سلسلة الطاقة النووية

العدد NW-T-1.31

الخبرة في التصرف في النفايات المشعة عقب الحوادث النووية: أساس للتخطيط المسبَّق

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة

هيكل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة

بمقتضى أحكام الفقرة ألف-3 من المادة الثالثة والفقرة جيم من المادة الثامنة من النظام الأساسي للوكالة، يُخوَّل للوكالة تعزيز تبادل المعلومات العلمية والتقنية بشأن الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية. وتعرض المنشورات الواردة في **سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة** الممارسات الجيدة وأوجُه التقدُّم في مجال التكنولوجيا، إلى جانب أمثلة وخبرات عملية في مجالات المفاعلات النووية، ودورة الوقود النووي، والتصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة، وعن مسائل عامة ذات صلة بالطاقة النووية. ويتألف هيكل **سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة** من أربعة مستويات:

(1) تَصِفُ منشورات **المبادئ الأساسية للطاقة النووية** الأساس المنطقي والرؤية فيما يتعلق بالاستخدامات السلمية للطاقة النووية.

(2) وتَصِفُ منشورات **أهداف سلسلة الطاقة النووية** ما تجب مراعاته والأهداف المحدَّدة المراد تحقيقها في المجالات المواضيعية في مختلف مراحل التنفيذ.

(3) وتقدِّم **أدلة ومنهجيات سلسلة الطاقة النووية** إرشادات أو أساليب رفيعة المستوى بشأن كيفية تحقيق الأهداف المتعلقة بالمواضيع والمجالات المتنوعة التي تنطوي على الاستخدامات السلمية للطاقة النووية.

(4) وتقدِّم **التقارير التقنية لسلسلة الطاقة النووية** معلوماتٍ إضافية وأكثر تفصيلاً عن الأنشطة المتعلقة بالمواضيع التي تستكشفها **سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة**.

ويخضع كل منشور لاستعراض نظراء داخلي ويُتاح للدول الأعضاء لكي تبدي تعليقاتها عليه قبل نشره.

وتُستخدم الرموز التالية في تصنيف منشورات سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة: **NG** — منشورات عامة؛ **NR** — المفاعلات النووية (سابقاً **NP** — القوى النووية)؛ **NF** — دورة الوقود النووي؛ **NW** — التصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة. وبالإضافة إلى ذلك، تُتاح المنشورات باللغة الإنكليزية على موقع الوكالة على الإنترنت:

www.iaea.org/publications

ولمزيد من المعلومات، يُرجى الاتصال بالوكالة على العنوان التالي:

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

ويُرجى من جميع مستخدمي منشورات سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة إبلاغ الوكالة بخبرتهم المكتسبة في استخدام هذه المنشورات من أجل ضمان استمرار تلبيتها لاحتياجات المستخدمين. ويمكن إرسال المعلومات عبر موقع الوكالة على الإنترنت، أو بالبريد، أو بالبريد الإلكتروني على العنوان Official.Mail@iaea.org.

الخبرة في التصرف في النفايات المشعة عقب الحوادث النووية: أساس للتخطيط المسبَّق

الدول الأعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية

الاتحاد الروسي
إثيوبيا
أذربيجان
الأرجنتين
الأردن
أرمينيا
إريتريا
إسبانيا
أستراليا
إستونيا
إسرائيل
إسواتيني
أفغانستان
إكوادور
ألبانيا
ألمانيا
الإمارات العربية المتحدة
أنتيغوا وبربودا
إندونيسيا
أنغولا
أوروغواي
أوزبكستان
أوغندا
أوكرانيا
إيران، (جمهورية – الإسلامية)
آيرلندا
آيسلندا
إيطاليا
بابوا غينيا الجديدة
باراغواي
باكستان
بالاو
البحرين
البرازيل
بربادوس
البرتغال
بروناي دار السلام
بلجيكا
بلغاريا
بليز
بنغلاديش
بنما
بنن
بوتسوانا
بوركينا فاسو
بوروندي

البوسنة والهرسك
بولندا
بوليفيا، (دولة - المتعددة القوميات)
بيرو
بيلاروس
تايلند
تركمانستان
تركيا
ترينيداد وتوباغو
تشاد
توغو
تونس
تونغا
جامايكا
الجبل الأسود
الجزائر
جزر البهاما
جزر القمر
جزر كوك
جزر مارشال
جمهورية أفريقيا الوسطى
الجمهورية التشيكية
الجمهورية الدومينيكية
الجمهورية العربية السورية
جمهورية الكونغو الديمقراطية
جمهورية تنزانيا المتحدة
جمهورية كوريا
جمهورية لاو
الديمقراطية الشعبية
جمهورية مولدوفا
جنوب أفريقيا
جورجيا
جيبوتي
الدانمرك
دومينيكا
رواندا
رومانيا
زامبيا
زمبابوي
ساموا
سان مارينو
سانت فنسنت وجزر غرينادين
سانت كيتس ونيفس
سانت لوسيا
سري لانكا

السلفادور
سلوفاكيا
سلوفينيا
سنغافورة
السنغال
السودان
السويد
سويسرا
سيراليون
سيشيل
شيلي
صربيا
الصومال
الصين
طاجيكستان
العراق
عُمان
غابون
غامبيا
غانا
غرينادا
غواتيمالا
غيانا
غينيا
فانواتو
فرنسا
الفلبين
فنزويلا، (جمهورية - البوليفارية)
فنلندا
فيجي
فييت نام
قبرص
قطر
قيرغيزستان
كابو فيردي
كازاخستان
الكاميرون
الكرسي الرسولي
كرواتيا
كمبوديا
كندا
كوبا
كوت ديفوار
كوستاريكا
كولومبيا
الكونغو

الكويت
كينيا
لاتفيا
لبنان
لختنشتاين
لكسمبورغ
ليبيا
ليبيريا
ليتوانيا
ليسوتو
مالطة
مالي
ماليزيا
مدغشقر
مصر
المغرب
مقدونيا الشمالية
المكسيك
ملاوي
المملكة العربية السعودية
المملكة المتحدة لبريطانيا العظمى وآيرلندا الشمالية
منغوليا
موريتانيا
موريشيوس
موزامبيق
موناكو
ميانمار
ناميبيا
النرويج
النمسا
نيبال
النيجر
نيجيريا
نيكاراغوا
نيوزيلندا
هايتي
الهند
هندوراس
هنغاريا
هولندا، (مملكة -)
الولايات المتحدة الأمريكية
اليابان
اليمن
اليونان

وافق المؤتمر المعني بالنظام الأساسي للوكالة الدولية للطاقة الذرية الذي عُقد في المقرِّ الرئيسي للأمم المتحدة في نيويورك، في 23 تشرين الأول/أكتوبر 1956، على النظام الأساسي للوكالة الذي بدأ نفاذه في 29 تموز/يوليه 1957. ويقع المقرُّ الرئيسي للوكالة في فيينا. ويتمثَّل هدف الوكالة الدولية للطاقة الذرية الرئيسي في "تعجيل وتوسيع مساهمة الطاقة الذرية في السلام والصحة والازدهار في العالم أجمع".

العدد NW-T-1.31 من سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة

الخبرة في التصرف في النفايات المشعة عقب الحوادث النووية: أساس للتخطيط المسبَّق

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
فيينا، 2024

ملاحظة بشأن حقوق النشر

جميع المنشورات العلمية والتقنية الصادرة عن الوكالة محمية بموجب الاتفاقية العالمية لحقوق التأليف والنشر بصيغتها المعتمدة في عام 1952 (جنيف) والمنقحة في عام 1971 (باريس). وقد عمدت المنظمة العالمية للملكية الفكرية (جنيف) لاحقاً إلى توسيع نطاق حقوق التأليف والنشر لتشمل الملكية الفكرية الإلكترونية والفرضية. ويجوز اشتراط الحصول على إذن لاستخدام النصوص الواردة في منشورات الوكالة بشكلها المطبوع أو الإلكتروني، استخداما كلياً أو جزئياً. ويرجى الاطلاع على الموقع الإلكتروني www.iaea.org/publications/rights-and-permissions للحصول على مزيد من التفاصيل. ويمكن توجيه الاستفسارات إلى العنوان التالي:

Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
tel.: +43 1 2600 22529 or 22530
email: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/ar/almanshurat

حقوق النشر محفوظة للوكالة الدولية للطاقة الذرية، Year

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا

كانون الأول/ديسمبر 2024

STI/PUB/2022

ISBN 978-92-0-601824-8 | 978-92-0-602024-1 (PDF)

ISSN 2664-9365

تمهيد

يتمثل هدف الوكالة الرئيسي في: "تعجيل وتوسيع مساهمة الطاقة الذرية في السلام والصحة والازدهار في العالم أجمع". والوكالة مخوّلة، في إطار وظائفها الأخرى، "أن تُعزز تبادل المعلومات العلمية والتقنية بشأن الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية". وتتمثل إحدى طرق تحقيق ذلك في مجموعة من المنشورات التقنية، بما فيها سلسلة الطاقة النووية التي تُصدرها الوكالة.

وتتألف سلسلة الطاقة النووية التي تصدرها الوكالة من منشورات تهدف إلى تعزيز استخدام التكنولوجيات النووية دعماً للتنمية المستدامة، والنهوض بالعلوم والتكنولوجيا النووية، وتحفيز الابتكار، وبناء القدرات لدعم الاستخدام الحالي والموسع للقوى النووية وتطبيقات العلوم النووية. وتتضمن المنشورات معلومات تغطي جميع جوانب السياسات والتكنولوجيا والإدارة لتحديد الأنشطة التي تنطوي على استخدام سلمي للتكنولوجيا النووية وتنفيذها. وفي حين أن الإرشادات الواردة في منشورات سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة لا تُمثل إجماع الدول الأعضاء، فقد خضعت لاستعراض النظراء الداخلي وأتيحت للدول الأعضاء للتعليق عليها قبل نشرها.

وتُحدد معايير الأمان الصادرة عن الوكالة المبادئ الأساسية والمتطلبات والتوصيات لضمان الأمان النووي وإرساء ركيزة مرجعية عالمية لحماية الناس والبيئة من الآثار الضارة للإشعاع المؤين.

وعندما تناقش منشورات سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة مسألة الأمان، فإنها تحرص على الإشارة إلى معايير الأمان الصادرة عن الوكالة باعتبارها تُشكل الشروط الحدية الحالية لتطبيق التكنولوجيا النووية.

وقلما تقع حوادث كبيرة في محطات القوى النووية أو مرافق دورة الوقود، ولكنها يمكن أن تولّد كميات كبيرة من النفايات المشعة ذات الخصائص الشديدة التباين والتي قد يكون من الصعب التصرف فيها. ويتضح ذلك من التحديات التي واجهتها حادثة ثري مايل آيلند في عام 1979 والتحديات المستمرة التي أعقبت الحوادث التي وقعت في مفاعل وندسكيل 1 في عام 1957، ومحطة تشرنوبل للقوى النووية في عام 1986، ومحطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في عام 2011. ويمكن أيضاً أن تتولد كميات كبيرة من النفايات المشعة بسبب الحوادث التي تقع في المنشآت العسكرية أو بسبب سوء مناولة المصادر الإشعاعية المختومة القوية الإشعاع. كما أن الحاجة إلى التصرف في كميات كبيرة مكافئة من النفايات الناتجة عن تنظيف بعض المواقع النووية الموروثة يمكن أن يوفِّر خبرة قيمة للتعامل مع النفايات الناتجة عن الحوادث

وثبت أن التصرف المأمون والفعال من حيث التكلفة في النفايات الناتجة عن الحوادث النووية الكبيرة مهمة معقدة وتستهلك الكثير من الموارد. ويمكن أن تنشأ تحديات كبيرة أيضاً في حالة الحوادث الصغيرة. ويلزم اتخاذ قرارات بشأن التصاميم والتكنولوجيات التي يتعيّن استخدامها

في التعامل مع المزيج المتنوع من مكونات النفايات والتخلص منها، وبشأن اختيار المواقع التي ستستخدم للتصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها، والمرافق نفسها المستخدمة في التخلص من النفايات.

وفي حالة وقوع حادث كبير، يمكن لأحجام النفايات المشعة أن تطغى بسرعة على البنية الأساسية الوطنية القائمة المستخدمة في التصرف في النفايات والتخلص منها. وقد لا تكون مرافق التخلص المناسبة متاحة لاستيعاب كميات النفايات أو خصائصها. وفي هذه الظروف، يمكن لإجراءات التصدي غير الملائمة المتخذة في أعقاب وقوع حادث أن تحد من نطاق خيارات التصرف في النفايات والتخلص منها في المستقبل، ويمكن أن تزيد التكاليف بصورة كبيرة وتؤدي إلى تعرض كبير للعمال وزيادة مخاطر تعرض الجمهور. ويمكن تجنب هذه الحالات من خلال التخطيط المسبق لإجراءات التصدي الاحترازية للحوادث، حتى في الحالات التي تكون فيها احتمالات وقوع حوادث خطيرة منخفضة للغاية.

وتوفِّر المعرفة الموسعة المستمدة من معالجة النفايات الناتجة عن حادثي تشرنوبل وفوكوشيما دايتشي، بالإضافة إلى الخبرة في مجال دورة الوقود النووي الموروثة ومرافق الأسلحة النووية، والحوادث غير النووية وأدوات تقدير النفايات الناتجة عن الحادثات الإشعاعية، دروساً قيّمة للتخطيط المسبّق الاستباقي ووضع الاستراتيجيات. واكتُسبت أيضاً خبرة كبيرة في كثير من الدول الأعضاء في مجال التصرف في الكميات الكبيرة من النفايات المشعة الموروثة بطريقة وقائية مناسبة وفعالة من حيث التكلفة باستخدام نُهج مختلفة. وأدى ذلك إلى تحسين النُهج التشغيلية وتوفير الخبرة في تطبيق مبادئ الإعفاء ورفع الرقابة.

وتعتمد تحديات التصرف في النفايات على نطاق الحادث وشدته، وكذلك على مرحلة التصدي. ويمكن أن تُشكل مراحل التصدي المبكرة لحالات الطوارئ تحديات عندما يلزم اتخاذ القرارات بسرعة، وعندما تكون هناك محدودية في توافر الموظفين والمرافق، وعندما يتعيّن إعطاء الأولوية للسيطرة على حالة الطوارئ نفسها. ويمكن أن تنجم التحديات عن جمع وخزن كميات صغيرة من النفايات في حاويات من دون معالجة خاصة؛ والحاجة إلى إنشاء نُظم تكييف كبيرة لاحتواء وتثبيت النويدات المشعة والوقود التالف؛ ومتطلبات التصرف في مجموعة واسعة من النفايات؛ والعمل في ظروف مادية وإشعاعية قاسية؛ وما إلى ذلك. ويعتمد اختيار و/أو إنشاء نظام للتصرف في النفايات على عدة عوامل، مثل كمية النفايات وتوزيعها الجغرافي، ومستويات التلوث، والخصائص الفيزيائية والكيميائية، والتقنيات والموارد المتاحة، والمتطلبات والقدرات في مجال خزن النفايات والتخلص منها. ويمكن أن يكون التصرف في النفايات عائقاً أمام المعالجة إذا لم تتوافر المرافق المناسبة للتصرف في النفايات، والخدمات اللوجستية، ودعم الموظفين في الوقت المناسب. ومن المهم تحقيق التكامل بين برنامج الاستصلاح وبرنامج التصرف في النفايات.

ومن خلال التخطيط القوي للتأهب، يمكن للدول الأعضاء تقليل كمية النفايات التي تتطلب التخلص منها وضمان فصل النفايات حسب النوع ومستوى النشاط الإشعاعي، ومعالجة النفايات

المخزّنة أو التصرف فيها تمهيداً للتخلص منها، وذلك كله بطريقة مأمونة ومتسمة بالكفاءة وفعالة من حيث التكلفة. ويتم تحقيق هذه الأهداف المترابطة في جميع الحالات بطريقة تحمي العمال والجمهور والبيئة، وفقاً للمعايير المقبولة. وتهدف التجارب المكتسبة من الحوادث الكبيرة السابقة التي يلخصها هذا المنشور إلى دعم التخطيط لهذا التأهب.

والمسؤول عن هذه الوثيقة من موظفي الوكالة هما G.H. Nieder-Westermann و F.N. Dragolici، من شُعبة دورة الوقود النووي وتكنولوجيا النفايات.

ملحوظة تحريرية

حُـرِّر هـذا المنشـور مـن جانـب موظفـي هيئـة التحريـر فـي الوكالـة بقـدر مـا اعتُبِـر ذلـك ضرورياً لمسـاعدة القـارئ. وهـو لا يتنـاول مسـائل تتعلـق بالمسـؤولية، قانونيـة كانـت أم غيـر قانونيـة، عـن أفعـال أو الامتنـاع عـن أفعـال مـن جانـب أي شـخص.

وعلـى الرغـم مـن توخـي قـدر كبيـر مـن الحـرص للحفـاظ علـى دقـة المعلومـات الـواردة فـي هـذا المنشـور، لا تتحمـل الوكالـة ولا دولهـا الأعضـاء أي مسـؤولية عـن العواقـب التـي قـد تنشـأ عـن اسـتخدام تلـك المعلومـات.

وتمثـل الإرشـادات والتوصيـات المقدمـة هنـا فيمـا يتعلـق بالممارسـات الجيـدة المحـددة آراء الخبـراء ولكنهـا غيـر مسـتندة إلـى توافـق فـي آراء جميـع الـدول الأعضـاء.

واسـتخدام تسـميات معيَّنـة لبلـدان أو أقاليـم لا يعنـي ضمنًـا إصـدار أي حكـم مـن جانـب الناشـر، أي الوكالـة، بشـأن الوضـع القانونـي لهـذه البلـدان أو الأقاليـم أو سـلطاتها ومؤسسـاتها أو تعييـن حدودهـا.

وذكـر أسـماء شـركاتٍ أو منتجـاتٍ معيَّنـة (سـواء مـع الإشـارة إلـى أنهـا مسجّـلة أو دون تلـك الإشـارة) لا يعنـي ضمنًـا وجـود أي نيـة لانتهـاك حقـوق الملكيـة، كمـا لا ينبغـي أن يُفسَّـر علـى أنـه تأييـد أو توصيـة مـن جانـب الوكالـة.

ولا تتحمَّـل الوكالـة أي مسـؤولية عـن اسـتمرارية أو دقّـة الوصـلات الإلكترونيـة للمواقـع الشـبكية الخاصـة بطـرف خارجـي أو طـرف ثالـث المشـار إليهـا فـي هـذا الكتـاب ولا تضمـن أن يكـون، أو أن يظـلَّ، أي محتـوى يـرد فـي تلـك المواقـع الشـبكية دقيقًـا أو ملائمًـا.

المحتويات

1- مقدمة 1

1-1- الخلفية 1
1-2- الهدف 5
1-3- النطاق 6
1-4- الهيكل 6

2- منشأ نفايات الحوادث وخصائصها 10

2-1- كميات النفايات 11
2-2- خصائص النفايات 13
2-3- الاختلافات بين نفايات الحوادث والنفايات العادية 14

3- نهج هندسة النُظم في التخطيط للتصرف في النفايات 17

3-1- نظام إدارة المتطلبات وتسلسلها الهرمي 21
3-2- تنفيذ نظام إدارة المتطلبات 22

4- التخطيط قبل الحادث وبعده 54

4-1- التخطيط المسبق للتخلص من النفايات 60
4-2- التخطيط للتصرف في النفايات بعد وقوع حادث 67
4-3- ملاحظات إضافية بشأن خطة ما بعد الحادث 76

5- تنفيذ خطة التصرف في النفايات 77

5-1- تحويل المرافق القائمة 80
5-2- تحديد مواقع المرافق الجديدة 81
5-3- التصميم 81
5-4- الترخيص 83

5-5- تشييد المرفق وتنفيذ المشروع 84
5-6- الإدخال في الخدمة والاختبار 86
5-7- التدريب 87
5-8- التشغيل والصيانة 87
5-9- الإخراج من الخدمة لمرافق مناولة وخزن النفايات 88
5-10- ضمان الجودة ومراقبة الجودة 89

6- الاستراتيجيات والمنهجيات والتكنولوجيات المستخدمة في تحديد خصائص النفايات 90

6-1- استراتيجية تحديد الخصائص ومنهجيته 90
6-2- تفاوت الطلب على بيانات تحديد الخصائص 95
6-3- الطرق والتقنيات المستخدمة في تحديد الخصائص 102
6-4- أمثلة على تحديد الخصائص من الحوادث النووية التي وقعت في الماضي 107

7- جمع النفايات ومناولتها واسترجاعها 111

7-1- الجمع الأوّلي للنفايات 112
7-2- مناولة المواد الكبيرة و/أو السائبة 113
7-3- التقييم عن بُعد للمواد في الهياكل المتضررة 116
7-4- الاسترجاع من الخزن 121

8- معالجة النفايات 122

8-1- المعالجة التمهيدية 123
8-2- المعالجة 128
8-3- التكييف 145
8-4- الحاويات والتعبئة 152

9- النقل والتحويل 160

10- الخزن 165

10-1- اعتبارات أوّلية 166
10-2- المسائل المتعلقة بتخطيط الخزن 168
10-3- اختيار حلول الخزن المناسبة..... 172
10-4- هياكل الخزن المؤقت المرتجلة..... 172
10-5- هياكل الخزن المؤقت المحددة الغرض 174

11- التخلص من النفايات 183

11-1- آثار حجم النفايات على أنشطة التخلص من النفايات على المستوى الوطني 186
11-2- تحديد أنواع مرافق التخلص من النفايات التي قد تكون مطلوبة باستخدام نهج متدرج 188
11-3- عدد المرافق المطلوبة للتخلص من النفايات وحجمها ونوعها 189
11-4- تحديد مواقع المرافق الجديدة للتخلص من النفايات بعد وقوع حادث .. 193
11-5- عمليات مرافق التخلص من النفايات بعد وقوع حادث 195
11-6- الخبرة في التخلص من النفايات بعد الحوادث الكبيرة 200

12- خاتمة: قيمة التأهب 202

التذييل الأول- حادث المفاعلين في وندسكيل 204

التذييل الثاني- حادث ثري مايل آيلند 209

التذييل الثالث- حادث تشيرنوبيل 215

التذييل الرابع- حادث فوكوشيما دايتشي 230

التذييل الخامس- حوادث نووية أخرى 238

التذييل السادس- تنظيف المواقع النووية الموروثة 244

المساهمون في الصياغة والاستعراض 272

1- مقدمة

1-1- الخلفية

تتولد في العادة كميات كبيرة من النفايات المشعة و/أو النفايات ذات الخصائص الشديدة التباين نتيجة لوقوع حادث كبير في محطة قوى نووية أو في مرفق من مرافق دورة الوقود. ويتضح ذلك من خلال التحديات التي واجهتها عمليات التصرف في النفايات داخل الموقع في الحادث الذي وقع في الوحدة رقم 2 في ثري مايل آيلند في عام 1979 في بنسلفانيا، الولايات المتحدة الأمريكية [1، 2] والتحديات المستمرة المرتبطة بالنفايات داخل الموقع وخارجه في أعقاب الحوادث التي وقعت في محطة تشيرنوبيل للقوى النووية في عام 1986 [3–6] في أوكرانيا، ومحطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية في عام 2011 [7–12] في اليابان. ويمكن أيضاً أن تتولد كميات كبيرة من النفايات المشعة بسبب الحوادث التي تقع في المنشآت العسكرية أو بسبب الأفعال غير المتعمدة/المتعمدة التي تنطوي على تشتت مواد مشعة في المناطق الحضرية أو في غيرها من الأماكن.

ويمكن أن يسفر وقوع حادث في محطة للقوى النووية عن مجموعة واسعة من العواقب التي تتراوح أساساً بين عدم حدوث أثر بيئي مباشر وإطلاق كميات كبيرة من المواد النووية في البيئة. ويتناول هذا المنشور الدروس المستفادة من أنشطة التصرف في النفايات الناجمة عن حوادث الصناعة النووية الأكثر خطورة، مع التركيز على الخبرة المستمدة من مفاعل وندسكيل 1 في كمبريا (كمبرلاند سابقاً)، المملكة المتحدة، ومحطات القوى النووية في ثري مايل آيلند، وتشرنوبل، وفوكوشيما دايتشي. وعلى الرغم من التفاوت الكبير في عواقب هذه الحوادث، فإنها توضح نطاق آثار الحوادث السابقة ويمكن أن توفِّر أساساً للتخطيط المسبق لاحتياجات التصرف في النفايات في حالات الطوارئ النووية أو الإشعاعية في المستقبل.

وحدث انطلاق لكميات كبيرة من النويدات المشعة في البيئة في مراحل البدء والتصدي الأوّلي للحوادث في وندسكيل، ومحطتي القوى النووية في تشرنوبل وفوكوشيما دايتشي. وفي محطة تشرنوبل للقوى النووية، أُطلقت غازات انشطار ونويدات مشعة متطايرة وجسيمات وقود أثناء الحادث. وأسفر الحادثان اللذان وقعا في مفاعلي وندسكيل وفوكوشيما دايتشي عن إطلاق غازات انشطار وأنواع مشعة متطايرة. وعلى العكس من ذلك، أدى الحادث الذي وقع في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية إلى إطلاق كميات ضئيلة من النويدات المشعة التي كانت في معظمها غازات نواتج انشطار خاملة تشتتت على الفور.

وفي حالة محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، انتشرت معظم النويدات المشعة القصيرة العمر المنطلقة إلى منطقة خارج الموقع، مما تطلب إجلاء السكان على نطاق واسع

وإجراء حملة تنظيف نشطة خارج الموقع للحد من التلوث وإعادة تأهيل الموئل البشري إلى أقصى حد ممكن. وما زال العمل جارياً حتى وقت كتابة هذا المنشور في إعادة توطين السكان تدريجياً في المناطق التي كانت قد أُخليت.

وشملت الجهود التي بذلت بعد حادث تشرنوبل خفض مستويات التلوث واستعادة الموئل البشري إلى أقصى حد ممكن. ومع ذلك، في حالة محطة تشرنوبل للقوى النووية، احتوت الإطلاقات خارج الموقع على أكتينيدات طويلة العمر بالإضافة إلى نويدات مشعة قصيرة العمر، مما أدى ليس فقط إلى إجلاء السكان، بل وكذلك إنشاء منطقة محظورة حول موقع الحادث. ونظراً لمستوى التلوث وطبيعته، يُحظر السكن الدائم داخل المنطقة المحظورة في المستقبل المنظور.

وفي حالة حادث ثري مايل آيلند، اقتصرت التأثيرات على المرفق النووي نفسه من دون حدوث إطلاقات كبيرة في البيئة. وفي حالة مفاعلي وندسكيل، حدث انطلاق لنويدات مشعة، ولكنها كانت في معظمها نويدات مشعة قصيرة العمر جداً، من دون الحاجة إلى إجلاء السكان أو إجراء حملة تنظيف خارج الموقع.

ويُرجح أن تبدأ خطوات التصرف في النفايات بعد أن تكون تدابير الطوارئ الأساسية لتحقيق الاستقرار في الأحداث جارية على قدم وساق أو بعد الانتهاء من جانب كبير منها. ومع ذلك، يمكن أن تشمل تدابير الطوارئ أيضاً تنظيفاً جزئياً للموقع أو المرفق المتضرر لتقليل مستويات الإشعاع والتلوث من أجل التمكن من الوصول إلى المرفق أو تحسين الوصول إليه، ولذلك تبدأ بعض أنشطة التصرف في النفايات بالتزامن مع تدابير الطوارئ. ومن المرجح أن تشمل هذه الأنشطة فصل المواد الملوثة بالاستناد إلى معدل جرعة غاما و/أو تبعاً لنوع المادة (التربة، والغطاء النباتي، والركام، وما إلى ذلك) وجمع هذه النفايات الخام في مناطق خزن مؤقت لتيسير خطوات التمهيد للتخلص منها. وتختلف الأولويات تبعاً لكل حالة من حالات الحوادث، وتختلف أيضاً بين الحوادث التي تكون مصحوبة بحدوث إطلاقات خارج الموقع، والحوادث التي يكون فيها الضرر موضعياً/محصوراً داخل المرفق أو الموقع النووي. وعلى سبيل المثال، أُعطيت الأولوية في حالة حادث تشرنوبل أساساً لتقليل النشاط في الموقع لكي يتمكن العاملون في محطة القوى النووية المتعددة الوحدات من مواصلة تشغيل الوحدات الثلاث المتبقية التي لم تتضرر بشدة أثناء الحادث. وركزت الجهود خارج الموقع على إزالة التلوث لتقليل النشاط في البيئة، واتخاذ تدابير للسيطرة على انتشار التلوث، ووضع ضوابط للمناطق التي أُخليت عقب انتشار الغبار النووي. ومن ناحية أخرى، اتُخذ في حالة مفاعلي وندسكيل ومحطة ثري مايل آيلند للقوى النووية قرار في مرحلة مبكرة بشأن تحقيق الاستقرار في الحالة عن طريق ضمان الإغلاق الدائم لمفاعل الإنتاج ومحطة القوى النووية على التوالي. وفي محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، كان الهدف الرئيسي هو ضمان تحقيق الاستقرار في المفاعلات الثلاثة المتضررة وإغلاق المفاعلات الثلاثة الأخرى المتبقية بصورة دائمة، على الرغم من عدم تضرر الوحدتين 5 و6 جراء الحادث. وفي موازاة ذلك، كانت الجهود الضخمة التي نُظمت خارج الموقع للتعامل مع

الغبار النووي المتساقط من المفاعلات المتضررة معقدة بسبب الحاجة إلى التعامل مع العواقب الوخيمة للكارثة الطبيعية الناجمة عن الزلزال والتسونامي الذي تلاه. وأسفرت هذه الأهداف المختلفة عن نُهج مختلفة تماماً في التعامل مع حالات الطوارئ، وهو ما ترتبت عليه بعد ذلك آثار على تنفيذ أنشطة التصرف في النفايات الموضحة في هذه الوثيقة.

ويمكن أن تتجاوز كميات النفايات المتولدة بعد وقوع حادث بسهولة كميات النفايات المشعة السنوية المتولدة داخل دولة عضو، مما يصقل كاهل المرافق المرخصة القائمة للتصرف في النفايات المشعة والتخلص منها. ومن المرجح أيضاً أن تؤدي مثل هذه الحوادث إلى تيارات نفايات متنوعة يمكن أن تكون إشكالية ولا تنتج عن العمليات الروتينية. وقد لا تكون الخصائص الفيزيائية والكيميائية والإشعاعية لبعض النفايات متوافقة مع المرافق القائمة لمعالجة النفايات أو التخلص منها. ونتيجة لذلك، فإن البنية الأساسية والإجراءات الوطنية القائمة للتصرف في النفايات المشعة (طرق تحديد خصائص النفايات؛ وإجراءات تشغيل المرافق، والمعدات أو القدرة التصميمية؛ ومعايير قبول النفايات لأغراض التخلص منها؛ ومرافق التخلص من النفايات؛ وإجراءات السماح بنقل النفايات والتخلص منها؛ وما إلى ذلك) قد لا تكون قادرة على التعامل مع طبيعة النفايات المتولدة أو حجمها.

ويمكن أن تؤدي الطبيعة المفاجئة للحوادث النووية إلى إيجاد ظروف أزمة بسبب احتمال حدوث مخاطر فورية وكبيرة تُهدد الصحة العامة والأمان، ويمكن أن تلحق بالممتلكات والنشاط الاقتصادي أضراراً واسعة النطاق. ومن الممكن أن تتفاقم ظروف الأزمة إذا كان الحادث ناجماً عن كارثة طبيعية واسعة النطاق - كما كان الحال في فوكوشيما دايتشي - حيث تتعرض البنية الأساسية خارج الموقع لأضرار بالغة أو تواجه تحديات أخرى. وتتولد النفايات الناتجة عن المراحل الأوّلية للحادث خلال فترة زمنية قصيرة (أيام أو أسابيع). ولا يُشكل التصرف في النفايات الاعتبار الأساسي في مرحلة الطوارئ الأوّلية التي من المناسب أن ينصب التركيز فيها على الحفاظ على حياة الإنسان والبيئة. ومع ذلك، يمكن أن تتسبب الإجراءات والقرارات المتخذة في المراحل الأولى من التصدي في تعقيد خطوات التصرف في النفايات في المستقبل. وبعد مرحلة الطوارئ الأوّلية للحدث، يمكن أن تستمر أنشطة التصرف في النفايات لفترة طويلة بعد ذلك (تتراوح بين سنوات وعقود). ومن شأن التخطيط الدقيق للتأهب أن يُعزز الحفاظ على بدائل التصرف المفيدة التي يمكن أن تصبح مقيّدة أو مستبعدة.

ويمكن أن تكون طيارات النفايات الناتجة عن حادث نووي أو إشعاعي مختلفة عن النفايات الناتجة عن عمليات الاعتيادية في المرافق النووية، وتشمل على سبيل المثال:

- كميات كبيرة من المواد المنخفضة التلوث في الغالب، تصل إلى ملايين الأمتار المكعبة، والتي قد تحتاج إلى معالجة كنفايات مشعة.
- كميات أقل من النفايات القوية الإشعاع غير الخاضعة للتحكم الرقابي.

— النويدات المشعة المشتتة التي لا توجد في العادة في النفايات الناتجة عن العمليات الاعتيادية.

وسيتأثر نوع التلوث ومداه بمخزون النويدات المشعة وكميتها في المرفق وقت وقوع الحدث وبمخزون وكمية النويدات المشعة التي يُطلقها المرفق المتضرر أثناء الحدث، وكذلك بالظروف البيئية السائدة أثناء الحدث وبعده.

وتعتمد خصائص النفايات أيضاً على تصميم المرفق، وسيناريو الحدث، والظروف الجوية، والترسب الانتقائي للنويدات المشعة، واضمحلال النويدات المشعة القصيرة العمر، والطريقة التي تتم بها عملية التنظيف ودرجة التنظيف.

وينبغي أن تكون طبيعة التصرف للنفايات في إطار التصدي لحادث ينطوي على إطلاق مواد مشعة في البيئة مع نطاق الحدث (مثل السبب، ونوع المرفق، وحجم المنطقة المتأثرة، وما إلى ذلك) وشدة الحدث (مثل كتلة النويدات المشعة ونشاطها وعمرها النصفي ومعدل إطلاقها وتشتتها في البيئة وقربها من المراكز السكانية وضعف النُظم الإيكولوجية). وستُقيّم أيضاً شدة الحادث من خلال أي آثار غير إشعاعية مرتبطة به. ويُعد المقياس الدولي للأحداث النووية والإشعاعية أداة مفيدة لتوضيح أهمية الأمان في الحوادث النووية أو الإشعاعية أو الحوادث التي تنطوي على إطلاق مواد مشعة في البيئة. وهذا المقياس لوغاريتمي يبدأ من المستوى 1 (أقل أثر) إلى المستوى 7 (أعلى أثر).

ومن الواضح أن نهج التصرف في النفايات التي تنتج عن حادث يتعيّن أن يكون متناسباً مع شدة الحادث ونطاقه. وفي ما يتعلق بالأحداث ذات التأثير المنخفض نسبياً التي تنطوي على خطر إشعاعي محدود في الحالات المعزولة، يمكن بسهولة جمع المواد المشعة وخزنها في حاويات بسيطة أثناء انتظار طريقة التخلص منها. وعلى الطرف الآخر من الطيف، من المرجح أن يشمل الاحتجاز والتثبيت والاحتواء في حالات النويدات المشعة القوية الإشعاع أو الوقود النووي التالف طرقاً عن بُعد أو آلية للحد من التعرض وجمع النويدات المشعة المنطلقة، وطرق تكييف متطورة للسماح بالخزن المأمون والآمن لحين اتخاذ قرارات أخرى. وفي ما يتعلق بأي حالة من حالات التصرف في النفايات، ينبغي أن تُراعى في تفاصيل النهج المستخدم مجموعة واسعة من العوامل الإشعاعية واللوجستية، ليس أقلها حجم النفايات وتركيز نشاطها، والخصائص الفيزيائية والكيميائية للنفايات، والموارد المتاحة لتنفيذ الحلول.

وبالإضافة إلى تحديات التعامل مع آثار الحادث والنفايات المتولدة، هناك أيضاً التحدي المتزامن المتمثل في الحفاظ على اتصالات فعالة مع المتضررين. ولا يعرف معظم أفراد الجمهور ما يمكن توقعه في حال إطلاق مواد مشعة فجأة في البيئة، ولكن يمكن افتراض أنهم يخشون الأسوأ. ويمكن أن ينشأ عن هذه الحالة ضغط اجتماعي وسياسي قوي للتحرك بسرعة استجابة للمخاطر الحقيقية والمتصورة. وتبعاً للظروف، يمكن أن تمتد المصلحة العامة والحكومية إلى

البلدان المجاورة. وتفرض هذه الظروف متطلبات هائلة على الموارد البشرية والمالية في المنظمات المسؤولة عن التصدي للحادث والإبلاغ الدقيق عما يجري القيام به. وفي العديد من الدول الأعضاء، تُقسّم هذه المسؤوليات بين منظمات متعددة على المستوى الوطني والإقليمي (على مستوى الولاية/المقاطعة) وعلى المستوى المحلي. وهذا في حد ذاته يطرح تحديات هائلة في مجالات التنسيق واللوجستيات وتبادل المعلومات.

ومن المسّلم به أنه قد لا يكون من الممكن في جميع الحالات مراعاة الممارسات المثالية المتبعة في التصرف في النفايات، ولا سيما أثناء المراحل المبكرة من وقوع حادث نووي، إذ ينصب الهدف الرئيسي على السيطرة على الحالة بطريقة مأمونة. ومع ذلك، يتعيّن مراعاة متطلبات ومبادئ التصرف في النفايات وآثارها في كل مرحلة من مراحل الحادث، حتى لو لم تكن قابلة للتحقيق الكامل في ذلك الوقت، ويتعيّن السعي إلى تحقيق الامتثال الكامل في غضون إطار زمني معقول بعد نهاية مرحلة الحادث الأوّلية. وترد مبادئ الأمان الأساسية للتصرف في النفايات المشعة وإدارة مرحلة ما بعد الحادث في منشورات أخرى صادرة عن الوكالة، على النحو المحدد في المراجع [13–20].

1-2- الهدف

استناداً إلى الخبرة السابقة المكتسبة من الحوادث النووية الكبيرة، يمكن توقع عدة جوانب لسيناريوهات الحوادث المحتملة واستخدامها كأساس للتخطيط والإعداد المسبقين اللذين يمكن أن يحسنا بشكل كبير التعافي في حالة وقوع حادث في المستقبل [21].

والهدف من هذا المنشور هو استخدام هذه الخبرة لتوفير معلومات منهجية وشاملة عن الجوانب التكنولوجية لإدارة الكميات الكبيرة المحتملة و/أو النفايات المعقدة المتولدة على مدى فترة زمنية قصيرة أثناء وقوع حادث. ويمكن استخدام هذه المعلومات للاسترشاد بها في عمليات التخطيط المسبّق الاحترازية التي تتناول سيناريوهات الحوادث المحتملة للمرافق النووية في أي دولة عضو. وفي هذا السياق، يُفترض أن هذه النفايات ستتجاوز قدرات و/أو إمكانيات البنية التحتية القائمة للتصرف في النفايات في الدولة العضو.

وتمثل الإرشادات الواردة هنا، التي تصف الممارسات الجيدة، آراء الخبراء، ولكنها لا تُشكل توصيات مقدمة على أساس توافق آراء الدول الأعضاء.

1-3- النطاق

ينصب التركيز الرئيسي للمنشور على توفير التوجيه للتخطيط التكنولوجي وتنفيذ عمليات التصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث النووية، من توليدها إلى التخلص منها في نهاية المطاف، بالاستناد إلى الخبرة ذات الصلة المكتسبة من الأحداث السابقة.

ويُقدم الشكل-1 جدولاً زمنياً مبسّطاً لأنشطة إدارة النفايات بعد وقوع حادث. وتمثيل الأنشطة كمراحل منفصلة من العمل هو بالضرورة تبسيط للحالات الفعلية. وفي الممارسة العملية، سيحدث تداخل كبير بين كل نشاط من الأنشطة. وتتطور الحاجة الملحة للمرحلة الأوّلية للسيطرة على انتشار العواقب إلى مرحلة وسيطة لجعل ظروف الموقع أكثر أماناً ثم الانتقال إلى مرحلة أطول أجلاً لاستصلاح الموقع، وإخراجه من الخدمة واستعادته. ولا يُستخدم الجدول الزمني الموضح كمقياس: على سبيل المثال، قد تستمر مرحلة التصدي الأوّلية لحالات الطوارئ من ساعات إلى أسابيع، في حين أن أنشطة التنظيف والإخراج من الخدمة والاستصلاح اللاحقة يمكن أن تستمر من سنوات إلى عقود.

1-4- الهيكل

يصف القسم 2 مصادر النفايات التي يمكن أن تنشأ عن حادث في مرفق نووي وخصائصها المحتملة. ويتناول القسم 3 نهج هندسة النُظم للتصرف في النفايات، بينما يتناول القسم 4 التخطيط قبل وقوع الحادث وبعده. ويناقش القسم 5 خطوات وخيارات التمهيد للتخلص من النفايات. ويصف القسم 6 عملية تنفيذ التصرف في النفايات. ويصف القسم 7 التقنيات المختلفة التي يمكن تطبيقها لتحديد خصائص النفايات المرتبطة بالحوادث. وتُناقش الأقسام من 8 إلى 11 جمع/مناولة النفايات المرتبطة بالحوادث ونقلها ومعالجتها وخزنها، على التوالي. ويصف القسم 12 خيارات وإجراءات التخلص من النفايات. ويتضمن القسم 13 ملخصاً يوجز الاستنتاجات. ويبدأ كل قسم بقائمة موجزة لبعض الدروس الرئيسية المستفادة في مجال الموضوع المعني، المستمدة من إدارة الحوادث النووية السابقة

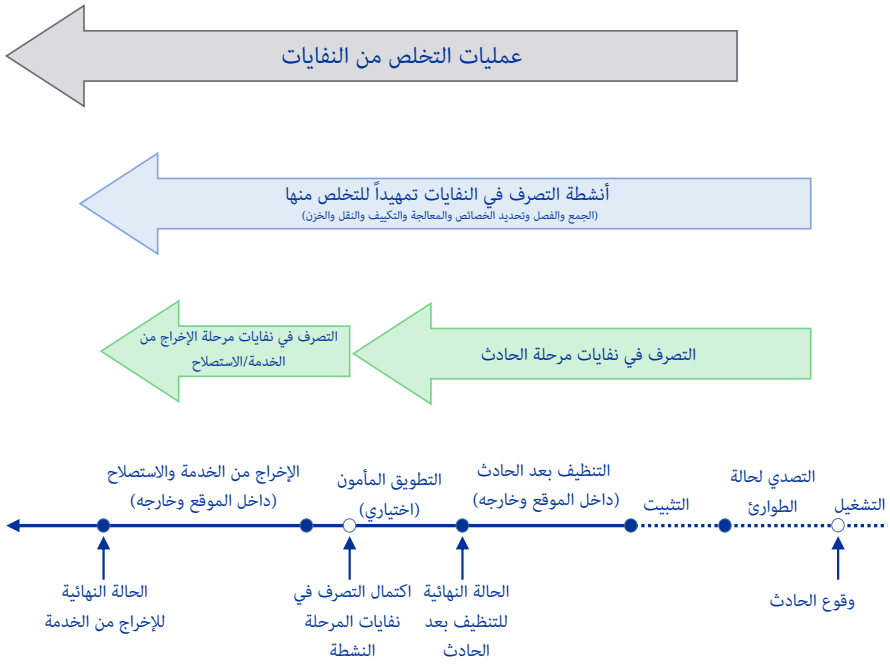
وترد في التذييلات الستة ملخصات موجزة للحوادث الرئيسية الأربعة والنفايات المرتبطة بها التي تُستخدم كأمثلة رئيسية في هذا المنشور، بالإضافة إلى معلومات عن الحوادث الأخرى والخبرة المكتسبة في مجال التصرف في الكميات الكبيرة من النفايات الناتجة عن عمليات تنظيف المواقع النووية الموروثة. ويصف التذييل الأول الحادث الذي وقع في عام 1957 في مفاعل وندسكيل 1، ويصف التذييل الثاني الحادث الذي وقع في محطة جزيرة ثري مايل للقوى النووية، ويتناول التذييل الثالث الحادث الذي وقع في محطة تشرنوبل للقوى النووية، ويرد في

التذييل الرابع الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. ويصف الملحق الخامس مجموعة مختارة من الحوادث الأخرى ذات العواقب الأقل، ويُحدد الملحق السادس بعض الأعمال ذات الصلة بالتصرف في الكميات الكبيرة من النفايات (أي ما يعادل الكميات التي يمكن أن تنجم عن حادث) التي تتولد أثناء تنظيف المواقع النووية الموروثة التاريخية.

يُشكل هذا المنشور جزءاً من سلسلة منشورات الوكالة التي أُعدت لدعم جهود الدول الأعضاء في سبيل تحسين التأهب في حالة وقوع طارئ نووي أو إشعاعي:

- العدد IAEA-TECDOC-1826، من سلسلة الوثائق التقنية الصادرة عن الوكالة، Management of Large Volumes of Waste Arising in a Nuclear or Radiological Emergency (التصرف في الكميات الكبيرة من النفايات الناشئة عن طارئ نووي أو إشعاعي) [21].
- العدد NW-T-2.7 من سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، Experiences and Lessons Learned Worldwide in the Cleanup and Decommissioning of Nuclear Facilities in the Aftermath of Accidents (الخبرات والدروس المستفادة على نطاق العالم في مجال تنظيف المرافق النووية وإخراجها من الخدمة في أعقاب الحوادث) [22].
- العدد NW-T-2.10 من سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، Decommissioning after a Nuclear Accident: Approaches, Techniques, Practices and Implementation Considerations (الإخراج من الخدمة بعد وقوع حادث نووي: النُهج والتقنيات والممارسات واعتبارات التنفيذ) [23].

ويُقدم المنشور الأول الذي يتناول التصرف في الكميات الكبيرة من النفايات الناتجة عن حادث نووي أو إشعاعي [21]، مجموعة واسعة من الرؤى المتعلقة بالأمان والتكنولوجيا والجوانب المجتمعية. ويصف منشور مصاحب مزيداً من الخبرات التقنية المكتسبة والدروس المستفادة في مجال تنظيف المرافق النووية وإخراجها من الخدمة عقب وقوع حادث [22] ويدعمه منشور آخر يصف الاعتبارات المتعلقة بالتقنيات والممارسات ومنهجيات التنفيذ [23]. ويغطي المنشور الحالي الجوانب ذات الصلة بالتصرف في النفايات المشعة المتولدة عن الحوادث حتى التخلص منها



الشكل-1- التسلسل الزمني للتصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث. بتصرف من المرجع [22].

ويتناول المنشور الحالي عدة مصادر للنفايات المرتبطة بالحوادث. ولأغراض هذا المنشور تُعرَّف هذه النفايات على النحو التالي

(أ) النفايات الأوّلية: تتولد كنتيجة مباشرة للحادث (على سبيل المثال، المعدات الملوثة، وحطام الوقود، والمعدات أو الهياكل التالفة أو الملوثة في منطقة الحادث، وغيرها). وبصفة عامة، ستكون هذه النفايات مواد صلبة داخل الموقع، ويمكن أن تكون قوية الإشعاع.

(ب) نفايات الاستعادة: تتولد نتيجة لتحقيق الاستقرار في الظروف (مثل استخدام الماء لتبريد المفاعل) أو جعل منطقة مأمونة للدخول إليها (على سبيل المثال، الإزالة الأوّلية للحطام الشديد التلوث). ويمكن أن تكون هذه النفايات صلبة أو سائلة، وسيكون معظمها في الموقع.

(ج) نفايات الترميم/الاستصلاح: نفايات صلبة بصفة عامة تنتج عن ترميم المناطق الملوثة (على سبيل المثال، التربة وأوراق النباتات وركام المباني، وغيرها)، بما في ذلك داخل الموقع وخارجه.

(د) النفايات الثانوية: النفايات الصلبة أو السائلة المرتبطة بالتنظيف والأنشطة الأخرى (مثل الملابس الواقية للعمال، وسوائل إزالة التلوث، وما إلى ذلك) أو معالجة النفايات الأوّلية (على سبيل المثال، مرشحات الغاز الناتج عن الترميد، وما إلى ذلك).

(هـ) النفايات العرضية: النفايات الصلبة أو السائلة المتولدة كنتيجة غير مباشرة للحادث (على سبيل المثال، تنظيف مناطق الخزن المؤقت بعد أن تخدم الغرض منها)، بما في ذلك داخل الموقع وخارجه.

(و) نفايات الإخراج من الخدمة: نفايات تنتج بسبب تفكيك المرفق الذي يقع فيه الحادث وأي مرافق مرتبطة به، بما في ذلك مرافق المعالجة والخزن الجديدة التي تم إنشاؤها أو تحويلها للاستخدام في الترميم/الاستصلاح. ويمكن أن تكون هذه النفايات صلبة أو سائلة، وتشمل عموماً معدات كبيرة و/أو ركام المباني. وقد يكون لهذه النفايات نشاط و/أو حجم أكبر من النفايات الناتجة عن أنشطة الإخراج من الخدمة 'العادية'.

قد تتداخل أنواع النفايات المذكورة أعلاه، وقد لا يتم فصلها أو التصرف فيها بشكل منفصل في الممارسة العملية. ومع ذلك، عند التخطيط لأنشطة التصرف في النفايات، من المهم النظر في جميع المصادر المحتملة للنفايات وخصائصها ومواقعها. وفي سياق هذا المنشور، تشمل "النفايات" أي مواد ملوثة ناتجة عن الحادث و/أو تنظيفه و/أو ترميم الموقع.

ولا يتناول المنشور ما يلي:

- الاعتبارات المفصلة المتعلقة بالتصرف في الوقود المشعع (على سبيل المثال، الوقود المتحلل، والكوريوم، وغيرهما)؛
- المسائل المتعلقة بحصر المواد النووية وضماناتها.
- النفايات الناتجة عن العمليات غير العادية أو الحادثات البسيطة التي يمكن التعامل معها من خلال البنية الأساسية و/أو الممارسات القائمة.
- التخطيط غير التكنولوجي (مثل اللوائح الحكومية وغيرها)، الذي يغطيه المرجع [21].

2- منشأ نفايات الحوادث وخصائصها

الدروس الرئيسية المستفادة:

- يلزم إجراء تقدير أوّلي ومنهجي للحجم الإجمالي للنفايات (مصنفة أولاً على أساس مستوى النشاط الإشعاعي ثم على أساس نوعها) ومعدل توليد النفايات أثناء التنظيف.
- يكاد يكون من المؤكد أن النفايات ستكون ذات حجم أكبر وأكثر تنوعاً من النفايات 'العادية' الناتجة عن مرفق نووي مرخص عامل.
- يتعيّن أن يُراعى في التخطيط إمكانية توليد نفايات من الأنشطة داخل الموقع (داخل حدود الموقع المرخص) وخارجه (خارج حدود الموقع المرخص).
- ستؤثر معايير التنظيف المحددة والحالة النهائية المتوقعة على كميات النفايات المتولدة وأنواعها.
- قد يكون من الصعب التصرف في النفايات الخطرة الملوثة إشعاعياً (على سبيل المثال، السامة كيميائياً).

يتناول هذا المنشور التصرف في النفايات المشعة المتولدة نتيجة لحادث نووي وأنشطة التنظيف/الترميم اللاحقة. ولا يتناول المنشور النفايات المتوقعة الناتجة عن العمليات العادية في المرافق النووية. ويمكن أن تولّد الحوادث النووية كميات كبيرة للغاية من النفايات غير المتجانسة التي يصعب تحديد خصائصها. وترد في التذييلات أمثلة على حوادث محددة وتيارات النفايات المتولدة المستخدمة كأساس رئيسي لهذا المنشور. وتجدر الإشارة إلى أن التذييل لا يتضمن قائمة شاملة بجميع الحوادث التي وقعت في الماضي.

ولا يُعرِّف مسرد مصطلحات الأمان الصادر عن الوكالة [24] مصطلح 'نفايات الحوادث'. ولأغراض هذا المنشور، تُعرَّف نفايات الحوادث بأنها نفايات مشعة ناشئة عن حادث نووي لا يمكن التعامل معها بأمان وفق الإطار الحالي للنظام الوطني للتصرف في النفايات. ومن المتوقع أن تنشأ جميع فئات النفايات، على النحو المحدد في العدد GSG-1، من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة بعنوان 'تصنيف النفايات المشعة' [13]، كما في ذلك النفايات المعفاة والنفايات القصيرة العمر جداً، والنفايات الضعيفة الإشعاع جداً، والنفايات الضعيفة الإشعاع، والنفايات المتوسطة الإشعاع، والنفايات القوية الإشعاع. ويمكن أيضاً تعريف النفايات الناتجة عن المراحل المختلفة للحادث، كما هو موضح في القسم 1. ويوضح الجدول 1 المجموعات العامة لأنواع النفايات الناتجة في العادة عن حادث نووي كبير ومستويات نشاطها الإشعاعي.

الجدول-1- الأنواع النمطية للنفايات الناتجة عن حادث نووي كبير

مستوى النشاط الإشعاعي للنفايات	النفايات الصلبة التي يمكن أن تكون ذات أحجام كبيرة	عناصر كبيرة منفصلة من النفايات الصلبة	النفايات السائلة/ الرطبة الصلبة
نفايات ضعيفة الإشعاع (يمكن أن تشمل النفايات المعفاة، والنفايات القصيرة العمر جداً والنفايات الضعيفة الإشعاع جداً، تبعاً لنظام التصنيف الوطني)	— التربة، داخل الموقع وخارجه — الركام، داخل الموقع وخارجه، مثل الأشجار — المواد الخرسانية الناتجة عن الهياكل المدمّرة — الماصات — الغبار — النفايات الثانوية، مثل الملابس الواقية المستخدمة	— المركبات، وغيرها — المعدات التالفة	— المياه المستخدمة في إزالة التلوث — الزيوت والمذيبات وغيرها — السوائل المتعددة الأطوار
نفايات متوسطة الإشعاع	— التربة داخل الموقع — الركام داخل الموقع — ماصات النويدات المشعة في مياه التبريد، وغيرها — رماد المحارق — المواد الخرسانية والركام الأخرى	— المعدات التالفة	— مياه تبريد قلب المفاعل — سوائل إزالة التلوث — السوائل الناتجة عن عمليات مرافق إعادة المعالجة — الحمأة الناتجة عن نُظم التنقية — وسائط التبادل الأيوني المستهلكة
نفايات قوية الإشعاع	— الوقود التالف والمواد المحتوية على وقود	— قلب المفاعل	— السوائل الناتجة عن عمليات مرافق إعادة المعالجة

ويتناول القسم 2-1 الأحجام المحتملة للنفايات التي يمكن أن تنشأ عن حادث نووي، وترد خصائص النفايات في القسم 2-2، وتُناقش الاختلافات بين النفايات الناتجة عن التشغيل العادي المتوقع للمرافق النووية والنفايات الناتجة عن الحوادث في القسم 2-3.

2-1- كميات النفايات

يلزم إجراء تقدير أوّلي ومنهجي لحجم النفايات الإجمالي (مصنفة أولاً على أساس مستوى النشاط الإشعاعي للنفايات ثم بعد ذلك تبعاً لنوع النفايات) ومعدل توليد النفايات أثناء التنظيف من أجل التخطيط لاستراتيجيات إدارة الأحجام التي يمكن أن تكون كبيرة جداً من النفايات

المشعة الناتجة عن الحادث. وستُشكل هذه المعلومات جزءاً أساسياً من الأساس الذي تستند إليه جميع الأنشطة الإضافية المطلوبة للتعافي من الحادث. وتشمل الاعتبارات ما يلي

- معايير التنظيف ومستويات إجراءات إزالة التلوث (على سبيل المثال، مستوى رفع الرقابة)؛
- طبيعة الحادث ونوع الترميم ونطاقه (على سبيل المثال، آلية توليد النفايات، وطريقة إزالة التلوث، والنفايات الثانوية، وما إلى ذلك).
- تقدير حجم ومعدل توليد النفايات في كل خطوة متصلة بمرحلة التصدي (على سبيل المثال، مرحلة الطوارئ ومرحلة الاسترداد، وفترة التصرف اللاحقة الطويلة الأجل).

ويرد وصف مفصَّل لأنواع النفايات المشعة المتولدة وكمياتها أثناء حوادث محطات القوى النووية الكبيرة الأربعة المستخدمة كأمثلة في هذا المنشور في التذييلات من الأول إلى الرابع. وتتفاوت هذه الأنواع والكميات تفاوتاً كبيراً لتبدأ من الحد الأدنى، كما هو الحال في مفاعلي وندسكيل ومحطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، حيث تولدت عشرات الآلاف من الأمتار المكعبة من النفايات، وتشرنوبل وفوكوشيما، حيث تولدت ملايين الأمتار المكعبة من النفايات. ولأغراض المقارنة، يتراوح الإنتاج السنوي من النفايات الناتجة عن مفاعل نموذجي بقدرة 000 1 ميغاواط (كهربائي) تقريباً بين 250 و400 م^3 في السنة. وخلال العمر النموذجي الذي يبلغ 60 عاماً، يصل هذا الإنتاج من النفايات إلى 000 25 م^3 تقريباً، بالإضافة إلى 000 10 م^3 أخرى ناتجة عن إخراج المفاعل من الخدمة.

وبالإضافة إلى هذه الحوادث الرئيسية الأربعة المعروفة، تسببت حوادث أخرى عديدة أيضاً في توليد كميات كبيرة من النفايات المشعة. وتشمل هذه الحوادث (ترد تفاصيل كل منها في التذييل الخامس):

(أ) انفجار صهريج خزن في عام 1957 كان يحتوي على نفايات سائلة قوية الإشعاع في مصنع ماياك لإنتاج البلوتونيوم بالقرب من بلدة كيشتيم في جبال الأورال، الاتحاد الروسي.

(ب) تحطم طائرة عسكرية كانت تحمل أسلحة نووية في عام 1966 بالقرب من بالوماريس، إسبانيا؛

(ج) تخريب وحدة العلاج عن بُعد وصهرها العرضي في كويداد خواريز، المكسيك، في عام 1983؛

(د) سوء تعامل السكان المحليين في غويانيا، البرازيل، مع وحدة العلاج الإشعاعي المهجورة في عام 1987؛

(هـ) الصهر العرضي لمصدر مشع مختوم مُهمل في عام 1988 في مسبك أسيرينوكس، في لوس باريوس، إسبانيا.

ووقعت عدة حوادث ذات تأثيرات مباشرة محدودة أو معدومة خارج الموقع، وما زالت لها عواقب كبيرة على التصرف في النفايات. وعلى سبيل المثال، كانت هناك عدة أحداث تسببت في وقوع أضرار بقلب المفاعلات المبرّدة بالصوديوم، وتطلب ذلك تصرفاً في الوقود المستهلك المرتبط بالصوديوم والنُظم والهياكل الملوثة بالصوديوم (Fermi-1, 1966؛ EBR-1, 1955)، وقوبلت عمليات التصرف بالنفايات بتحديات تقنية معقدة في ما يتعلق بخزن النفايات والتخلص منها. ويمكن أن تُشكل الحوادث والأحداث غير المرتبطة بالمفاعلات تحديات موضوعية مماثلة ولكنها خطيرة في مجال إدارة النفايات. وعلى سبيل المثال، سُحبت أنفاق النقل بالسكك الحديدية التابعة لمحطة استخراج اليورانيوم من البلوتونيوم في موقع هانفورد (الولايات المتحدة الأمريكية) وأُغلقت، ودفنت عربات السكك الحديدية الملوثة. وتلوث النفق وعربات السكك الحديدية بمواد نووية من إنتاج الأسلحة النووية، وكانت لها آثار إشعاعية ونووية وسمية على الأمان. وتطلب ذلك اتخاذ إجراءات موسعة ودقيقة لعزل النفايات والتصرف فيها.

2-2- خصائص النفايات

يلزم تحديد الخصائص المفصلة، على النحو المبيّن في القسم 7، في مختلف خطوات عملية التصرف في النفايات من أجل تصنيف النفايات لمواصلة التصرف فيها وتحديد الحلول المناسبة للتخلص منها. ويمكن في العادة تصنيف النفايات الناتجة عن حادث على أنها سوائل أو مواد صلبة أو مواد صلبة رطبة أو غازات. ويرد أدناه وصف للخصائص العامة لتيارات النفايات، ويلخص الجدول 2 الخصائص الرئيسية التي لا بد من معرفتها للتصرف في هذه النفايات.

(1) السوائل:

- كميات كبيرة؛ ويتراوح نشاطها الإشعاعي بين ضعيف وقوي؛ وتركيبها الكيميائي المعقد (مثل الأملاح والزيوت والمواد الصلبة العالقة والتلوث البيولوجي، وما إلى ذلك)؛ ويمكن أن تنشأ عن مصادر عديدة.
- من الأمثلة على هذه النفايات مياه التبريد الملوثة، والمصادر الطبيعية (المياه الجوفية، ومياه الأمطار، والبحيرات/الأنهار/مياه البحر)، والمياه الناتجة عن إزالة التلوث، وما إلى ذلك.

(2) المواد الصلبة:

- كميات كبيرة؛ ويتراوح نشاطها الإشعاعي بين ضعيف وقوي؛ والنفايات الثانوية والمواد التي تدخل منطقة ملوثة (الأدوات والمعدات وغيرها)؛ ومواد متنوعة.
- من الأمثلة على هذه النفايات الوقود التالف، وحطام قلب المفاعل، والتربة، والركام، والمعادن، والغطاء النباتي، والمكونات، ومعدات الوقاية، والحيوانات النافقة الملوثة، والإصابات البشرية الملوثة، والمرشحات، والرماد الناتج عن الترميد، وما إلى ذلك.

(3) المواد الصلبة الرطبة:

- نشاط إشعاعي يتراوح بين ضعيف وقوي؛ ونفايات أوّلية وثانوية؛ قيد التطوير وخصائص متنوعة للمواد.
- تشمل أمثلة هذه النفايات راتينجات التبادل الأيوني، والملاط، والحمأة، وما إلى ذلك.

(4) نفايات غازية:

- مخاليط أنواع نواتج الانشطار (تبعاً لنوع المرفق وظروف التشغيل)؛ ونويدات مشعة بتركيزات متباينة؛ ومخاليط يمكن أن تكون قابلة للاشتعال.
- تشمل أمثلة هذه النفايات نواتج الانشطار المتطايرة الناتجة عن التنفيس بعد الحادث، وغازات المداخن الناتجة عن المحارق غير النووية المحوّلة للاستخدام الإشعاعي (ملاحظة: يمكن أن يحتوي غاز المداخن الناتج عن المحارق على عناصر متطايرة مثل السيزيوم، ولكن يمكن لنُظم الترشيح الكيسية أن تزيل السيزيوم بكفاءة إلى أقل من حد الكشف، حتى لو استُخدم جهاز أخذ عينات الهواء الكبيرة الحجم)، وما إلى ذلك.

وفي ما يتعلق بالنفايات الخطرة (مثل المواد القابلة للانحلال أو السامة كيميائياً)، قد تكون الخصائص غير الإشعاعية هي الاعتبار السائد. ويمكن أن يُصبح ذلك مناسباً لمعالجة/مناولة النفايات (على سبيل المثال، حيث يوجد تلوث بالأسبستوس)، وخزن النفايات (على سبيل المثال، إذا كانت النفايات تكشف عن تحلل متسارع) والتخلص منها في نهاية المطاف (على سبيل المثال، إذا كانت النفايات تحتوي على رصاص).

الجدول-2- الخصائص الرئيسية للنفايات الصلبة والسائلة الناتجة عن حادث نووي كبير

الخصائص	النفايات الصلبة والنفايات الصلبة الرطبة	النفايات السائلة
الخصائص المادية	— شكل النفايات وحجمها ووزنها — مكان توليد النفايات — الخصائص الانسيابية (الحمأة) — المحتوى السائل	— حجم النفايات — مكان التوليد للمساعدة في تصنيف الخصائص الإشعاعية
الخصائص الكيميائية	— التركيب الكيميائي (المعادن، الأسمنت، البوليمرات، المعقدات، وغيرها) — الثبات الكيميائي (على سبيل المثال، التفاعل الذاتي، والتفاعل مع الأكسجين، وغيرهما) — ذوبانية الملوثات — السمية الكيميائية	— التركيب الكيميائي (الملوحة، والأس الهيدروجيني، والمواد العضوية، وما إلى ذلك) — السمية الكيميائية
الخصائص الإشعاعية	— مستويات النشاط الإشعاعي للنويدات المشعة الباعثة لأشعة بيتا وأشعة غاما وأشعة ألفا. — محتوى نواتج الانشطار، ونواتج التنشيط، والأكتينيدات. — فئات مستوى الجرعة المكافئة (على سبيل المثال أقل من 0,1، وما بين 0,1 و10، وما بين 10 و1000، وأكبر من 1000 مليسيفرت/ساعة): مفيدة لتحديد الخزن المؤقت الأوّلي المناسب — مسائل الحرجية النووية (مخلفات الوقود)	— مستويات النشاط الإشعاعي للنويدات المشعة الباعثة لأشعة بيتا وأشعة غاما وأشعة ألفا. — محتوى نواتج الانشطار، ونواتج التنشيط، والأكتينيدات — مسائل الحرجية النووية (مخلفات الوقود)
الخصائص الحرارية	— القابلية للاشتعال — معدل توليد الحرارة عن طريق الاضمحلال الإشعاعي والتفاعل الكيميائي — الموصلية الحرارية	— نقطة الغليان — التطاير — القابلية للاشتعال
الخصائص البيولوجية	— التفاعلات البيولوجية (على سبيل المثال، التحلل، والتفاعلات الميكروبيولوجية، وغيرها) — تحلل المواد ذات الأصل الحيواني — العوامل المعدية	— التفاعلات البيولوجية (على سبيل المثال، التحلل، والتفاعلات الميكروبيولوجية، وغيرها) — العوامل المعدية

2-3- الاختلافات بين نفايات الحوادث والنفايات العادية

كما نوقش بالفعل، يمكن أن يولّد الحادث حجماً كبيراً غير مخطط له من النفايات غير المتجانسة جداً. ومن أجل التخطيط للتصرف في هذه النفايات، من المفيد فهم بعض الاختلافات

المهمة بين نفايات الحوادث والنفايات الناتجة عن العمليات/الظروف العادية. ويمكن تلخيص الاختلافات الرئيسية على النحو التالي

(أ) تكون أحجام نفايات الحوادث أعلى عموماً من النفايات المتولدة في ظروف التشغيل العادية. وعلى سبيل المثال، كانت أحجام النفايات السائلة والصلبة المتولدة بعد وقوع حادث محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية وحجم النفايات الصلبة المتولدة في محطة تشرنوبل للقوى النووية أكبر بكثير من تلك المتولدة أثناء العمليات العادية.

(ب) يمكن أن يكون نطاق النويدات المشعة وتركيزاتها في النفايات أعلى بعد وقوع حادث نووي. فعلى سبيل المثال، كانت كميات النويدات المشعة الباعثة لأشعة غاما/بيتا القصيرة العمر و ذات الصلة بالوقود التي أُطلقت أثناء حادث تشرنوبل أكبر بكثير من أي إطلاقات غازية حدثت أثناء العمليات العادية.

(ج) قد تضمحل النويدات المشعة القصيرة العمر إلى حد كبير بحلول الوقت الذي تجري فيه عملية التنظيف. ولذلك، قد توجد النويدات المشعة القصيرة العمر بتركيزات أقل من النفايات العادية. ويمكن الاستفادة من ذلك في عملية التخطيط.

(د) خلافاً للنفايات العادية، يمكن أن يكون المحتوى الكيميائي/البيولوجي ومخاطر نفايات الحوادث معقداً ومتغيراً.

(هـ) تكون خصائص النفايات بناءً على المعرفة العلمية، معروفة بالنسبة للنفايات العادية، ولكن طبيعة النفايات المتولدة أثناء وقوع حادث تعتمد على سيناريو الحدث وما يرتبط به من آثار، وهي غالباً ما تكون غير معروفة على الفور، أو تكون غير مفهومة بصورة كاملة.

(و) يمكن أن تكون الخصائص الفيزيائية للنفايات الناتجة عن الحوادث شديدة التنوع، مما يؤدي إلى مجموعة واسعة من أنواع النفايات.

(ز) تبعاً للظروف الجوية السائدة، يمكن لنفايات الحوادث (خلافاً للنفايات العادية) أن تنتشر على نطاق جغرافي واسع ويمكن أن تتوزع عبر الحدود الوطنية.

يستصوب في حالة النفايات السائلة فهم الخصائص التالية على الأقل من أجل التخطيط للخزن المؤقت والتصرف في النفايات، وكذلك خطوات المعالجة اللاحقة، مع الأخذ في الاعتبار أن طرق المعالجة يمكن أن تختلف تبعاً للعملية التي تُجمع من خلالها النفايات:

(1) تركيز النشاط (مثل تحليل النويدات المشعة).

(2) مكان التوليد (للمساعدة في تصنيف الخصائص الإشعاعية).

(3) حجم توليد النفايات ومعدل توليدها.

(4) التركيب الفيزيائي والكيميائي.

وبالإضافة إلى ذلك، من الضروري في حالة النفايات الناتجة عن إزالة التلوث، فهم عملية إزالة التلوث و/أو المواد المستخدمة في إزالة التلوث.

وباختصار، تميل النفايات الناتجة عن الحوادث إلى أن تكون أكبر حجماً وتعقيداً وتنوعاً من النفايات العادية، وبالتالي يصعب توصيفها وفصلها وتحديد خطوات التصرف الملائمة لها.

3- نهج هندسة النُظم في التخطيط للتصرف في النفايات

الدروس الرئيسية المستفادة:

- التحديد المسبق للأدوار والمسؤوليات والموارد اللازمة لوضع استراتيجية التصرف في النفايات وتنفيذها، وكذلك السلطة المسؤولة عن اتخاذ القرارات.
- للحصول على أفضل الحلول، يتعيّن أن يتضمن تقييم واختيار خيارات التصرف في النفايات تقييماً شاملاً لجميع المتطلبات مقابل مقاييس الأداء، مع الأخذ في الاعتبار تفاعلاتها وتأثيراتها على دورة الحياة.
- يوفِّر نهج هندسة النُظم الرسمي الذي يُنفذ وفق نظام إدارة المتطلبات، إطاراً قوياً لتحديد الأهداف والأولويات والخيارات وإداراتها، ويمكن وضع هذا النهج في عملية التخطيط المسبق الوطنية.
- توضع خطة لتيسير التواصل مع الجمهور والجهات المعنية الأخرى.
- قد تكون هناك حاجة إلى بعض البحث والتطوير إلى جانب اختبار النطاق التجريبي قبل تصميم مرافق كاملة النطاق وبنائها.

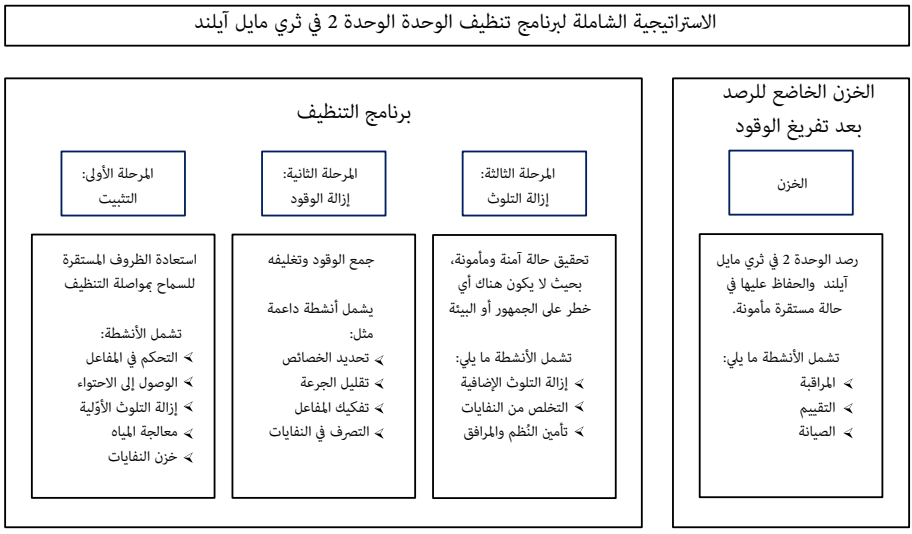
يضمن الأخذ بنهج عقلاني حيال التصرف في النفايات بعد وقوع حادث أن تكون التدابير المتخذة فعالة ومتسمة بالكفاءة. وستتغيَّر الأولويات مع تطور الحادث ووصوله إلى حالة الاستقرار. ولن يكون التصرف في النفايات على رأس الأولويات في المراحل الأولى من الحدث. ولكن بعض هذه القرارات المبكرة يمكن أن تؤثر تأثيراً كبيراً على كمية النفايات المتولدة ونوعها. وبالإضافة إلى ذلك، فإنها يمكن أن تحد أيضاً أو أن تؤثر على أي نحو آخر على الخيارات المتاحة لخطوات التصرف في النفايات لاحقاً. وعلى هذا النحو، يعتبر من الممارسات الجيدة تحديد أدوار ومسؤوليات محددة مسبقاً لوضع استراتيجية التصرف في النفايات وتنفيذها ليتم تفعيلها في حالة وقوع حادث. وعند وضع الاستراتيجية، من المهم أولاً تحديد جميع المتطلبات التقنية

وغير التقنية التي يتعيّن أن يلبيها نظام التصرف في النفايات. وتنشأ هذه المتطلبات من مصادر مختلفة، بما في ذلك مصادر داخلية، مثل المنظمات التي تدير الحادث والمرفق المعني، أو مصادر خارجية، مثل أصحاب المصلحة القانونين والتنظيميين والسياسيين والمجتمعيين، وربما على المستويين الوطني والدولي.

وتُشير الأدلة إلى أن وضع وإدماج استراتيجيات واضحة لإشراك أصحاب المصلحة يمكن أن يكون له دور أساسي في بناء ثقة الجمهور في النهج العام المتبع في التصرف في النفايات، وبالتالي الحفاظ على المرونة في تدابير التصدي اللاحقة. ولتحقيق النجاح، من الضروري العمل في تعاون وثيق مع الهيئات الرقابية وأصحاب المصلحة، لتوليد ثقة متبادلة وضمان تحديد النُهج التقنية السليمة وقبولها وتنفيذها، مما يسمح بإكمال جهود التنظيف. ومن المهم اختيار النُهج التقنية بعناية لمعالجة المتطلبات المحددة وتلبيتها.

وتوفّر عملية إدارة تنظيف الوحدة 2 في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية مثالاً مبكراً على التفاعل بين المتطلبات التي تعقدها التحديات التقنية وغير التقنية (مثل التحديات الرقابية والسياسية والمؤسسية والمجتمعية) [2]. ووضعت اعتبارات الأمان فوق جميع الأهداف الأخرى، وشكلت الشرط الأساسي لتخطيط الأنشطة وتنفيذها. واتُخذ أيضاً قرار بعدم إعادة تشغيل المفاعل في المراحل المبكرة، وساعد ذلك على تركيز أنشطة معالجة النفايات وإزالة التلوث. واستُخدمت استراتيجية لمتابعة تكنولوجيات التنظيف المرنة والمتوازية لتجنب 'العقبات' والتقليل إلى أدنى حد من حالات البدء من جديد. وعمل فريق الإدارة أيضاً مع الهيئات الرقابية وأصحاب المصلحة لإيجاد حلول مقبولة. ولم تكن اللوائح المعمول بها في الولايات المتحدة الأمريكية بشأن التخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي كانت سارية وقت وقوع الحادث كاملة وصريحة. وعلى الرغم من وضع لوائح أكثر ملاءمة وإصدارها في وقت لاحق، واجه فريق إدارة الوحدة 2 في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية في ذلك الوقت العديد من التحديات التقنية والرقابية التي تطلبت تفاعلاً مكثفاً مع الهيئة الرقابية، وكذلك الارتجال في النُهج المبكرة التي اتُبعت في التصرف في النفايات، ولا سيما في ما يتعلق بنُظم استرجاع النفايات وخزنها ومعالجة النفايات السائلة. ومع ذلك، أُجريت أنشطة التصرف في النفايات المشعة بصورة مأمونة قبل إصدار اللوائح ذات الصلة وبعد إصدارها. وصدرت اللوائح المناسبة، انطلاقاً من الحادث واستجابة له، بعد ثلاث سنوات تقريباً من وقوعه.

وفي خريف عام 1979، وضعت خطة تقنية موجزة لتحديد أهداف الأداء، ووضع الأولويات، وتحديد معايير الإنجاز [2]. وفي كانون الثاني/يناير 1980، أي بعد تسعة أشهر تقريباً من وقوع الحادث، أنشئ مكتب الشؤون التقنية والتكامل في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. وأتاح إنشاء هذا المكتب تواجداً داخل الموقع لتوجيه أنشطة التنظيف [25]. وفي عام 1984، وبتوجيه من مكتب الشؤون التقنية والتكامل، وضعت استراتيجية برنامجية حددت خطة التنظيف بمزيد من التفصيل. ويبين الشكل-2 هذه الاستراتيجية البرنامجية.



الشكل-2- استراتيجية تنظيف الوحدة 2 في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية: المراحل والأنشطة داخل المراحل. بتصرف من المرجع [2].

يُشكل التحديد المنهجي للأهداف والأولويات الرئيسية للتصرف في النفايات، إلى جانب فهم أهم الدوافع والقيود، وآثارها على الخيارات المتاحة، أساساً مهماً للتصدي للحدث وقرارات التصرف في النفايات. ومن المتوقع أن تلبي استراتيجية التصرف في النفايات متطلبات عديدة، وأحياناً متضاربة. وستشمل هذه المتطلبات المتصلة بأمان العمال داخل الموقع وخارجه، وأمان الجمهور، ولوائح الأمان النووي، ومسائل الأمن، والحالة النهائية لموقع الحادث ومرافق التصرف في النفايات، واحتياجات المجتمع المحلي، والطلبات السياسية على المستويين الوطني والمحلي، والاتفاقات الدولية، وما إلى ذلك. وإذا لم يتم فهم هذه المتطلبات على نطاق واسع قبل وقوع الحادث ولم توضع استراتيجية سريعة لتحديدها، خاصة أثناء وقوع الحادث، من المحتمل أن يؤدي ذلك إلى عواقب وخيمة في وقت لاحق. وعلى سبيل المثال، قد يكون هناك اعتماد لحلول تقنية لا تفي في نهاية المطاف ببعض المتطلبات الرئيسية (ولا سيما المتطلبات المتعلقة بخصائص النفايات المعالجة، والمكان، والتصميم، والحالة النهائية لمرافق خزن النفايات والتخلص منها)، وقد يؤدي ذلك إلى تكاليف إضافية وعواقب إشعاعية لتصحيحها أو تكييفها.

ويوفِّر نهج هندسة النُظم الرسمي الذي يُنفذ وفق نظام لإدارة المتطلبات، إطاراً قوياً لتحديد الأهداف والأولويات والخيارات وإدارتها. وفي ما يتعلق بالتأهب للحوادث، يمكن لإدماج نظام إدارة المتطلبات الذي يحدد التسلسل الهرمي للمتطلبات المنطبقة والطريقة التي يمكن بها إثبات تنفيذها (الشكل-3) في عملية التخطيط المسبق الوطنية أن يكون مفيداً. وفي حالة وقوع حادث، يمكن بعد ذلك تركيز نظام إدارة المتطلبات بصورة مباشرة على الظروف الخاصة بالمرفق

مستوى نظام إدارة المتطلبات		الوصف
1	المتطلبات الخارجية الرفيعة المستوى	المتطلبات الخارجية الرفيعة المستوى المتصلة بالتصرف في النفايات: الاتفاقات الدولية والسياسة الحكومية والهيئات الرقابية والمجتمع المحلي وما إلى ذلك.
2	متطلبات نظام التصرف في النفايات	المتطلبات النوعية والكمية التي تُحدد الطريقة التي يستوفي بها نظام إدارة النفايات الكلي المتطلبات الخارجية الرفيعة المستوى: تُحدد هذه المتطلبات في جانب كبير منها داخلياً من خلال المنظمات التي تتولى إدارة المرفق والتصدي للحادث وتستخدم لتحديد نظام التصدي والتصرف في النفايات.
3	متطلبات النُظم الفرعية	المتطلبات المحددة لكل من الهياكل والنُظم والمكونات الرئيسية لنظام التصرف في النفايات والأنشطة المرتبطة بها، حيثما يكون ذلك مناسباً، معبراً عنها كدالة للأمان لكل هيكل ونظام ومكون.
4	متطلبات التصميم	أهداف الأداء الكمي التي تحددها المنظمات التي تتولى إدارة التصدي للحادث ونظام التصرف في النفايات، بالنسبة لكل هيكل ونظام ومكون ولكل نشاط، بحيث يتم الوفاء بمتطلبات النُظم الفرعية ووظائف الأمان المرتبطة بها.
5	مواصفات التصميم	أهداف الأداء لكل مكون من مكونات كل تصميم مختار للهياكل والنُظم والمكونات في نظام التصرف في النفايات، بالإضافة إلى المواصفات المفصلة للتصميم والتشييد والتصنيع لكل مكون أو نشاط من أجل تلبية أهداف الأداء فيما يتصل بمتطلبات التصميم.

الشكل-3- التسلسل الهرمي المحتمل للمتطلبات وفقاً لنظام إدارة متطلبات نظام التصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث.

وظروف الحادث. ويرد وصف لاستخدام نهج هندسة النُظم في سياق التخلص من النفايات في منشور مصاحب صادر عن الوكالة بعنوان 'مبادئ التصميم والنُهج لمستودعات النفايات المشعة' [26].

يمكن أن يتطلب نهج هندسة النُظم الرسمي والتنفيذ الصارم لنظام إدارة المتطلبات الكثير من الموارد والتكاليف. وتنطوي الإدارة المتسقة للطلبات على عدة عناصر رئيسية، بما في ذلك التعرف على المتطلبات وتحديد القابلية للتطبيق؛ والتأكد من أن إرشادات التنفيذ وإجراءاته متاحة للاستخدام؛ واتخاذ الترتيبات اللازمة للتأكد من تحقيق النتائج المرجوة. ومن المستصوب استثمار الوقت والموارد لتحديد المتطلبات عندما توجد مجموعة من سيناريوهات الحوادث التي يمكن

أن تقع في دولة عضو. ومن المهم أن يأخذ التقييم في الاعتبار أيضاً الآليات ذات الصلة للاستجابة بفعالية للمتطلبات في جميع المراحل بعد وقوع الحادث. ويلاحظ أن تطبيق نهج هندسة النُظم يتطلب التزاماً جدياً بمبادئه، وجهد التنفيذ المستمر، ودعماً واقعياً من حيث الموارد.

3-1- نظام إدارة المتطلبات وتسلسلها الهرمي

يتطلب تحقيق الحلول المُثلى أن يشمل تقييم وتحديد خيارات التصرف في النفايات إجراء تقييم للمتطلبات البارزة وسردها وإدارة تطبيقها بصورة شاملة، بما في ذلك استخدام مقاييس الأداء. ويمكن عند القيام بذلك اتباع نهج هرمي لإدارة المتطلبات. ويوضح الشكل-3 كيفية إنشاء نظام لإدارة المتطلبات في نظام التصرف في نفايات الحوادث بالاستناد إلى هيكل هرمي نموذجي يشمل مستويات متتالية من المتطلبات.

ويحتاج المستوى الأعلى في نظام التصرف في النفايات بصورة أساسية مراعاة الدوافع الخارجية/المتطلبات التي تُحدد الشروط الحدية للنهج العام المتبع في التصرف في النفايات. ويُستمد ذلك من مصادر قانونية وسياساتية وتنظيمية، بالإضافة إلى المتطلبات الاستراتيجية التي تؤخذ عن المنظمة المسؤولة عن إدارة المشروع. وعند هذا المستوى الأعلى، تنشأ متطلبات في المجالات الرئيسية التالية

(أ) الامتثال الرقابي للصحة والأمان لعامة الجمهور والعاملين؛
(ب) الامتثال القانوني والرقابي في ما يتعلق بالآثار البيئية الوطنية وربما العابرة للحدود.
(ج) جدوى النظام وفعاليته ومتطلبات التطبيق العملي (بما يشمل متطلبات استخدام التكنولوجيات المتاحة، واستخدام مساحات الأراضي المتاحة ونُظم النقل، والتوافق بين العمليات الأوّلية والنهائية، وما إلى ذلك).
(د) متطلبات التكلفة والتمويل (بما في ذلك التكاليف العامة والخاصة لمختلف مكونات النهج المخطط له، فضلاً عن المتطلبات والقيود التي تُمكن من المفاضلة بين التكاليف الأوّلية وتكاليف الأنشطة اللاحقة.
(ه) متطلبات الجدول الزمني (أهداف الجدول الزمني العامة والمفصلة؛ ومتطلبات المُهل الزمنية والمواعيد النهائية للإنجاز؛ أوتوافر الموارد والتقنيات).
(و) المتطلبات المتعلقة بمشاركة الجمهور/أصحاب المصلحة والتوقعات.
(ز) المتطلبات الاستراتيجية المتعلقة بمستقبل المرفق الذي يقع فيه الحادث و/أو المجمع الصناعي المرتبط به.

وعندما تُحدد العناصر الخاصة بالهياكل والنُظم والمكونات التي ستُدار بواسطة نظام التصرف في النفايات، يمكن تطبيق متطلبات مستوى النظام الرئيسي ومستوى النظام الفرعي (المستويان 2 و3)، عليها، مما يؤدي إلى تحديد مواصفات التصميم/العملية في المستويات النهائية لنظام إدارة متطلبات هندسة النُظم. وستشمل الهياكل والنُظم والمكونات ما هو قائم من مكونات وهياكل داخل مرفق الحادث نفسه وخارجه، بالإضافة إلى المرافق/النُظم الجديدة التي يتم تطويرها للتصرف في النفايات الناتجة عن الحادث. وتصبح المستويات الدنيا لنظام إدارة المتطلبات المبيّنة في الشكل-3 أكثر تحديداً وتفصيلاً بصورة تدريجية، وتؤدي وظائف الأمان وأهداف الأداء في مكونات النظام الفرعي وأنشطته في نهاية المطاف إلى تحديد مواصفات مفصلة للتصميم.

3-2- تنفيذ نظام إدارة المتطلبات

يصف هذا القسم تطبيق استراتيجية نظام إدارة المتطلبات بما يتفق مع النهج الهرمي لإدارة المتطلبات على النحو المبيّن في القسم 3-1. وتركز المناقشة بشكل خاص على العوامل المحركة التي تؤثر على المتطلبات التي سيتعيّن معالجتها في هيكل نظام إدارة المتطلبات. وتشمل هذه الأسئلة ما يلي:

- متطلبات الحالة النهائية لموقع الحادث والمعالم البارزة للحالة المؤقتة.
- معايير قبول النفايات في مرافق الخزن والنقل والتخلص منها.
- معايير الإطلاق الحر ورفع الرقابة وإعادة التدوير.
- متطلبات التصريف.
- متطلبات الترخيص والمتطلبات الرقابية لجميع الأنشطة والمرافق المعنية.
- مراقبة التكاليف واتخاذ القرارات المتعلقة بالميزانية.
- الخيارات والمتطلبات المتعلقة بالتقليل إلى أدنى حد من النفايات.
- متطلبات إدارة السجلات والبيانات.
- متطلبات مراقبة الجودة.

وبالإضافة إلى ذلك، يتعيّن عند وضع نظام التصرف في النفايات مراعاة مجموعة من القيود والفرص التي ستؤثر على تصميم نهج التصرف في النفايات وتنفيذه، بما في ذلك ما يلي:

- الهياكل التنظيمية المتاحة؛

- البنية الأساسية المتاحة.
- ترتيبات استيعاب التكاليف الاستثنائية التي قد ترتبط بالتصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث، مثل تكلفة المرافق والمواد وموظفي الدعم والتكلفة الرأسمالية للأموال.
- الطلب على التمويل ومصادر التمويل بعد وقوع حادث، بما في ذلك التكاليف غير المباشرة، مثل تحويل الأصول إلى رأسمال سائل لتغطية النفقات اللوجستية ونفقات شراء اللوازم وغيرها.
- توافر الموظفين.
- طرق نشر التكنولوجيات (الثابتة مقابل المحمولة/القابلة للنقل).
- إمكانية التفاعل مع البرامج الأخرى أو الدول الأعضاء بشأن الاحتياجات التقنية واللوجستية والمالية.
- القدرة على تحديد المجالات التي يمكن أن يُساهم فيها البحث والتطوير.
- الحاجة إلى التعقيبات المستمرة والاعتراف بالدروس المستفادة مع استمرار الأنشطة.

وتتناول الأقسام الفرعية التالية بمزيد من التفصيل العوامل المحرِّكة المؤثرة على المستوى الأدنى من متطلبات نظام إدارة المتطلبات وما يرتبط بها من قيود وفرص على النحو المبيّن أعلاه.

3-2-1- متطلبات الحالة النهائية لموقع الحادث والمعالم البارزة للحالة المؤقتة

يلزم تحديد متطلبات الحالة النهائية لموقع الحادث مبكراً قدر الإمكان في العملية. ويمكن لتحديد شروط الحالة النهائية أن يُملي عملية اتخاذ القرار ونشر تكنولوجيا التصرف في النفايات. وعلى سبيل المثال، إذا حُددت الحالة النهائية التي تسمح فقط بالاستخدام المستقبلي الخاضع للرصد في الموقع، يمكن نشر تقنيات التعطيل والإخراج من الخدمة، وهي تقنيات يمكن أن تُبسّط أنشطة استرجاع النفايات ومعالجتها.

وبدلاً من ذلك، إذا كان تحديد الحالة النهائية هو ترميم الموقع لاستخدامه في الأغراض العامة، سيلزم بذل مزيد من الجهد ومعالجة أكثر شمولاً واستخدام التكنولوجيا. وبالتالي فإن تخطيط أنشطة المعالجة يعتمد على شروط الحالة النهائية المرجوة. وتتناول منشورات أخرى، مثل المراجع [16، 27، 28]، السياسات والاستراتيجيات المتبعة في استصلاح المواقع الملوثة.

وينطوي تحديد متطلبات الحالة النهائية على تعقيدات، وقد يكون من الصعب تحقيقها جنباً إلى جنب مع الأولويات المتنافسة الأخرى في أعقاب وقوع حادث. وبالإضافة إلى ذلك، ونظراً للفترات الزمنية الطويلة المطلوبة في العادة لتحقيق الحالة النهائية المحددة للتعافي من الحوادث، قد يكون هناك ما يبرر تطبيق نهج تكيّفي أو متدرج لتنفيذ الأنشطة. ولتحقيق هذه الغاية، يمكن تحديد الحالات المؤقتة ذات المعالم البارزة الواضحة والحالات النهائية المؤقتة

التي لا تمنع تحديد الحالة النهائية الأخيرة. ويمكن أن يتيح تعريف الحالات النهائية للمرحلة المؤقتة أيضاً زيادة المرونة في معالجة متطلبات أصحاب المصلحة المتغيرة، وتعزيز ثقة الجمهور واستيعاب التطورات التكنولوجية، والتي قد يتطور جميعها على مدى الفترات الزمنية المعنية. ويمكن أن تساعد الحالات المؤقتة في توفير الوقت، إلى جانب اعتبارات أخرى، للأخذ بنهج شامل في صنع القرار وعملية أكثر دعماً وتكراراً للتعامل مع أصحاب المصلحة.

ومن الأمثلة على استخدام هذا النهج المرحلي نظام الاحتواء المأمون الجديد في محطة تشرنوبل للقوى النووية. وحقق تركيب نظام الاحتواء المأمون الجديد فوق هيكل الساتر القائم هدف توفير مكان عمل مأمون يدعم تفكيك هيكل الساتر الأصلي في المستقبل واسترجاع قلب المفاعل التالف في نهاية المطاف. ويبلغ العمر التصميمي الوظيفي لنظام الاحتواء المأمون الجديد 100 عام، ويتيح ذلك وقتاً كافياً لتطوير التكنولوجيات المطلوبة واختبارها وتنفيذها بأمان، بما في ذلك معدات التحكم الآلي والمناولة عن بُعد اللازمة لإخراج هيكل الساتر والوحدة 4 من الخدمة. ويمثل هيكل الساتر نفسه حالة مؤقتة الهدف منها تحقيق حالة الاستقرار في الإطلاقات المنبعثة من الوحدة 4 وحصر الإشعاع في منطقة خاضعة للرقابة.

ومن الاعتبارات الرئيسية المتعلقة بتحديد الحالة النهائية الأخيرة قرار ما إذا كان ينبغي إعادة تشغيل مرفق نووي متضرر، وكذلك كيفية تأثير قرار إعادة التشغيل على الوحدات والمرافق المجاورة غير المتضررة. وسيكون لتوقيت هذا القرار وأثره دور مباشر في تغيير مدى تركيز أنشطة التصرف في النفايات والإخراج من الخدمة والتنظيف والعلاج، مقابل أنشطة الإصلاح وإعادة التشغيل. وسيكون تنفيذ عملية إعادة التشغيل بالتزامن مع التنظيف تحدياً إدارياً صعباً ومعقداً مما سيؤدي إلى توليد كميات كبيرة من النفايات أثناء العملية وبعد الانتهاء منها. وتختلف التجارب - على سبيل المثال، اتُّخذ قرار مبكر بعدم إعادة تشغيل الوحدات المتضررة بالنسبة للوحدة 2 في ثري مايل آيلند، والوحدات من 1 إلى 3 في فوكوشيما دايتشي، والوحدة 4 في تشرنوبل، ومفاعل وندسكيل 1. ولكن ستكون القرارات مختلفة في ما يتعلق باستخدام مرافق أخرى في المواقع النووية التي شُغِّلت فيها هذه الوحدات المتضررة.

ونظراً لعدم حدوث إطلاقات خارج الوحدة 2 المتضررة في ثري مايل آيلند، اتُّخذ القرار بمواصلة تشغيل الوحدة 1، الواقعة في المنطقة المجاورة لها مباشرة. وحدد ذلك هدف الحالة المؤقتة للوحدة 2 المتضررة في ثري مايل آيلند: متابعة حملة التنظيف التي تضمن تلبية شروط الأمان في الوحدة 2 في ثري مايل آيلند آيلاند، بما يكفي للسماح باستمرار تشغيل الوحدة رقم 1، الأمر الذي يتطلب عدة سنوات. وأدى ذلك أيضاً إلى تأجيل إيقاف التشغيل والمعالجة في الموقع في نهاية المطاف - أي الوصول إلى الحالة النهائية - حتى الوقت الذي تم فيه إغلاق الوحدة 1 في ثري مايل آيلند في أيلول/سبتمبر 2019. وتأجل هدم المحطة باستخدام نهج التطويق المأمون الذي وضعته الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة، وهو نهج يتيح 60 عاماً لتحقيق الحالة

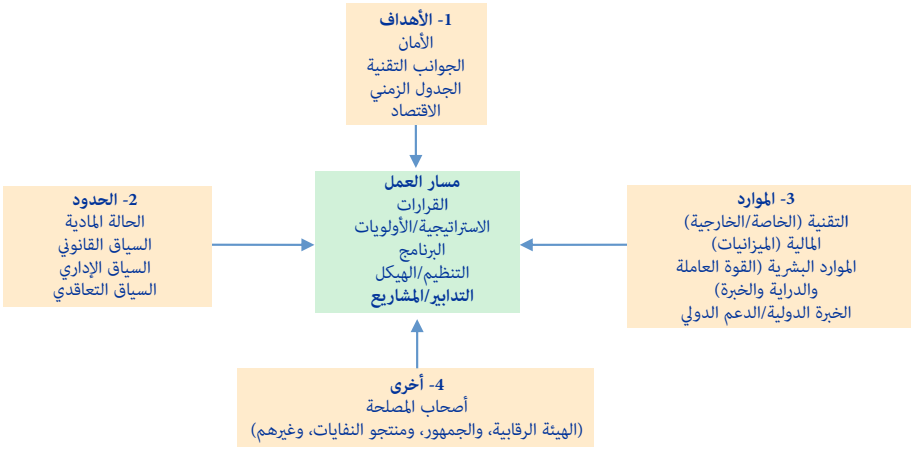
النهائية، وبالتالي تأجيل القرار بشأن الحالة النهائية للموقع النووي إلى تاريخ لاحق. ومن الواضح أن هذا النهج سيؤثر على حجم الأنشطة المطلوبة للتصرف في النفايات.

وصُممت محطة تشرنوبل للقوى النووية كمحطة متعددة الوحدات، حيث توجد نُظم معيّنة مشتركة بين الوحدتين 1 و2 وبين الوحدتين 3 و4. ولم تتأثر الوحدتان 1 و2 سلباً بالحادث، وكان من الممكن عزل الوحدة 3 عن الوحدة 4 المدمَّرة. وحُددت حالة مؤقتة: حصر النشاط الإشعاعي في الوحدة المتضررة عن طريق تثبيت الإطلاقات من الوحدة 4. وأدى ذلك إلى بناء هيكل الساتر وتحديد أهداف التنظيف الأوّلية داخل منطقة الحظر، مما سمح باستعادة العمليات لعدة سنوات في الوحدات 1 و2 و3. وفي نهاية المطاف، اتُخذ قرار آخر بإغلاق جميع المفاعلات المتبقية، وفي 15 كانون الأول/ديسمبر 2000، أصبحت الوحدة 3 آخر مفاعل يُغلق. وبالإضافة إلى ذلك، سمح تحديد المنطقة المحظورة باحتواء النفايات وتهيئة ظروف مأمونة للسكان المتضررين، مما سمح بالمضي قدماً في إجراءات التنظيف. ويمكن النظر إلى إنشاء منطقة الحظر وإجلاء السكان على أنه شرط مبكر لتحقيق الحالة المؤقتة، وأنه يدعم الجهود الجارية والمستقبلية للإخراج من الخدمة.

وعندما تنخفض مستويات النشاط الإشعاعي، يمكن إعادة تصنيف المنطقة، ويمكن أيضاً النظر إلى منطقة الحظر في تشرنوبل على أنها موقع مؤقت للنفايات الطويلة العمر أو النفايات القوية الإشعاع التي سيتم التخلص منها في نهاية المطاف في مستودع جيولوجي. وما زال القرار النهائي بشأن الحالة النهائية لموقع المحطة ومنطقة الحظر قيد المناقشة. ومع ذلك، هناك توقع بأن الحالة النهائية المستهدفة ستشمل الاستخدام الصناعي المستقبلي لجزء على الأقل من المنطقة المحظورة. واتُخذت بالفعل خطوة أوّلية في سبيل تحقيق هذه الغاية، وأنشئت بالفعل محطة قوى تعمل بالطاقة الشمسية داخل المنطقة المحظورة.

وفي فوكوشيما داييتشي، اتُخذ قرار بعدم إعادة تشغيل الوحدات 4 و5 و6 غير المتضررة، والتركيز على تخفيف عواقب الحادث في الموقع النووي بأكمله. وكان ذلك متسقاً مع اتجاه النية نحو عدم استخدام الموقع لأي نشاط نووي في المستقبل. وأثر هذا القرار مرة أخرى على توليد النفايات وأتاح إنشاء مرافق مؤقتة للتصرف في النفايات في الموقع نفسه. وعلى المدى الأطول، سيؤثر القرار بطبيعة الحال على الإطار الزمني المحدد لإخراج جميع الوحدات الست من الخدمة، بالإضافة إلى مخزون النفايات الإجمالي الذي سيتعيّن نقله من الموقع إلى مخازن أو مستودعات طويلة الأجل خارج الموقع. وبالمثل فإن عملية التنظيف المعجّلة خارج الموقع، والتي تهدف إلى وصول حالة نهائية محددة لاستعادة غالبية المناطق المتضررة إلى ظروف الاستخدام المستقبلي كما حددتها وزارة البيئة، ستؤثر أيضاً على مقدار النفايات التي سيجري توليدها ومعالجتها وخزنها ونقلها والتخلص منها.

وعقب التنظيف الأوّلي لموقع حادث مفاعل وندسكيل 1، وضع المرفق تحت نظام المراقبة والصيانة. ومن المتوقع أن يبقى المفاعل ومرافق الدعم في حالتها المأمونة سلبياً الحالية



الشكل-4- تحليل الأهداف والعوامل الحدية المؤثرة على القرارات وترتيبات البرنامج أو المشروع وأدائه (طريقة تحليل النُظم).

لمدة زمنية طويلة، ومن المقرر حالياً إجراء إخراج كامل من الخدمة في أربعينات القرن الحالي. ووافقت السلطات الرقابية على النهج الحالي الذي يخضع لاستعراض روتيني.

وكما جاء في بداية القسم 2-3، يُعد نهج هندسة النُظم بمثابة منهجية تحسين مؤكدة يتم من خلالها تحرير المتطلبات، في شكل أهداف وشروط حدية مثل تلك التي نوقشت أعلاه، من خلال نظام إدارة المتطلبات لتحديد استراتيجية وأولويات وبرامج تنفيذ وتنظيم متماسكة من أجل تحديد نسق التدابير أو المشاريع. ويوضح الشكل-4 المدخلات الضرورية بشأن كيفية تحديد مسار العمل للتوصل إلى قرارات بشأن الحالة النهائية وشروط الحالة المؤقتة من خلال نهج تحليل النُظم. وكما يتبيّن من الشكل-4، يبدأ التحليل بتحديد الأهداف المعقدة التي يمكن تحقيقها وفهم الشروط الحدية والموارد المتاحة، فضلاً عن القيود الأخرى التي تُعتبر مهمة في تحديد مسار الإجراءات.

3-2-2- معايير قبول النفايات في مرافق خزن النفايات والتخلص منها

ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار معايير قبول النفايات في مرافق خزن النفايات والتخلص منها في مرحلة مبكرة وطيلة عملية تطوير وتنفيذ نظام التصرف في النفايات وكلما حدث نقل لمواد النفايات المادية أو المسؤوليات المتعلقة بمواد النفايات، حتى لو كان هذا النقل داخلاً ضمن الإطار التنظيمي الوحيد للكيان. وتمثل معايير قبول النفايات شكلاً مهماً من أشكال المتطلبات التي يتعيّن إدراجها في نظام إدارة المتطلبات، وتُحدد من حيث خصائص شكل النفايات. وبالتالي فإن تحديد خصائص أشكال النفايات مهم لتحديد النويدات المشعة وتركيزات النويدات المشعة

لأهم الأنواع والأشكال الفيزيائية لمختلف تيارات النفايات التي سيتعيّن التخلص منها، وتحديد الحلول المتاحة ومدى الحاجة إلى مرافق جديدة للتخلص من النفايات. وستُساعد الصورة العامة الأوّلية لمجموعة خصائص شكل النفايات في البداية على تحديد نطاق حلول التصرف الممكنة ويمكن بعد ذلك تحسين عملية تحديد الخصائص لإنشاء معايير محددة لقبول النفايات بما يناسب كل مرفق متاح أو كل مرفق يمكن تطويره لخزن النفايات/التخلص من النفايات.

ويمكن أن تُشير بيانات تحديد الخصائص إلى حلول تُبسّط أو تُلغي الحاجة إلى خزن بعض أنواع النفايات، أو بدلاً من ذلك، يمكن أن تزيد من الحاجة إلى إنشاء قدرات أكثر شمولاً لمعالجة النفايات أو خزنها، سواءً داخل موقع الحادث أو خارجه. وفي بعض الحالات، ستُشير هذه البيانات إلى الحاجة إلى مرافق خزن وتخلص جديدة و/أو تحديد تيارات نفايات جديدة. وفي جميع الحالات، ينبغي أن تكفل معايير مقبول النفايات التي يتم إنشاؤها أن تيارات التدفق متوافقة مع قدرات مرافق الخزن/التخلص المتاحة في البداية، أو التي سيتعيّن تنفيذها في المستقبل. وينبغي عند استرجاع النفايات ومعالجتها مراعاة خصائص النفايات ومتطلبات قبولها. ويمكن أن تؤدي الإجراءات غير المناسبة إلى توليد نفايات يمكن أن تُشكل تحدياً لخزنها أو التخلص منها أو يمكن أن تؤثر سلباً على المرافق.

ومن أجل تحقيق المواءمة بين خصائص شكل النفايات، وقدرات المرفق ومعايير قبول النفايات، يتعيّن أن تكون معايير القبول مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بمتطلبات استراتيجية الأمان ونتائج تقييم أمان مرفق التخلص من النفايات بحيث يتم اختيار جميع خطوات التمهيد للتخلص من النفايات (السابقة لها) وتنفيذها على نحو لا يؤثر تأثيراً ضاراً على خزن النفايات أو التخلص منها. وأسفر الحادثان اللذان وقعا في تشرنوبل وفوكوشيما دايتشي عن ظهور أشكال وأحجام من النفايات وانتشارها جغرافياً بشكل لم يكن متوقعاً من قبل. وكانت الظروف الفعلية تتجاوز بكثير أي اعتبارات مسبقة للحوادث المحتملة وعواقبها. وأدى عدم التخطيط المسبق لإجراءات التصدي ذات الصلة إلى أن تكون أنشطة التصدي الفعلية ذات طابع تفاعلي أكبر، وكما نوقش في موضع آخر من هذا المنشور، ربما تكون أنشطة التصدي بدائية أكثر مما يمكن أن يحدث في حالة الأخذ بنهج مخطط له مسبقاً. ويُشكل الوعي بأن متطلبات نفايات الحوادث يمكن، بل ومن المرجح، أن تتجاوز الإمكانات القائمة في مجال خزن النفايات والتخلص منها، خطوة متأصلة في سيناريوهات التخطيط المسبق.

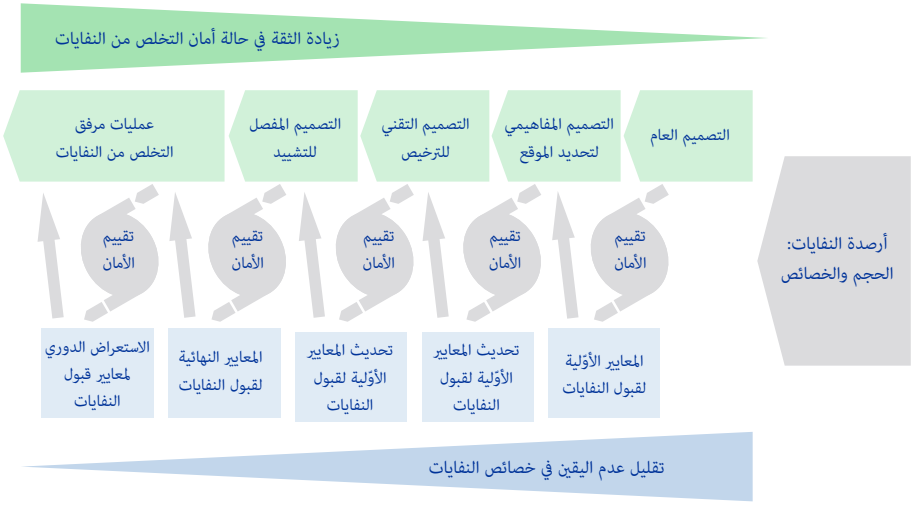
وعند تحديد المرافق المناسبة للتخلص من النفايات، من المسلّم به أن الحالة الراهنة في كثير من الدول الأعضاء تتمثل في أن تطوير مرافق للتخلص من النفايات الناتجة عن محطات القوى النووية يمضي بخطى بطيئة، وأن أنواع المستودعات التي يمكن أن تكون ضرورية لنفايات الحوادث غير متوافرة. وينطبق ذلك بصفة خاصة على مرافق التخلص الجيولوجي من النفايات. وحتى في حالة وجود المرافق، من المرجح أن يكون من الصعب استيعاب تيارات النفايات ذات الحجم الكبير وغير النموذجي والمعقدة والناجمة عن الحادث. وذلك بسبب مشاكل المساحة أو

عدم التوافق مع ما هو قائم بالفعل من معايير لقبول النفايات في المرافق أو عدم التوافق مع المتطلبات الأخرى التي تُشكل نظام إدارة المتطلبات (المنفصل) بالنسبة للمرفق القائم. ومن المرجح أن يصبح إنشاء مرافق جديدة للتخلص من النفايات، موضوعياً في موقع الحادث وضمن الإطار الوطني القائم للتصرف في النفايات، تحدياً كبيراً. وعندما تكون هناك حاجة إلى قدرات جديدة لخزن النفايات أو التخلص منها في موقع الحادث أو بالقرب منه، قد تكون المعلومات ذات الصلة التي تُستمد من المرافق القائمة للتخلص من النفايات (على سبيل المثال، المتعلقة بالنفايات المماثلة، وفي البيئات الجيولوجية المماثلة أو التضاريس أو الظروف المناخية المماثلة أو على المستوى الوطني أو في الدول الأعضاء المجاورة) متاحة للاسترشاد بها في تصميم وتطوير مرافق النفايات ومعايير قبول النفايات في هذه المرافق.

ويتطلب الطابع الاستثنائي لتيارات النفايات الناتجة عن الحوادث المبيّنة في تذييلات هذا المنشور وأحجامها وخصائصها الإشعاعية إجراء تخطيط مسبق لخيارات وإمكانات خزن النفايات والتخلص منها الممكنة على المستوى الوطني والمحلي. ويمكن لجهود التخطيط المسبق أن تأخذ في الاعتبار مجموعة واسعة من السيناريوهات، وستكون ذات قيمة في تشكيل الإطار الأوّلي للتصرف في النفايات. وإذا لم يتم إجراء تخطيط مسبق، أو إذا لم يتم تنفيذه بالقدر الكافي من التفاصيل، فإن التصرف في النفايات من حيث معايير القبول التي لا تنطبق إلّا جزئياً أو التي لم تُحدد بعد، يمكن أن ينطوي على مشاكل عملية كبيرة.

ومن المهم التأكد من أن جميع الأطراف المشاركة في وضع معايير قبول النفايات والموافقة عليها تُدرك تماماً الحدود والشروط لهذه الحالة غير المخطط لها، وتُعدّل نُهجها بناءً على ذلك لكي تقبل الأخذ بنهج قائم على المخاطر لا يقوّض الأمان على المدى الطويل. ومن شأن التحديد المناسب للخصائص أن يُسهّل اتباع نهج سليم قائم على المخاطر لفصل النفايات وخزنها ومعالجتها والتخلص منها في نهاية المطاف. وقد يكون هذا النهج القائم على المخاطر أكثر شفافية وفائدة للرقابيين وأصحاب المصلحة، ويمكن أن يُسهّل التصرف في النفايات بشكل أكثر فعالية من حيث التكلفة. وكنهج أوّلي، يمكن إجراء المحاولة الأولى لفصل مواد النفايات بعد وقوع الحادث بناءً على معدلات الجرعات والخصائص الفيزيائية وأنواع المواد. ويمكن بعد ذلك إجراء تحديد أكثر تفصيلاً للخصائص وفقاً للمتطلبات والشروط الخاصة بالمرافق التي ستكون متاحة لمعالجة النفايات أو خزنها أو التخلص منها.

ويمكن الوصول إلى المستوى الأمثل في العديد من خطوات التمهيد للتخلص من النفايات لضمان التخلص منها بأكبر قدر من الفعالية في المرافق المناسبة. ويمكن تطوير خطوات مختلفة للتمهيد للتخلص من النفايات ووضع معايير قبول النفايات، مع وضع هذا الهدف في الاعتبار. ومع ذلك، قد تكون هناك حالات لا يمكن فيها تلبية معايير قبول التخلص من النفايات في مرفق بعينه (على سبيل المثال، مرفق قريب من سطح الأرض) بسبب النويدات المشعة الطويلة العمر أو العناصر السامة كيميائياً في خليط النفايات، أو لأسباب أخرى. ويمكن أن يؤدي ذلك إلى تعقيد



الشكل-5- مثال على نهج تكراري لتطوير التصميم وتقييم الأمان ووضع معايير قبول النفايات.

أو زيادة تكلفة خطوات المعالجة المسبقة بصورة كبيرة. وينبغي أن يؤخذ في الاعتبار الوضع الاحتياطي الذي يشمل خزناً طويل الأجل وتحديد مرفق التخلص الجيولوجي من تلك الأنواع من النفايات وتحديد مكانه.

وفي ما يتعلق بالمرافق الجديدة، يُمثل وضع معايير قبول النفايات عملية تكرارية ترتبط ارتباطاً وثيقاً بتصميم المرافق (المعالجة والتكييف والخزن والتخلص) وتقييم أمانها وترخيصها، على النحو المبيّن في الشكل-5، حيث عدد التكرارات لأغراض توضيحية بناءً على نُهج التصميم العامة لمستودعات النفايات المشعة [26].

3-2-2-1- معايير قبول النفايات في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية

عندما وقع حادث ثري مايل آيلند، لم تكن تصنيفات النفايات موجودة لجميع النفايات الصلبة الناتجة عن تنظيف محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. ووفقاً للوائح التي كانت متبعة في الولايات المتحدة [29]، كانت النفايات الضعيفة الإشعاع تُصنف ضمن الفئة 'ألف' والفئة 'باء' والفئة 'جيم'، بناءً على مستويات النشاط الإشعاعي، ويمكن التخلص من نفايات الفئات 'ألف' و'باء' و'جيم' في المرافق التجارية. وكان من المعروف أن بعض النفايات تجاوزت حدود الدفن التجاري في الولايات المتحدة (أكبر من الفئة 'جيم')، ولذلك لا يمكن التخلص منها باستخدام مواقع الدفن التجارية القائمة. وأُجري تقييم برنامجي لبيان الأثر البيئي وتم التوصل إلى اتفاق

بين الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة لكي تقبل وزارة الطاقة هذه النفايات لأغراض البحث والتطوير من أجل تقييم تقنيات المعالجة ونُظم الخزن وغيرها. [30]. وأصبح هذا الجزء من برنامج التنظيف، الذي يُعرف باسم 'برنامج شحن النفايات غير العادية'، يُشكل عنصراً حيوياً في جهود التنظيف

3-2-2-2- معايير قبول النفايات في محطة تشرنوبل للقوى النووية

أنشئت منطقة محظورة بعد حادث تشرنوبل بسبب تلوث منطقة كبيرة بالنويدات المشعة الطويلة العمر التي تنبعث منها أشعة ألفا والتي لا يمكن علاجها حالياً باستخدام تدابير فعالة من حيث التكلفة. واتُخذ قرار باستخدام المنطقة المحظورة لإنشاء جميع المرافق القريبة من سطح الأرض للتخلص من جميع تيارات النفايات الناتجة عن المرافق النووية وعن استخدام التطبيقات النووية في جميع أنحاء البلد، وكذلك مرافق الخزن الطويل الأجل للنفايات التي تحتاج إلى الانتظار لحين إعداد مستودع جيولوجي. وتتطلب الخطة المرجعية معايير للتخلص من النفايات في المرافق القريبة من سطح الأرض للتأكد من إمكانية إزالة التحكم الرقابي من موقع التخلص من النفايات بعد 200 عام من التشغيل و300 عام من الرصد في مرحلة ما بعد الإغلاق. ومن المفترض أيضاً إزالة النفايات من جميع مرافق الخزن الجديدة أو الموجودة في ما يتعلق بالنفايات القوية الإشعاع أو النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع ذات النويدات المشعة الطويلة العمر إلى مستودع جيولوجي مناسب خلال فترة التشغيل. ويمكن باستخدام هذا النهج أن تكون معايير قبول النفايات الخاصة بمرافق الخزن القريبة من سطح الأرض صارمة، بغض النظر عن أن المرافق القريبة من سطح الأرض للتخلص من النفايات تقع في المنطقة المحظورة، وسيتعيّن الحفاظ عليها بشكل أو بآخر لأجل غير مسمى. وإذا استمر هذا الحظر لمدة طويلة، فإن الجدول الزمني المحدد لرفع التحكم الرقابي عن المرافق القريبة من سطح الأرض قد يتم تمديده. ويمكن للوقت الإضافي للتحكم الرقابي، في ضوء الأعمار النصفية للمواد المشعة، أن يتيح زيادة تحميل النفايات في عبوات النفايات المكيّفة، مما يُقلل بشكل كبير من تكلفة التخلص من النفايات والحفاظ على اعتبارات الأمان.

3-2-2-3- معايير قبول النفايات في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية

لتقييم المفاهيم المحتملة للتخلص من النفايات في الموقع، يمكن لتقييمات الأمان الحالية في العديد من أنواع النفايات أن توفّر مدخلات في المسارات المحتملة للتخلص من النفايات في المستقبل (أي بالقرب من سطح الأرض، أو التخلص منها في عمق متوسط أو التخلص الجيولوجي العميق). ومع ذلك، في المرحلة المبكرة من التصرف في النفايات، وإدراكاً

لأوجه عدم اليقين المرتبطة بوضع معايير قبول النفايات لأغراض التخلص منها في المستقبل، يُستصوب وضع إجراءات روتينية لأخذ العينات أثناء جمع النفايات ومعالجتها. ويمكن أن توفّر هذه العينات إمكانية تحديد الخصائص المفصلة في المستقبل، حسب الحاجة، لدعم قرارات التخلص من النفايات. وستُتخذ قرارات التخلص من النفايات السائبة الناتجة عن أنشطة التفكيك في وقت لاحق

وهناك العديد من المعايير المتعلقة بخزن النفايات الملوثة خارج الموقع وتقييم التخلص منها في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. وحُددت مستويات إشعاعية قدرها 000 8 بكريل/كغ عند النظر في الجرعة الإشعاعية للعاملين في مواقع التخلص من النفايات (أي أقل من 1 مليسيفرت/سنة) بينما حُددت جرعة إشعاعية قدرها 000 100 بكريل/كغ عند النظر في الجرعة الإشعاعية للمقيمين بالقرب من مواقع التخلص من النفايات (أي أقل من 10 ميكروسيفرت/سنة).

وتُعرَّف النفايات الملوثة التي تزيد على 000 8 بكريل/كغ، بخلاف النفايات الملوثة الناتجة عن أنشطة إزالة التلوث، بأنها 'نفايات معيّنة'. وفي محافظة فوكوشيما، ستُرسل النفايات الناتجة عن أنشطة إزالة التلوث والنفايات المعيّنة التي تزيد على 000 100 بكريل/كغ إلى مرفق خزن مؤقت لحين التخلص منها مستقبلاً في مستودع هندسي مناسب. وسيجري التخلص من النفايات المعيّنة التي تقل عن 000 100 بكريل/كغ في مواقع التخلص من النفايات الحالية الخاضعة للرقابة باتباع الإجراءات المحددة بموجب قانون التدابير الخاصة المتعلقة بالتعامل مع تلوث البيئة بالمواد المشعة

وخارج محافظة فوكوشيما، من المقرر التخلص من النفايات المعيّنة في مستودعات هندسية مناسبة وتخضع لرقابة وزارة البيئة. وما زال التخلص من النفايات الناتجة عن إزالة التلوث خارج محافظة فوكوشيما قيد المناقشة. ويمكن التخلص من جميع النفايات التي تحتوي على أقل من 000 8 بكريل/كغ، باستثناء النفايات الناتجة عن إزالة التلوث، في مواقع التخلص الخاضعة للرقابة الحالية جنباً إلى جنب مع النفايات التقليدية الأخرى.

وفي ما يتعلق بالنفايات التي تحتوي على السيزيوم المشع القابل للذوبان في الماء، يلزم إيلاء عناية خاصة لمنع الذوبان السريع، وهو ما يتحقق من خلال تغطيته بتربة غير ملوثة. ويُحدد القانون طرق التخلص من النفايات الملوثة والسيطرة عليها، بما في ذلك النفايات المعيّنة والنفايات التي تحتوي على أقل من 000 8 بكريل/كغ.

ويمكن الرجوع إلى مزيد من الإرشادات حول وضع معايير قبول النفايات في منشورات أخرى، مثل المرجع [31]

3-2-3- معايير الإطلاق الحر ورفع الرقابة وإعادة التدوير

سيكون للكميات الكبيرة من مواد النفايات المتولدة أثناء حادث نووي مستويات تلوث ضئيلة إلى أدنى حد. ومع الرصد الكافي، يمكن أن يكون من المناسب إطلاقها أو إعادة تدويرها لأغراض أخرى، بدلاً من التصرف فيها باستمرار كنفايات مشعة. وتختلف السياسات واللوائح والإجراءات المتعلقة بإطلاق هذه المواد باختلاف الدول الأعضاء، ويلزم إدراجها كمتطلبات رفيعة المستوى في نظام إدارة المتطلبات. ويمكن أن يكون إطلاق هذه المواد 'غير مشروط' (أي 'إطلاق حر' للاستخدام من دون قيود)، أو يمكن أن يكون 'مشروطاً' (على سبيل المثال، للاستخدام وفق قيود معيّنة، مثل بناء طبقات الأساس للطرق، والتخلص منها في مواقع محددة، وإعادة الاستخدام داخل قطاعات صناعية معيّنة، وما إلى ذلك). وبالإضافة إلى مستوى رفع الرقابة (الذي يبلغ في العادة 100 بكريل/كغ)، يلزم إجراء تقييم إشعاعي في كل حالة، بافتراض وجود طرق عديدة للتعرض للإشعاعات (مثل التعرض المباشر، والابتلاع، والاستنشاق، وما إلى ذلك)

وفي محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، قُيّمت المواد الملوثة للتحقق من إمكانية استخدامها في الطبقة السفلية المستخدمة في إنشاء الطرق، وسُمح باستخدام المواد التي تحتوي على أقل من 000 3 بكريل/كغ لهذا الغرض [32] . ووفقاً لهذا المبدأ التوجيهي، استخدمت محافظة مياجي الرماد السفلي الناتج عن حرق حطام التسونامي في أعمال دفن النفايات. وبالتوافق مع هذه اللائحة، أصدرت الجمعية الجيوتقنية اليابانية مبادئ توجيهية لإعادة تدوير الرماد القاعي الملوث الناتج عن عمليات الترميد [33]. وفي ما يتعلق بالمواد الأخرى، قامت وزارة البيئة بإجراء تنظيم رقابي لحدود الجرعات المختلفة [34]

وفي محطة تشرنوبل للقوى النووية، لم يستخدم الإطلاق الحر للمواد التي نتجت عن الحادث والتي كانت ملوثة بمستويات طفيفة بسبب وجود المنطقة المحظورة. ودُفنت مواد النفايات الناتجة عن إزالة التلوث داخل الموقع وخارجه وجرى توسيمها. وفي البداية، أنشئ أكثر من 000 1 خندق وتل ترابي لاحتواء المواد الملوثة التي نتجت عن حملة تصفية عواقب الحادث في الفترة من عام 1986 إلى نهاية عام 1988.

وبالإضافة إلى ذلك يُشير السجل العقاري الرسمي في أوكرانيا إلى وجود 53 مرفق خزن نفايات ناتجة عن أنشطة إزالة التلوث ومحطات إزالة التلوث الخاصة خارج المنطقة المحظورة التي استُخدمت في معظمها لإزالة التلوث من المركبات المستخدمة داخل المنطقة المحظورة أثناء حملة التصفية. وتتم أعمال الصيانة لهذه المرافق بواسطة مؤسسة 'رادون كييف'، وتقع في منطقتي كييف جيتومير، وتشرنيغوف.

وحاليًا، واستنادًا إلى نتائج التحقيق، تمت إعادة تصنيف حوالي 200 خندق داخل منطقة الحظر كمواقع نفايات غير مشعة. ويجري بذل جهد مماثل في مرافق تخزين النفايات الناتجة عن إزالة التلوث ومحطات إزالة التلوث الخاصة خارج منطقة الحظر.

وينص برنامج التصرف في النفايات المشعة في موقع محطة تشرنوبل للقوى النووية على تشغيل مرفق لإطلاق النفايات من التحكم الرقابي. وتم التعاقد على الأعمال الخاصة بهذا المرفق بموجب مشروع ممول من المفوضية الأوروبية.

وبشكل عام، تجدر الإشارة إلى أن من المتوقع أن تؤثر المشاعر العامة أو السياسية القوية على القرارات المتعلقة بمستويات رفع الرقابة عن المواد الملوثة الناتجة عن حادث كبير وإطلاقها وإعادة تدويرها. ويمكن أن تكون هذه المشاعر، التي يُشار إلى بعضها رسمياً باعتبارها متطلبات خارجية في نظام إدارة المتطلبات، متعارضة مع تنفيذ رفع الرقابة أو يمكن على الأقل أن تجعل تطبيقه مقصوراً على داخل المناطق الملوثة أو الأماكن المتضررة. ويتطلب تنفيذ عملية رفع الرقابة اشتقاق معايير الإطلاق (على سبيل المثال، الحد الأقصى لتركيزات النويدات المشعة) وكذلك بروتوكولات القياس للتأكد من أن المواد أقل من هذه المستويات. وتتطلب القياسات معدات حساسة لإجراء قياس مناسب لمستويات الإشعاع المنخفضة جداً. ويرد في القسم 7 مزيد من الإرشادات بشأن تقنيات القياس المستخدمة في رفع الرقابة. ويمكن الرجوع إلى مزيد من الإرشادات حول الإطلاق الحر ورفع الرقابة وإعادة التدوير في منشورات أخرى، مثل المراجع [35–37]

3-2-4- متطلبات التصريفات

يمكن التخلص من بعض تيارات النفايات السائلة أو الغازية المعالجة أو غير المعالجة عن طريق التصريف في البيئة، بما يتوافق مع اللوائح الوطنية وضمن حدود التصريفات المصرح بها، والتي ستُشكل متطلبات محددة رفيعة المستوى في نظام إدارة المتطلبات [38، 39]. ويُعد فهم حدود التصريف ضرورياً لتوجيه اختيار تكنولوجيا المعالجة وعملياتها، ولتحديد قرارات الأخذ بالتكنولوجيات المرشحة أو عدم الأخذ بها. وقد يكون من الضروري أن تعمل الوكالة المنفذة مع الهيئات الرقابية في ما يتعلق بالاتفاق على تحليل المسارات الخاصة بكل حالة على حدة، مع إيلاء المراعاة دائماً لنية لوائح الأمان والمشاعر العامة. وعلى سبيل المثال، يمكن أن تتطلب التركيزات المنخفضة جداً من التريتيوم التي لا يمكن إزالتها من المجاري المائية مرونة في قرارات التخلص من النفايات لتيسير إدارة أنشطة التصرف الفعالة من حيث التكلفة.

ونتيجة لحادث مفاعلي وندسكيل، كان الخطر المرتبط بإطلاق نواتج الانشطار في البيئة الأوسع معروفاً. وفي حين أن مخاطر الاستنشاق والإشعاع الخارجي تبدو محدودة، كشفت قياسات محتوى اليود في الحليب المنتج محلياً عن شواغل أكثر إلحاحاً في حاجة إلى اتخاذ تدابير طارئة. ونتيجة لذلك، فُرضت قيود على جمع الحليب وتوزيعه في مساحة 500 كم^2 حول الموقع. واستُخدمت بواليع مياه الصرف الصحي للتخلص من الحليب لتجنب ابتلاعه مع ضمان تخفيفه بالقدر المناسب في البيئة.

وأُجري فحص لتدابير الطوارئ المعتمدة لدى السلطات المحلية (كمبرلاند سابقاً، وكمبريا حالياً) للتأكد من فعاليتها بعد الحدث. وتمثلت إحدى مواطن الضعف الأساسية التي حُددت بسهولة في عدم نشر معلومات آنذاك عن المستوى 'المأمون' لليود-131 في الحليب. ونتيجة لذلك، طُبق نهج حذر للغاية وحُظر بموجبه استهلاك الحليب في مساحة كبيرة نسبياً. وكان من الواضح أيضاً أن الوقت بين الحادث وبدء برنامج أخذ عينات الحليب كان أطول مما كان سيحدث لو تم التخطيط لإجراءات وموارد فعالة قبل وقوع الحادث. وعقب وقوع الحادثة، صدرت بعض الانتقادات لعدم تحديد منطقة أكبر لعدم توخي مزيد من الحذر منذ البداية. تم تقليص المساحة بعد ذلك نظراً لأن ذلك هو النهج الأكثر قبولاً من الناحية النفسية. وذكرت هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة أنها ستُقدم تعويضات عن الحليب الذي تم التخلص منه [40].

وينبغي أن تُعبِّر طبيعة التصرف في النفايات في إطار التصدي لحادث ينطوي على إطلاق مواد مشعة في البيئة عن نطاق الحدث (على سبيل المثال، السبب، ونوع المرفق، وحجم المنطقة المتضررة، وما إلى ذلك)، بالإضافة إلى شدة الحدث (على سبيل المثال الكتلة والنشاط والعمر النصفي ومعدل إطلاق النويدات المشعة وانتشارها في البيئة وقربها من المراكز السكانية وضعف النُظم الإيكولوجية). وستُقيّم أيضاً شدة الحادث من خلال أي آثار غير إشعاعية مرتبطة به. ويُعد المقياس الدولي للأحداث النووية والإشعاعية أداة مفيدة لتوضيح أهمية الأمان في الحوادث النووية أو الإشعاعية أو الحوادث التي تنطوي على إطلاق مواد مشعة في البيئة. وهذا المقياس لوغاريتمي يبدأ من المستوى 1 (أقل أثر) إلى المستوى 7 (أعلى أثر).

ومن الواضح أن نهج التصرف في النفايات التي تنتج عن حادث يتعيّن أن يكون متناسباً مع شدة الحادث ونطاقه. وفي ما يتعلق بالأحداث ذات الأثر المنخفض نسبياً والتي تنطوي على خطر إشعاعي محدود في حالات الاحتواء، يمكن بسهولة جمع المواد المشعة وخزنها في حاويات بسيطة أثناء انتظار الاضمحلال أو الخزن الطويل الأجل أو طريق للتخلص منها. وعلى الطرف الآخر من الطيف، من المرجح أن يشمل الاحتجاز والتثبيت والاحتواء في حالات النويدات المشعة القوية الإشعاع أو الوقود النووي التالف طرقاً عن بُعد أو آلية للحد من التعرض وجمع النويدات المشعة المنطلقة، وطرق تكييف متطورة للسماح بالخزن المأمون والآمن لحين اتخاذ قرارات أخرى. وفي ما يتعلق بحالة التصرف في النفايات، ينبغي أن تُراعى في النهج المعتمد مجموعة واسعة من العوامل الإشعاعية واللوجستية، ليس أقلها حجم النفايات وتركيز نشاطها، والخصائص الفيزيائية والكيميائية للنفايات والموارد المتاحة لتنفيذ الحلول.

ونظراً لطبيعة الحادث الذي وقع في مفاعلي وندسكيل، جُمعت النفايات الصلبة الناتجة عن الحادث في الموقع، وعلى الرغم من وجود معدلات توليد أكبر من المعتاد، فإنها لم تكن تطغى على البنية الأساسية القائمة. وجرى التخلص من هذه النفايات في المرافق القائمة أو احتُفظ بها في حالة مأمونة داخل هيكل تطويق المفاعل.

وضُخ ما يقرب من 7000 م^3 من المياه إلى المفاعل أثناء الحادث. ودخلت هذه المياه أساساً إلى حوض تبريد المفاعل، وفاض جزء منها إلى قنوات الهواء. وتم بعد ذلك تصريف المياه من حوض تبريد المفاعل إلى البحر (حوالي 1,1 م^3 × 10^5 م^3) والمياه من قنوات الهواء إلى نظام الصرف السطحي. وبحلول الوقت الذي تم فيه تصريف المياه إلى البحر، على مدار شهر، انخفض النشاط الإشعاعي للمياه بصورة ملحوظة بسبب الاضمحلال الإشعاعي [41]

وكمثال آخر، كانت الإطلاقات التي حدثت على الفور بسبب الحادث الذي وقع في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية مقتصرة إلى حد كبير على الغاز الخامل لنواتج الانشطار (غاز الكربتون) الذي انطلق أساساً في المبرّد بسبب تلف قلب المفاعل. وبعد ذلك قامت نُظم المحطة باستخراج هذه الغازات من المبرِّد بكميات كبيرة. وأدّت هذه العملية إلى إطلاقات غير مقصودة من خلال مدخنة المحطة نتيجة لتنشيط صمامات التنفيس. وحتى مع الأخذ في الاعتبار الظروف الجوية المستقرة التي كانت سائدة طيلة معظم فترة الإطلاق، كانت الجرعات القصوى المحسوبة التي تلقاها الجمهور خارج الموقع هي جرعات 'غامرة' صغيرة جداً بلغت نحو 10 ميكروسيفرت. وأثناء مراحل التصدي الأوّلية والتعافي من الحادث، لم يحدث أي تعرض لانطلاق جسيمات مشعة كبيرة أو تصريف نفايات مشعة صلبة أو سائلة خارج الموقع [42]

وفي محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، شكل التخلص من المياه بعد المعالجة تحدياً كبيراً بسبب تركيزات التريتيوم المتبقية. وكانت تركيزات التريتيوم منخفضة بدرجة كافية بحيث يؤدي التصريف المباشر في البيئة إلى تخفيفه إلى مستويات أقل بكثير من حدود التنظيم الرقابي. ومع ذلك، ونظراً للحساسيات السياسية وعدم القبول العام، اتُخذ قرار لاعتماد طريقة التبخير للتخلص من تلك التركيزات [2]. ونشأت مشاكل مستمرة مماثلة متعلقة بتصريف المياه في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، إذ خُزِّنت كميات كبيرة من المياه المعالجة بسبب التريتيوم المتبقي.

3-2-5- متطلبات الترخيص والتنظيم الرقابي لجميع الأنشطة والمرافق المعنية

في نظام التصرف في النفايات، من المهم التعرف على اللوائح القائمة لمتطلبات الترخيص وإدماجها في نظام إدارة المتطلبات. ويُعد إنشاء علاقة عمل مع الهيئات الرقابية وأصحاب المصلحة مهماً لبلورة فهم مشترك لهذه المتطلبات. ويمكن أن تُسهِّل المعايير واللوائح والمبادئ التوجيهية الدولية المعمول بها – بما في ذلك المراجع [13–20، 35–39، 43–49] – عملية الترخيص، ويمكن أن توفِّر معلومات قيّمة لدعم المناقشات المتعلقة بالتنظيم الرقابي. ويمكن أن تتطلب الطبيعة الفريدة للنفايات بعد وقوع حادث اهتماماً خاصاً من الهيئات الرقابية. وعلى سبيل المثال، كان أحد العناصر المهمة في جهود تنظيف محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية هو برنامج النفايات غير العادية [1]. وفي إطار هذا البرنامج، وافقت وزارة الطاقة في الولايات

المتحدة على قبول بعض النفايات التي تجاوزت حدود الدفن التجاري. وأتاح ذلك حلاً للتخلص من العديد من تيارات النفايات (مثل وسائط معالجة المياه بالزيوليت) التي لم يكن من الممكن توفيرها بموجب اللوائح القائمة. ويوضح ذلك العلاقة التعاونية التي تأسست بين المشغّل التجاري لمحطة القوى النووية والحكومة الفيدرالية لتوفير نهج عقلاني لحل المشكلة الصعبة الناتجة عن التصرف في النفايات.

3-2-6- مراقبة التكاليف واتخاذ القرارات المتعلقة بالميزانية

ونظراً للكميات الكبيرة والتعقيدات المرتبطة بالنفايات الناتجة عن حادث نووي، يمكن أن تكون تكاليف التصرف في النفايات مرتفعة بصورة استثنائية. ويتعيّن النظر في آليات الحصول على التمويل الكافي وتحسين الإنفاق والتحكم في التكاليف بشكل شامل في نظام التصرف في النفايات، ويؤدي التخطيط المسبّق مرة أخرى دوراً مهماً في هذا السياق. ويمكن لنهج هندسة النُظم الذي نوقش من قبل في هذا القسم أن يُسهِّل تحليل الخيارات وعمليات صنع القرار، وهو نهج مفيد لمالك/مشغِّل المرفق، والممولين الحكوميين والهيئات الرقابية. وفي حين أن صانعي القرار الأساسيين هم على الأرجح الفريق التنفيذي للمرفق، يمكن أن يتأثر اتخاذ القرار و/أو تنفيذه بشكل كبير بأصحاب المصلحة الخارجيين. وسيكون تحديد متطلبات الميزانية والإنفاق المناسبة ضمن نظام إدارة المتطلبات مسألة حساسة يمكن معالجتها بفعالية من خلال عمليات وضع سيناريوهات التخطيط المسبق.

وكجزء من إدارة التكاليف والتمويل، يمكن للفريق التنفيذي أن يُقدم تقديراً فعالاً ومتحفظاً للتكلفة، وإجراء إدارة صارمة للتكلفة والجدول الزمني، ومخصصات طوارئ/مخصصات احتياطية كافية في الميزانية. ويمكن لنهج التخطيط والمشاركة أن يبني الثقة في إدارة التكاليف واحتياجات التمويل لدى الأطراف المعنية. وعلى الرغم من تباينها بين الدول الأعضاء، فإن الأطراف المعنية تشمل في العادة وبالضرورة صانعي القرار في مجال السياسة والتمويل داخل الهيئات الحكومية، والمنظمات الرقابية المتعددة، وشركات التأمين، ودعم موارد الجهات النظيرة المالكة/المشغّلة. وعلى سبيل المثال، بعد فترة وجيزة من وقوع الحادث في الوحدة رقم 2 في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، تعاونت حكومة الولايات المتحدة في عملية التعافي من خلال توفير التمويل لمختلف جوانب إدارة النفايات، بما في ذلك خزن الركام الأساسية على المدى الطويل، وتوفير تكنولوجيا إزالة التلوث، وجمع بيانات عن تكنولوجيا قلب المفاعل. ووفر التمويل الذي اعتمد في جانب كبير منه على تقديرات تكلفة المنافع، تعويضاً للتكلفة، مما أدى إلى خفض في النفقات الإجمالية لكل من المنافع وشركات التأمين [50].

وكجزء من عملية التخطيط والميزنة، يمكن استخدام تحليلات أثر التمويل والتكلفة والعائد لدعم التخطيط والقرارات المتعلقة بالتكنولوجيا. ويتطلب التصرف في النفايات تقييماً وتخطيطاً

مسبقاً لضمان تحديد الخيار الأكثر فعالية من حيث التكلفة الذي يُلبي المتطلبات. وتشمل عملية التقييم في العادة تحديد المتطلبات والأهداف، وتحديد الخيارات وسيناريوهات التنفيذ، وتحديد معايير التقييم، وتقييم الخيارات وتحديد الخيار المفضل. ومن الضروري أيضاً استخدام أدوات التحليل المتعدد السمات لبلور فهم أفضل للبدائل المحتملة. وتشمل السمات التي يتعيّن تقييمها ما يلي

- هدف التصرف في النفايات.
- أنواع وكميات النفايات وأماكنها؛
- القدرة على مناولة أنواع النفايات المختلفة أو الجديدة؛
- المخاطر المتصلة بأمان العمال وكذلك الأمان الطويل الأجل لعبوات النفايات التي من المهم التخلص منها؛
- الوقت اللازم للتنفيذ؛
- التكاليف المرتبطة بالبدائل المقترحة.

ويتيح إدراج إجراءات رسمية للتحكم في التغيير ضمن نهج هندسة النُظم تحديد الخيارات وتقييمها من أجل التكيُّف مثلا مع إدخال تيارات النفايات الجديدة المنطوية على مشاكل أو التغييرات الأخرى. وينتج عن ذلك قرار يمكن تبريره بناءً على عملية سليمة لاتخاذ القرارات. ويمكن الرجوع إلى مزيد من المعلومات والإرشادات بشأن تطبيق عملية اتخاذ القرار المتعددة السمات لتحديد خيارات التصرف في النفايات في موضع آخر، مثل المرجع [51].

3-2-7- خيارات التقليل إلى أدنى حد من النفايات

على غرار جميع نُظم التصرف في النفايات، يُعد التقليل إلى أدنى حد من النفايات مكوناً مهماً في التصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث. وتكون كمية ونوع النفايات المتولدة أثناء أنشطة التنفيذ والمعالجة مرهونة بالنويدات المشعة وتركيزاتها، ودرجة انتشار التلوث والحالة النهائية للموقع المختار وخيارات التخلص من النفايات [52]. وتعتمد درجة انتشار التلوث أساساً على طبيعة الحادث والظروف البيئية السائدة وقت وقوعه (الرياح والأمطار وتدفقات المياه السطحية وغيرها). وتخرج هذه الشروط المحددة عن سيطرة أي منظمة مسؤولة عن التشغيل أو إدارة الحادث. ومع ذلك، يوصى بدراسة سيناريو واحد أو أكثر غير محتاط له في التصميم، مع التركيز على الظروف البيئية الأكثر تطرفاً في موقع معيّن من أجل النظر بصورة أفضل في العواقب المحتملة لمثل هذا الحادث والاستعداد لها (على غرار ما تُشير إليه التجارب المكتسبة من محطتي القوى النووية في تشرنوبل وفوكوشيما دايتشي). وقد يكون من المهم النظر في

هذه الدراسات والتحليلات الإضافية للعواقب المحتملة من أجل إدماجها في حالة أمان التشغيل أو المواقع الجديدة. ولا يؤدي الفهم الأفضل للعواقب ذات الاحتمالية المنخفضة جداً تلقائياً إلى وضع شروط حدية جديدة أو مجموعة جديدة من الحواجز الهندسية، ولكنه يُساعد على الاستعداد بصورة أفضل للتعامل مع عواقب الحوادث، بما في ذلك التصرف في النفايات الناتجة عنها

وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تُساهم عمليات الإجلاء الواسعة النطاق أيضاً في انتشار التلوث بشكل لا يمكن السيطرة عليه (على سبيل المثال، عن طريق تحركات المركبات، والممتلكات الشخصية الملوثة، وما إلى ذلك). وتقع مسؤولية السيطرة على انتشار التلوث على عاتق المنظمة المسؤولة عن إدارة التصدي للحوادث، على الرغم من أنها قد لا تُشكل أولويتها العليا (وهي الصحة والأمان المباشرين للأشخاص المتضررين).

وأحد الجوانب التي غالباً ما يتم إهمالها في التقليل إلى أدنى حد من النفايات هو الحاجة في نهاية المطاف إلى إخراج مرافق الخزن والمناولة المصممة للنفايات الناتجة عن الحوادث من الخدمة. وفي نهاية عمرها التشغيلي، ستصبح كل منشأة بحد ذاتها نفايات. ولذلك من الضروري التخطيط بعناية لعدد وطبيعة المرافق التي يتم إنشاؤها، والعمل قدر الإمكان على تحسينها من حيث التخلص من النفايات. وعلاوة على ذلك، من المهم، حيثما كان ذلك عملياً، أن يكون عدد المرافق والمعدات الموجودة في المرافق وأنواعها متسقاً مع متطلبات الأمان وحماية البيئة المعمول بها. وينبغي تجنب الجداول الزمنية والمواعيد النهائية كعوامل محركة، ما لم يكن ذلك مدفوعاً بالحاجة إلى تحقيق الوقاية للعمال أو الجمهور.

ويستصوب أن تُراعى في تصميم أي مرافق جديدة سهولة إزالة التلوث والتقليل من النفايات الثانوية إلى أدنى حد. ويلزم إجراء دراسة وتوثيق دقيقين للظروف الإشعاعية الرئيسية، مع توسيع متطلبات حفظ السجلات خلال مرحلة العمليات من أجل دعم الإخراج من الخدمة وإزالة التلوث. ويمكن أن تشمل هذه السجلات استقصاءات روتينية لمناطق التشغيل؛ واستقصاءات دورية، وأخذ عينات من القواديس والصهاريج والحاويات التي على مستويات عالية من السلامة، وما إلى ذلك؛ وسجلات الانسكابات وحالات الانطلاق غير المقصودة والتلوث خارج المناطق العادية الخاضعة لمراقبة إشعاعية؛ والسجلات المماثلة لكل من التلوث الإشعاعي العادي والشاذ.

3-2-8- إدارة السجلات والبيانات

سيكون من الضروري إنشاء نظام لإدارة السجلات في مرحلة مبكرة لدعم جهود التصرف في النفايات. وقد تكون السجلات المتعلقة بالنفايات مطلوبة لعدة عقود من الزمن، ولذلك ينبغي أن يُراعى في نظام إدارة السجلات تدهور السجلات المادية أو تقادم النُظم الرقمية [53].

ويمكن أن تكون السجلات التشغيلية التي توضح الظروف في الموقع وبالقرب منه قبل مرحلة الحادث وأثناءها ذات قيمة في عمليات تقييم خصائص النفايات. وبالإضافة إلى ذلك،

ستكون السجلات المحفوظة أثناء مرحلة التنظيف مطلوبة لفهم ظروف الموقع المتغيرة ودعم التنبؤ بالنفايات. ويلزم إجراء تحديد لخصائص تيارات النفايات من أجل تحديد المتطلبات من حيث إمكانات المعالجة وخزن النفايات والتخلص منها في نهاية المطاف. وتُعد الإدارة الفعالة لبيانات الخصائص بالغة الأهمية لدعم إجراء تحديد دقيق لمتطلبات معالجة النفايات وخزنها والتخلص منها في المستقبل نتيجة لتغيُّر ظروف الموقع. وينبغي أن تأخذ التنبؤات الخاصة بالنفايات في الاعتبار ما هو قائم من نفايات، بالإضافة إلى النفايات الجديدة التي ستتولد أثناء الأنشطة التي سيجري الاضطلاع بها في المستقبل، والنفايات الثانوية الناتجة عن الأنشطة المقررة لاسترداد النفايات ومعالجتها/تجهيزها للمعالجة.

ومن الدروس المهمة المستفادة من حادث ثري مايل آيلند ضرورة إدارة البيانات والسجلات منذ بداية الحادث [2]. وفي البداية، كانت إجراءات التصدي لحالات الطوارئ تفرض أنشطة العمل، مع القليل من التركيز على تقييم ظروف المحطة وتوثيقها. وبمجرد وصول المحطة إلى حالة الاستقرار، كان التركيز يتحول نحو التنظيف، مما أدى إلى السعي في نهاية المطاف إلى التزوُّد بالوقود بأسرع الطرق الممكنة. وأكدت الدروس المستفادة أن الحصول على البيانات وتفسيرها أمر حيوي لاتخاذ القرارات. ولذلك، كان أحد الدروس الرئيسية المستفادة الحاجة إلى مركزية وظائف جمع البيانات وإدارتها وتحليلها. وعلاوة على ذلك، فإن التحكم في كيفية جمع البيانات ضروري لضمان اتساق البيانات وجودتها وشمولها إلى أقصى حد. وكانت الملاحظة المهمة الأخرى هي الحاجة إلى بلورة فهم شامل للأهداف المتعلقة بتحليلات العينات، بما في ذلك فهم القدرات التحليلية التي ستُستخدم (وقيود تلك القدرات) وضمان وضوح عرض البيانات (مثل الوحدات).

وبات معروفاً أيضاً أن إدارة البيانات كانت مهمة في حالة محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. ويرد وصف للتفاصيل في المبادئ التوجيهية لبرنامج النقل التجريبي. وطورت شركات البناء العامة اليابانية التي شاركت في عملية التنظيف نُظماً جديدة لإدارة البيانات.

ويمكن الرجوع إلى مزيد من الإرشادات بشأن السجلات المتعلقة بالنفايات وإدارة البيانات في منشورات أخرى، مثل المراجع [54، 55].

3-2-9- تحديات إدارة الجودة

تُمثل الحوادث النووية تحديات كبيرة لإدارة الجودة. ويمكن للتخطيط المسبق في مجال تطوير نُظم إدارة الجودة تحسباً للمشاكل المحتملة أن يساعد في تجنب الآثار السلبية التي يمكن أن تنشأ بسبب الطبيعة المفاجئة والمعقدة والسريعة التطور لمعظم الحوادث النووية. ومن خلال تحديد مجالات المخاطر الكبيرة، يمكن وضع النُظم والعمليات في حالة استعداد قبل وقوع

أي حادث. وتشمل مجالات المخاطر ذات الصلة بالتمهيد للتخلص من النفايات ثم التخلص منها في نهاية المطاف ما يلي

- يمكن لعدم توافر معلومات كافية عن النفايات أو عن أداء المرفق إلى تأخير إنشاء مرافق جديدة للتخلص من جميع النفايات الناتجة عن الحوادث أو يمنع بصورة كبيرة إنشاءها، مما يعيق استكمال تقييمات الأمان اللازمة؛
- يمكن لعدم القدرة على توفير بيانات مقبولة للوفاء بمتطلبات معايير قبول النفايات إلى منع استلامها في مرافق المعالجة أو التخلص القائمة.
- يمكن أن يزداد تعرض العمال للمخاطر الإشعاعية وغيرها من المخاطر التي تُهدد الأمان إذا لم تكن مكونات النفايات معروفة، أو عند الجمع بين النفايات غير المتوافقة.
- يمكن لسوء مراقبة العمليات وما ينشأ عن ذلك من امتزاج النفايات الأقل تركيزاً مع النفايات الشديدة التلوث إلى الحاجة إلى التخلص من كميات كبيرة من النفايات بسبب وجود المكونات الأعلى من حيث المخاطر، وبتكلفة أكبر بكثير مما يمكن أن يكون عليه الحال في ظل ظروف مختلفة.

ويمكن أن يؤدي عدم وجود نظام مقبول لإدارة الجودة أيضاً إلى مشاكل أخرى تتعلق بالتخلص من النفايات، بما في ذلك ما يلي:

- عدم كفاية الثقة في الجوانب الهندسية والمشتريات والبناء والتشغيل في مرافق إدارة النفايات بسبب غياب أو ضعف ضمان الجودة، وهو ما يمكن أن يؤثر تأثيراً مباشراً على الدعم العام للاستراتيجية الوطنية للتخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث؛
- الاستعانة بعمال غير مؤهلين إذا كانت جودة التدريب غير كافية.

3-2-10- الهيكل التنظيمي المتاح

يلزم وجود منظمة لإعداد أنشطة التصرف في النفايات وإدارتها وتنسيقها وتنفيذها. ومن المهم أن تكون لدى المنظمة مسؤوليات محددة بوضوح، وينبغي أن تكون مساءلة أمام أصحاب المصلحة والهيئات الرقابية، وينبغي أن تكون على علاقة جيدة بفريق التصدي للحوادث. وينبغي أن يتضمن نهج حوكمة المنظمة وظائف نموذجية، مثل اتخاذ القرار الاستراتيجي وتوجيه التنفيذ وإدارة المشروع وضوابط المشروع، ولكن بالإضافة إلى ذلك، ينبغي أن تُدرج المنظمة في هيكلها أو أن تمتلك قدرة على التأثير في وظائف الصحة والأمان وتطوير التكنولوجيا والتدريب والمشتريات. ويتعيّن أن تبقى المنظمة وإجراءاتها في مجال التصدي مرنة مع ما تشهده من

تطور، وستحتاج إلى التكيُّف مع المتطلبات والظروف المتغيرة أثناء التصدي، وهو ما قد يستغرق ما يتراوح بين سنوات وعقود.

3-2-10-1- مفاعلا وندسكيل

بقيت الهياكل التنظيمية لهيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة والموقع والمجتمع المحلي (مثل الشرطة المحلية ومجلس تسويق الحليب) التي كانت قائمة في ذلك الوقت على حالها من دون تغيير طيلة حادث مفاعلي وندسكيل وأثناء مرحلة التعافي. وعلى الرغم من أن فريقاً صغيراً من ثمانية أشخاص بدأ في البداية في تفريغ المفاعل، اتسع فريق التصدي وبات يشمل العديد من الأفراد من القوة العاملة في الموقع، إلى جانب موارد متخصصة تطوعت من مواقع أخرى. وأدى التحقيق في الحادث نفسه إلى إنشاء مجلس ترخيص لجميع المفاعلات النووية المدنية المستقبلية. وفي عام 1959، تم إقرار قانون المنشآت النووية الذي أسفر عن تشكيل هيئة تفتيش المنشآت النووية داخل وزارة الطاقة. وكُلفت هذه المنظمات بأن توفِّر معاً وظائف الحوكمة والدعم المطلوبة لجميع المفاعلات المدنية.

ونُفذت أيضاً أنشطة الإخراج من الخدمة، تحت إشراف هيئة التفتيش، في المفاعلين 1 و2، ووضعت هيكلية منظمة لأطر المشروع لتنسيق جميع الأنشطة وإجراء الاتصالات والمواءمة والإدارة والمراقبة، ويكفل ذلك مواءمة ما يتحقق من تقدم مع الأهداف الاستراتيجية ووضع خطة ذات مصداقية للمشروع. وأصبح موقع سيلافيلد مملوكاً الآن للهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة، وتتولى شركة Sellafield Ltd المسؤولية عن إخراج مفاعلي وندسكيل من الخدمة. وتدعو الخطط إلى إزالة الوقود من الوحدتين بحلول عام 2030، مع استكمال عملية الإخراج الكامل من الخدمة في أربعينات القرن الحالي

3-2-10-2- محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية

تحول الهيكل التنظيمي في ثري مايل آيلند للقوى النووية من تركيزه الأوّلي على عمليات المحطة مباشرة بعد وقوع الحادث، وبات يشمل منظمات أكثر ملاءمة لأداء عمليات التنظيف والتخلص من النفايات. وفي بعض الحالات، ثبت أن هذا التغيير كان مناسباً لاحتياجات الأنشطة المطلوبة. ومع ذلك، فرض ذلك ضغوطاً على الموظفين بسبب التغييرات المتكررة في أدوارهم والحاجة إلى التكيُّف مع المنظمات الجديدة.

وأنشئت المنظمة الأولى لكي تتولى إدارة الأزمة، وساعدت بشكل جيد في تحقيق الاستقرار في المحطة بعد وقوع الحادث. وتُعبِّر التغييرات في هياكل الأقسام داخل المنظمة عن الاحتياجات الناشئة لعملية التنظيف. وتطور هذا الهيكل التكيّفي إلى منظمة موجهة نحو

المشاريع بعد أن بدأ تنفيذ أنشطة التنظيف، وتطلب ذلك تحولاً في التركيز إلى إدارة المرفق الذي عاد إلى حالة الاستقرار ولكن لحقت به أضرار كبيرة، وإدارة الحوادث والاسترداد ومخلفات أنشطة التنظيف الأوّلية. وكانت هناك تحديات تنظيمية كبيرة طيلة البرنامج الذي شارك فيه العديد من المتعهدين، وكانت الأحداث غير المخطط لها تتطلب استجابات تكيُّفية. وكانت هذه النقطة الأخيرة صحيحة بشكل خاص أثناء مرحلة التزود بالوقود، وتطلبت تكوين مجموعات عمل متشابكة في خطوطها التنظيمية لحل المسائل الناشئة.

وبحلول مطلع ثمانينات القرن الماضي، كانت غالبية الوقود قد أزيلت من الوحدة رقم 2، وجرت تعبأتها ونُقلت إلى مختبر أيداهو الوطني لخزنها. ويبقى ما يقرب من 1 في المائة من الوقود في الأجزاء التي يتعذر الوصول إليها من وعاء المفاعل. ونُقلت الوحدة رقم 2 إلى شركة FirstEnergy Corporation، ووُضعت في مخزن مأمون وحالة مستقرة في انتظار إخراجها من الخدمة في المستقبل. وتطورت منظمة الاسترداد مرة أخرى إلى منظمة أصغر كثيراً كل مهمة رصد الوحدة في نسق الخزن المستقر الطويل المدى. ونُقل ترخيص الوحدة رقم 2 في كانون الأول/ديسمبر 2020 [56] إلى متعهد لإخراجها من الخدمة. وظلت الوحدة رقم 1، المملوكة لشركة Exelon، تعمل حتى أيلول/سبتمبر 2019، عندما أُغلق المفاعل بشكل دائم. ومن المقرر وضع الوحدة رقم 1 في حالة خزن مأمون، مع تأجيل إخراجها من الخدمة، ربما حتى عام 2075.

3-2-10-3- محطة تشرنوبل للقوى النووية

أثناء حادث تشرنوبل، تولى الإشراف على تدابير الطوارئ الفورية فريق خاص من الخبراء الحكوميين تحت قيادة وحدات متخصصة من جيش الاتحاد السوفياتي السابق. وتعامل هذا النهج التنظيمي مع العواقب المباشرة للحادث، مثل مكافحة الحرائق، وتبريد بقايا المفاعل، وإجلاء السكان، ثم إنشاء المنطقة المحظورة. وبدأت أعمال التعافي من الحادث مباشرة بعد وقوعه في نيسان/أبريل 1986، وذلك تحت إشراف اللجنة الحكومية لاتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية [57]، التي واصلت أنشطتها حتى عام 1991، وتطور هيكلها التنظيمي وبات يشمل رصد وإدارة السكان المحليين والممتلكات الواسعة المتضررة من التلوث.

وأُنشئت المنطقة المحظورة بمساحة 2600 م^2 بعد فترة وجيزة من وقوع الحادث في أيار/مايو 1986، ووضعت تحت السيطرة العسكرية، وتم إجلاء السكان بسبب مستويات الإشعاع وخطر التلوث. وأعادت الحكومة تركيز جميع أنشطة أكاديمية العلوم في أوكرانيا والمؤسسات والمنظمات الحكومية الأخرى على تقديم الدعم التقني والعلمي إلى الحكومة في التصدي للحادث. وفي غضون أسبوع من وقوع الحادث، أنشأت الحكومة فريق العمليات لتنسيق مختلف جهود التصدي.

وأنشأت أكاديمية العلوم ووزارة الموارد المائية والإدارة الزراعية في أوكرانيا والوكالات المعنية الأخرى مركزاً تحليلياً في معهد علم التحكم الآلي التابع للأكاديمية الوطنية الأوكرانية للعلوم، وكُلف ذلك المركز بتقييم التلوث المحتمل على طول مجرى نهر دنيبرو. وفي خريف عام 1986، قُدمت التوقعات الأولى إلى فريق العمليات والحكومة الأوكرانية، واستمرت التوقعات المنتظمة حتى عام 1998. ومن السمات المميزة لأنشطة جميع اللجان الرسمية، وفي المقام الأول فريق العمليات الحكومي خلال تلك الفترة، التعاون الوثيق مع العلماء

ونتيجة للحادث، أنشئت لجنة متعددة التخصصات في عام 1989 من خلال الأكاديمية الأوكرانية للعلوم، وكُلفت بتعزيز مشاريع القوانين المتعلقة بتحقيق الوقاية للسكان. وتولى وضع المبادئ الأساسية للقوانين باحثون من أوكرانيا بالاشتراك مع زملاء من بيلاروس والاتحاد الروسي. وكان هذا العمل بمثابة الأساس الذي استند إليه البرلمان الأوكراني (فرخوفنا رادا) في اعتماد قوانين أكثر تجاوباً، ووثائق قانونية رقابية خففت بشكل كبير من الضغوط الاجتماعية والاقتصادية بين العاملين في مجال الإنعاش والسكان المتضررين.

ويُعهد حالياً إلى الوكالة الحكومية الأوكرانية لإدارة المناطق المحظورة، باعتبارها جزءاً من وزارة البيئة والموارد الطبيعية، بتنفيذ السياسة الحكومية للتصرف في النفايات المشعة، بما في ذلك إدارة مواقع خزن النفايات المشعة والتخلص منها على الأجل الطويل. ولأداء وظائفها، تعمل الوكالة الحكومية الأوكرانية لإدارة المناطق المحظورة مع مؤسسات التصرف في النفايات المشعة المتخصصة المملوكة للدولة في محطة تشرنوبل للقوى النووية المسؤولة عن الإخراج من الخدمة للوحدات من 1 إلى 3، وتحويل هيكل الساتر إلى نظام مأمون بيئياً. وامتثالاً لسياسة الدولة، تتولى الجهات التي تولّد نفايات المسؤولية عن التصرف في النفايات قبل نقلها إلى مؤسسات متخصصة في التصرف في النفايات المشعة. ويحظر القانون على الجهات التي تولّد نفايات أن تتخلص من النفايات المشعة.

3-2-10-4- محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

كانت محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية عندما وقع الحادث مملوكة ومدارة من قِبل شركة طوكيو للطاقة الكهربائية تحت الإشراف الرقابي لوكالة الأمان النووي والصناعي، وهي منظمة خاصة ملحقة بوكالة الموارد الطبيعية والطاقة التابعة لوزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة. وكان من بين الأدوار التي اضطلعت بها وكالة الموارد الطبيعية والطاقة الترويج للطاقة النووية. وتتمتع لجنة الأمان النووي التابعة لمجلس الوزراء الياباني بسلطة استعراض الأعمال التي تُجريها الوكالات الرقابية، مثل وكالة الأمان النووي والصناعي.

وفي أعقاب الزلزال مباشرة، أنشأت الحكومة المقر العام للتصدي للطوارئ النووية، الذي أصدر أوامر الإجلاء الضرورية. وأنشأت الوكالة أيضاً مركزها للتصدي للطوارئ الذي يتألف من

الوزارات المعنية، بما فيها قوات الدفاع الذاتي اليابانية وغيرها من المنظمات ذات الصلة، مثل المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية (التي قدمت الدعم التقني إلى وكالة الأمان النووي والصناعي)، والوكالة اليابانية للطاقة الذرية (المنظمة المعنية بالبحث والتطوير)، وما إلى ذلك، وبدأت في جمع المعلومات عن المفاعلات في المنطقة المتضررة.

وبعد إجراء استعراض كامل للوائح الأمان في أعقاب حادث فوكوشيما دايتشي، أنشئت الهيئة الرقابية النووية كوكالة خارجية تابعة لوزارة البيئة. ونُقلت لجنة الأمان النووي ووكالة الأمان النووي والصناعي، بما في ذلك السلطة الرقابية التابعة لوزير الاقتصاد والتجارة والصناعة، إلى الهيئة الرقابية النووية. وأُدمجت أيضاً المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية في الهيئة الرقابية النووية.

وفي أيلول/سبتمبر 2011، أنشئت مؤسسة تيسير التعويض عن الأضرار النووية بموجب قانون مؤسسة التعويض عن الأضرار النووية لضمان تقديم دفعات تعويضية بشكل سريع ومناسب [58]. وكان الهدف من ذلك هو ضمان إمدادات مستقرة من الكهرباء عن طريق منح الأموال التعويضية المطلوبة لمشغلي المرافق النووية الذين ربما واجهوا أضراراً نووية واسعة النطاق.

وعندما وصلت جميع المفاعلات في موقع فوكوشيما دايتشي إلى حالة الإغلاق البارد في كانون الأول/ديسمبر 2011، اعتمدت الحكومة خارطة طريق متوسطة وطويلة الأجل لإخراج محطة فوكوشيا دايتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية من الخدمة [59]، وبدأت مرحلة الإخراج من الخدمة بناءً على خارطة الطريق. ومنذ ذلك الحين، حُدثت خارطة الطريق خمس مرات. واعتُمدت آخر نسخة محدثة في كانون الأول/ديسمبر 2019. وأُنشئ معهد البحوث الدولي لإخراج المحطات النووية من الخدمة في آب/أغسطس 2013 لإجراء أعمال البحث والتطوير الخاصة بالتكنولوجيات التي يمكن استخدامها لإخراج محطات القوى النووية من الخدمة

وفي آب/أغسطس 2014، أعيد تنظيم مؤسسة تيسير التعويض عن الأضرار النووية وأُعيدت تسميتها لتصبح مؤسسة تيسير تعويضات الأضرار النووية والإخراج من الخدمة، وباتت تشمل وظائف مثل دعم الإخراج من الخدمة. وأضيفت إدارة الصندوق الاحتياطي للإخراج من الخدمة والأنشطة ذات الصلة لتنفيذ أعمال الإخراج من الخدمة إلى الدور الذي تضطلع به المؤسسة في أيار/مايو 2017 بعد تعديل القانون.

3-2-11- البنية الأساسية المتاحة

يمكن دعم استراتيجية إدارة النفايات من خلال الاستفادة من البنية الأساسية والمعدات المتاحة، سواءً داخل الموقع أو خارجه. ويمكن الاستفادة من الموارد المفيدة من المصادر المحلية والدولية على حد سواء. ويمكن الاستفادة من المرافق القائمة وإعادة توظيفها، بالقدر

الممكن عملياً، لتيسير التصرف في النفايات ودعم تنظيف الموقع. ويمكن أيضاً استخدام المرافق المناسبة خارج الموقع كخيارات لدعم جهود التصرف في النفايات. ومن المستصوب تقديم الدعم من المرافق النووية النظيرة غير المتأثرة حيثما كان ذلك متاحاً.

وأثناء جهود تنظيف النفايات في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، أُعيد في البداية توظيف حوض الوقود القائم لاستخدامه في خزن النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية، مع الاستفادة من التدريع المعزز الذي يوفره حوض الوقود المستهلك، مع إجراء العمليات عن بُعد [1]. وبعد معالجة مواد النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية والتخلص منها، استُخدم حوض الوقود لخزن براميل الوقود المحمّلة التي كانت في انتظار الشحن، وذلك مرة أخرى للاستفادة من التدريع المعزز. وعقب الحادث مباشرة، استُخدمت مظلة معدنية كانت تُستخدم لأغراض الطلاء، لجمع النفايات الصلبة وخزنها مؤقتاً. وجُهزت المظلة بنظام الرش، وتقع داخل الجدار الواقي الرئيسي للمحطة. وكانت المظلة تقع على مسافة قريبة نسبياً من حدود الموقع، وكانت هناك حاجة في بعض الأحيان إلى درع مؤقت. وسرعان ما بات واضحاً أن هناك حاجة إلى نظام هندسي أكثر شمولاً لخزن النفايات الصلبة، وأنشئت بالتالي مرافق جديدة.

وبالمثل، في فوكوشيما دايتشي، قامت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية بإعادة استخدام العديد من المباني في المنطقة المجاورة للتفاعلات (مبنى التوربينات، ومبنى التشغيل الرئيسي) لدعم أنشطة معالجة المياه [7]. وحُوّل الكثير من صهاريج المياه القائمة، ولا سيما الصهاريج الملحومة لخزن المياه المالحة المركزة، لخزن المياه الملوثة المعالجة. وبالإضافة إلى ذلك، بعد فترة قصيرة من وقوع الحادث، تم الحصول على الصهاريج وغيرها من الأدوات والمعدات المتخصصة من مصادر في جميع أنحاء العالم.

وتقوم الحكومة، بالتعاون مع الشركات المورِّدة، بإجراء أنشطة إزالة التلوث عن بُعد داخل مبنى المفاعل ووعاء الاحتواء. وبالإضافة إلى ذلك، تجري أعمال البحث والتطوير حالياً بشأن التكنولوجيات المناسبة لاستخراج حطام الوقود. وتُستخدم حالياً الوحدتان 5 و6 اللتان لم تتأثرا بالحادث، واللتان أتُخذ قرار نهائي بعدم إعادة تشغيلهما، كمرافق اختبار بالحجم الطبيعي لإجراء اختبارات نموذجية (اختبارات التحقق الفعلية من الأجهزة).

وفي ما يتعلق بإعادة استخدام البنية الأساسية خارج الموقع، أُعيد استخدام ملعب J-Village (مجمع رياضي ضخم متصل بمركز التدريب الوطني لكرة القدم) مباشرة بعد وقوع الحادث كقاعدة لعمليات التصدي للحوادث. وأُجريت أنشطة إزالة التلوث من سيارات الإطفاء والمركبات العسكرية والطائرات العامودية التي استُخدمت في تبريد حوض الوقود المستهلك وإزالة الحطام في الموقع الذي أُعيد استخدامه. ويوفِّر المرفق أيضاً مناطق سكنية واستراحة لقوات الدفاع الذاتي اليابانية والشرطة والمنظمات الأخرى المعنية. وفي كانون الثاني/يناير 2013، أنشأت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية المقر الرئيسي لإعادة إعمار فوكوشيما J-Village، لدعم أكثر من 4000 موظف. ونُقلت بعض أعمال فحص التعويضات من المكتب الرئيسي لشركة طوكيو

للطاقة الكهربائية إلى المقر الرئيسي لإعادة الإعمار. وعادت J-Village إلى وظيفتها الأصلية، وهي دعم كرة القدم اليابانية، في نيسان/أبريل 2019.

وأثناء حادث مفاعل وندسكيل 1 وبعده، أُجريت أعمال التصرف في جميع النفايات السائلة والصلبة في حدود القدرة القائمة للبنية الأساسية المتاحة. وتم تفريغ الوقود والنظائر بصورة رئيسية، ولكن بطريقة غير تقليدية، عبر المسار المصمم الذي كان قائماً إلى حوض التبريد، حيث أُجريت أعمال الخزن و/أو المعالجة عبر مسار دورة الوقود القائم. وأُزيلت المرشحات من المدخنة، إلى جانب النفايات الصلبة الملوثة الأخرى، وتم التخلص منها في أحد مرافق التخلص من النفايات الصلبة العديدة المتاحة الموجودة في موقع مفاعلي وندسكيل. وحوّلت المياه المستخدمة أثناء جهود مكافحة الحرائق، حيثما أمكن، إلى حوض تبريد المفاعل لفترة قصيرة لخزن الاضمحلال الإشعاعي، قبل التصريف إلى البحر.

وفي الوقت الذي وقع فيه حادث مفاعلي وندسكيل، لم يكن هناك سوى القليل من الاستعدادات لحالة طوارئ من هذا النوع. وأشار السير كريستوفر هينتون (الذي كان مسؤولاً عن تصميم البرنامج النووي المدني المبكر وبنائه في المملكة المتحدة) لاحقاً أن المفاعل 1 سيكون "نُصباً تذكارياً يشهد على جهلنا" [60]. وعلى هذا النحو، كانت التكنولوجيا التي نُشرت أثناء الحادث وبعده مباشرة بسيطة ومتاحة [60]، على سبيل المثال:

- حصلت القوة العاملة على قضبان الفولاذ المتاحة لتيسير إزالة قضبان الوقود من المفاعل.
- نقل ثاني أكسيد الكربون (من الأرصدة المخزّنة في كالدر هول) إلى قلب المفاعل دون تحقيق أي تأثير كبير.
- تم البحث عن المياه بعد ذلك كملاذ أخير، وكان من الضروري توفير المعدات اللازمة لتصريف المياه في المفاعل. وتم توصيل أربعة خراطيم من سيارة الإطفاء بأعمدة الثقالة وإدخالها إلى المفاعل.

وأثناء تصفية حادث تشرنوبل وإجراء حملة التنظيف، استُخدمت البنية الأساسية القائمة إلى أقصى حد ممكن. واستُخدم مبنى خزن النفايات الصلبة لاستقبال النفايات الناتجة عن الحادث، بالإضافة إلى مرفق الخزن الذي كان مصمماً في البداية كمخزن للنفايات في الوحدة 5، والذي كان قيد التشييد في ذلك الوقت. وأُعيد توظيف هذا المرفق الأخير لاستخدامه كموقع للتخلص من النفايات المشعة من المرحلة الثالثة، وهو ما يُشار إليه أيضاً باسم مُجمع التخلص من النفايات المشعة (RWDS Kompleksny) في الأبحاث المنشورة.

وبالإضافة إلى ذلك، استُخدم حوض التبريد الكبير جداً في محطة تشرنوبل للقوى النووية لاستضافة كمية كبيرة من المواد الملوثة أثناء التصدي الأوّلي لحالة الطوارئ، وهو الآن في طور الإخراج من الخدمة.

وفي الوقت الحاضر، يُستخدم العديد من المرافق في محطة تشرنوبل للقوى النووية التي يجري حالياً إخراجها من الخدمة، كمواقع خزن مؤقت للمواد أو النفايات المشعة. وكما هو مبيّن في الشكل-6، يُستخدم مبنى التوربينات في الوحدة 3 لخزن أجزاء من أنبوب التهوية المفكك من المرحلة الثانية من إخراج محطة القوى النووية من الخدمة.

3-2-12- توافر العاملين المتمرسين واحتياجات التدريب

من المرجح أن يتطلب التصدي لحادث موارد أكثر بكثير مما هو متاح في العادة داخل المنظمات ذات الصلة (بما في ذلك، على سبيل المثال، الوكالات الرقابية)، وقد يلزم استمرار ذلك لعدة أشهر أو سنوات. وقد تحتاج أعداد كبيرة محتملة من العمال الجُدد، ربما من ذوي اللغات أو اللهجات أو الخلفيات الثقافية المختلفة مقارنة بالعمال المحليين، إلى تدريب أساسي على الوقاية من الإشعاعات، على سبيل المثال. ومن المهم أن يُعطي التخطيط المسبق الاعتبار المناسب للقدرات والمعرفة التي قد تكون ضرورية لأدوار محددة من أجل دعم التعافي من حادث نووي. وسيلزم اجتذاب أفراد يتمتعون بمؤهلات مناسبة، ليس فقط للتصدي للحادث، بل وكذلك للتقليل إلى أدنى حد من تعطل أجزاء أخرى من الصناعة النووية داخل البلد ولضمان إمكانية استئناف

الشكل-6- مخزن مؤقت (احتياطي) في قاعة التوربينات في الوحدة 3 في محطة تشرنوبل للقوى النووية، ويحتوي المخزن على قطع من أنبوب التهوية المفكك من الوحدتين 3 و4. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

الأعمال العادية في أسرع وقت ممكن. وبموازاة عمليات التوظيف، سيلزم تدريب الموظفين الجُدد أو رفع مهارات الموظفين الحاليين لتقديم أنشطة التصرف في النفايات. وسيلزم إيلاء المراعاة لكيفية تَغيُّر الأدوار في التعافي بمرور الوقت للسماح بالتخطيط للحالات التي يتعيّن فيها الالتزام بالموارد أو إتاحتها للتخصيص في أماكن أخرى.

ومن المرجح ألّا يمتلك الموظفون المعيّنون بالفعل لدى المرفق ما يلزم من مهارات لإدارة وتنفيذ وظائف التصرف في النفايات المتزايدة بعد وقوع حادث نووي. وسيكون تحديد العاملين المهرة لدعم جهود التصرف في النفايات مهماً لنجاح برنامج التنظيف. وسيزداد الاعتماد على العاملين المهرة مقارنة بالعمليات العادية، نظراً لأن نُظم وعمليات الإدارة القائمة لن تغطي العديد من الأنشطة. ويُعد تعزيز موارد الموظفين من خلال الخبراء الوطنيين والدوليين في إدارة الحوادث والتصرف في النفايات أحد الاعتبارات المهمة الأخرى. ويمكن أن يؤدي استخدام الخبراء الدوليين إلى احتياجات تدريبية خاصة تُعالج الاختلافات اللغوية والثقافية بالإضافة إلى الحاجة إلى تزويد الخبراء الخارجيين بالدراية الكاملة في ما يتعلق بممارسات التشغيل والأمان المحلية. وسيكون إنشاء برامج التدريب ضرورياً لضمان صحة العمال وأمانهم. وبالنظر إلى ظروف العمل التي قد تكون صعبة وحجم العمليات، قد يكون من المستصوب تعيين عدد كبير من العمال موزعين على نوبات عمل قصيرة. وقد يكون من المناسب في بعض الحالات التعاقد بالكامل مع كيان ذي خبرة لأداء وظيفة التصرف في النفايات.

وكمتوسط تقريبي، شارك نحو 1 000 عامل كل عام في تنظيف الوحدة رقم 2 في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. وتراوحت أعداد العاملين في المحطة بين الحد الأقصى الذي بلغ نحو 1400 في عام 1985 وإلى الحد الأدنى الذي بلغ نحو 500 في عام 1989)في نهاية البرنامج) [2]. وفي البداية، كانت القوة العاملة تتألف أساساً من موظفين من شركة المرافق العامة النووية. ودعم العديد من المتطوعين من عدة أماكن تابعة لشركة المرافق العامة النووية جهود التنظيف منذ البداية. وأنشئ برنامج تدريبي بسرعة لضمان أمان العمال. وانصب تركيز القوة العاملة المتطوعة على أنشطة إزالة التلوث، وساهم ذلك في تمكين المهندسين والمشغلين الأكثر مهارة من التركيز على المشاكل الأكثر تحدياً. وساعدت القوة العاملة الكبيرة في تقليل تعرض العمال للإشعاع. وفي وقت لاحق، استُخدم العاملون التابعون للمتعهدين بشكل كبير لدعم العاملين من شركة المرافق العامة.

ولمعالجة الطابع الفريد للعمل والتحديات المرتبطة بالقوة العاملة غير المدرَّبة، اتُخذت التدابير التالية في برنامج التنظيف:

(أ) تخطيط المهام: تخطيط مفصل لجميع أنشطة العمل للتقليل إلى أدنى حد من الوقت واتخاذ التدابير الضرورية لضمان الأمان للعمال (الأدوات المستخدمة عن بُعد، والروبوتات، ومعدات الوقاية للعاملين، وما إلى ذلك).

(ب) نماذج بالحجم الطبيعي: استُخدمت التدريبات وعمليات تقييم ممارسات العمل لزيادة فعالية العامل وكفاءته.

(ج) مناطق التجمع: استُخدمت المناطق الواقعة في مناطق الجرعات الإشعاعية المنخفضة لتجميع المعدات وصيانتها، والسماح بفترات راحة للعمال، وما إلى ذلك.

(د) التدريب: تم تطوير ونشر برنامج تدريبي مكثف للتأكد من أن العمال على دراية بالظروف الخطرة وممارسات العمل الفعالة.

ويجري استخدام تقنيات مماثلة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، ويرد وصف لهذا الإجراء في المبادئ التوجيهية لإزالة التلوث [61].

3-2-13- طريقة نشر التكنولوجيات (الثابتة مقابل المتنقلة/المحمولة)

يمكن لحجم الحادث وكمية/نوع النفايات المراد التصرف فيها أن يُحدد نوع المرافق التي سيجري استخدامها. ومع ذلك، يمكن أن يعتمد استخدام المرافق المركزية مقابل المرافق المتنقلة/المحمولة في كثير من الأحيان على التطبيق. وفي بعض الحالات، يمكن أن تكون هناك تكنولوجيات متاحة، بما في ذلك الأدوات والمعدات المتخصصة، أو وحدات يمكن نشرها بسرعة لتلبية الاحتياجات العاجلة. ويمكن أن تتأثر عملية اتخاذ القرار لاختيار التكنولوجيات المناسبة أو مجموعة المعدات، بمجموعة متنوعة من العوامل التقنية وغير التقنية. ويرد وصف لعمليات ومعايير الاختيار النموذجية بمزيد من التفصيل في المرجع [51]. وخلال المراحل المبكرة من وقوع حادث أو التعافي منه، قد يلزم نشر سريع للمعدات والخدمات. وعلى هذا النحو، تُفضل في كثير من الأحيان المعدات والموارد السهلة النشر (مثل المعدات المتنقلة)، على الرغم من أنها قد لا تكون مثالية من الناحية التقنية أو قد لا يكون استخدامها في الحالة المعيّنة هو الأكثر فعالية من حيث التكلفة. ويمكن توسيع نطاق النظر ليشمل استخدام المعدات المتنقلة/المحمولة المتاحة داخل الدول الأعضاء الأخرى شريطة أن تكون المعدات خالية من التلوث الذي يمكن أن يحول دون نقلها

واعتمدت عمليات معالجة المياه في أعقاب حادث ثري مايل آيلند وحادث فوكوشيما دايتشي على مرافق معالجة مركزية يتم إنشاؤها في الموقع وتشغيلها لفترات طويلة. وفي محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، أنشئت عدة مرافق مركزية لمعالجة المياه، بدءاً من عملية إزالة السيزيوم، والتقدم إلى تركيب ونشر النظام النشط المبسّط لاسترجاع المياه واستعادتها من أجل زيادة إزالة السيزيوم، والتحول في نهاية المطاف نحو استخدام النظام المتقدم لمعالجة السوائل من أجل إزالة النويدات المشعة المتعددة في المياه الملوثة. وأُجريت عملية لتنقية المياه الملوثة في الخندق الرئيسي للوحدتين 2 و3 باستخدام نظام متنقل لمعالجة المياه.

ويُستخدم نظام متنقل آخر لمعالجة المياه في أنشطة تنقية مياه التبريد في أحواض الوقود المستهلك. وللتقليل من مستوى السترونتيوم في الماء المركز بالانتشار الأسموزي العكسي، تم تركيب نظام متنقل لإزالة السترونتيوم.

ويرد وصف للنُظم المتنقلة بمزيد من التفصيل في القسم 9 من هذا المنشور وفي المرجع [62]

3-2-14- احتياجات البحث والتطوير

نظراً لتعقد النفايات وظروف المواقع الخطرة، قد لا تكون تكنولوجيات تحديد خصائص النفايات واسترجاعها ومعالجتها المستخدمة حالياً كافية. وقد يلزم إجراء أنشطة للبحث والتطوير تبدأ بالتطوير أو تكييف تكنولوجيات الاستخدام المحددة إلى نُظم واسعة النطاق لمعالجة النفايات. ويمكن أن تكون عملية تقييم التكنولوجيا بالاستعانة بخبراء وطنيين ودوليين مؤهلين تأهيلاً مناسباً فعالة للغاية في تحديد احتياجات البحث والتطوير. وباستخدام نتائج تقييم التكنولوجيا، يمكن وضع خطة البحث والتطوير لتحديد احتياجات البحث والتطوير وتحديد خطة مناسبة لتطوير التكنولوجيا. وفي بعض الحالات، يمكن وضع واستخدام سيناريوهات موازية من أجل العرض الإيضاحي للتكنولوجيا. ونُفذ هذا النهج في محطة فوكوشيا داييتشي للقوى النووية، ويمكن أن يساعد في تحديد التكنولوجيات الواعدة وتأكيدها بصورة أسرع.

وفي محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، أنشئ مبنى للبحث التعاوني الدولي في عام 2017 لتعزيز البحث والتطوير بدءاً من الأبحاث الأساسية وحتى الدراسات التطبيقية، مثل تحسين فهم خصائص النفايات المشعة. وتُعزز خطة البحث والتطوير الوظيفة الأساسية التي تجمع بين الباحثين ومعاهد الأبحاث وتعمل كهمزة وصل بين مواقع البحث والإخراج من الخدمة.

3-2-15- التعقيبات/الدروس المستفادة

توفِّر التجارب السابقة في مجال عمليات تنظيف الحوادث النووية معلومات وإرشادات قيّمة تستحق أن تؤخذ في الاعتبار كجزء من عمليات التخطيط، ولكنها مهمة أيضاً لبناء الوعي بتجارب الصناعة القديمة والجديدة ذات الصلة والحفاظ عليها لدى الفريق الذي يُنفذ برنامج التصرف في النفايات وتقديم التوجيه في تحديد المتطلبات. ويُتاح قدر كبير من هذه المعلومات في المجال العام، بما في ذلك المراجع [2، 22، 47، 49، 52، 60، 63–66]، ويوثق هذا المنشور معلومات محددة. ويمكن للمنشورات المتعلقة بالحوادث الصناعية الأخرى (على سبيل المثال، حادث بوبال الكيميائي، وانحراف القطارات عن مساراتها، وتسربات النفط وما إلى ذلك) أن تُلقي أيضاً بأضواء كاشفة على الممارسات الفعالة في مجال التنظيف والتصرف في النفايات.

ويمكن أن تستفيد استراتيجية التصرف في النفايات بصورة كبيرة من استخدام برنامج فعال للتوعية أو التعقيبات أو الدروس المستفادة لدعم التطوير المستمر للتكنولوجيا وتوجيه عمليات التنفيذ. ويمكن تحديد الممارسات الإيجابية والسلبية واستعراضها مع الموظفين بانتظام. ويمكن أن يكون لبناء عقلية التحسين المستمر دور فعال في تحقيق التميّز في الأمان وفعالية التكلفة وتسيير العمليات.

وبذلت جهود متضافرة بعد حادث ثري مايل آيلند لتوثيق نتائج الحادث، بما في ذلك جهود التنظيف والتصرف في النفايات. وتتاح هذه المنشورات في المؤلفات المفتوحة وترد الإشارة إليها في هذا المنشور. وعلى سبيل المثال، أُعدت سلسلة من التقارير التي تُلخص العديد من جوانب جهود التنظيف والتصرف في النفايات. ووُضعت هذه التقارير التي عُرفت باسم تقارير GEND تحت إشراف شركة المرافق العامة (الجهة المشغّلة لمرفق محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية)، ومعهد بحوث الطاقة الكهربائية والهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة، ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة [66].

وصدر بعد حادث تشرنوبل عدد كبير من التقارير والمقالات العلمية التي تصف الدروس المستفادة. وتتضمن المؤلفات منشورات الوكالة (مثل العدد 1 من سلسلة الفريق الاستشاري الدولي للأمان النووي [64] والعدد 7 من سلسلة الفريق الاستشاري الدولي للأمان النووي [65])، بالإضافة إلى العديد من المقالات في المجلات العلمية باللغتين الأوكرانية والروسية، ومقالات في مجلات علمية عالمية. ومع تطور التقدم في عملية التنظيف في محطة فوكوشيما داييتشي للقوة النووية، أعدت العديد من الوكالات والبلدان تقارير ومنشورات علمية (يُشار إلى بعضها في التذييل الرابع).

3-2-16- التفاعلات مع البرامج الأخرى

يمكن لاستراتيجية التصرف في النفايات وتحديد المتطلبات ذات الصلة الاستفادة من التفاعلات مع الكيانات الأخرى ذات الصلة، بما في ذلك برامج حصر المواد النووية والضمانات، وسلطات إدارة الطوارئ المدنية، والوزارات المحلية والإقليمية، والهيئات الحكومية الوطنية، والدول المجاورة والمنظمات الدولية. وسيكون الحفاظ على خطوط اتصال، حسب الاقتضاء، مهماً لضمان قبول استراتيجية التصرف في النفايات.

ويمكن أن يكون الدعم من حيث اللوجستيات والموارد والتكنولوجيا والخبرة متاحاً في مرافق وطنية أخرى مماثلة أو ذات صلة، وكذلك في دول أعضاء أخرى. ويمكن للتشاور والتفاعل مع هذه الكيانات ومع الوكالة وغيرها من المنظمات الدولية أن يزيد من قدرات فريق التصرف في النفايات دون صرف الانتباه عن تنفيذ أنشطة التصرف في النفايات الأكثر إلحاحاً. ومرة أخرى، ينصب التركيز على أهمية التخطيط المسبق الذي يشمل التفاعلات مع الوكالات ذات الصلة. وفي

حالة وقوع حادث، ستحتاج المنظمة المسؤولة عن التصرف في النفايات إلى تحديد الفجوات في الموارد الوطنية من أجل تركيز الدعم الدولي بصورة أفضل على المجالات التي يمكن إضافة قيمة إليها.

وسرعان ما بات واضحاً في أعقاب حادث ثري مايل آيلند أن المشاركة المنسقة للكيانات التجارية والحكومية ضرورية لضمان نجاح عملية التنظيف البيئي. وأنشئ اتحاد فريد من نوعه في عام 1980 للاستفادة من خبرات المنظمات الوطنية داخل الولايات المتحدة الأمريكية. وأسفر الاتفاق بين شركة المرافق العامة ومعهد بحوث الطاقة الكهربائية والهيئة الرقابية النووية ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة الذي سبقت الإشارة إليه أعلاه، عن جهود منسقة من العاملين في شركة المرافق العامة ومعهد بحوث الطاقة الكهربائية والهيئة الرقابية النووية ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة [2، 66].

وفي ما يتعلق بحادث فوكوشيما دايتشي، أنشئ معهد البحوث الدولي لإخراج المحطات النووية من الخدمة في عام 2013 لتعزيز البحث والتطوير في مجال إخراج المحطات النووية من الخدمة في ظل نظام إدارة متكامل. وتُركز جهود هذا المشروع على المسألة الأكثر إلحاحاً، وهي إخراج محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية من الخدمة، بهدف تعزيز أُسس تكنولوجيات الإخراج من الخدمة. ويتألف أعضاء معهد البحوث الدولي لإخراج المحطات النووية من الخدمة من الوكالة اليابانية للطاقة الذرية، والمعهد الوطني للعلوم والتكنولوجيا الصناعية المتقدمة، و4 شركات مصنِّعة، و12 شركة من شركات مرافق الكهرباء

3-2-17- احتياجات الاتصال والمشاركة العامة

يُشكل التنظيف البيئي والتصرف في النفايات المرتبطة به بعد وقوع حادث نووي تحدياً معقداً وطويل الأمد وسيشمل توجيه اهتمام كبير لترميم الموقع والمناطق المحيطة به ومستقبل المجتمعات المحلية من مجموعة متنوعة من أصحاب المصلحة، بما في ذلك المسؤولون الحكوميون وقادة المجتمع المحلي، وقطاع الصناعة النووية والجمهور. ومن ركائز استراتيجية التنظيف البيئي والتصرف في النفايات اتخاذ ترتيبات تكفل المشاركة الفعالة مع أصحاب المصلحة. وتُعد مشاركة أصحاب المصلحة أيضاً عنصراً أساسياً في تنشيط المجتمع المحلي من خلال الجمع بين أصحاب المصلحة المعنيين لوضع رؤية للمستقبل. وتُشكل المتطلبات المستمدة من جهود مشاركة أصحاب المصلحة عنصراً أساسياً في إدارة المتطلبات الشاملة.

ومن المرجح أن يسعى أفراد الجمهور إلى الحصول على معلومات من مجموعة من المصادر، بما في ذلك مشغلو المرافق والهيئات الرقابية والمنظمات الحكومية المحلية/الوطنية، وفي بعض الحالات، من مصادر غير مطلعة أو مصادر رسمية غير موثوقة. ومن المهم وجود درجة من التنسيق والتواصل بين المنظمات لضمان اتساق الرسائل ودقتها. ويتعيّن توضيح أدوار هذه

المنظمات ومسؤولياتها في مجال الاتصالات في مرحلة مبكرة، إذ سيلزم إجراء اتصالات استباقية وتفاعلية. ويمكن أن تُركز المنظمات المختلفة على مسائل أو مواضيع مختلفة، وسيلزم بالتالي إجراء تنسيق مناسب لتجنب الاختلافات الواقعية وتقليل سوء الفهم. ومن الضروري لبناء الثقة مع الجمهور والحفاظ عليها توفير معلومات مستندة إلى الحقائق. ووضعت الوكالة العدد GSG-14، من سلسلة معايير الأمان، ترتيبات التواصل مع الجمهور في مجال الاستعداد لحالات الطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها، ويصف هذا المنشور البنية الأساسية والعمليات اللازمة لتوفير معلومات مفيدة وفي الوقت المناسب وصادقة ومتسقة وواضحة ومناسبة إلى الجمهور في حالة وقوع طارئ نووي أو إشعاعي [67]

وأصبح من المعترف به حدوث انهيار في الاتصالات العامة بعد فترة وجيزة من وقوع الحادث في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، مما تسبب في توتر العلاقات مع الجمهور. وعلاوة على ذلك، باتت محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية تُشكل نقطة محورية للجماعات والسياسيين المناهضين للقوى النووية [2]. واستمرت هذه المشكلة طيلة حملة التنظيف، وتحول اهتمام الإدارة في كثير من الأحيان نحو معالجة الاهتمامات العامة. وكان من الممكن تخفيف بعض هذه المشاكل من خلال الجهود المتضافرة في مجال العلاقات العامة، بما في ذلك نشر المعلومات بصورة متكررة وإظهار شفافية البرنامج.

ولمساعدة الجمهور على فهم الخطط والجهود الجارية لإخراج محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية من الخدمة، استحدثت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية في عام 2013 منصب المسؤول المختص بالإبلاغ عن المخاطر، وأنشأت الشركة مكتب التواصل الاجتماعي [68]. وقد تم إنشاؤهما اعترافاً بأن ثقافة الشركة لم تكن داعمة للاعتراف بالمخاطر ولم تكن قادرة على إيصال المخاطر بشفافية إلى الجمهور. وكانت عقلية العصمة من الخطأ سائدة داخل الشركة وعُممت خارجها في المجتمع ككل. وأنشئ مكتب التواصل الاجتماعي، جنباً إلى جنب مع المسؤول المختص بالإبلاغ عن المخاطر، لتعزيز التواصل القائم على الحقائق والمنصب على بناء الثقة. وتُسند إلى مكتب التواصل الاجتماعي والمسؤول المختص بالإبلاغ عن المخاطر مهمة سد الفجوة في التصورات وتعزيز العلاقات العامة والإبلاغ عن المخاطر المحتملة.

وتُشير تجربة وزارة البيئة إلى الصعوبات الخطيرة في التواصل مع أصحاب المصلحة، مثل السكان الذين أُجبروا على الإخلاء، أو الأشخاص المقيمين في مناطق كانت في حاجة إلى إزالة التلوث، أو الأشخاص الذين كانوا يعيشون بالقرب من مواقع خزن النفايات. ونشأ بعض سوء التفاهم بين مختلف أقسام الحكومة المركزية ووزارة البيئة، أو مع شركة طوكيو للطاقة الكهربائية. ومع ذلك، ومن خلال التدابير الاستباقية، أصبح من الممكن تحقيق تعاون إيجابي وفعال بفضل الجهود الكبيرة التي بذلها الأكاديميون والمتخصصون الآخرون.

وأظهرت التجربة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية بوضوح أنه قد تكون هناك حاجة لعقد اجتماعات فردية وجماعية عديدة ومتكررة من أجل التعامل مع ردود الفعل العاطفية

والإدراكية لدى الجمهور. وتُعد هذه التفاعلات مهمة في تنسيق الفهم العام وكسب القبول لتنفيذ أعمال إزالة التلوث. ولم يتحقق تقدم كبير في تنفيذ أعمال إزالة التلوث إلّا منذ نجاح تنفيذ الجهود ذات الصلة على مدى فترة ثلاث سنوات تقريباً. والواقع أن الجدول الزمني الذي كان مقرراً لتنفيذ هذه الأعمال كان مدفوعاً في جانب كبير منه بجهود بناء الإجماع داخل المجتمع المحلي بدلاً من مجرد التغلب على المشاكل التقنية. وقامت وزارة البيئة في عام 2018 بتلخيص ونشر الأنشطة التي نُفذت في مواقع إزالة التلوث، إلى جانب تفسيرات الأمان ذات الصلة [69].

ويبذل الباحثون، سواءً في اليابان أو على المستوى العالمي جهوداً نشطة لدراسة المشاكل المتعلقة بالإبلاغ عن المخاطر وتقنيات حل المشاكل (على سبيل المثال، منشور صادر عن الوكالة [70] و مسودة تقرير وكالة الطاقة النووية لعام 2020 [71]). ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن تقنيات الإبلاغ عن المخاطر لن تكون قابلة للتطبيق على المستوى العالمي وستحتاج دائماً إلى أن تُعبِّر عن الملامح الخاصة المحددة للطابع الوطني وقرارات السياسات المعمول بها في ذلك الوقت. ويُلاحظ أن طبيعة الاتصالات المطلوبة يمكن أن تكون مختلفة جداً، تبعاً لاحتياجات المجتمع في المنطقة التي تتعرض لحادث نووي.

وبغض النظر عن الاختلافات، ستكون هناك بعض المجالات المشتركة، ومنها على سبيل المثال ما يلي:

(أ) توفير مواقع فعلية، مثل مركز معلومات محلي (وليس فقط جهة اتصال على شبكة الإنترنت) حيث يمكن لأفراد الجمهور الحصول على المعلومات والتعرف على المسائل الأساسية، ويمكنهم الحكم على الحالة بأنفسهم. وتُساهم هذه التسهيلات بدور فعال في تبادل المعلومات والتواصل بشأن التحديات الماثلة. ولا يكفي الاعتماد على قنوات الاتصال الجماهيري، مثل الإنترنت، ولا سيما بعد الكوارث الطبيعية، عندما تتدهور البنية الأساسية.

(ب) عقد اجتماعات جماعية صغيرة لتقديم الإيضاحات، مع تحديد حجمها بعدد يمكن التعامل معه مثل 20 شخصاً.

(ج) بذل جهود لبناء علاقة ثقة متبادلة من خلال الاستعانة في الاجتماعات المحلية بالمتحدثين الذين يثق بهم ويحترمهم السكان المحليون.

4- التخطيط قبل الحادث وبعده

الدروس الرئيسية المستفادة:

- التخطيط المسبق الذي يغطي مجموعة واسعة من سيناريوهات الحوادث المحتملة ويتناول الأدوار التنظيمية والتفاعلات سيساعد على تيسير فهم الخيارات المتاحة للتصرف في النفايات والاستعداد للتصدي الأوّلي السريع للحادث.
- استعراض الحوادث السابقة وكيفية التعامل معها (الدروس المستفادة - الجيدة والسيئة على حد سواء) ستثري الاستراتيجيات والخطط في مجال التصرف في النفايات.
- مدى التخطيط المسبق المطلوب مرهون بطبيعة المرافق النووية وحجمها وسيناريوهات الحوادث ذات المصداقية في الدولة العضو والدول الأعضاء المحيطة بها.
- التخطيط المسبق يتيح تحديد البنية الأساسية الضرورية المتاحة أو التي يمكن أن تكون متاحة لأنشطة التصرف في النفايات.
- التمهيد للتخلص من النفايات: تحديد الطرق والإجراءات التي تُتبع في عمليات استرجاع النفايات ومعالجتها وخزنها والتخلص منها، وتحديد الأماكن التي قد يكون من الممكن أن يُعاد فيها استخدام المرافق القائمة أو تكييفها مع المرافق الجديدة للتصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث، ولا سيما في المراحل الأوّلية من الحدث عندما تكون المرافق مطلوبة على وجه السرعة.
- التخلص من النفايات: تحديد الخيارات التي قد تكون متاحة على المستويين الوطني والمحلي للتخلص من النفايات، بما في ذلك إمكانية تحديد مواقع وبناء مرافق جديدة لهذا الغرض.
- تقديم لمحة عامة عن الخيارات المحتملة للتخلص من النفايات، ومفاهيم تصميم المستودع والمواقع والقدرات واستراتيجيات التخلص من النفايات، ستُشكل الأساس للمعايير المفاهيمية الخاصة بقبول النفايات. وسيكون لهذا أثر كبير على القرارات العاجلة بشأن فصل النفايات ومعالجتها منذ بداية أنشطة التصرف في النفايات بعد وقوع الحادث.
- الطريقة التي تتفاعل بها المنظمات مع وقوع حادث ما والتنظيف اللاحق له سيكون لها أثر كبير على كميات النفايات المشعة وأنواعها التي يتعيّن التصرف فيها.
- الاستعانة بخبراء مستقلين لاستعراض الخطط والتكنولوجيات وإسداء المشورة بشأنها مفيداً، ولا سيما عند تقييم الحلول المقترحة.

وفي حين أن هناك كثير من الإرشادات المتاحة لوضع سياسات واستراتيجيات للتصرف في النفايات في الحالات العادية [72]، فإنها قلما ما تأخذ في الاعتبار الاحتياجات الفريدة لحالات ما بعد الحوادث، والمبيّنة في هذا القسم.

وشملت الخبرة التاريخية مع الحوادث (انظر التذييلات) ظروفاً غير عادية وغير متوقعة، مثل انطلاق مواد قلب المفاعل من الاحتواء وانطلاق كميات غير عادية من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً إلى النفايات القوية الإشعاع للغاية في البيئة، والتي تجاوزت بشكل كبير الشروط المتوقعة في تحليل الأمان وعمليات إصدار التراخيص للمرافق. وشكلت النفايات المتولدة تحدياً مماثلاً في عملية الاسترجاع والجمع والخزن، ولا سيما من حيث الآثار المصاحبة على الجرعات التي تلقاها العمال والجمهور، وعلى البيئة، وعلى الاقتصادات الوطنية والإقليمية والمحلية واقتصادات مالك المرفق.

ومن المرجح أن يتطلب التخطيط المسبق لإدارة التصدي للحوادث المحتملة والمواد المشعة والنفايات التي يمكن أن تنتج عن هذه الحوادث مشاركة العديد من المنظمات في الدولة العضو وتخصيص موارد لإجراء تمارين مشتركة شاملة. ويمكن للتخطيط المسبق تحديد مجموعة واسعة من السيناريوهات ذات الصلة بالمرافق النووية المحددة في الدولة العضو والتي يمكن تحليلها، بما في ذلك النظر في التمارين التي تشمل المنظمات الوطنية (والدولية) ذات الصلة التي يمكن أن تشارك في التصدي للحوادث. ويمكن أن تأخذ تمارين التخطيط المسبق المتقدمة أيضاً في الاعتبار الحوادث المحتملة في المرافق النووية في البلدان المجاورة. ومن شأن تحديد وفهم نطاق سيناريوهات الحوادث ذات المصداقية أن يتيح تحديد نطاق المصادر المحتملة، ومسارات الإطلاق المحتملة وأنواع النفايات المشعة، إلى جانب كميات الأرصدة ذات الصلة والطريقة التي يمكن أن تتطور بها مع مرور الوقت بعد وقوع الحادث. ويمكن الرجوع إلى معلومات بشأن ترتيبات التصرف في النفايات المشعة أثناء حالة الطوارئ وبعدها في العدد GSG-11 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، ترتيبات إنهاء حالة طوارئ نووية أو إشعاعية [73].

وبطبيعة الحال، فإن النفايات المشعة ليست سوى جانب واحد من جوانب التخطيط المسبق للتصدي للحوادث النووية المحتملة. وسينصب كثير من التركيز في تمارين التخطيط المسبق على إدارة حالات انطلاق النشاط الإشعاعي وتقليل تعرض السكان والعمال بشكل مباشر. وفي ما يلي الجوانب المشتركة لجميع تمارين التخطيط المسبق للحوادث:

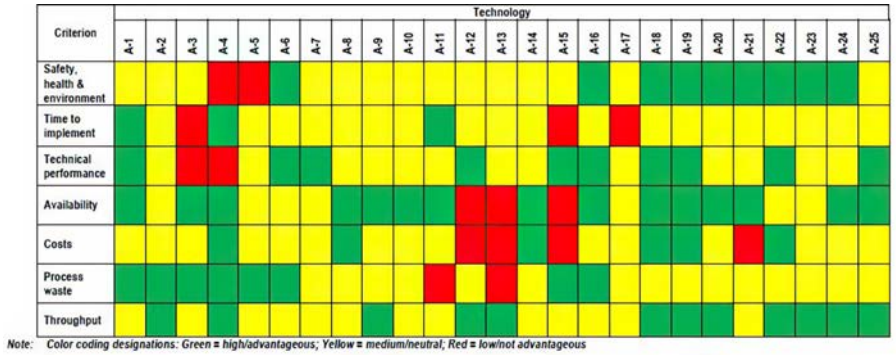
(أ) إشراك واختبار أدوار وتفاعلات الوكالات الوطنية والإقليمية المعنية بالأمان النووي، والوقاية من الإشعاعات، والتخطيط للطوارئ والتصدي لها، إلى جانب مالكي ومشغلي جميع المرافق النووية ذات الصلة.

(ب) الاعتماد على تحديد سيناريوهات الحوادث لمرافق محددة، مما يساعد في تحديد طبيعة الحوادث المحتملة والتسلسل المحتمل للأحداث، والمواد المعنية، والمناطق التي يمكن أن تتضرر.

(ج) النظر في القيود المرتبطة بأصحاب المصلحة والعوامل المجتمعية والموارد في ما يتصل بمدى الاستعداد العملي الذي يمكن تحقيقه لكل سيناريو ولكل مرفق وكيفية تحديد أولويات تنفيذ التخطيط.

(د) تحديد الاستراتيجيات والخطط لكل مرفق في مجموعة من السيناريوهات وإمكانية نشرها بسرعة وبفعالية من جانب الوكالات المشاركة في حالة وقوع حادث.

ويُمثل الفحص المسبَّق وتحديد التكنولوجيات التي يمكن استخدامها تمريناً تخطيطياً مفيداً ينبغي إجراؤه عند وضع خطط التصدي لحادث نووي محتمل. ويشارك كثير من الدول الأعضاء بالفعل في هذه الأنشطة كجزء من برامج التصدي لحالات الطوارئ [74]. ويرد مثال على ذلك في الشكل-7.



الشكل-7- مثال على الفحص المسبق لتكنولوجيات التصدي لحادث. بإذن من وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة الأمريكية [74].

ومن المتوقع أن تؤدي هذه الأجزاء من تمارين التخطيط الاستراتيجي المسبق التي تتعامل بشكل خاص مع نشوء النفايات ووضع استراتيجية ونظام للتصرف في النفايات إلى ما يلي:

(أ) إعداد تقديرات نوعية وكمية للعواقب المحتملة للحدث، بما في ذلك المواد المشعة المنبعثة والنفايات المشعة التي تنشأ أثناء كل مرحلة من مراحل الحادث، من أجل وضع المعايير اللازمة للتخطيط المسبق أو تحديد نطاقها: على سبيل المثال، الشكل، ومحتوى النويدات المشعة، ونطاقات النشاط الإشعاعي، وآليات التعرض والجرعات الإشعاعية، والأحجام، والأماكن، والتأثيرات على عمل المحطة، والقدرة على الاسترجاع، وما إلى ذلك.

(ب) تحديد الاستراتيجيات والنُظم المحتملة للتصرف في النفايات، والمتطلبات التي ستؤثر على اتخاذ القرارات بشأن اختيار كل مكون من مكونات نظام التصرف في النفايات وتصميمه وتشغيله، باستخدام نهج هندسة النُظم.

(ج) تحديد المكونات المحتملة لنظام التصرف في النفايات الخاص بمرفق معيّن لجمع المواد وخزنها والتخلص منها: على سبيل المثال، معدات الاسترجاع والحفر؛ وأماكن التجميع والخزن القريبة عن المرفق والبعيدة عنه؛ والقدرة على التخلص من النفايات والقرب من إمكانات التخلص من النفايات؛ وإمكانية إعادة توظيف المرافق؛ والنقل وما يرتبط به من إمكانات لوجستية؛ وما إلى ذلك.

(د) تحديد الموارد المالية والبشرية والمعدات المطلوبة والمتاحة لكل سيناريو ووضع الخطط المقابلة للتصرف في النفايات المتوقعة.

(هـ) تحديد ما يشوب المرافق والإمكانات من ثغرات يمكن أن تؤدي إلى عدم تلبية المتطلبات الأساسية والتأكد من معالجة هذه الثغرات.

وينبغي أن تأخذ استراتيجية التصرف في النفايات وخطط تنفيذها في الاعتبار المراحل المتتابعة للحادث. وفي المرحلة الأوّلية (أو الطوارئ)، يتعيّن اتخاذ القرارات بسرعة، وينبغي أن تنصب الأولوية على السيطرة على الوضع وتخفيف العواقب بدلاً من تحسين التصرف في النفايات [45]. ومع انتقال الحادث إلى مرحلتي التعافي والتنظيف، يتاح مزيد من الوقت للتخطيط وتحسين تنفيذ استراتيجية التصرف في النفايات. وينبغي أن تأخذ استراتيجية وخطط التمهيد للتخلص من النفايات في الاعتبار خطة التخلص من النفايات واستراتيجيات التنظيف والاستصلاح، وينبغي أن تكون متكاملة معها. ومن المرجح أن تحتاج أنشطة التصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها إلى أن تكون قابلة للتكيُّف من أجل التصدي للتغييرات الحتمية في هذه الخطط الأخرى.

وفي حالة وقوع حادث، لا يمكن إجراء تخطيط مفصل للتصرف في النفايات إلّا بعد استقرار حالة الطوارئ الأوّلية، عندما تتبلور صورة أفضل عن النطاق الكامل للحالة. وسيوفِّر

التخطيط الاستراتيجي الوطني المسبق، عندما يُنفذ بطريقة مناسبة، أساساً قوياً لتخطيط تكتيكي أكثر تفصيلاً وسيسلط الضوء على المسائل الحاسمة الأهمية التي ينبغي مراعاتها في الخطة. وترد المواضيع التي يتم يتناولها في الأقسام الفرعية المتعلقة بالتخطيط قبل الحادث وبعده لاحقاً في هذه الوثيقة كأمثلة توضيحية فقط. وستعتمد درجة التخطيط المسبّق الفعلي المستخدم على السياسات والمنظمات في كل دولة من الدول الأعضاء.

وكما جاء أعلاه، يعتمد التخطيط المسبق على تمارين السيناريوهات التي تأخذ في الاعتبار الحالة الوطنية، مما يشمل عوامل من قبيل ما يلي:

- عدد وأنواع المرافق النووية والمصادر الإشعاعية في الدولة العضو.
- حالة المرافق (أي التشغيل أو الإخراج من الخدمة).
- مكان المرافق القائمة للتخلص من النفايات المشعة وغير المشعة.
- طبيعة البيئة المحيطة في المرافق المحددة (الريفية أو الحضرية، والساحلية أو الداخلية، والتضاريس، والخصائص الجيولوجية، واستخدام الأراضي، وأنماط الطقس والمناخ، وما إلى ذلك).
- القرب من الحدود الوطنية.

وستشمل الدراسة الفعالة للسيناريوهات احتمالات منخفضة، وأحداث شديدة العواقب، وافتراضات لأسوأ الحالات، من أجل تقييم النطاق والطابع المحتملين لانتشار التلوث والنفايات المتولدة. وأظهر حادث فوكوشيما دايتشي أن من غير المعقول استبعاد السيناريوهات على أساس احتمالات غير مفهومة أو قواعد التصميم القائمة. ويمكن لعملية التخطيط المسبق، مع مراعاة أنواع الأحداث المذكورة أعلاه، التأكد من أن إجراءات التصرف في النفايات كافية للتعامل مع عواقب السيناريوهات التي تكون قيد النظر.

وبالإضافة إلى استخدام السيناريوهات، يمكن النظر في إجراء تمرين لاختبار كفاءة الخطة وتنفيذها. ويمكن بعد ذلك تنقيح الخطة، إذا اقتضت الضرورة ذلك. وعلى غرار جميع هذه الأنشطة، من المهم تحديث الخطة على فترات منتظمة لكي تُعبِّر عن الظروف المتغيرة.

وفي ما يتعلق بالمرافق النووية، ستكون هناك خطط للتصدي لحالات الطوارئ. ومع ذلك، لا تُغطي هذه الخطط في العادة أنشطة التصرف في النفايات. ويمكن النظر في توسيع خطط التصدي لمعالجة التصرف في النفايات خلال المرحلة العاجلة المبكرة من أجل توفير إجراءات مناسبة قبل الشروع في إجراءات التصدي الوطنية.

وفي ما يتعلق بالبلدان التي لا تمتلك مرافق نووية، يمكن إجراء عملية تخطيط مسبق أصغر ومتناسبة للتصرف في النفايات. وستحتاج هذه العملية إلى معالجة السيناريوهات المستندة إلى الحوادث التي تنطوي على نظائر مشعة ومصادر إشعاعية، والأعمال الإزائية المحتملة

ومن خلال تمارين التخطيط المسبق، يمكن وضع هيكل تنظيمي مسبقاً ليتم تفعيله فور وقوع حادث، مما يُسهِّل تنفيذ وتعديل استراتيجية التصرف في النفايات. ويلزم بلورة فهم شامل لنطاقات العواقب المحتملة للحوادث وسياسات التصرف في النفايات الإقليمية والوطنية ذات الصلة والمتطلبات التنظيمية، قبل وقوع الحادث، للتأكد من أن إجراءات التصدي للحادث والتصرف في النفايات على المدى الأطول تستجيب لظروف الحدث وتتوافق مع اللوائح والسياسات المعمول بها.

ومن أمثلة التخطيط المسبق في فرنسا مجموعة CODIRPA[1]. وفي عام 2005، صدر توجيه مشترك بين الوزارات حدد مسؤوليات السلطات العامة في حالة حدوث طارئ إشعاعي، وكُلفت هيئة الأمان النووي بمسؤولية إنشاء إطار ووضع خطط للتدابير اللازمة لمعالجة الحالات التي تعقب وقوع حادث نووي. وأنشأت هيئة الأمان النووي لجنة توجيهية (CODIRPA) كُلفت بالمسؤولية عن وضع النهج والمنهجية اللذين سيجري استخدامهما. وجمعت هذه اللجنة بين مختلف أصحاب المصلحة، بما في ذلك الإدارات الوزارية الرئيسية المعنية وهيئات الخبراء والجمعيات والمسؤولين المنتخبين ومشغلي المنشآت النووية، واستعانت بالخبرة الدولية.

ويرد في التذييل 1 من المرجع [21] مثال آخر يوضح منهجية إجراء التخطيط المسبق.

4-1- التخطيط المسبق للتخلص من النفايات

عند إجراء تخطيط مسبق للتخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث، من المهم أن يكون مفهوماً أن توافر الموارد التقنية والمالية والتنظيمية يمكن أن يؤثر على توقيت الخطوات المختلفة التي يتعيّن اتخاذها. وعلى سبيل المثال:

(أ) التخلص السريع: يمكن لدولة عضو تتمتع بالموارد والخبرة والبنية الأساسية اللازمة أن تختار الأخذ باستراتيجية تهدف إلى التخلص السريع نسبياً من النفايات. وفي هذه الحالة، سيُركز التخطيط المسبق بصورة أكبر على تحديد المرافق القائمة التي يمكن تكييفها أو توسيعها بأمان، باستخدام واحد أو أكثر من المرافق الإضافية المخصصة للتخلص من النفايات أو مفاهيم التخلص من النفايات التي لم تُستخدم من قبل، و/أو تحديد المواقع التي يمكن أن تكون مناسبة كمواقع للمرافق الجديدة، مع تطبيق إجراءات الترخيص القائمة إلى أقصى حد ممكن. ويكون التخلص السريع من النفايات مناسباً عندما تتوافر معلومات كافية عن الموقع وعندما يتبيّن من التقييم أثناء تمارين التخطيط المسبق أن

[1] اللجنة التوجيهية لإدارة المرحلة اللاحقة لحادث نووي أو حالة إشعاعية.

أماكن المواقع مناسبة - إذ يمكن من خلال ذلك تجنب المشاكل التي يمكن أن تحدث في المستقبل بسبب وجود مواقع غير محددة الخصائص وغير مناسبة للتخلص من النفايات.

(ب) التخلص المؤجل: يمكن للدولة العضو، إذا كانت تثق بأنها استوفت جميع المسائل الاجتماعية والسياسية والتقنية الداخلية المتعلقة بتحديد موقع مرفق التخلص من النفايات وتشييده وترخيصه، استخدام استراتيجية تؤجل التخلص من النفايات. وفي هذه الحالة، سينصب تركيز التخطيط المسبق بصورة أكبر على مواقع أو مرافق التصرف المؤقتة، سواءً كمناطق مؤقتة محدودة المدة أو للخزن على المدى الأطول. ومن الأفضل أن يُعالج التخطيط المسبق لأنشطة التصرف المؤقتة مواضيع مثل معايير المكان والترخيص ومعايير التشييد والممارسات التشغيلية.

(ج) الاستراتيجية الهجينة: من الممكن أيضاً تحديد استراتيجية هجينة، بمعنى أنه قد يكون هناك بعض أنواع النفايات المتوقعة التي يمكن التخلص منها بسهولة نسبياً في المرافق القائمة، في حين يمكن الأخذ بنهج يغطي مدى زمنياً أطول في ما يتصل بأنواع النفايات الأكثر تحدياً، أو لاستيعاب الأحجام الكبيرة جداً من النفايات.

4-1-1- تقييم القدرة القائمة في مجال التخلص من النفايات

يمكن أن تكون المرافق القائمة في بعض البلدان كافية لإدارة الاحتياجات العاجلة المتعلقة بمعظم أو كل النفايات الناتجة عن الحوادث الكبيرة. وفي حالات أخرى، قد لا تكون مرافق التخلص من النفايات موجودة، أو قد تكون القدرة غير كافية لاستيعاب النفايات الناتجة عن سيناريوهات الحوادث المحتملة بشكل معقول.

وأثناء مرحلة التخطيط المسبق، من المفيد استخدام مرافق التخلص الخاضعة لرقابة تنظيمية من أجل استخدامها مع أنواع متعددة من النفايات، وليس فقط المرافق التي تقبل النفايات المشعة. وفي بعض الدول الأعضاء، يمكن تحسين مرافق التخلص من النفايات غير المشعة أو توسيعها للسماح بالتخلص من أنواع محددة من النفايات الكبيرة الحجم والضعيفة النشاط الإشعاعي الناتجة عن حالة طوارئ، بما يتوافق مع حالة الأمان المعدة بصورة سليمة.

وستشمل عملية التخطيط القوية تحديد وتقييم المسائل التالية المتعلقة بالمرافق القائمة للتخلص من النفايات والقدرة على مناولة النفايات:

(أ) مساحة الأرض المشغولة والمكان بالنسبة لمحطات القوى النووية القائمة، والمنشآت العسكرية وأماكن الحوادث المحتملة الأخرى، ومرافق معالجة النفايات وتكييفها، وطرق النقل بالسكك و الحديدية والطرق السريعة.

(ب) أنواع النفايات المسموح بها، والسعة الإجمالية المسموح بها للتخلص من النفايات من حيث الحجم والنشاط، وقدرة التخلص الإضافية المخطط لها، ومعدلات الاستخدام التاريخية، وإمكانية توسيع المرفق.

(ج) القوانين أو اللوائح أو شروط التصاريح أو الاتفاقات المجتمعية أو عوامل الإنصاف الاجتماعي التي قد تسمح باستخدام المرفق أو التوسع في النفايات الناتجة في حالات الطوارئ أو تمنع ذلك أو تحد منه.

(د) الظروف البيئية، أو المنطقة العازلة أو قيود البنية الأساسية، أو خطط استخدام الأراضي في المستقبل، أو العوامل الأخرى التي يمكن أن تمنع أو تحد من استخدام المرفق أو التوسع في النفايات الناتجة عن الحوادث.

4-1-2- تقييم الأماكن والتكنولوجيات المحتملة للمرافق الجديدة للتخلص من النفايات

توفِّر معايير الأمان الصادرة عن الوكالة متطلبات اختيار المواقع التي تُحدد ما يُشكل موقعاً سليماً من الناحية التقنية للتخلص من النفايات والذي سيحمي صحة الإنسان والبيئة. وتوجد لدى الدول الأعضاء نُهج مختلفة بشأن المعايير الاقتصادية والاجتماعية والثقافية لتحديد المواقع، فضلاً عن المعايير البيئية التي ليس لها تأثير مباشر على حالة الأمان. وتُعزز عملية تحديد المواقع التي تجمع بشكل فعال بين جميع أنواع معايير تحديد المواقع احتمالات النجاح. ومع ذلك، سيختلف ترجيح المعايير المستخدمة في تحديد موقع مرفق التخلص من النفايات، ولا سيما في المناطق الملوثة بصورة خطيرة بسبب حادث نووي، مقارنة بما هو مطلوب لتحديد موقع مرفق التخلص في مناطق غير محظورة إشعاعياً في ظل ظروف غير طارئة

وإذا كانت المرافق القائمة للتخلص من النفايات محدودة من حيث القدرة أو ضعيفة من حيث إمكانات التوسع، سيكون من المفيد تحديد المناطق العامة التي تتميّز بخصائص مواتية في ما يتعلق بالجيولوجيا المائية، والخصائص الجيولوجية، وتصريف المياه السطحية، والنشاط الزلزالي، قبل حدوث حالة طوارئ. وتوفِّر عملية تحديد النطاق العديد من المزايا:

(أ) التحديد المبكر لمعايير التحديد الموضوعي للموقع، بالإضافة إلى فرص جمع المعلومات المتعلقة بهذه المعايير ومناقشتها مع أصحاب المصلحة المعنيين في غياب ظروف الطوارئ الفعلية.

(ب) تقصير الأُطر الزمنية المطلوبة لتحديد الموقع وترخيص المواقع الجديدة التي قد تكون ضرورية بعد وقوع حادث فعلي.

(ج) تعزيز ثقة الجمهور من خلال تكوين مجموعة من أصحاب المصلحة من الجمهور المطلع الذين يشاركون في التحديد المبكر للنطاق، مما يمكن أن يُسهل الاتصالات التي قد تُعزز ثقة الجمهور في القرارات المتخذة بعد وقوع حادث فعلي.

ويمكن لعملية تحديد النطاق أن تستخدم البيانات المتاحة أو البيانات الجديدة إذا سمح التمويل بذلك. ومع ذلك، بالنظر إلى أن اختيار مواقع التخلص من النفايات يمكن أن يكون مسألة حساسة للغاية، قد يكون من المناسب فقط في التخطيط المسبق إجراء دراسات واسعة نسبياً للخيارات في المنطقة المحيطة بالمرفق النووي التي تخضع للتقييم. وسيُحدد الموقع النهائي (المواقع النهائية) للتخلص من النفايات والتكنولوجيات المستخدمة في حالة وقوع حادث.

وعند النظر في مفاهيم التخلص المحتملة التي يمكن الموافقة عليها مسبقاً، قد يكون تقييم الخبرة في التعامل مع المرافق التي لديها متطلبات تصميمية محددة أسهل من تقييم المفاهيم التي قد تتطلب تقييمات واسعة النطاق خاصة بالموقع المحدد.

ومن أمثلة التخطيط المسبق لمرافق التخلص المحتملة العمل الذي قامت به اللجنة التوجيهية لإدارة المرحلة اللاحقة لحادث نووي أو حالة إشعاعية في فرنسا (سبقت مناقشتها في هذا القسم). ولم تُحدد مداولات التخطيط المسبق التي أجرتها اللجنة التوجيهية لإدارة مرحلة ما بعد حادث نووي أو طارئ إشعاعي في البداية مرفق مركز موريفيليه الصناعي لجمع النفايات وخزنها والتخلص منها (انظر التذييل السادس) كنموذج أوّلي مناسب للمرافق الجديدة لإدارة كميات كبيرة من النفايات الملوثة إشعاعياً والتي يمكن أن تنتج عن حادث، إذ لن يكن من المؤكد أن الظروف الجيولوجية في منطقة الحادث ستكون مماثلة لما في منطقة موريفيليه وتفي بنفس المعايير المنطبقة عليها. وتقوم اللجنة التوجيهية المذكورة بتقييم ما إذا كان من الممكن استخدام المبادئ المستخدمة في مرفق موريفيليه (اللائحة التنظيمية للتخلص من النفايات الخطرة) لتطوير مرفق متخصص يمكن أن يستقبل أيضاً مستويات منخفضة جداً من التلوث الإشعاعي، مع بناء (أو إعادة بناء) محلي للحاجز الطبيعي باستخدام مواد مستوردة، مثل الصلصال، على غرار ما هو متبع في مدافن النفايات الخطرة.

وبالمثل، تُحدد المتطلبات التصميمية والهندسية لمدافن النفايات الخطرة كيميائياً في الولايات المتحدة الأمريكية والتي تقرر أنها توفِّر المستوى اللازم من الاحتواء في مجموعة من الظروف الجيولوجية والجوية. وتشمل هذه المتطلبات (مدونة اللوائح الاتحادية: الجزء 264 من الباب الأربعين) عناصر مثل التصميم والمواد المستخدمة في البطانة ونُظم جمع السوائل المرتشحة، ومتطلبات الاستقرار، وتصاميم الغطاء النهائي. وإلى جانب معايير تحديد المواقع الأساسية (مثل تجنب السهول الفيضية أو المناطق النشطة زلزاليا) أثبتت هذه المرافق بنجاحها في البيئات الرطبة التي يبلغ فيها منسوب المياه الجوفية مستويات ضحلة نسبياً، والبيئات القاحلة التي توجد فيها المياه الجوفية على أعماق كبيرة جداً. وتُستخدم مرافق كثيرة أيضاً للتخلص من

النفايات التي تحتوي على تركيزات منخفضة نسبياً من النويدات المشعة، سواءً عن طريق الإعفاء، أو الناشئة عن أنشطة مثل إنتاج النفط والغاز. ومن المستصوب لأغراض التخطيط المسبق التحلي بالمرونة والقدرة على التكيف مع البيئات المختلفة.

وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تُصدر السلطات الرقابية متطلبات قياسية لمحتوى طلبات تصاريح مرافق التخلص من النفايات وتوفِّر خططاً قياسية للاستعراض الرقابي لأغراض التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع. ويُساهم توافر هذه النماذج القياسية في تقليل الوقت اللازم لتجميع طلبات الحصول على تصاريح للمرافق الجديدة للتخلص من النفايات واستعراض تلك الطلبات لاحقاً.

4-1-3- نُهج حساب المتوسطات والتخفيف والمزج

لن تكتمل مناقشة أحجام النفايات في سياق حالات الطوارئ النووية أو الإشعاعية ما لم تؤخذ في الاعتبار الآثار المحتملة للتخفيف المقصود وغير المقصود على الأحجام الإجمالية للنفايات المراد التخلص منها. ولأغراض هذا المنشور، يُشير التخفيف المقصود إلى خلط أو مزج النفايات التي تُظهر مستويات نشاط إشعاعي أعلى أو أقل في ظروف خاضعة للرقابة، أو المواد غير الملوثة، لتقليل مستويات النشاط الإشعاعي الكلية والسماح بإجراء تخلص مأذون به في مرفق مرخص. ويتولى في العادة وضع هذه النُهج الهيئات الرقابية بالاستناد إلى تحليلات حالة الأمان المناسبة.

ويمثل التخفيف غير المأذون به لتخريب معايير التخلص المسموح بها ممارسة غير مقبولة دولياً. وقد يكون التخفيف المأذون به جزءاً من نهج متدرج للتخلص من النفايات، ويحقق ذلك وفورات في التكلفة من خلال الاستخدام المناسب لمرافق التخلص المتعددة. ولأغراض هذا المنشور، يُشير التخفيف غير المقصود إلى الإجراءات المتخذة (أو غير المتخذة) في أعقاب حالة الطوارئ التي تؤدي إلى زيادة مستويات التلوث (وربما أحجام النفايات) من المواد التي لم تكن ملوثة من قبل أو المواد التي تحتوي على مستويات ضئيلة من التلوث. ويمكن أن يكون لهذه الكميات غير المقصودة أثر كبير على الاحتياجات من حيث قدرات التخلص من النفايات في المستقبل والمتطلبات من حيث الموارد ذات الصلة.

ويمكن أن يؤدي وضع النفايات الناتجة عن الحوادث في خنادق غير مبطنة أو في ظروف أخرى سيئة من حيث الاحتواء إلى تلوث كبير للتربة المحيطة والمياه الجوفية والمسطحات المائية السطحية من خلال نزوح النويدات المشعة من وحدات الدفن. وكما يتبيّن من تجربة محطة تشرنوبل للقوى النووية التي تُناقش هنا، والمواقع الموروثة المختلفة المبيّنة في التذييل السادس، من المحتمل حدوث تلوث غير مقصود بشكل خاص في المناطق التي ترتفع فيها معدلات هطول الأمطار وتتسم فيها التربة بالنفاذية. وتميل الآثار الضارة إلى الزيادة بالنسبة

للنفايات غير المتجانسة الطويلة العمر. وبمرور الوقت، يمكن أن يزداد حجم التربة المحيطة الملوثة. وفي حالة وقوع حادث، قد يكون هناك ما يبرر الخزن المؤقت في ظروف احتواء سليمة لحين توافر مرافق مناسبة التصميم للتخلص من النفايات، وهي عملية يمكن أن تمتد من بضع سنوات إلى عدة عقود.

ويؤدي حرث التربة الملوثة إلى تقليل تلوث السطح، عن طريق تخفيف تركيزات النويدات المشعة داخل عمق أكبر من التربة الملوثة. وقد يؤدي اتخاذ قرار لاحق بالحفر والتخلص من هذه التربة الملوثة إلى كميات كبيرة من النفايات التي تتطلب التخلص منها. وفي حين أن الحرث قد يتم دون أي نية للحفر في المستقبل، فإن تغيير خطة استخدام الأراضي للأغراض الزراعية أو النمو السكاني أو لأسباب أخرى يمكن أن يؤدي إلى إلغاء هذا القرار الأوّلي [75] .

4-1-4- مشاركة أصحاب المصلحة في التخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث

من الأهمية الحاسمة لوضع خطة واستراتيجية للتصدي لحادث نووي وبما يشمل جوانب التصرف في النفايات والتخلص منها، تزويد مجموعة واسعة من أصحاب المصلحة، ولا سيما أصحاب المصلحة المتضررين من الحادث، بالمعلومات وإشراكهم في العمل. وتتمثل الأهداف الرئيسية لبرنامج المشاركة والتواصل في بناء ثقة الجمهور، وتشجيع المشاركة الواسعة، وتحقيق أقصى درجات من القبول للحلول المقترحة للتخلص من النفايات، وفي الوقت نفسه التقليل إلى أدنى حد من التصورات العامة السلبية الناتجة عن عدم الإجابة على التساؤلات أو المعلومات المغلوطة. ويمكن أن يؤدي توفير المعلومات والسعي إلى الحصول على مدخلات بشأن التخلص من النفايات في حالات الطوارئ إلى فوائد متعددة، ومنها على سبيل المثال ما يلي

- يمكن أن تُعبِّر خطط واستراتيجيات التخلص من النفايات التي وضعت عن الاحتياجات والتفضيلات المحلية بشكل أفضل، مما يزيد من احتمالات التوصل إلى إجماع واسع لدعم الخطط والاستراتيجيات التي سيجري وضعها في نهاية المطاف.
- يمكن استكشاف المواضيع الحساسة في أجواء غير أجواء الطوارئ، مما يُشجع الحوار المدروس ووجهات النظر المتنوعة والتحقق من الحقائق من مصادر مطلعة.
- يمكن إنشاء آليات للتواصل واختيار الموظفين المدربين بحيث يمكن إجراء تبادل للمعلومات في حالة وقوع حادث فعلي من خلال شبكة قائمة بالفعل.
- يمكن إتاحة مصادر معلومات الأطراف الثالثة الموثوقة بمزيد من الكفاءة لوسائل الإعلام والجمهور بعد وقوع الحادث لتوفير معلومات سريعة ودقيقة ولتبديد المعلومات المغلوطة.

ويمكن للأسئلة التالية بشأن الخيارات الممكنة للتخلص من النفايات والمرافق والأماكن، أن تساعد على إطلاق هذه الحوارات:

- هل توسيع القدرة في مرافق التخلص من النفايات المشعة القائمة أمر عملي؟ وإذا كان الأمر كذلك، فإلى أي مدى يُعد هذا التوسع مرغوباً أو مناسباً؟ وهل يمكن استخدام مرافق متعددة للتصرف في النفايات لنشر الأثر؟
- إذا كانت هناك حاجة إلى مرافق جديدة للتخلص من النفايات، فما هي العملية التي ستستخدم لتحديد المواقع المناسبة؟ وهل يتعيّن أن تُحدد مسبقاً المواقع المفضلة بشكل عام؟
- إلى أي مدى سيؤثر تحديد مواقع المرافق الجديدة سلباً على خطط استخدام الأراضي الحالية أو المقصودة في المجتمعات المحلية المتضررة؟
- هل يتعيّن تقديم حوافز اقتصادية إلى المجتمعات المحلية التي تقبل التوسع الكبير في مرافق التخلص من النفايات القائمة أو إنشاء مرافق جديدة؟ وإذا كان الأمر كذلك، فكيف ينبغي أن تحدث هذه العملية؟
- هل هناك حاجة إلى تغييرات في التشريعات أو في معايير الأمان أو اللوائح لتسريع عملية ترخيص المرافق الجديدة للتخلص من النفايات أو زيادة المرونة التشغيلية في المرافق القائمة في حالة وقوع حادث؟ وهل ينبغي تقييم الاستثناءات الرقابية المتوافقة مع الأمان والمخاطر المجتمعية النسبية؟

وسيكون هناك تفاوت في العمليات المستخدمة وفي أصحاب المصلحة المشاركين في معالجة هذه الأسئلة تبعاً لتشريعات كل دولة عضو وسياساتها. ونشرت الوكالة عدداً من المنشورات بشأن إشراك أصحاب المصلحة، بما في ذلك النُهج الشاملة لاختيار المواقع والتكنولوجيات الجديدة للتخلص من النفايات، وبرامج الحوافز ومواضيع أخرى (على سبيل المثال، المراجع [70، 76]).

4-1-5- المسائل التقنية الأخرى في التخطيط المسبق للتخلص من النفايات

هناك مسائل تقنية كثيرة يتعيّن أخذها في الاعتبار عند التخطيط لطريقة تنفيذ التخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث. ويمكن أن يكون تحليل الفجوات بمثابة دعم فعال للتخطيط المسبق. وتقترح الوكالة [21]

(أ) إجراء تحليل للفجوات من أجل تقييم إمكانات البنية الأساسية للتخلص من النفايات وقدراتها، وكذلك الأدوات والطرق الأخرى وغير ذلك مما سيكون مطلوباً لتنفيذ سياسة

الحكومة للتخلص من النفايات في حالة وقوع حادث (بالاستناد إلى السيناريوهات التي تم النظر فيها).

(ب) اقتراح العمل الجديد المطلوب لمعالجة أي فجوات محددة؛ ويمكن أن يشمل ذلك إجراء بحث وتطوير لتحسين إمكانات التخلص القائمة أو تطوير نُهج جديدة.

(ج) تقدير أرصدة النفايات المحتملة لحالات الطوارئ المفترضة والتي تُعبِّر عن الحالة الوطنية (مع مراعاة أعداد المرافق النووية وأنواعها وأماكنها، ومستخدمي النظائر المشعة والمصادر الإشعاعية).

(د) تقدير أرصدة يتعيّن أن يشمل الانتشار المرجح (الغيمة المرجحة) للتلوث، وتنقل الملوثات في البيئة، وحجم المواد الملوثة وخصائصها (مثل التربة والأشجار والمباني وغيرها).

(هـ) النظر في وضع تصاميم نمطية وقابلة للتطوير للتخلص من نفايات الحوادث التي يمكن أن تُمكن من سرعة الترخيص والتنفيذ السريع.

(و) تقييم إمكانية نقل تصاميم مرافق التخلص المرخصة القائمة للسماح بسرعة تنفيذ وترخيص مرافق جديدة للنفايات الناتجة عن الحوادث - مع ملاحظة أنه إذا كانت أنواع النفايات وتصاميم المرافق وأماكن المرافق الجديدة المقترحة مماثلة للمرافق القائمة المعنية، من المتوقع أيضاً أن يكون أداء الأمان الخاص بها مماثلاً.

4-2- التخطيط للتصرف في النفايات بعد وقوع حادث

تمضي عملية التخطيط للتصرف في النفايات بعد استقرار الحادث بطريقة منهجية بهدف أساسي يتمثل في حماية صحة الإنسان ورفاهه، وكذلك التقليل إلى أدنى حد من مقدار النفايات المشعة التي يتعيّن التصرف فيها على المدى الطويل.

ويتم التصدي للحادث على مراحل. وعند القيام بأنشطة التخطيط، من المهم دراسة المراحل المختلفة لجهود التصدي بشكل جيد، بما في ذلك الانتقال بين المراحل. ويوفر العدد GSG-11 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة [73] معلومات عن الترتيبات الخاصة بالمرحلة الانتقالية من التصدي لحالة الطوارئ إلى إنهاء حالة الطوارئ النووية أو الإشعاعية، بما في ذلك أنشطة التصرف في النفايات المشعة. ويمكن لنقطة النهاية المحددة أن تُيسِّر الانتقال إلى المراحل اللاحقة وتوفِّر مقاييس ملموسة لنجاح جهود التصدي. وعلى سبيل المثال، مع تقدم مراحل عملية التنظيف في حادث محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، أصبحت أربع مراحل تشغيلية واضحة[2]:

(أ) الوصول بالمحطة إلى حالة الاستقرار (1979-1980).

(ب) التصرف في النفايات (1980-1983).
(ج) إزالة التلوث (1981-1985).
(د) تفريغ الوقود (1984-1990).

وتداخلت المراحل، وكانت الأنشطة ضمن هذه المراحل تفتقر عموماً إلى بدايات ونهايات واضحة. وخلال الأشهر الخمسة عشر الأولى بعد وقوع الحادث، أُجري إغلاق بارد للمفاعل، وأزيلت الغازات الانشطارية من الاحتواء، واتُبع نهج منظم للسيطرة على التلوث ووضعت عمليات لمعالجة المياه الملوثة. وشملت مرحلة التصرف في النفايات معالجة المياه الملوثة، واسترجاع النفايات، وجُمدت النفايات، وأخيراً خُزنت النفايات المشعة وتم شحنها. ووجهت مرحلة إزالة التلوث أساساً نحو تقليل تعرض العمال وإتاحة إمكانية الوصول لتيسير عملية التنظيف وإزالة الوقود في نهاية المطاف. وكانت مرحلة تفريغ الوقود معقدة وشملت في البداية وضع استراتيجية لتحديد خصائص حطام الوقود ونُهج إزالته.

ويتناول هذا القسم بمزيد من التفصيل مثالين للتخطيط لمرحلة ما بعد الحادث بالاستناد إلى التجارب في محطتي تشرنوبل وفوكوشيما داييتشي للقوى النووية على النحو الوارد وصفه في القسمين 4-2-1 و4-2-2.

4-2-1- المثال 1: تخطيط عمليات الاستعادة في موقع وحدة تشرنوبل رقم 4

كان من الضروري إجراء تحليل شامل للتخطيط المفصل للإجراءات والتدابير اللازمة للتصدي للظروف المعقدة والشديدة التي أعقبت الحادث في تشرنوبل. وبدأ التخطيط، الموثق في وحدة تشرنوبل 4: التدابير القصيرة والطويلة الأجل[2][1]، في مطلع عام 1996 لتحليل الخيارات وتقديم توصيات مفصلة لتحقيق ظروف مأمونة إيكولوجياً. وأجرى التحليل فريق دولي من الخبراء قام، بالتعاون مع خبراء أوكرانيين، بالتأكد من التدابير المطلوبة والنُهج التي يمكن اتباعها لتنفيذ تلك التدابير. وصدر تقرير نهائي يُلخص النتائج في تشرين الثاني/نوفمبر 1996. وتضمن التقرير مسار العمل الموصى باتباعه كناتج أوّلي. وبناءً على نتائج التقرير، وجهت أوكرانيا ومجموعة السبعة/الثمانية والمفوضية الأوروبية الفريق لإعداد خطة تنفيذ الساتر الواقي [1]. وتم الانتهاء من خطة تنفيذ الساتر الواقي في حزيران/يونيه 1997 وصدرت الموافقة عليها خلال الدورة الثالثة

[2] تُشير 'وحدة تشرنوبل 4 إلى الوحدة 4 في محطة تشرنوبل للقوى النووية التي تضررت في الحادث النووي الذي وقع في نيسان/أبريل 1986. ويُشار في كثير من الأحيان إلى وحدة تشرنوبل 4 باسم 'الساتر' أو 'هيكل الساتر'، والترجمة الروسية هي 'Ukritiye' والترجمة الأوكرانية هي 'Ukryttja'؛ ويُستخدم أيضاً في بعض الأحيان مصطلح 'التابوت' 'Sarcophagus'.

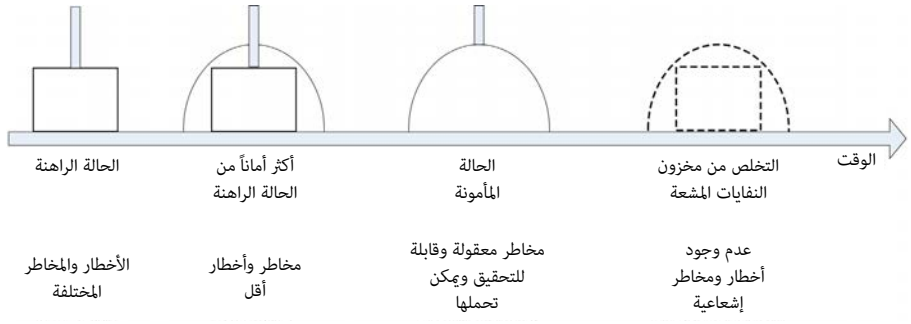
والعشرين لقمة مجموعة الثمانية التي عُقدت في دنفر، كلورادو، في حزيران/يونيه 1997. ويرد أدناه ملخص لأنشطة التطوير ومنهجية اتخاذ القرارات والخطط الناتجة.

4-2-1-1- أولويات وقرارات تحويل موقع وحدة تشرنوبل *4*

اعتمد الفريق الدولي نهج تحليل العجز لتحديد أهداف تحويل وحدة تشرنوبل 4 إلى حالة مأمونة إيكولوجياً. وتمثل الهدف الرئيسي لفريق الخبراء في حماية الجمهور والعمال والبيئة، وتطلب ذلك إجراء خزن مأمون لجميع المواد المشعة والنووية. وبعد حوار موسّع، تم التوصل إلى تفاهم مشترك على عدم إمكانية تحويل وحدة تشرنوبل 4 إلى مرفق خزن دائم ومأمون للمواد النووية. وبالتالي، تقرر إزالة المخزون باعتباره الهدف النهائي الطويل المدى، وذلك باتباع نهج متدرج لضمان الأمان، كما هو موضح في الشكل-8. ويبقى الإطار الزمني لتنفيذ التخلص من المخزون المشع مفتوحاً، في انتظار ما يُتخذ من قرارات في المستقبل.

وفي الخطوة التالية، خلص الخبراء إلى أن من الضروري وضع تدابير لمعالجة مسائل الأمان المحددة التالية وتنفيذها بصورة منهجية

(أ) المخاطر المتصلة بالمصدر.
(ب) الأمان النووي: الوقود/المواد المحتوية على وقود (المواد الانشطارية).
(ج) الأمان الإشعاعي: المواد الإشعاعية، بما فيها حطام قلب المفاعل.
(د) المواد الخطرة الأخرى: المواد القابلة للحرق والمتفجرة والسامة.
(ه) المخاطر التشغيلية.
(و) وظائف وأنشطة العمل الخطرة، والأمان الصناعي.
(ز) الغبار والإشعاع.
(ح) طرق الوصول والأمان الصناعي.
(ط) المخاطر العرضية.
(ي) الوحدة 4 - انهيار الساتر.
(ك) الحرائق.
(ل) نُظم الطوارئ والتأهب.



الشكل-8- نهج مرحلي لتحويل موقع وحدة تشرنوبل 4 إلى حالة مأمونة بيئياً. بتصرف من المرجع [1].

ورتُبت مسائل الأمان إلى فئات عمل وحُللت بمزيد من التوسع من حيث مدى الإلحاح، والجدوى، وإمكانية التنفيذ المبكر. وأسفر هذا النشاط عن قائمة بالتدابير الاستراتيجية العاجلة والضرورية والمستصوبة. ويمكن الرجوع إلى تفاصيل العملية والمسائل المرتبطة بها في التقرير ذي الصلة [1]

وبمجرد تحديد الأهداف والتدابير الاستراتيجية وترتيب أولوياتها، أُعدت شجرة قرارات قائمة على الأمان في ما يتعلق بتخفيف المخاطر. ومن الناحية المجردة، كان من المقرر تنفيذ ثلاثة قرارات رئيسية: كان من المقرر معالجة المخاطر القصيرة الأجل من خلال تدابير عاجلة في غضون مدة زمنية قصيرة، مع إعطاء الأولوية القصوى للتمويل على المدى القريب (القرار رقم 1). وفي الخطوة التالية، كان من الضروري اتخاذ قرار بشأن ما إذا كان من الممكن، وفقاً للمعايير المقبولة دولياً، أن تبقى أرصدة المخزون في موقعها الحالي (القرار رقم 2). وبناءً على التفاهم المشترك، جرى التوصل إلى عدم إمكانية تحويل الموقع إلى مستودع يفي بهذه المعايير. وكان القرار التالي المطلوب (القرار رقم 3) يتعلق بتوقيت إزالة الأرصدة ونقلها إلى المستودع. وما زال القرار رقم 3 معلقاً حتى وقت كتابة هذا المنشور.

4-2-1-2- تحليل السيناريوهات وإعداد مسار العمل الموصى به

اقترح الخبراء والمنظمات المتخصصة الداعمة للمشروع سيناريوهات مختلفة. وحُللت تلك السيناريوهات بالتفصيل، بما في ذلك جدواها ومخاطر تنفيذها وتكلفتها وتوقيتها. وبعد تحليل كل سيناريو مقترح ثم إجراء تحليل مقارن لإيجابياته وسلبياته، تحديد مسار العمل الموصى به لتوفير أساس منظم يمكن من خلاله معالجة المخاطر القصيرة والطويلة الأجل. ونتج عن ذلك دراسة محددة للسيناريوهات، وهي الدراسة الائتلافية. واقترحت الدراسة تدابير شاملة لإنشاء ساتر احتواء خرساني جديد وطويل العمر من النوع المقوس والمزدوج الجدران إلى جانب

مرافق داعمة لحصر وحدة المفاعل المتضررة واحتوائها بأمان لمدة لا تقل عن 100 عام. وكانت السيناريوهات الأخرى التي جرى النظر فيها، على سبيل المثال، هي التثبيت الهيكلي للهيكل الساتر القائم، أو احتواء المفاعل التالف في هيكل خرساني متجانس ثقيل، أو إنشاء هياكل احتواء خفيفة. وكان الحل الأنسب الذي جرى تنفيذه في نهاية المطاف هو نظام الاحتواء المأمون الجديد الذي نُقل بنجاح إلى موقعه النهائي في عام 2016. وللأغراض المرجعية، ترد مقتطفات بشأن المهام المرتبطة بكل مرحلة أدناه [78]:

"المرحلة 1: الإجراءات العاجلة والتدابير الأخرى القصيرة الأجل

- المهمة 1-1- تقليل احتمالات وقوع حوادث الانهيار عن طريق التثبيت الهيكلي (تُنسق مع المهمتين 2-1و2-2)
- المهمة 1-2- تقليل عواقب حوادث الانهيار (تنسق مع المهمتين 2-1 و2-2)
- المهمة 1-3- زيادة الأمان النووي عن طريق التحكم في الحرجية وإدارة المياه المحتجزة (كجزء من نظام رصد متكامل)
- المهمة 1-4- زيادة أمان العمال والأمان الصناعي (ضرورة استخدام معدات رصد وأمان مناسبة)
- "المرحلة 2: الإعداد للتحويل الطويل الأجل إلى موقع مأمون بيئياً
- المهمة 2-1- إتاحة سُبل وصول أكثر أماناً عن طريق التدريع والتثبيت قدر الإمكان باستخدام الحشوات الإسمنتية ومثبتات الغبار (بالتوازي مع تنفيذ المرحلة 1)
- المهمة 2-2- توفير الاحتواء وإزالة الأجزاء العلوية غير المستقرة. وينبغي، بدلاً من ذلك، تصميم الاحتواء بحيث يتحمل الانهيار
- المهمة 2-3- وضع استراتيجية للإزالة والتنفيذ الاختياري لإزالة جزئية مبكرة
- "المرحلة 3: التحويل إلى موقع مأمون بيئياً
- المهمة 3-1- تحويل الموقع إلى هيكل مأمون (بالتوازي مع تنفيذ المرحلة 1)
- المهمة 3-2- التحكم في الهيكل المأمون وصيانته لحين إزالته (بالتوازي مع تنفيذ المرحلة 1)
- المهمة 3-3- إزالة الأرصدة المتبقية عندما يكون ذلك مناسباً وعند الضرورة."

ويُحدد مسار العمل الموصى به بهدف تحديد إطار يمكن من خلاله تحويل موقع الحادث إلى حالة مأمونة بيئياً. ويوفِّر الإطار الناتج نهجاً متدرجاً ولكنه مرن لاتخاذ القرارات التي تدعم أيضاً تدابير التحسين في المستقبل. وحُدد مسار العمل الموصى به في الفترة بين أيار/مايو 1996 وكانون الأول/ديسمبر 1997.

4-2-1-3- خطة تنفيذ الساتر: الوضع الحالي والنتائج المحققة

في إطار معالجة احتمالات انهيار الساتر وعواقب ذلك، تناولت المهام 2-3 ومن 1-3 إلى 3-3 الكثير من أوجه عدم اليقين المرتبطة بتنفيذ المهام من 1-1 إلى 2-2. وانصب الإجماع على المُضي قدماً في تنفيذ المهام من 1-1 إلى 2-2، مع التركيز على إجراء تحسين كبير في الأمان وتوفير أساس أفضل للقرارات اللاحقة المطلوبة في إطار المهام من 2-3 إلى 3-3.

وقررت حكومة أوكرانيا ومجموعة السبعة والاتحاد الأوروبي في مطلع عام 1997 تنفيذ المرحلة 1 والمهمتين 2-1 و2-2 من المرحلة 2 والقيام في الوقت نفسه بإعداد القاعدة التي يستند إليها اتخاذ القرارات في الخطوات التالية (المهمة 2-3 ومهام المرحلة 3). وتمثل خطة تنفيذ الساتر التي وضعها فريق الخبراء الدولي خطة التنفيذ التي تغطي المرحلة 1 والمهام 2-1 و2-2 من المرحلة 2. وعلى هذا النحو، تغطي خطة تنفيذ الساتر الجزء الأول من مسار العمل الموصى به ووضعت بشأنه خطة تمويل موثوقة. وكانت نتائج مشروع التدابير القصيرة والطويلة الأجل بمثابة خط الأساس لقرار إعداد وتنفيذ خطة تنفيذ الساتر [1].

وبدأ تطبيق خطة تنفيذ الساتر في عام 1998. وتحقق أول إنجاز في عام 2008 في ما يتعلق بالأمان بعد الانتهاء من إجراءات التثبيت في هيكل الساتر. وفي عام 2007، مُنح عقد نظام الاحتواء المأمون الجديد وبدأ العمل في تنفيذه. والغرض الرئيسي من نظام الاحتواء المأمون الجديد هو حماية العمال والجمهور والبيئة من أثر الأخطار النووية والإشعاعية المرتبطة بهيكل الساتر وتوفير الظروف التي تُمكن من إجراء مزيد من أعمال التفكيك وإزالة المواد المحتوية على وقود والنفايات المشعة.

وقبل تثبيت نظام الاحتواء المأمون الجديد، كان لا بد من الانتهاء من عدة أنشطة أخرى، بهدف تحسين ظروف الأمان العام في هيكل الساتر. وشملت هذه الأنشطة إنشاء نظام الرصد الآلي المتكامل وتشغيله، وهو نظام يتألف من عدة نُظم فرعية مصممة لرصد الإشعاعات والأمان النووي، وكذلك النشاط الزلزالي في الموقع والثبات الهيكلي لهيكل الساتر الأصلي. وبالإضافة إلى ذلك، جرى تحديث العديد من النُظم القائمة، بما فيها نُظم الحماية المادية وإخماد الغبار والحماية من الحرائق.

وفي ما يتعلق بالوضع النهائي لنظام الاحتواء المأمون الجديد فوق هيكل الساتر، كان لا بد أيضاً من الانتهاء من عدد كبير من الأنشطة التحضيرية، مثل تفكيك الهياكل والمكونات 'القديمة' (على سبيل المثال، أنبوب التهوية القديم VT-2)، وإزالة المواد المفككة من الأماكن التي يمكن الوصول إليها داخل هيكل الساتر، وتشييد نظام الاحتواء المأمون الجديد نفسه على مسافة مأمونة من هيكل الساتر. ونُقل نظام الاحتواء المأمون الجديد إلى مكانه فوق هيكل الساتر في عام 2016، وبدأت بعد ذلك أنشطة التشغيل في عام 2017. وانتهت أعمال التركيب وإدخال نظام الاحتواء المأمون الجديد في الخدمة في عام 2019.

4-1-2-4- التحديات وآفاق المستقبل

ما زال هناك عدد من التحديات وأوجه عدم اليقين ذات الصلة التي تتطلب تقييماً دقيقاً وبحثاً وتحقيقاً واتخاذ قرارات معقدة، ويمكن أن يكون لها أثر كبير على تخطيط المرحلة 3، التحويل إلى موقع مأمون بيئياً، وتنفيذها في المستقبل:

(أ) التصرف في المواد المحتوية على وقود. يتعيّن تحديد الخصائص الكاملة للمواد المحتوية على وقود في ما يتعلق بحالتها النووية والفيزيائية والكيميائية، ويتعيّن تطوير الطرق والتكنولوجيات اللازمة لإزالة المواد المحتوية على وقود من الموقع. ويمكن دعم هذه الأنشطة بصورة أفضل من خلال وضع برنامج شامل للبحث والتطوير قبل الشروع في عملية التجميع والإزالة في الموقع. وستنشأ عن مكان وجود المواد المحتوية على وقود وتكوين هذه المواد داخل هيكل الساتر، وجرعات التعرض العالية، وعدم إمكانية الوصول إلى أجزاء معيّنة من الهيكل تحديات تقنية في ما يتصل بإزالة المواد المحتوية على وقود المتراكمة والمحددة.

(ب) التصرف في 'غبار الوقود'. بالإضافة إلى غبار الوقود الناتج عن الحادث، فإن جمع وإزالة المواد المحتوية على وقود سيتطلب تقنيات معطلة ومتلفة؛ وستولِّد هذه التقنيات أيضاً 'غبار الوقود'. ويتعلق أحد المجالات المثيرة للقلق بجسيمات الغبار الصغيرة جداً، واحتمال انتشار التلوث وابتلاعه. وتتطلب الدراسات وأنشطة التخطيط اللازمة لمعالجة مسائل غبار الوقود فحصاً ودراسة شاملين في إطار برنامج البحث والتطوير. ومن الاعتبارات الرئيسية في أنشطة التخطيط في المستقبل تطوير طرق التنفيذ المناسبة بالإضافة إلى تدابير تقليل مخاطر تعرض العمال وضمان الوقاية من الإشعاعات.

(ج) إدارة المياه الملوثة والنفايات المشعة السائلة المتدفقة من هيكل الساتر. لا يوجد حالياً مرفق لفصل نويدات ما وراء اليورانيوم المشعة والجسيمات العضوية من المياه الناتجة عن هيكل الساتر، ولكنه سيُشكل خطوة أساسية للتمكين من معالجة تيارات النفايات من خلال المرافق القائمة لمعالجة النفايات المشعة السائلة.

(د) تفكيك هيكل الساتر الحالي. تتطلب الهياكل غير الثابتة في هيكل الساتر تفكيكاً. ومع ذلك، يُهدد هذا النشاط أيضاً بزيادة مستوى التلوث الإشعاعي العالق في الهواء وجرعات التعرض داخل نظام الاحتواء المأمون الجديد. وعلاوة على ذلك، سيؤدي تفكيك الهياكل والمكونات الملوثة إشعاعياً إلى توليد نفايات مشعة، بما في ذلك الحطام الذي يحتوي على مواد محتوية على وقود الذي لا بد من إزالته وخزنه/التخلص منه لاحقاً. ولتلبية الاحتياجات ذات الصلة، سيتعيّن تجهيز البنية الأساسية الإضافية للتصرف في النفايات قبل اتخاذ خطوات مهمة لدعم تفكيك هيكل الساتر الحالي.

(هـ) المرافق الإضافية اللازمة للتصرف في النفايات المشعة. كما ذُكر أعلاه، ستنشأ عن تفكيك هيكل الساتر وإزالة المواد المحتوية على وقود والنفايات مشعة أخرى تدفق نفايات إضافية تتطلب معالجة وخزناً والتخلص منها في نهاية المطاف. وفي ما يتعلق بالنفايات الضعيفة الإشعاع، سيجري إنشاء مرافق إضافية وتشغيلها بالقرب من محطة تشرنوبل للقوى النووية، في حين لا يزال يتعيّن تطوير مرافق أخرى للنفايات القوية الإشعاع، مثل المستودعات الجيولوجية العميقة للنفايات المتوسطة الإشعاع و/أو القوية الإشعاع. ونظراً للتكاليف المرتبطة بإنشاء هذه المستودعات ومتطلبات التخطيط المرتبطة بمرافق التخلص الجيولوجي، فإن من غير الواقعي إنشاء مرفق التخلص المخصص للنفايات الأقوى من حيث نشاطها الإشعاعي والأطول عمراً الناتجة عن الحادث في محطة تشرنوبل للقوى النووية. ولا يمكن النظر في التخلص من هذه النفايات إلا مع الجرد الوطني للمواد المتوسطة الإشعاع والقوية الإشعاع/الوقود النووي المستهلك. ولذلك، تتطلب أنشطة التخطيط للتصرف في نفايات الحوادث التي تتطلب تخلصاً جيولوجياً، إجراء تنسيق وثيق مع المنظمة الوطنية للتصرف في النفايات، المسؤولة عن تطوير مرافق التخلص الجيولوجي، وإدماجها في الاستراتيجية الوطنية الأوكرانية بشأن النفايات المشعة.

ويمكن استخلاص الاستنتاجات العامة التالية بشأن التخطيط لتنفيذ المزيد من التدابير لضمان أمان هيكل الساتر في المستقبل:

(1) ما زال هيكل الساتر تحت نظام الاحتواء المأمون الجديد مرفقاً نووياً متضرراً. ويُمثل هذا النظام وسيلة لتوفير ظروف أكثر أماناً للجمهور والعمال والبيئة أثناء استمرار أنشطة الإخراج من الخدمة، وهو ليس غاية في حد ذاته. وعلى الرغم من تحسن حالة وحدة تشرنوبل 4 من حيث الأمان، فإنها ما زالت محفوفة بأخطار وتتطلب بذل جهود كبيرة، بما في ذلك استثمار الموارد والوقت لتحقيق حالة مأمونة بيئياً بالمعنى الحقيقي للكلمة. وفي حين أن نظام الاحتواء المأمون الجديد مُجهزاً لتفكيك وإزالة المواد المحتوية على وقود وغيرها من النفايات المشعة، ما زالت هناك عدة تحديات في حاجة إلى حل. وتتطلب هذه التحديات والمخاطر المرتبطة بها وأوجه عدم اليقين الخاصة بعملية إزالة المواد المحتوية على وقود والنفايات المشعة تقييماً دقيقاً للسماح بالتخطيط لجميع الإجراءات الضرورية وتطويرها وتنفيذها في نهاية المطاف بطريقة مناسبة.

(2) يلزم إعادة تقييم الاستراتيجيات الحالية الطويلة والقصيرة الأجل لتحويل هيكل الساتر من أجل إيلاء المراعاة المناسبة لنطاق العمل المتوقع على مدار 100 عام من عمر نظام الاحتواء المأمون الجديد، بما في ذلك وضع خارطة طريق مفصلة للأنشطة التي سيجري تنفيذها في المستقبل. وتحقيقاً لهذه الغاية، يمكن النظر في الأخذ بنهج مرحلي يوفِّر

المرونة في خيارات التصميم في المستقبل. وسيظل للتعاون الدولي والتبادل المستمر للمعلومات بين الخبراء أهمية حاسمة في التخطيط ثم تنفيذ استراتيجية التعافي بما يتوافق مع المرحلة 3، التحويل إلى موقع مأمون بيئياً.

4-2-2- المثال 2: خارطة طريق محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

تصور خارطة الطريق المتوسطة والطويلة الأجل نحو إخراج محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية من الخدمة [59] مراحل الأنشطة في الموقع. وتُستكمل خارطة الطريق مراراً بتحديثات، وتحتوي على ثلاث مراحل، موضحة بإيجاز أدناه

(أ) المرحلة 1:
- فترة التثبيت والتحضير لاسترجاع الوقود المستهلك من حوض الوقود المستهلك في الوحدة 4.
- انتهت هذه المرحلة في 18 تشرين الثاني/نوفمبر 2013 عندما بدأت عملية إزالة الوقود المستهلك من حوض الوقود المستهلك في الوحدة 4.

(ب) المرحلة 2:
- من نهاية المرحلة 1 إلى بداية استرجاع حطام الوقود.
- الفترة المستهدفة: 10 سنوات تقريباً.
- بما في ذلك أنشطة البحث والتطوير والتخطيط الهندسي والتحقيقات في الحالات الداخلية.
- التصرف في المياه الراكدة في المباني وأحواض الوقود المستهلك ومعالجتها بصورة متدرجة.

(ج) المرحلة 3:
- من نهاية المرحلة 2 إلى انتهاء الإخراج من الخدمة.
- الفترة المستهدفة: 30 إلى 40 عاماً تقريباً.
- المرحلة 3-(1) هي الفترة الممتدة من بداية استرجاع حطام الوقود حتى نهاية عام 2031.
- الانتهاء من إزالة الوقود من أحواض الوقود المستهلك من 1 إلى 6.
- البدء في تجربة استرجاع حطام الوقود المستهلك التي ستزداد وتيرتها تدريجياً.

أصدرت هيئة الرقابة النووية توجيهاتها إلى شركة طوكيو للطاقة الكهربائية بتقديم خطة لتنفيذ التدابير التي سيجري اتخاذها في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية [79] في تشرين الثاني/نوفمبر 2012. واستجابة لهذا التوجيه من هيئة الرقابة النووية، وضعت شركة طوكيو للطاقة

الكهربائية خطة تنفيذ [80] وقدمتها إلى هيئة الرقابة النووية في كانون الأول/ديسمبر 2012. واستعرضت هيئة الرقابة النووية خطة التنفيذ وأصدرت موافقتها عليها في آب/أغسطس 2013. وقُدم طلب لتغيير خطة التنفيذ في أيلول/سبتمبر 2013، وصدرت الموافقة على الطلب في تشرين الثاني/نوفمبر 2013. وتصف خطة التنفيذ الجدول الزمني العام لتثبيت المرافق المحددة وتصميمها وأمنها وتقييم المخاطر المرتبطة بها. وتصف الخطة أيضاً خطط إزالة حطام الوقود وتتناول الإخراج من الخدمة. وفي ما يتعلق بالتخلص النهائي من النفايات في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية خارج الموقع، تتبع وزارة البيئة نهجاً متعدد الخطوات ينتقل من بداية موقع الخزن المؤقت مروراً بمراحل البحث والتطوير وتقييم الخيارات إلى اختيار الموقع وإجراء التخلص النهائي، باتباع خطة من ثماني خطوات على مدى إطار زمني مدته ثلاثون عاماً [81].

3-4- ملاحظات إضافية بشأن خطة ما بعد الحادث

تضع الخطة الفعالة للتصرف في النفايات بعد وقوع حادث جدولاً زمنياً يغطي كامل دورة العمر وتقديرات التكلفة ذات الصلة. وسيكون ذلك ضرورياً لضمان تحديد الاحتياجات من التمويل وتأمين مصادر التمويل. ويُعد تحديد الخيارات والتحليل واتخاذ القرار من النقاط المحورية الرئيسية لخطة التصرف في النفايات. وكان تقييم خيارات التكنولوجيا عنصراً رئيسياً في جهود استصلاح الوحدة 2 في ثري مايل آيلند. ويُقدم التاريخ التقني الخاص بعملية تنظيف الوحدة 2 في ثري مايل آيلند ملخصاً ممتازاً لعملية اتخاذ القرار المستخدمة لتحديد التكنولوجيات واختيارها [2].

ومن المهم تنسيق التخطيط التمهيدي الذي يفضي إلى مرحلة التخلص النهائي من النفايات (انظر القسم التالي) مع الخطط العامة الخاصة بالتصرف والتنظيف طوال دورة العمر في الموقع. وتحقيقاً لهذه الغاية، يمكن استخدام خطة التصرف في النفايات لتحديد الأولويات التي تُركز على تقليص الأخطار والمخاطر. وسيوفِّر تقييم أرصدة النفايات، بما في ذلك التنبؤات بالنفايات المستقبلية، من جانبه الأساس للتصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها وتحديد الجدول الزمني لإجراءات التخلص من النفايات الحالية والمستقبلية. وكما هو الحال مع أي أرصدة نفايات، ينبغي أن يأخذ التخطيط في الاعتبار النفايات المتولدة أثناء الأنشطة المستقبلية والنفايات الثانوية الناتجة عن الأنشطة المقررة لاستعادة النفايات ومعالجتها/تجهيزها. ويمكن تحديد الحاجة إلى تعديلات في المرافق أو البنية الأساسية في المستقبل وتوقيت إجراء تلك التعديلات بناءً على التوقعات المتعلقة بهذه النفايات.

وسيشمل التخطيط الفعال للتصرف في النفايات أيضاً تحديد الجوانب المشتركة المتعلقة بالقبول الرقابي والترخيص. وتُعد الاتصالات مع أصحاب المصلحة، بما في ذلك الجمهور، مكونات

رئيسية للخطط ويمكن أن توفِّر محفلاً لتبادل المعلومات المفتوحة. ومن شأن التحديثات الروتينية للخطة، وخاصة التحديثات التي تكشف عن تقدم ملموس، أن تُعزز ثقة الجمهور.

وعلاوة على ذلك، يمكن أن تشمل الخطة ترتيبات للبحوث والتطوير من أجل معالجة الفجوات التكنولوجية المعروفة والناشئة. ويمكن الاستفادة من قدرات المنظمات الخارجية الوطنية والدولية، لدعم البحث والتطوير. وعلاوة على ذلك، يمكن أيضاً استخدام هذه الكيانات في الاستعراضات البرنامجية والتكنولوجية أثناء القيام بجهود التنظيف.

ويلزم الحفاظ على خطة إدارة النفايات كوثيقة حيّة واستكمالها بتحديثات دورية لكي تُعبِّر عن الاحتياجات والمدخلات الجديدة والمتغيرة من المعلومات. ومن المتوقع استعراض خطة التصرف في النفايات وتنقيحها بصورة روتينية بسبب تغيُّر الأولويات والظروف المتغيرة والاحتياجات الناشئة. ويوصى بالحصول على تعقيبات بشأن النتائج الإيجابية والسلبية في عمليات الاستعراض البرنامجي لضمان التقدم المستمر في جهود التنظيف.

5- تنفيذ خطة التصرف في النفايات

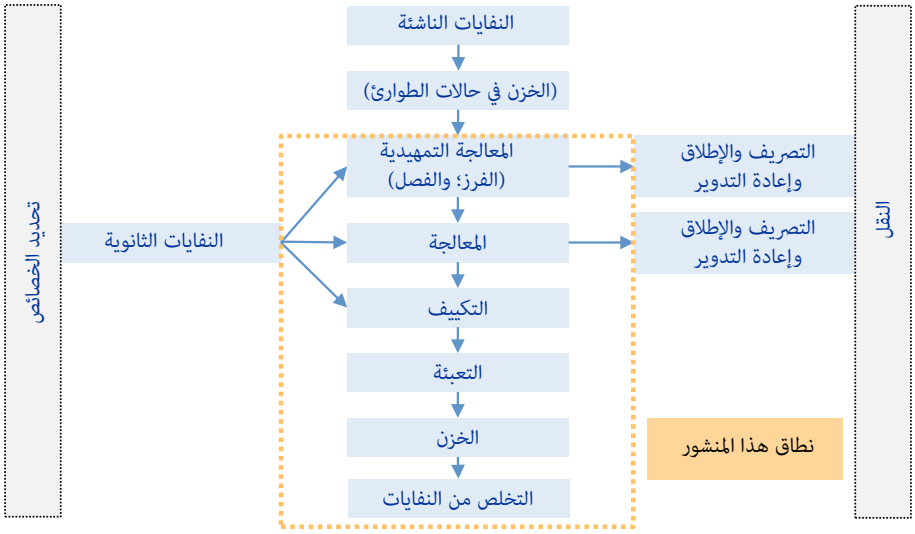
الدروس الرئيسية المستفادة:

- تعتمد متطلبات التصرف في النفايات واختيار التكنولوجيا على تفاصيل سيناريو الحادث من حيث أحجام النفايات المتولدة وأنواعها وتوزيعها الجغرافي.
- الخطوات الأساسية المتبعة في التصرف في النفايات هي الخطوات نفسها المتبعة مع جميع النفايات المشعة. ومع ذلك، قد يكون النطاق المطلوب أكبر بكثير والجداول الزمنية للتنفيذ أقصر. وقد يلزم إقامة تعاون موسع عبر الحدود.
- يتعيّن أن يؤخذ في الاعتبار مدى التوزيع الجغرافي للنفايات عند اختيار المرافق المركزية أو الموزعة أو المتنقلة. وقد يلزم في كثير من الأحيان الجمع بينها.
- من شبه المؤكد أن الخزن في حالات الطوارئ سيكون مطلوباً قبل إنشاء البنية الأساسية لمعالجة النفايات وخزنها لفترات طويلة أو التخلص منها.
- يمكن أن تؤدي إعادة استخدام المرافق القائمة أو إعادة توظيفها إلى تقصير الجداول الزمنية وزيادة عدد الخيارات المتاحة للتصرف في النفايات.
- قد يتطلب إلحاح الحالة جداول زمنية مضغوطة لتصميم مرافق جديدة أو مؤقتة وترخيصها وتشييدها.

- سيؤدي تشييد و/أو تشغيل المرافق في موقع ملوث إلى متطلبات إضافية (مثل الملابس الواقية) لوقاية العمال من الإشعاعات، وسيزيد من كمية النفايات الثانوية المتولدة.
- تحتاج دورة عمر المشروع إلى النظر في إخراج أي مرافق جديدة من الخدمة في نهاية عمرها (أي ضرورة النظر في عدد عمليات الإخراج من الخدمة المطلوبة وحجمها وتعقيدها).
- يمكن أن يساهم تنفيذ نظام الإدارة المتكامل بدور كبير في ضمان الجودة وإدارة نسق المكونات أثناء التصميم والترخيص والتشييد والتشغيل، وكذلك مراقبة الجودة وحفظ السجلات.

وستشمل خطة التصرف في النفايات التي توضع قبل وقوع أي حادث أو بعد وقوعه مباشرة عدة خطوات، كما هو موضح في الشكل-9. وسيكون المطلب الأول هو تقدير مكان النفايات المتولّدة ومقدارها ونشاطها الإشعاعي ونوعها أثناء إدارة عواقب الحادث. ويتعيّن إجراء هذا التقدير من خلال تحديد منظم للخصائص يشمل التنبؤ بالنفايات المحددة والمتوقعة من حيث النوع المتوقع والكميات ومحتوى النويدات المشعة.

ويمكن أن تكون الخطوة الأولى في إدارة التصدي للحادث هي 'الخزن الطارئ' لنفايات معيّنة في موقع الحادث أو بالقرب منه، مما يسمح بإجراء تحديد أوّلي للخصائص والمعالجة التمهيدية وفرز النفايات وفصلها. ويُقصد بالخزن الطارئ في سياق هذا المنشور خزن وقائي (مؤقت) لفترة زمنية معيّنة قبل الشروع في أي أنشطة أخرى لمعالجة النفايات أو تكييفها.



الشكل-9- الخطوط العريضة العامة للخطوات الرئيسية في خطة التصرف للنفايات الناتجة عن حادث.

وستستمر فترة الخزن الطارئ في العادة على الأقل حتى تنتهي فترة الطوارئ الأوّلية وقد تستمر لحين اتخاذ خطوات للتصرف في النفايات وتوافر المرافق بعد ذلك. ويمكن أن تتراوح بين أشهر وعدة سنوات.

يمكن أن يحدث تحديد الخصائص في مراحل متعددة من عملية التصرف في النفايات بدءاً من الفرز الأوّلي التقريبي حتى التحديد المفصل للخصائص قبل تعبئة النفايات للخزن أو التخلص منها. ولأغراض التبسيط، يتم تصوير ذلك على أنه عملية مستمرة طيلة دورة العمر. وبالمثل، يمكن نقل النفايات الخام أو المعبأة بين العديد من الخطوات، تبعاً للعمليات والمرافق المختلفة المتاحة. وقد يكون نقل كميات كبيرة من النفايات غير المعالجة ضرورياً، وهو ما يمثل مصدر قلق كبير في حد ذاته (انظر القسم 10).

وتبعاً لمستويات النشاط الإشعاعي ومحتوى النويدات المشعة، قد تكون هناك فرص لتحويل بعض النفايات أو إعادة تدويرها في خطوات المعالجة أو التمهيد للمعالجة. وتبعاً للنُظم الرقابية في الدول الأعضاء، قد يكون من الممكن تحديد بعض الكميات الكبيرة من المواد الملوثة الضعيفة الإشعاع التي يمكن التخلص منها مباشرة في مدافن النفايات المتاحة، أو التي يمكن التخلص منها بطريقة أخرى كنفايات معفاة. ومن ذلك على سبيل المثال أن الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة أصدرت مؤخراً إرشادات بشأن التخلص البديل من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في المرافق غير التقليدية [82].

وسيتعيّن اختيار ما هو مناسب من عمليات المعالجة وأنواع التعبئة وطرق وتكنولوجيات الخزن. ويتعيّن أن تكون التكنولوجيات المختارة، متعددة الاستخدامات وقوية وفعالة من حيث التكلفة، إن أمكن، بالإضافة إلى كونها مناسبة لتيارات النفايات قيد النظر، من أجل التعامل مع الخصائص المتعددة للنفايات. ويمكن إجراء عملية الاختيار والنشر تدريجياً (على سبيل المثال، لتقليل حجم النفايات، وتثبيت النفايات ثم تعبئتها للخزن/التخلص منها). وفي بعض الحالات، يمكن أيضاً أن تكون سرعة النشر أولوية. وعند اتخاذ قرارات بشأن الخيارات، من المهم إيلاء المراعاة لدورة عمر النفايات بأكملها، والتأكد من أن الخيارات المختارة لا تعيق خطوات التصرف في النفايات في المستقبل.

ويمكن أن تنشأ عن خطط المعالجة في حد ذاتها نفايات ثانوية يتعيّن التصرف فيها، ويتعيّن مراعاة التوازن بين تحسين العملية على المدى القصير وإمكانية التخلص من النفايات على المدى الطويل وتقليل التعرض عند اختيار تكنولوجيات المعالجة المناسبة. وفي حالات الحوادث، تُفضل في كثير من الأحيان الحلول التي يمكن نشرها بسرعة، ربما باستخدام التكنولوجيات البسيطة أو المرافق القائمة التي يمكن تكييفها بسهولة للغرض الجديد. وبالنظر إلى أن كامل نطاق النفايات و/أو خصائصها قد لا يكون معروفاً في المراحل الأوّلية، فإن مرونة التكنولوجيا في التعامل مع نطاق واسع من النفايات أمر مهم أيضاً. ويمكن أيضاً للكميات الكبيرة

من بعض النفايات المرتبطة بالحوادث أن تُحدد مكان مرافق المعالجة بالقرب من مصدر النفايات للتقليل إلى أدنى حد من الحاجة إلى النقل.

وعلى الرغم من أن المسارات والطرق المتبعة في التخلص من النفايات قد لا تكون معروفة على وجه اليقين في وقت المعالجة، من المهم النظر في خطة التخلص النهائية اللازمة والمتاحة أثناء تخطيط وتنفيذ خطوات التصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها (انظر القسم 11). ويلزم توخي العناية عند اختيار عمليات المعالجة والتكييف و/أو التحكم فيها عندما لا تكون معايير قبول النفايات المحددة لمرفق التخلص من النفايات معروفة بعد من أجل تجنب اتباع نهج شديد التحفظ. ولكن المعايير العامة لقبول النفايات والقيود المفروضة على معظم أنواع المستودعات مفهومة جيداً ويمكن تكييفها مع النفايات المرتبطة بالحوادث.

ومن المهم جداً فهم ضرورة هذا الارتباط المبكر بين حلول التمهيد للتخلص من النفايات وحلول التخلص من النفايات في المستقبل. ويصدق ذلك بصفة خاصة في ما يتعلق بالتحسين الأمثل لمنهجيات التخلص من النفايات نظراً لوجود خيارات مختلفة قابلة للتطبيق، تبعاً لمتطلبات عزل النفايات واحتوائها التي يمكن أخذها في الاعتبار بالنسبة لتيارات النفايات التي تكون متماثلة أساساً (أي التخلص الجيولوجي العميق من النفايات القوية الإشعاع أو النفايات المتوسطة الإشعاع، أو التخلص منها على عمق متوسط أو التخلص منها بالقرب من سطح الأرض في حالة النفايات الضعيفة الإشعاع جداً أو النفايات الضعيفة الإشعاع). ولذلك، يتعيّن تحسين خيارات التمهيد للتخلص من النفايات، مع الأخذ في الاعتبار حلول التخلص المحتملة التي يمكن اتباعها (انظر القسم 11). ويمكن أن تنشأ أيضاً مشاكل عند استرجاع النفايات المخزّنة في نهاية المطاف، ولا سيما إذا كانت في الأصل مخزّنة في شكل خام (غير معالج).

وستشمل جميع الخطوات الموضحة في الشكل-9 تقريباً استخدام مرافق البنية الأساسية لمعالجة النفايات أو تجهيزها أو خزنها أو التخلص منها. وبعض هذه المرافق موجود بالفعل، ولكنه قد يحتاج إلى تكييف - والبعض الآخر قد يستفيد من البنية الأساسية المعاد توظيفها، ويكاد يكون من المحتم أن تحتاج بعض المرافق الجديدة تماماً إلى التصميم وتحديد الموقع والتشييد. وسيحتاج تنفيذ جميع المرافق إلى أخذ الترخيص في الاعتبار.

وبناءً على الكمية المقدّرة للنفايات وخصائصها، من المهم تقييم إمكانية استخدام المرافق القائمة أو تكييفها. وإذا لم يكن لدى مرافق التصرف في النفايات المشعة القائمة قدرة أو إمكانية كافية للتصرف في النفايات و/أو إذا كانت قد تعرضت للتلف بسبب الحادث، ستكون هناك حاجة إلى مرافق جديدة أو بديلة سواءً بصفة مؤقتة أو على الأجل الطويل.

5-1- تحويل المرافق القائمة

يمكن أن يكون تحويل المرافق النووية وغير النووية القائمة عن أغراضها الأصلية، عندما يكون ذلك ممكناً، مفيداً في تلبية احتياجات التصرف من النفايات (القسم 4-1-1). وعلى سبيل المثال، يمكن استخدام محارق النفايات غير المشعة التابعة للبلديات لحرق مواد الحطام العضوية الضعيفة الإشعاع جداً (مثل الأخشاب والأشجار وأوراق النباتات وغيرها) الناتجة عن تنظيف المناطق الملوثة. وقد يتطلب ذلك بعض التعديلات، مثل إضافة نُظم لرصد العادم أو إضافة نُظم تطويق لاحتواء الرماد المشع، وغيرها. وعلاوة على ذلك، يمكن تزويد مدافن النفايات التقليدية والخطرة بنُظم للتحكم في توليد السوائل المرتشحة والغاز للتخلص من المواد الملوثة الضعيفة الإشعاع والنفايات الضعيفة الإشعاع جداً. وترد في هذا المنشور أمثلة أخرى على استخدام المرافق القائمة. وكما هو الحال مع المرافق المشيّدة حديثاً، يتعيّن اتباع لوائح الترخيص وإجراءاته للحصول على التراخيص الضرورية للتحويل والعمليات التي تنطوي على مواد مشعة.

وفي حين أن إعادة توظيف المباني القائمة كمرافق جديدة للتصرف في النفايات يمكن أن يحقق وفورات في الوقت والتكاليف، من الممكن أيضاً ألا تكون المسائل الموروثة المرتبطة بهذه المرافق واضحة على الفور.

وتتمثل عيوب المرافق النووية الأقدم والتي خرجت من الخدمة في تدهور الهياكل بصورة طبيعية والتدهور الناجم عن التخلي عن الصيانة أو الأعمال الجارية للإخراج من الخدمة. ويمكن تقييم المرافق الأقدم لتحديد ما إذا كان يمكن تجديدها بطريقة فعالة من حيث التكلفة لكي تتوافق مع اللوائح والقوانين والمعايير التشغيلية السارية. ويمكن أن تكون تكاليف التشغيل والصيانة أعلى أيضاً من المباني الحديثة المماثلة. وهذه هي العوامل التي يمكن أن تقف حائلاً دون اختيار إعادة التطوير وإعادة الاستخدام [83].

5-2- تحديد مواقع المرافق الجديدة

إذا أُجري تخطيط مسبق محدد للمرفق النووي (القسم 4-1-2) ، فإن إحدى النتائج ستكون عبارة عن قائمة من الخيارات لتحديد أماكن أنواع مختلفة من البنية الأساسية للتصرف في النفايات في الموقع النووي أو بالقرب منه. ومن المهم أن تكون هناك مجموعة من الخيارات المتاحة لأن بعض هذه الأماكن، تبعاً لطبيعة الحادث، قد لا تكون صالحة للاستخدام، في حالة تلف البنية الأساسية أو تلوثها بشدة.

وبالإضافة إلى العوامل التقنية وغير التقنية التقليدية المتعلقة بتحديد مواقع المرافق النووية، ستشمل بعض الاعتبارات المحددة في تحديد مواقع المرافق الجديدة للتصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث ما يلي

- ما إذا كانت المرافق مؤقتة (مثل المخازن) أو دائمة (مثل مواقع التخلص من النفايات) والجداول الزمنية المستخدمة.
- إمكانية الوصول وسهولة تدفق المواد من أحد مرافق التصرف في النفايات إلى مرفق آخر.
- التأثير على خيارات تخطيط إدارة المواقع النووية في المستقبل.
- مقبولية تطوير مرافق جديدة خارج الموقع مقابل الحفاظ على جميع البنية الأساسية للتصرف في النفايات داخل الموقع.

ويتناول القسم 12 الاعتبارات المحددة المتعلقة بتحديد مواقع المرافق الدائمة الجديدة للتخلص من النفايات.

5-3- التصميم

بمجرد اختيار المكان والتكنولوجيا الأساسية لمرفق التصرف في النفايات، يمكن تسريع وتيرة التصميم المفصل للتشييد. وبالمقارنة مع مشروع التصميم دون الحاجة المُلحة المرتبطة بالحوادث، فإن الجدول الزمني الذي يحتاج إليه المرفق لإدارة المراحل المبكرة من الحادث قد يكون مضغوطاً إلى حد كبير. ويعني ذلك، على سبيل المثال، انخفاضاً في عدد دورات الموافقة على التصميم. ويمكن النظر في تقييم تنفيذ ميزات برنامج الجودة، على الرغم من ضرورة توخي الحذر في التعامل مع هذه المسألة لتجنب إضعاف الضوابط التي تمنع الجودة التي تقل عن المستوى المطلوب وعدم المساس بجودة التصميم أو الشراء أو التشييد الميداني والإدخال في الخدمة، ولا سيما النُظم المتعلقة بالأمان، لتلبية جدول زمني صارم. ويمكن للاعتماد على العناصر المنتجة تجارياً بمستويات معقولة من مبررات الجودة، مثل معدات الوقاية من الحرائق والمعدات الكهربائية التي تمتثل للمعايير الوطنية، يمكن أن يقلل إلى أدنى من التكاليف والفترات الزمنية المطلوبة للشراء وفي الوقت نفسه توفير مستويات كافية من الأداء.

وبالإضافة إلى الجدول الزمني المضغوط، هناك أيضاً بعض متطلبات وميزات التصميم المحددة التي يتعيّن مراعاتها عند التعامل مع النفايات المتصلة بالحوادث. ومن ذلك على سبيل المثال أن التصاميم موضوع التقييم تحتاج إلى ما يلي

(أ) معالجة مجموعة واسعة من النفايات التي غالباً ما تكون ذات خصائص غير محددة بصورة جيدة. ويشير ذلك إلى تفضيل التكنولوجيات البسيطة والقوية والناضجة. ولا يوصى باستخدام التكنولوجيات الشديدة الحساسية لخصائص النفايات أو تركيبها.

(ب) النظر في نقاط النهاية غير المؤكدة للنفايات، بما في ذلك النفايات الثانوية (مثل المسارات غير المعروفة للتخلص من النفايات). ولذلك، يتعيّن أن تكون مرنة وتوفِّر نقاط لأخذ العينات طيلة العملية من أجل تحديد خصائص المنتج.

(ج) إدراج التدريع الكافي للمعدات والمرفق (بما في ذلك تدريعه ضد التأثيرات المحتملة لظروف الإشعاعات الخارجية القوية جداً) وكذلك النظر في استخدام التكنولوجيات عن بُعد و/أو الأتمتة من أجل تقليل الجرعة التي يتلقاها العمال وزيادة الخرج.

(د) الاعتراف بالترابطات والاعتبارات المتعلقة بالخطوات التالية (حتى لو لم تكن معروفة بالكامل أو محددة جيداً) مثل ترتيبات أخذ العينات، وتفريغ الصهاريج والحاويات، وإزالة التلوث، وإخراج مرفق المعالجة نفسه من الخدمة، وما إلى ذلك.

(هـ) النظر في إخراج المرفق من الخدمة في نهاية المطاف، وذلك على سبيل المثال من خلال إتاحة إمكانية إزالة التلوث، واستخدام المواد التي يمكن إزالة التلوث منها بسهولة، وما إلى ذلك.

وبالإضافة إلى ذلك، يتعيّن أن تشمل عملية التصميم بلورة فهم واضح للوائح والقوانين والمعايير المنطبقة، وخاصة عند إشراك متعهدين متعددين وفرق متعددة الجنسيات.

5-4- الترخيص

ستعتمد عملية ترخيص لمرفق معدل أو جديد على المنظومة الرقابية في الدولة العضو المتضررة. وهناك العديد من أوجه المرونة التي يمكن أن تؤثر على عملية صنع القرار، سواءً في التخطيط المسبق للتصدي للحوادث أو في مراحل التعافي. وتشمل هذه الأسئلة ما يلي:

— الترخيص المسبق (أو استخدام التصاميم العامة المرخصة من قبل) (مثل العمليات والحاويات ومفاهيم الخزن، وغيرها).

- التحديد المبكر لقواعد الأمان واحتياجات الإدارة البيئية والجداول الزمنية لحالات الحوادث.
- إمكانية تعديل المتطلبات الرقابية في ضوء حالة الحادث، مثل استخدام عملية مبسّطة لمراحل الحادث؛ والنظر في الاحتياجات القصيرة الأجل وعمر المرفق عند الاقتضاء؛ والتكامل المتسم بالكفاءة بين عملية صنع القرار الرقابي والجدول الزمني المعقد للتصدي للحوادث، بحيث تعالج مسائل الأمان الإشعاعي والنووي التي تتطلب اهتماماً سريعاً في الوقت المناسب.
- إمكانية تطبيق الإرشادات الدولية، مثل الإرشادات المنصوص عليها للتصرف في الأحجام الكبيرة بشكل غير عادي من النفايات المشعة بعد وقوع حادث، على النحو الوارد في المرجع [21].

وقد يلزم في كثير من الدول الأعضاء إصدار سلسلة من التراخيص أو التصاريح لتشييد وتشغيل مرفق نووي من الهيئات الرقابية النووية والبيئية وغيرها من الهيئات الرقابية ذات الولاية القضائية على أنشطة التصميم والتشييد. ومن منظور التنظيم الرقابي النووي، من المحتمل أن تشمل هذه التراخيص والتصاريح إصدار ترخيص أو تصريح بالتشييد (بعد قبول التصميم المفصل) ورخصة بدء التشغيل (بعد المرحلة الأوّلية من الإدخال في الخدمة والاختبارات الباردة)، ورخصة التشغيل (بعد ضمان الانتهاء من الاختبار الساخن وتنظيم نسق المكونات)، وأخيراً ترخيص الإخراج من الخدمة (عندما لا تكون هناك حاجة إلى المرفق). ويمكن أن تشمل هذه الأذون التراخيص الرسمية الصادرة عن الهيئة الرقابية، بالإضافة إلى الأذون الصادرة عن هيئات و/أو وكالات مؤسسية أو حكومية أخرى. وفي كثير من الحالات، يلزم أيضاً إجراء تقييم بيئي. ومع ذلك، في حالات ما بعد الحوادث، وخاصة في المرحلة الأوّلية لأنشطة ومرافق التمهيد للتخلص من النفايات التي تكون فيها الحاجة المُلحة للتنفيذ مشكلة، من المستصوب إجراء تنسيق وثيق بين الهيئات الرقابية والجهات المرخص لها من أجل تبسيط العملية قدر المستطاع، بما في ذلك، الإعفاءات من المتطلبات لأجل قصير أو طويل، عندما يكون ذلك مناسباً وحيثما تقتضيه الضرورة.

وعلى سبيل المثال، تستند القوانين واللوائح ذات الصلة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية إلى ظروف تشغيل المحطة العادية التي كان من الصعب أو التي كان من المتعذر تطبيقها على حالة ما بعد الحادث. وصنفت الهيئة الرقابية الوطنية اليابانية المفاعلات في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية على أنها مرفق مفاعل محدد، أي مرفق وقع فيه حادث نووي، ووضعت لوائح خاصة موضع التنفيذ. ونفذت الهيئة الرقابية النووية مجموعة من اللوائح الخاصة بعد تحديد احتياجات الأمان لظروف ما بعد الحادث وطلبت من المُشغِّل (شركة طوكيو للطاقة الكهربائية) تطبيق خطط التنفيذ المتعلقة بعمليات المرفق. وتجري أنشطة إزالة التلوث خارج موقع محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية تحت إشراف الحكومة المحلية والقوانين الخاصة

بمناطق التلوث الإقليمية الخاضعة لسلطة وزارة البيئة [84]، التي تتحمل المسؤولية عن منطقة التلوث الخاصة.

ومن الاعتبارات المحددة للنفايات المتصلة بالحادث إمكانية تأثر العديد من الدول الأعضاء بحادث ما. وعلى سبيل المثال، تأثرت عدة دول مجاورة تأثراً كبيراً بحادث تشرنوبل وعمليات التنظيف التي نتجت عنه. وسيؤدي ذلك حتماً إلى مشاركة عدد من المنظمات الرقابية والتنفيذية الوطنية التي قد يكون لكل منها معاييرها ومتطلباتها المختلفة إلى حد كبير في ما يتعلق بإصدار التراخيص. وحتى داخل دولة عضو معيّنة، قد تُفرض متطلبات مختلفة على المستوى الوطني و/أو مستوى المقاطعة/الولاية و/أو المستوى المحلي.

5-5- تشييد المرفق وتنفيذ المشروع

حالما يقع الاختيار على التصميم، يمكن الشروع في التشييد والتحضير للتشغيل، إما بالترخيص المسبق أو الترخيص المتزامن. وتمتلك معظم الدول الأعضاء البنية الأساسية والخبرة والموظفين اللازمين لتنفيذ مشاريع التشييد في المجال النووي التي قد تكون مطلوبة. ويمكن الحصول بسهولة على هذه الخبرة من السوق الدولية إذا كانت إحدى الدول الأعضاء بحاجة إلى مساعدة إضافية.

وفي بيئة ما بعد الحادث، سيتطلب تنفيذ أنشطة التشييد وإدارتها مراعاة ما يلي:

(أ) إنشاء فريق لإدارة أعمال التشييد وتُحدد له أدوار ومسؤوليات واضحة ويُشكل جزءاً لا يتجزأ من فريق التصدي القائم، بما يشمل الموظفون الحاليون المعنيون بالتشغيل في الموقع النووي، لضمان التنسيق الكافي لأعمال التشييد في بيئة ما بعد الحادث.

(ب) الوصول إلى موظفين يغطون تخصصات تقنية متعددة ويتمتعون بالمهارات الكافية من أجل ضمان الدعم المؤهل لعملية التصميم/الشراء/التشييد/الإدخال في الخدمة في المجالات التي تنطوي على معرفة تقنية متخصصة، مثل معالجة النفايات. وستكون المهارات والقدرات التي تتجاوز المعرفة العادية بالمرفق النووي ضرورية.

(ج) التدريب السليم والكافي على تسيير العمل في بيئة إشعاعية، بما يشمل الفهم الكامل لجميع الاحتياجات من الدعم اللوجستي ذات الصلة.

(د) التدابير اللازمة لضمان التكامل المأمون والمتسم بالكفاءة بين مجموعة كبيرة من ذات الأُطر الزمنية القصيرة والمتعهدين، بالإضافة إلى التواصل مع العديد من مشاريع التصدي الأخرى ذات الصلة والوكالات المسؤولة.

(هـ) ترتيبات لإدماج المستشارين والمتعهدين والموظفين الدوليين (على سبيل المثال، لإدارة المسائل اللغوية/الثقافية، بما في ذلك الحاجة إلى مترجمين شفويين وترجمة تعليمات العمل والرسومات).

(و) التنفيذ الدؤوب لثقافة الأمان النووي والامتثال للعمليات التشغيلية في مرحلة ما بعد الحادث.

(ز) قد يلزم توخي الحذر المناسب عند اتباع الإجراءات التشغيلية والهندسية القائمة التي كانت صالحة للتشغيل العادي ولكنها قد تكون دون المستوى المناسب لحالة ما بعد الحادث.

وتشمل العوامل الأخرى التي قد تكون حاسمة لتشييد المرافق المطلوبة في حالة ما بعد وقوع حادث ما يلي:

— توافر التمويل ومواد البناء والمعدات والبنية الأساسية والموظفين ذوي الخبرة.
— إمكانية تصنيع المجمّعات الفرعية أو المكونات الرئيسية للمشروع خارج الموقع للتقليل إلى أدنى حد من وقت التشييد في الموقع و/أو التعرض للإشعاع.

ويمثل تنظيم نسق المكونات مكوناً أساسياً ينبغي عدم إغفاله أثناء تصميم المرفق وإنشائه وبدء العمل فيه وتشغيله. ويضمن تنظيم نسق المكونات أن المرفق 'المنفذ فعلياً على أرض الواقع' متطابق مع وثائق التصميم وأساس الترخيص [85]. وفي إجراءات التصدي التي اتُخذت من قبل، لم يعالج هذا الجانب بصورة كافية أو أُغفل تماماً في تصميم المرفق وبنائه وفقاً لجداول التصدي الصارمة، أو في حالة عدم توافر موارد أو تمويل كافٍ. ويعد الحفاظ على نسق مكونات التصميم المشيّدة ونسق مكونات التشغيل بما يتوافق مع تحليل الأمان ضرورياً لضمان الحفاظ على سلامة الأمان الإشعاعي والأمان النووي واحتواء النفايات وعزلها. ومن ذلك على سبيل المثال أن أي تعديلات مادية يتم إدخالها على المرفق تخضع لاستعراض الأمان في مرحلة التمهيد للتنفيذ، ويتعيّن تشغيل المرفق وفق المبادئ التوجيهية المحددة من خلال إجراءات التشغيل والصيانة والاختبار، التي تم تطويرها بما يتوافق مع تحليل الأمان.

وفي الجداول الزمنية المضغوطة التي قد تكون مرتبطة بالمرافق ذات الصلة بالحوادث، قد يلزم في بعض الأحيان البدء في أعمال التشييد قبل تصميم جميع جوانب المرفق بالكامل. وفي هذه الحالة، من المهم جداً وجود نظام منضبط وفعال لتنظيم نسق المكونات لضمان تشييد المرفق وفقاً للتصميم وتوثيق جميع المتغيرات بشكل صحيح. ومن الناحية المثالية، يتعيّن تزويد مشغِّل المرفق بالوثائق الكاملة والدقيقة (الرسومات والأدلة وغيرها) لتصميم المرفق وتشييده قبل بدء التشغيل. وتعتبر الإجراءات الصارمة في تحديث الرسومات والتحليلات لما هو منفذ فعلياً

على أرض الواقع ضرورية أيضاً للتشغيل المأمون المستمر، ولا سيما عند إدخال تغييرات على إجراءات التشغيل والصيانة والاختبار

5-6- الإدخال في الخدمة والاختبار

سيخضع المرفق الذي يتم تشييده أو تكييفه حديثاً في جميع الحالات لبرنامج إدخال في الخدمة واختبار بدء التشغيل للتأكد من أن جميع المعدات تعمل بشكل صحيح، وأن جميع إجراءات التشغيل والصيانة الأساسية متوافقة مع التصميم وتحليل الأمان. وتُحدد خطة الإدخال في الخدمة الاختبارات ومعايير الأداء التي يتعيّن الوفاء بها لإثبات تشييد المرفق وإمكانية تشغيله وفقاً لقواعد تصميمه. ويشمل التشغيل في العادة مرحلة اختبار بارز (عن طريق المحاكاة بدون استخدام مواد مشعة) ومرحلة اختبار ساخن (باستخدام مواد مشعة)، ثم انتقال المرفق بعد ذلك إلى مرحلة التشغيل بكامل إمكاناته. وتعتبر عملية الانتقال هذه مهمة في التحقق من فعالية إجراءات التشغيل والصيانة والاختبار، وكوسيلة لتدريب أفراد المرحلة التشغيلية الذين يعملون مع المعدات الجديدة. وفي سيناريو ما بعد الحادث، من المتوقع استخدام المرحلة الساخنة لتسليم المرفق الجديد أو المعاد بناءه إلى طاقم التشغيل الخاص به.

وفي حالة ما بعد الحادث، قد يكون الوقت المتاح لإجراء اختبارات التشغيل محدوداً وقد لا تكون معايير الأداء محددة بشكل كامل (على سبيل المثال، بسبب الخصائص العامة للنفايات). وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تنشأ مشاكل بسبب التوسع من الاختبارات على النطاق الصغير، أو الأخطاء التي قد تكون ناتجة عن الجدول الزمني المضغوط للتصميم الأوّلي. ويتعيّن تصحيح ذلك قبل الشروع في التشغيل باستخدام مواد مشعة. ولذلك، من المهم إجراء هذه الاختبارات، بالقدر الممكن عملياً، بما يتوافق مع متطلبات السلطة الرقابية للتأكد من أن المرفق يعمل وفقاً للتصميم قبل البدء في التشغيل الواسع النطاق الذي تُستخدم فيه مواد مشعة.

5-7- التدريب

من المرجح أن تتطلب المرافق الجديدة أو المعدلة للتصرف في النفايات والتكنولوجيات المرتبطة بها برامج تدريب محددة لموظفي الموقع النووي الحاليين والموظفين الجُدد الذين يُستعان بهم في إطار برنامج التصدي للحوادث. ويبدأ تدريب الموظفين في العادة في موعد لا يتجاوز مرحلة إدخال المرفق في الخدمة، وقبل وقت طويل من جاهزيته للتشغيل. ومن المهم أن

يُعزز التدريب تنفيذ ثقافة قوية للأمان النووي تُشدد على التقيُّد الصارم بإجراءات المرفق وتعطي الأولوية لاعتبارات الأمان على حساب أهداف الإنتاج

ويمكن للمشاركة في برنامج الإدخال في الخدمة أو الإعارة إلى مرافق مماثلة أن تُستخدم لتكميل التدريب النظري. وتوفّر مرحلة الإدخال في الخدمة فرصة مفيدة للتعرف على المرفق وإجراءاته. وينبغي أن يؤخذ في الاعتبار عند إجراء التخطيط مدى توافر مرافق التدريب المناسبة. وإذا لم يكن أي من هذه المرافق متاحاً، سيتعيّن تشييدها كجزء من مشروع المرفق وإتاحتها قبل الانتهاء من المرفق الرئيسي.

5-8- التشغيل والصيانة

يعتبر العديد من التكنولوجيا وأنواع المرافق المستخدمة في التصرف في النفايات في أعقاب الحوادث مفهومة جيداً وتُستخدم على نطاق واسع في تطبيقات أخرى غير مرتبطة بالحوادث. غير أن تشغيل وصيانة مرفق للتصرف في النفايات في حالات ما بعد الحوادث قد ينطوي على بعض التحديات. وقد يتعيّن إجراء تكييف لإجراءات التشغيل والصيانة والاختبار وطرق الإدارة المألوفة سواءً عن طريق تعديل إجراءات المرفق القائمة أو وضع إجراءات جديدة تُناسب ظروف ما بعد الحادث. ويتطلب ذلك مراعاة عوامل مختلفة، بما في ذلك ما يلي:

- تتطلب بعض حالات ما بعد الحوادث معالجة النفايات على نطاق أوسع بكثير مما كان مستخدماً في الماضي، مما يؤدي إلى الحاجة إلى معدات أكبر بكثير أو مرافق نمطية أكثر.
- الحاجة إلى المرونة في التشغيل لتكييف العمليات مع مختلف أنواع النفايات (على سبيل المثال، قد يتطلب الأمر مزيداً من التدخل اليدوي للتحكم في بارامترات العمليات أكثر من المعتاد).
- إدارة أوقات العمل (على سبيل المثال، بسبب الظروف البيئية و/أو ارتفاع معدلات الجرعات الإشعاعية) وما يرتبط بذلك من أولويات وتسلسل في إجراء الأنشطة.
- تكييف مستويات الموظفين ومواعيد نوبات العمل لاستيعاب أوقات العمل ومتطلبات الخرج التشغيلي.
- تكييف ممارسات الصيانة لاستيعاب الظروف الصعبة (على سبيل المثال، المجال الإشعاعي، والتلوث العالق في الهواء، وعدم وجود وثائق النظام أو المكونات الكاملة، والحاجة الملحة إلى عودة المرفق إلى الخدمة، والاستبدال مقابل الإصلاح في الموقع، وما إلى ذلك).

- قد تبرر الظروف استخدام التشغيل عن بُعد والتكنولوجيا المتخصصة لإدارة تعرض العمال للجرعات، ويتطلب ذلك أيضاً إجراءات متخصصة وعمليات تدريب وإدارة قبل التنفيذ.
- يمكن أن يكون للإجراءات التشغيلية لمرفق جديد أو معدل احتياجات مرتبطة بالدعم اللوجستي، بما في ذلك سلسلة الإمداد الخاصة بمتطلبات المواد، والخدمات اللوجستية في الموقع ودعم الموظفين، مثل وسائل الراحة للعمال (مثل غرف تغيير الملابس، ومراكز إزالة التلوث، وأماكن المعيشة، والنقل، ومرافق الدعم، وما إلى ذلك).

5-9- الإخراج من الخدمة لمرافق مناولة وخزن النفايات

ستصل المرافق المستخدمة في التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها في نهاية المطاف إلى نهاية عمرها التشغيلي، إما عن طريق استكمال الغرض منها أو من خلال سحبها من الخدمة بسبب العمر أو التقادم. وسيؤدي الإخراج من الخدمة إلى توليد نفايات وجرعات إضافية يتعرض لها العمال. ولذلك، يلزم إجراء دراسة متأنية لعدد المرافق المستخدمة. وعلاوة على ذلك، يُعد التقليل إلى أدنى حد من النفايات الثانوية وسهولة إزالة التلوث عوامل من المهم إدراجها في تصاميم أي مرافق جديدة.

وتجدر الإشارة إلى أن حالة ما بعد الحادث يمكن أن تستمر لمدة زمنية أطول بكثير من العمر التصميمي النموذجي لمرافق التصرف في النفايات. ومن المهم أن يؤخذ هذا الجانب في الاعتبار أثناء المراحل الأولى من التخطيط للإخراج من الخدمة، بحيث يمكن تصور إعادة بناء رأس المال أو استبدال المعدات، أو حتى مرافق جديدة تماماً، في الوقت المناسب. وقد يكون السبب وراء إخراج مرافق النفايات المبكر من الخدمة راجعاً أيضاً إلى تطبيق حلول تكنولوجية أكثر تقدماً وكفاءة، أو بسبب بلورة فهم أفضل لخصائص تيارات النفايات التي يتعيّن معالجتها بمرور الوقت. ومن ذلك على سبيل المثال أن استرجاع حطام الوقود من ساتر تشرنوبل يمكن أن يحدث ضمن إطار زمني يتراوح بين 50 و100 عام، وسيتطلب ذلك تصميم مرافق متخصصة للتصرف في النفايات، في حين أن جميع مرافق المعالجة القائمة التي جرى تركيبها في محطة تشرنوبل للقوى النووية ستكون قد تجاوزت في الوقت نفسه عمرها التصميمي.

وتُدرك معظم الدول الأعضاء التي لديها قدرات في مجال القوى النووية أو التي لديها بحوث نووية متقدمة ممارسة إخراج المرافق النووية من الخدمة. وفي حالة المرافق المستخدمة للتصرف في النفايات المرتبطة بالحوادث، ولا سيما المرافق التي لم تُصمم في الأصل كمرافق نووية، سيلزم توخي عناية خاصة لمكافحة انتشار التلوث أثناء تفكيك المعدات والمباني.

وكما هو الحال مع أي مشروع للإخراج من الخدمة في المجال النووي، سيكون من الضروري اتخاذ قرار بشأن الحالة النهائية للمرفق (أي شروط الاستخدام المستقبلية المحددة).

ويتعيّن تنسيق معايير الحالة النهائية بعد وقوع حادث مع الحالة النهائية للمرافق والمناطق الأخرى المرتبطة بالحادث، ويتعيّن الأخذ بنهج متسق. وعلى سبيل المثال، فإن تخصيص الموارد لتحقيق مستوى أعلى بكثير من حيث إزالة التلوث في مرفق التصرف في النفايات الذي يكون خارج الخدمة، مقارنة بالموقع المحيط الذي لا يزال ملوثاً من الحادث، ليس واقعياً ولا عملياً.

5-10- ضمان الجودة ومراقبة الجودة

يُشكل ضمان الجودة جزءاً من نظام الإدارة المتكامل الذي يشمل جميع الإجراءات المخططة أو المنهجية اللازمة لتوفير الثقة الكافية بأن المنتجات أو الخدمات ستكون من النوع والجودة المطلوبة والمتوقعة من جانب الجميع وأصحاب المصلحة الآخرين. وإلى جانب ضمان الجودة، تُعد مراقبة الجودة إحدى وظائف تأكيد الجودة أو بناء الثقة، وهي تشمل جميع الإجراءات المخططة أو المنهجية (على سبيل المثال، الاحتياطات العلمية، مثل المعايرة، والعينات المتكررة، ومنهجية أخذ العينات، وسلسلة العهدة، وعمليات التفتيش المادي، والفحص غير المتلف، وما إلى ذلك) اللازمة لتوفير الثقة في أن المنتجات أو النتائج تُلبي المواصفات بالفعل. ويُعد ضمان الجودة الذي يُستكمل بمراقبة للجودة عنصراً مهماً في نظام التصرف في النفايات. وتُحدد منشورات أخرى، مثل المرجع [46] متطلبات الجودة الأساسية.

ويعتمد أصحاب المصلحة والهيئات الرقابية والهيئات الحكومية الأخرى على وثائق البرامج العالية الجودة لتوفير الثقة في أي مشروع نووي؛ ويضع برنامج الجودة نفسه متطلبات كبيرة على الوثائق، لتكون بمثابة دليل على المنتجات والأنشطة المُرضية. وبالتالي، من المهم إنشاء وثائق تحقيق الجودة والحفاظ عليها.

وفي حالة ما بعد الحادث، من المتوقع أن تكون بعض الوثائق المطلوبة لتصميم مرفق التصرف في النفايات أو تشغيله، والتي تعود إلى المراحل الأولى من وقوع الحادث، وخاصة سجلات مرحلة الطوارئ والأنشطة المبكرة المتصلة بالنفايات، مفقودة أو غير مستوفاة على أي نحو آخر. وتشمل السجلات المهمة ما يتعلق بأنواع النفايات وكمياتها وخصائصها وكيفية معالجتها و/أو تعبئتها ومكان خزنها أو التخلص منها. وفي هذه الظروف، قد يكون من الضروري لفريق إدارة المرفق إعادة إنشاء المعلومات المفقودة أو استبدالها لضمان إعادة تحقيق مستويات الجودة والأمان المناسبة. وقد يشمل ذلك إعادة بناء الوثائق حيثما أمكن، أو أنشطة لإعادة إنشاء السجلات في أقرب وقت ممكن عملياً.

6- الاستراتيجيات والمنهجيات والتكنولوجيات المستخدمة في تحديد خصائص النفايات

الدروس الرئيسية المستفادة:

- يُعد تحديد خصائص النفايات التي تؤثر على المرافق والأماكن الواقعة خارج الموقع ضرورياً للتصرف في النفايات (بما في ذلك رفع الرقابة) والاستصلاح والتنظيف، ولأغراض حماية العاملين، وكذلك لاتخاذ القرارات.
- يدعم الحصول فوراً على بيانات تحديد الخصائص باتخاذ القرارات التقنية والتخطيط والهندسة. وهذه عملية متكررة ومستمرة.
- لتحقيق المستوى الأمثل لأخذ العينات، يتعيّن أن تكون استراتيجية تحديد الخصائص وأهدافها وغاياتها مفهومة بوضوح وموثقة قبل الشروع في برنامج لتحديد الخصائص.
- قد تكون هناك حاجة إلى مرافق مختبرات و/أو تقنيات تحليل إضافية نتيجة لوقوع حادث (على سبيل المثال، في منطقة ينخفض فيها معدل الجرعة الأساسية).
- قد يلزم تحديد نواقل النويدات المشعة أو عوامل القياس الخاصة بالحالة لمجموعة متنوعة من أنواع النفايات غير القياسية.
- يتعيّن مراعاة إدارة البيانات من حيث تجميع البيانات التقنية وتنظيمها ونشرها.

6-1- استراتيجية تحديد الخصائص ومنهجيته

تنص متطلبات الأمان الصادرة عن الوكالة على أن تحديد الخصائص ينطبق على كل خطوة من خطوات التصرف في النفايات المشعة. وينطبق تحديد الخصائص أيضاً على النفايات الناتجة عن حادث نووي [17–19]. ويمكن اعتماد نهج متدرج، ويعني ذلك أن درجة وجهد تحديد الخصائص اللازم لهذا الغرض يُشكل أحد الاعتبارات. وعندما يقع حادث نووي، يكمن التحدي في القدرة على حشد الخبرات والمعدات المناسبة خلال مدة زمنية قصيرة لقياس انتشار النشاط الإشعاعي في مجموعة متنوعة من المسارات و الوسائط، مع الاعتراف بأن جميع السكان يمثلون الهدف الرئيسي. ولذلك، وأثناء المرحلة الأوّلية من وقوع حادث نووي، سينصب التركيز في عملية تحديد خصائص النفايات على تقييم مستويات الجرعة لتحديد حجم الحادث. وستُيسِّر هذه البيانات التجميع المؤقت للنفايات وفرزها بالإضافة إلى إبلاغ إدارة الحدث بالإجراءات الوقائية المطلوبة. وعندما توضع خطط لمعالجة النفايات لاحقاً، سيكون من الضروري تقديم

بيانات توصيفية أكثر تفصيلاً عن نوع النويدات المشعة وتركيزها، والتركيب الكيميائي والخصائص الفيزيائية، للاسترشاد بها في قرارات معالجة النفايات وخزنها وتكييفها/تعبئتها والتخلص منها في نهاية المطاف.

6-1-1- معرفة العمليات

في حالة وقوع حادث نووي، فإن معرفة سيناريو الحادث، وتصميم المرافق المرتبطة بالحادث، والإمكانيات المتاحة للتصرف في النفايات، والظروف البيئية السائدة، والمواد وتركيزات النويدات المشعة المنطلقة، كلها عوامل تُساهم في تحديد منهجيات الحصول على العينات وإجراء القياسات اللازمة. ويتسم ذلك بأهمية خاصة في حالة النويدات المشعة التي يصعب أخذ عينات منها أو قياسها. وتتفاوت احتياجات تحديد الخصائص بعد وقوع حادث نووي تفاوتاً كبيراً، وتتراوح بين الحاجة إلى تقييم الأثر الإشعاعي على منطقة جغرافية واسعة والحاجة إلى بيانات كمية عن النويدات المشعة لدعم حسابات تقييم الأداء لتيسير التخلص من النفايات.

6-1-2- وضع برنامج لتحديد الخصائص

تبدأ مرحلة التنظيف بعد الحادث بمجرد (أو حتى قبل) استقرار الحادث. ويلزم وجود برنامج لتحديد خصائص النفايات من أجل تصنيفها والتأكد من أنها تفي بمتطلبات معايير الأمان والمعايير النهائية لقبول النفايات. وفي ما يلي العوامل المهمة التي يتعيّن أن تؤخذ في الاعتبار في برنامج تحديد الخصائص:

(أ) ينبغي فهم الأهداف والغايات واستراتيجية تحديد الخصائص وتوثيقها بوضوح قبل الشروع في برنامج تحديد الخصائص، وذلك لتجنب أخذ العينات غير الضرورية وما يرتبط بها من جرعة يتعرض لها العمال.

(ب) قد يلزم تحديد أولويات تحديد الخصائص لمعالجة بعض الأجزاء الإشكالية بشكل خاص في موقع الحادث في وقت مبكر، قبل اتخاذ خطوات لخفض الجرعة أو تخفيف الإطلاقات؛ على سبيل المثال، إزالة النقاط الساخنة أو النظر في أوقات الإقامة في منطقة الإشعاع أو قيود ظروف العمل البيئية الأخرى.

(ج) متطلبات الدعم اللوجستي، بما في ذلك الاستعانة بالموظفين المهرة والمدربين تدريباً مناسباً، والأجهزة والدعم المختبري (المتنقل)، والدعم المادي (اللوازم المستهلكة اللازمة لأخذ العينات، ومعدات الوقاية الشخصية، وما إلى ذلك) ومرافق دعم الموظفين (مثل

غرف تغيير الملابس، ومراكز إزالة التلوث، وأماكن المعيشة، والنقل، ومرافق الدعم، وما إلى ذلك).

(د) إمكانية استخدام تكنولوجيا المركبات الجوية غير المأهولة التي يتم التحكم فيها عن بُعد للحد من تعرض العمال من أجل الوصول إلى المناطق التي تسودها ظروف إشعاعية قاسية أو غير ذلك من الظروف الخطرة؛ على سبيل المثال، إجراء المسح الجوي باستخدام المركبات الجوية التي تعمل بدون طيار، والمركبات الصغيرة والكبيرة الحجم التي تعمل عن بُعد، والروبوتات.

(هـ) متطلبات التدريع لأدوات تحديد الخصائص والمعدات والمرافق اللازمة لإدارة تداخل إشعاعات الخلفية ولحماية العمال.

(و) قدرات الصيانة لمعدات ومرافق تحديد الخصائص في ظل الظروف الصعبة (مثل قرارات الاستبدال مقابل الإصلاح في الموقع).

وعند تحديد التقنيات والتكنولوجيات المناسبة لأخذ العينات وتحديد الخصائص، من المهم مراعاة ما يلي:

(1) استراتيجية أخذ عينات من مواد النفايات:

- مجموعة المواد التي يلزم تحديد خصائصها، من حيث خواصها الفيزيائية والإشعاعية والنووية (النفايات الخام، والأجسام الكبيرة، والمواد السائبة، والحطام، والغطاء النباتي، والتربة، والمواد النووية الخاصة، وغيرها)؛
- المدى والتواتر والدقة والإحكام في أخذ العينات، بما في ذلك اختيار نقاط أخذ العينات وأي قيود في الوصول إلى المواد التي تتطلب تحديداً لخصائصها.
- قيود أخذ العينات الناتجة عن بيئة أخذ العينات (الجرعة التي يتلقاها العامل، والظروف البيئية المحيطة، والمكان المادي).

(2) قيود القياس الناتجة عن بيئة أخذ العينات (مستويات الإشعاع التي تؤثر على الحد الأدنى القابل للكشف، وما إلى ذلك).

(3) استخدام نُهج محددة ومتدرجة للتعامل مع أوجه عدم اليقين والتأثيرات على الشمول التمثيلي للعينات؛ فعلى سبيل المثال، قد لا تكون النُهج المستخدمة في طرق التشغيل العادية أو الإخراج من الخدمة قابلة للتطبيق بسبب احتياجات تحديد الخصائص المرتبطة بخزن النفايات الناتجة عن الحوادث ومعالجتها والتخلص منها.

(4) الحاجة إلى تقنيات قياس خاصة؛ مثل تحديد خصائص أشعة ألفا وأشعة بيتا البحتة في حالات الحوادث (مثل حجم العينة المطلوب، ومستويات أشعة غاما في الخلفية، وحدود

الكشف، والكيمياء الرطبة، والمرافق المتخصصة المطلوبة، مثل نقل العينات خارج الموقع، وما إلى ذلك)، بالإضافة إلى أي متطلبات محددة لمعايرة الأجهزة.

(5) استخدام طرق تحديد الخصائص غير المباشرة، مثل القياس غير المُتلف مقابل القياس المُتلف، والاختلافات في احتياجات أخذ العينات في الموقع مقابل أخذها خارج الموقع، حيث لن تُحدد خطط أخذ العينات بالاستناد إلى الأُسس نفسها في حالة القياس غير المُتلف (على سبيل المثال، قياس طيف أشعة غاما في الموقع والقياس المُتلف).

(6) استخدام معاملات القياس؛ وعند الاقتضاء، بالنظر إلى الحجم المحتمل لتيارات النفايات وعدم تجانسها، قد يكون من الضروري التوسع من بيانات محدودة لأخذ العينات وتحديد الخصائص، استناداً إلى المعرفة العملية لمرفق الحوادث.

(7) استخدام أهداف جودة البيانات (انظر أدناه) وتطبيق عمليات ضمان الجودة ومراقبة الجودة على عمليات أخذ العينات وتحليلها، بما في ذلك تكنولوجيات القياس غير المباشرة، مثل القياس غير المُتلف والقياس المُتلف، بما في ذلك استخدام عمليات فعالة لضمان سلامة البيانات والسجلات وكفالة ما يلي:

- إمكانية التتبع والدقة في السجلات وتوثيق البيانات.
- الحماية المادية (والإلكترونية) والفهرسة المناسبة للسجلات والبيانات المخزونة، بما في ذلك الترتيبات اللازمة لضمان إتاحة أحدث المعلومات وتوفيرها للمستخدمين.
- مراقبة نشر السجلات والبيانات لضمان وصولها إلى المستخدمين والمساءلة عن استخدامها.

ويرد أدناه وصف لاستخدام أهداف جودة البيانات وتطبيق المعرفة بعمليات المحطة.

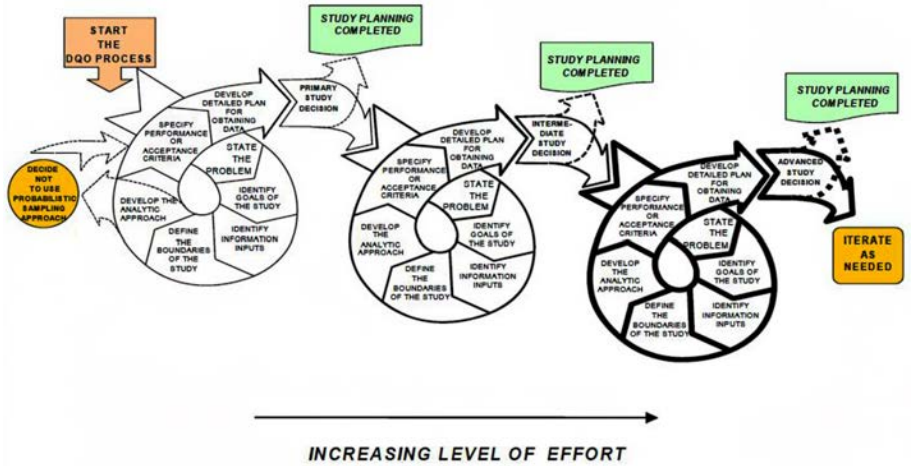
6-1-3- أهداف جودة البيانات

تُعرَّف أهداف جودة البيانات بأنها بيانات، من الناحيتين النوعية والكمية، تُحدد نوع البيانات المطلوبة وجودتها وحجمها لدعم قرارات الإدارة السليمة للمخاطر. وكانت وكالة حماية البيئة الأمريكية هي التي وضعت مفهوم أهداف جودة البيانات، وكان الهدف من تصميم هذا المفهوم هو استخدامه في وضع خطط فعالة لأخذ العينات أو الاختبار لتحسين البيانات المراد جمعها [86]. ومع ذلك، يمكن تطبيق مبادئ أهداف جودة البيانات على سائر الجوانب التي تتطلب اتخاذ قرارات. ومن ذلك على سبيل المثال، قامت شركة Sellafield Ltd (المملكة المتحدة) بتطبيق أهداف جودة البيانات لتحديد احتياجاتها من البحث والتطوير.

وتوضع أهداف جودة البيانات قبل جمع البيانات، كجزء من برنامج أخذ العينات/ تحديد الخصائص، من أجل توفير هيكل منطقي يُركز عملية جمع البيانات على الاحتياجات من المعلومات. ويتعيّن أن تُركز أهداف جمع البيانات بصورة محددة على ما يلي

(أ) توضيح أهداف جمع البيانات.
(ب) تحديد استخدام البيانات والطريقة التي ستدعم بها هذه البيانات قرارات إدارة المخاطر.
(ج) تحديد أنواع البيانات التي يتعيّن جمعها.
(د) تحديد كمية البيانات التي سيجري جمعها ونوعية هذه البيانات.

ويمكن لفهم المعلومات المتاحة بالفعل والتي يمكن استخدامها أن يقلل من جهود أخذ العينات/تحديد الخصائص. ومن شأن استخدام عملية تحديد أهداف جودة البيانات أن يحقق الكفاءة والفعالية في إنفاق الموارد، والوصول إلى توافق في الآراء بشأن نوع البيانات اللازمة لتحقيق الهدف ونوعية البيانات وكميتها، والتوثيق الكامل للإجراءات المتخذة. وتُنفذ عملية تحديد أهداف جودة البيانات على مراحل متكررة. ومع تغيُّر الافتراضات أو الاحتياجات من البيانات، أو عندما تؤثر النتائج على الاحتياجات الجديدة من البيانات، سيلزم إعادة تأكيد أهداف جودة البيانات، وسيتعيّن، عند الضرورة، تنقيحها، كما هو موضح في الشكل-10.



الشكل-10- تكرار عملية تحديد أهداف جودة الوثائق طيلة دورة عمر المشروع. بإذن من وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة [86]

وتتكون عملية هدف جودة البيانات من الخطوات السبع التالية:

(1) الخطوة -1 ذكر المشكلة. تُحدد المشكلة التي تتطلب بيانات جديدة بوضوح بحيث يكون محور الدراسة واضحاً لا لبس فيه.
(2) الخطوة -2 تحديد قرارات/أهداف الدراسة. يُحدد القرار الذي سيجري حله باستخدام البيانات لمعالجة المشكلة.
(3) الخطوة -3 تحديد مدخلات المعلومات. يلزم إجراء هذه الخطوة لحل المشكلة وتحديد المدخلات التي تتطلب قياسات للبيانات.
(4) الخطوة -4 تحديد حدود الدراسة. تُحدد الظروف المكانية والزمنية التي تغطيها المشكلة.
(5) الخطوة -5 تطوير نهج تحليلي. تُدمج مخرجات الخطوات السابقة في عبارة واحدة تصف الأساس المنطقي للاختيار من بين الإجراءات البديلة.
(6) الخطوة -6 تحديد الدقة والإحكام المطلوبين وإدراجهما في معايير الأداء أو القبول لدعم فهم صانعي القرار ومراعاة حالات عدم اليقين التي تشوب البيانات.
(7) الخطوة -7 وضع خطة للحصول على البيانات. يُحدد تصميم أخذ العينات والتحليل الأكثر فعالية من حيث استخدام الموارد لتوليد البيانات التي من المتوقع أن تفي بأهداف جودة البيانات.

6-2- تفاوت الطلب على بيانات تحديد الخصائص

ستتطلب أنواع المواد العديدة تحديداً للخصائص عبر مجموعة متنوعة من المقاييس المكانية والحجمية، تُلبي مجموعة متنوعة من المستخدمين النهائيين والأغراض. ويتناول هذا القسم بعض المتطلبات المتنوعة لمعلومات تحديد الخصائص التي من المحتمل أن تنشأ بعد وقوع حادث.

6-2-1- تحديد الخصائص على المستوى الكلي

يمكن أن يؤدي وقوع حادث نووي خطير إلى تلوث منطقة واسعة. ويتعيّن تقييم مستويات التلوث على نطاق مناسب لضمان أمان الجمهور والبيئة ودعم وضع استراتيجيات للتنظيف. وقد تكون هناك حاجة أيضاً إلى جهود للتنسيق مع البلدان المجاورة.

وساهم الجمع بين تكنولوجيا كشف الإشعاعات وتكنولوجيا تحديد المواقع باستخدام السواتل (النظام العالمي لتحديد المواقع) في تحسين كبير في القدرة على تحديد خصائص

الظروف الإشعاعية في مناطق واسعة جغرافياً. واستُخدمت المركبات الجوية المأهولة والمركبات البرية وقياسات كشف الإشعاعات سيراً على الأقدام في أعقاب حوادث محطات القوى النووية. وشمل التقدم في هذا المجال أيضاً تطوير مركبات جوية غير مأهولة قيد التطوير(طائرات بلا طيار) ونُظم المركبات السطحية المسيّرة عن بُعد.

وعلى سبيل المثال، طورت مركبة رصد ميداني لمحطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية لاستخدامها في عمليات مسح معدل الجرعات والتلوث في المناطق الأرضية، بما في ذلك الطرق والملاعب وساحات المدارس والمناطق الرياضية والحدائق العامة، وغيرها [87]. ويعتمد النظام على جرار زراعي ياباني مزوّد بمقطورة. ويشمل النظام مخمِّدات هيدروليكية للتكيف مع الأسطح غير المنتظمة، مثل المطبات والاهتزازات. وعند الكشف عن قيم عتبات أعلى من العتبة المعيّنة، يقوم جهاز طلاء المدمج تلقائيا بوضع علامات على مكان التلوث. وتعتمد تكنولوجيا الكشف المستخدمة على كاشف غايغر - مولر لقياس معدل الجرعة، ونظام لتعيين المواقع باستخدام النظام العالمي لتحديد المواقع وجهاز وماض بلاستيكي 000 1 مم^2×500 مم^2 لقياس التلوث السطحي. وتُغطى وحدة الكشف بتدريع من الرصاص للسماح بكشف التلوث السطحي الضعيف الإشعاع، حتى في المناطق التي ترتفع فيها معدلات أشعة الخلفية. وتبلغ عتبة الكشف حوالي 000 1 بكريل/م^2 إلى 2000 بكريل/م^2 في أشعة خلفية طبيعية تبلغ نحو 0,1 ميكروسيفرت/ساعة

6-2-2- تحديد الخصائص للفرز والتجميع

يُعد فرز النفايات إجراءً مستصوباً لدعم الخزن المؤقت الفعال، وإدارة معدلات الجرعات، ومرحلة المعالجة اللاحقة، وتعبئة النفايات لأغراض التخلص منها، وما إلى ذلك. وفي المراحل الأولى من التعافي من الحوادث، يمكن استخدام قياسات معدل الجرعة لفصل النفايات لخزنها المؤقت ولتعزيز أمان العمال عن طريق فرز مواد النفايات ذات معدلات الجرعات الأعلى لعزلها عن أنشطة العمل. وبمجرد تحديد عمليات معالجة نفايات معيّنة والحصول على بيانات عن خصائصها، يمكن تجميع النفايات بشكل مناسب في خطوط منظمة انتظاراً لمعالجتها. ويلزم الحصول على بيانات خصائص محددة للنفايات لضمان معالجة النفايات المناسبة.

6-2-3- تحديد خصائص الأكياس والعبوات

يحتاج الخزن المؤقت للنفايات الناتجة عن الحوادث إلى التخطيط والتنفيذ بحكمة، وغالباً ما يتم ذلك بسرعة كبيرة بعد وقوع الحادث لتقليل تعرض الجمهور والعمال للإشعاعات. ويعتمد نوع الحاوية المستخدمة على مستويات الإشعاع والطبيعة الكيميائية والخصائص الفيزيائية للنفايات. ويمكن أن تشمل الحاويات الأكياس والبراميل والصناديق والحاويات التي تكون على

مستويات عالية من السلامة، وغيرها، بأشكال وأحجام مختلفة. ويلزم الحصول على معلومات عن الخصائص للاختيار الصحيح لعبوات الخزن المؤقت من أجل دعم التحكم في معدلات الجرعات ومستويات التلوث في منطقة الخزن/المرفق ولحصر المخزون والتعامل معه والتخلص منه لاحقاً. وفي حالة المنطقة الواقعة خارج موقع محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، يقاس معدل الجرعة السطحية في طبقة سمكها 1 سم لكل حاوية مرنة ويُقاس معدل جرعة الهواء على مسافة 1 م بعد التحميل على الشاحنات، كما هو موضح في الشكل-11.

6-2-4- إطلاق المواد ورفع الرقابة عنها وإعادة تدويرها

طوِّرت عمليات لإعفاء المواد بالاستناد إلى مستويات رفع الرقابة الإشعاعية. وتبدأ عمليات رفع الرقابة في البداية بتحديد المواد قيد النظر لتحريرها من المراقبة التنظيمية وتنتهي بأي متابعة للإجراءات الناتجة عن الرصد. ومن أجل ضمان الامتثال لمستويات الإعفاء ورفع الرقابة، من الضروري إنشاء برنامج للرصد. ويمكن أن تكون عملية رصد الامتثال هذه، عند مقارنتها بالرصد الإشعاعي في المرافق التشغيلية، معقدة جداً، وتتطلب إجراءات تستغرق وقتاً طويلاً. ويشمل رصد مستويات رفع الرقابة في العادة قياس الكميات الكبيرة من المواد. ومع ذلك، تقترب مستويات رفع الرقابة من حدود الكشف للمعدات الميدانية، وقد يتطلب الأمر أخذ عينات تأكيدية في مختبرات مجهزة بشكل مناسب [35]

ووضعت تدابير أساسية في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية من أجل معالجة الزيادة في المياه المتراكمة بسبب تدفق المياه الجوفية ومنع التدفق إلى مباني المفاعلات [80]. وبدأ تشغيل 12 بئراً لضخ المياه الجوفية بشكل تسلسلي لاعتراض وضخ المياه الجوفية قبل أن تتمكن من الوصول إلى مباني المفاعلات المتضررة. وخُزِّنت المياه الجوفية التي تم ضخها لأول مرة مؤقتاً في صهاريج، وبدأ إطلاقها إلى البحر من عام 2014 بعد أن أكدت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية ومنظمة خارجية أن أهدافها التشغيلية للجودة قد تحققت [89]

وفي محطة تشرنوبل للقوى النووية، لم تحدث متابعة للإطلاق الحر لمواد الحادث الملوثة بصورة طفيفة، وذلك بسبب إنشاء منطقة محظورة محيطة بموقع الحادث. ودُفنت المواد الناتجة عن أعمال إزالة التلوث الناتج عن الحادث ووضع علامات عليها بلافتات. وتخضع المساحة الإجمالية للمنطقة المحظورة لتحكم كامل في الدخول إليها. وأنشئت داخل حدود المنطقة المحظورة منطقة مقيّدة أخرى تشمل جميع مواقع الخزن المؤقت للنفايات التي دُفنت فيها المواد الملوثة

المعدل المكافئ الأقصى على بُعد متر واحد من الشاحنة (قواعد النقل بالمركبات)	متوسط تركيز النشاط الإشعاعي (بكريل/كغ)						
	1,000,000	500,000	150,000	30,000	8,000	3,000	
100	89	44	13	2.7	0.72	0.27	معدل جرعة الهواء (ميكروسيفرت/ساعة)

الشكل-11- مثال لقياس الإشعاع لكيس (إلى الأعلى) وشاحنة في فوكوشيما (في الأسفل). بتصرف من المرجع [88].

6-2-5- تحديد خصائص الإمدادات الغذائية

توجد ثلاثة مسارات رئيسية لدخول المواد المشعة بعد وقوع الحوادث إلى الإمدادات الغذائية: يمكن أن تحملها الرياح (أي العالقة في الهواء) أو يمكن أن تحملها المياه أو يمكن أن تدخل عن طريق التربة والرواسب. ويمكن أن تترسب النويدات المشعة في الهواء على النباتات التي تأكلها الحيوانات. ويمكن أن تؤثر النويدات المشعة الموجودة في المسطحات المائية أيضاً على النباتات والحيوانات المائية بطريقة مماثلة. وقد يتعيّن معالجة الإمدادات الغذائية الملوثة والمواد البيولوجية الأخرى باعتبارها نفايات مشعة، تبعاً لمستوى التلوث. ولذلك، قد يكون من الضروري تحديد خصائص الإمدادات الغذائية لأغراض التصرف في النفايات، وكذلك لحماية صحة الإنسان

وتُعتبر تركيزات نشاط النويدات المشعة في البيئة معياراً أولياً مهماً لتحديد خيارات إدارة الإنتاج الزراعي والغذائي في المستقبل. وفي مرحلة مبكرة من التصدي للحادث، وكخطوة أوّلية

أولى، من المهم تقييم كيفية انتشار التلوث في البيئة عن طريق قياس تركيزات النويدات المشعة ثم رسم خرائط لها. ويمكن قياس تركيزات النويدات المشعة إما في الموقع أو في المختبر.

وتُعد محافظة فوكوشيما منطقة زراعية غنية جداً، فهي توفر الأرز ولحوم الأبقار والفاكهة العالية الجودة لسائر أنحاء اليابان. وقبل وقوع الحادث، كان حد النشاط الإشعاعي في الأغذية والذي كان محدداً عند 600 بكريل/كغ للسيزيوم-134 والسيزيوم-137 معاً في جميع أنحاء اليابان. وفي آذار/مارس 2012، خُفض حد النشاط الإشعاعي إلى مستويات أقل من ذلك ووصل إلى 100 بكريل/كغ. وانخفضت المشتريات من محافظة فوكوشيما، على الرغم من البرنامج المكثف لأخذ العينات والقياس، وهو ما كان كفيلاً باستيفاء معايير الإطلاق والاستهلاك. ومن أجل تعزيز ثقة الجمهور بشكل أكبر، أُجري فحص لكل كيس من الأرز من محافظة فوكوشيما بحثاً عن أي نشاط إشعاعي، وليس مجرد عينة إحصائية. وطُبقت هذه العملية نفسها على فاكهة الكاكي المجففة، وهي من الأطعمة الشهية في المنطقة. وتؤدي عملية تجفيف الكاكي إلى زيادة تركيز النشاط الإشعاعي في الثمرة وتضمن القياسات عدم دخول أي كاكي يتجاوز حدود الجرعة إلى السوق.

ولدعم رصد الإمدادات الغذائية، بدأ العديد من مشاريع التنمية بعد حادث فوكوشيما دايتشي في التحقق من مستوى التلوث والتحقق مما إذا كان الغذاء مقبولاً للاستهلاك البشري. ويمثل نظام كانبرا للتحليل الإشعاعي للأغذية (Canberra FoodScreen) جهازاً لتحليل الأغذية باستخدام قياس طيف أشعة جاما باستخدام الجرمانيوم الفائق النقاء لقياس التلوث في الأغذية الخام أو المصنعة [90]. وأُعد نسق مكونات النظام وتم تحميله مسبقاً باستخدام معايرات الكفاءة العامة التي تغطي نطاقاً واسعاً من حاويات ومصفوفات عينات الأغذية الخام والمصنعة. ويمكن أيضاً إنشاء أشكال هندسية متخصصة.

وعقب حادث تشرنوبل، طورت نُظم قياس لفحص النشاط الإشعاعي (باعثات جسيمات غاما، مثل نظائر السيزيوم) في الحيوانات الحيّة قبل دخول الحيوان إلى السلسلة الغذائية. ويمكن إجراء رصد للحيوانات الحيّة في المزرعة و/أو في المسالخ، مما يوفِّر ثقة عالية بأن اللحوم مأمونة قبل دخولها إلى السلسلة الغذائية. ولم ينجح هذا النهج حتى الآن في اليابان، نظراً لاختلاف ممارسات تربية الأبقار. ومع ذلك، صُمم نظام لقياس النشاط الإشعاعي في الأعلاف المحلية المجففة والأعلاف الخضراء المزروعة لتغذية الماشية. وهذه أمثلة على تخصيص وتحسين طرق رصد الأغذية لضمان إمكانية تحليل العينات بسرعة وكفاءة.

وبعد حادث مفاعلي وندسكيل، ونتيجة لانطلاق السترونتيوم، نُفذ برنامج للرصد البيئي، وأفضت نتائج هذا الاستقصاء إلى تقييد توزيع الألبان من منطقة مجاورة لمنطقة وندسكيل لعدة أسابيع [91]

6-2-6- تحديد خصائص المياه الجوفية

يُعد التقييم الإشعاعي للمسطحات المائية ضرورياً أيضاً بعد وقوع حادث نووي للتأكد من أمان إمدادات مياه الشرب للنباتات والحيوانات التي تعيش في المسطحات المائية المتضررة، ولاستخدام المياه (على سبيل المثال للأغراض الزراعية). ويمكن أيضاً أن تؤدي المسطحات المائية الملوثة بشدة إلى توليد نفايات مشعة إضافية، سواءً بصورة مباشرة أو عن طريق برامج التنظيف.

وتاريخياً، صُممت أجهزة قياس أشعة غاما الموضوعية للعمليات التي تتم تحت الماء [92]. واحتوت أجهزة قياس الطيف في البداية على كاشف يوديد الصوديوم المنشط بالثاليوم. وفي وقت لاحق، طورت أيضاً أجهزة قياس الطيف التي تستخدم كاشف الجرمانيوم الفائق النقاء المزودة بمكونات إلكترونية مكيّفة ومكونات إلكترونية للحصول على البيانات ومعالجتها. ويُستخدم هذان النظمان على نطاق واسع. وتُتاح الوحدات أيضاً بنظام رافعة هيدروليكية مزودة بمئات الأمتار من الكابلات الموصلة. واستخدمت هذه النُظم لقياس النشاط الإشعاعي في مياه البحر ورصد قاع البحر. واستُخدم قياس طيف جسيمات غاما تحت الماء في حالات الرصد الموضوعي لتسرب النويدات المشعة من الأجسام/النفايات النووية الملقاة أو الغارقة (مثل الغواصات النووية) أو التصريفات من المحطات النووية.

واستخدمت المركبات المسيّرة عن بُعد، مثل المركبات التي طورتها شركة AREVA [93]، والمجهزة بقياس طيف جسيمات جاما، للتفتيش تحت الماء على قيعان البحيرات في منطقة فوكوشيما لقياس تلوث الرواسب. ويمكن للمركبات المسيّرة عن بُعد أن تعمل حتى عمق 200 م. وتكنولوجيا الكشف على مسبار بروميد اللنثانوم $LaBr_3$ إلى جانب إجراءات مضادة للتعامل مع مشاكل تدريع عمود الماء. ويُحدد موقع المركبة المسيّرة عن بُعد باستخدام خط أساسي قصير جداً، وهو نظام تحديد المواقع تحت الماء يستخدم جهاز إرسال واستقبال مثبت على السفينة لكشف المدى والتوجه إلى الهدف باستخدام إشارات صوتية مرتبطة بالقارب الموجود على السطح. ويُحدد موقع القارب باستخدام النظام العالمي لتحديد المواقع.

6-2-7- تحديد خصائص معالجة النفايات وخزنها والتخلص منها

تتفاوت الخصائص الفيزيائية والكيميائية والإشعاعية (وربما النووية) للنفايات المتولدة من حادث نووي، مما يُشكل تحديات خاصة للتكييف والتعبئة والخزن والنقل والتخلص من النفايات. ويُعد التنسيق الوثيق ضرورياً في جميع مراحل التصرف في النفايات، بدءاً بتصميم العمليات المطلوبة لتكييف النفايات وصولاً إلى وضع المعايير المطلوبة لمراحل التصرف في النفايات تمهيداً للتخلص منها. ويتعيّن الاعتراف في برنامج تحديد خصائص النفايات بأن الخصائص الأوّلية للنفايات (كما تم تعريفها في المراحل السابقة) يمكن أن تتغيَّر مع مرور الوقت نتيجة لعمليات

التحلل المختلفة، بما في ذلك التحلل البيولوجي والتفاعلات الكيميائية والتآكل والاضمحلال الإشعاعي. ونتيجة لذلك، قد لا تكون الوثائق الأصلية المرتبطة بعبوات النفايات كافية بدون معلومات إضافية، لوصف الوضع الحالي للنفايات. وعلاوة على ذلك، قد تكون هناك شكوك بشأن مصادر البيانات المتاحة لأن مسارات المعلومات المختلفة يمكن أن تفضي إلى تناقض في البيانات

وكما نوقش من قبل، سيلزم الحصول على مجموعة من بيانات تحديد الخصائص لدعم معالجة النفايات والتخلص منها لاحقاً. ويمكن أن يؤدي تعقيد النفايات وحجمها إلى دفع برنامج التصرف في النفايات نحو بذل جهد كبير جداً لأخذ العينات وتحليلها. ولذلك، من الضروري وضع برنامج لأخذ العينات وتحليلها بحيث يوفِّر البيانات المطلوبة باستخدام أكثر الوسائل الممكنة كفاءة. ويمكن استخدام عملية تحديد أهداف جودة البيانات التي نوقشت في القسم 6-1-3 لتيسير تخطيط العينات وتحليلها

وستكون تقنيات تحديد الخصائص غير المتلفة والمتلفة مطلوبة لدعم معالجة النفايات وخزنها والتخلص منها. ويمكن أن تشمل القياسات التي سيتم إجراؤها و/أو التقنيات التي سيتم استخدامها ما يلي

(أ) القياس غير المتلف:

- رسم خرائط معدل الجرعات وطرق تحويل معدلاتها.
- تلوث الأسطح بالأدوات المحمولة.
- قياس طيف جسيمات غاما.
- قياس النيوترونات (لتفكيك محطة إعادة المعالجة، والمواد الملوثة بالبلوتونيوم والكوريوم وغيرهما).
- التصوير الإشعاعي باستخدام الأشعة السينية (لتقييم العبوات/الحاويات التي تحتوي على نفايات مشعة).

(ب) القياس المتلف:

- التحليلات الكيميائية الإشعاعية.
- التحليلات الكيميائية.
- خواص التميّع.

ومن المرجح أن توجد في موقع الحادث قدرات تحليلية محدودة، ومن المرجح أن تكون هناك حاجة إلى مختبرات خارج الموقع لدعم البرنامج التحليلي. ومع ذلك، وتبعاً لحجم البرنامج التحليلي، يمكن أن يصبح نقل العينات مشكلة، وقد يفرض الحاجة إلى إنشاء قدرات تحليلية محددة في الموقع أو بالقرب منه. ويمكن أن تؤدي مستويات الإشعاع الناتجة عن الحادث

إلى تعقيد عملية تحديد موقع مرفق المختبر، وذلك بسبب الحاجة إلى منطقة ذات معدل جرعة منخفض

6-3- الطرق والتقنيات المستخدمة في تحديد الخصائص

أثبتت تقنيات تحديد الخصائص المبتكرة والطرق التحليلية أهميتها في عمليات التنظيف في الحوادث النووية التي وقعت في الماضي. وساهم نشر النُظم المتنقلة، وتطوير المعدات اللازمة لإجراء التحليلات في البيئات الصعبة، وإعداد طريقة تحليلية لتحديد خصائص المصفوفات المعقدة، في جهود التصرف في النفايات والإخراج من الخدمة في الماضي. وتوفِّر هذه التقنيات والمعدات حالياً مجموعة أدوات للاستخدام في المستقبل.

ويُقدم هذا القسم لمحة عامة عن الطرق والتقنيات والمعدات التي استُخدمت لدعم جهود تحديد الخصائص في أعقاب الحوادث النووية.

6-3-1- قياسات معدل الجرعات

توفِّر قياسات معدل الجرعات، جنباً إلى جنب مع نُظم مسح التلوث العالق في الهواء، مؤشراً سريعاً لشدة الحادث النووي. ويمكن أيضاً استخدام هذه القياسات لتحديد خصائص المواد والتربة والمباني والمواقع وغيرها عقب الحادث

ويمكن إجراء قياس معدل الجرعات باستخدام أنواع مختلفة من أجهزة الكشف. ويمكن استخدام كاشف الغاز مثل أنابيب غايغر - مولر، أو غرف التأين، أو الومَّضات، سواءً البلاستيك أو يوديد الصوديوم (مثل يوديد الصوديوم المنشط بالثاليوم)، تبعاً لمستوى معدل الجرعة وظروف القياس. ويمكن حمل أجهزة رصد معدل الجرعة أو تركيبها على مركبة (سيارة أو شاحنة أو هليكوبتر أو طائرة أو مركبة مسيرة عن بعد تحت الماء، أو روبوت، وما إلى ذلك) ويمكن استخدامها جنباً إلى جنب مع نُظم تحديد المواقع لوضع خرائط تُحدد معدل الجرعة أو مستوى التلوث

6-3-2- مسح التلوث باستخدام مسابر ألفا وبيتا وغاما

توفّر مسابر ألفا وبيتا وغاما إشارة تدل على مستوى ونوع تلوث التربة والأغطية الأرضية (مثل الشوارع والممرات وغيرها) والجدران والأسطح الأخرى. ويكمن العيب هنا في أن عملية الرصد تستغرق وقتاً وأن العمال يقومون بإجراء المسح في ظروف إشعاعية خطرة. ولا يُناسب هذا النوع من المعدات سوى الاستخدام في خلفيات معدل الجرعة الخارجية المنخفضة. ولا يمكن

تقييم التلوث السطحي للحاوية التي توجد فيها نفايات باستخدام هذه المعدات. وتُعد منهجية اختبار المسحة مناسبة لهذا الغرض، حيث تُحسب المسحة في منطقة ذات معدل جرعة منخفض.

وتعتمد نُظم الكشف على العداد الوميضي المزوّد بنافذة وميضية كبيرة المساحة وصمام ضوئي مضاعف داخلي. ويمكن استخدام ومضات مثل كبريتيد لكشف جسيمات ألفا، ويمكن استخدام ومَّض بلاستيكي لكشف جسيمات بيتا. ويمكن تمييز الطاقات الوميضية الناتجة بحيث يمكن قياس أعداد جسيمات ألفا وبيتا بشكل منفصل باستخدام الكاشف نفسه. وتعتمد نُظم القياس الأخرى على الكاشف التناسبي الغازي. وتتألف هذه النُظم إما من شاشات محمولة باليد أو معدات رصد ثابتة لمسح المنطقة أو إجراء المسح الشخصي، أو مثبتة لرصد الأفراد، وتتطلب منطقة كشف كبيرة لضمان التغطية الفعالة والسريعة للأسطح المراد رصدها. ويمكن تركيب هذه المسابر على مركبات أو روبوتات يتم التحكم فيها عن بُعد

6-3-3- قياس التلوث العالق في الهواء

في هذا السياق، يُشير التلوث العالق في الهواء إلى الغازات أو الجسيمات المنطلقة في الغلاف الجوي. وتُستخدم نُظم مسح التلوث العالق في الهواء على نطاق واسع لأغراض الفيزياء الصحية في جميع قطاعات الصناعة النووية، ويمكن أن توفِّر مؤشراً سريعاً لمدى شدة أحداث الحوادث المستمرة أو الحوادث التي استقرت مؤخراً. ويُسحب الهواء في معظم نُظم رصد الجسيمات من خلال الجهاز عن طريق مضخة خارجية أو نظام تفريغ، وتُرسّب المواد الجسيمية على مرشح مثبت على بطاقة قابلة للإزالة. ويُرصد المشرح باستخدام كاشف، مثل كاشف السيليكون المسطح المطعوم بالأيونات الخاملة، والذي يسمح بإجراء قياس متزامن للنشاط الإشعاعي لجسيمات ألفا وبيتا في المادة المترسبة على المرشح. ويُقاس تدفق الهواء مباشرة ويتم الإبلاغ عنه بواسطة الجهاز. وأُدخلت تحسينات على تصميم نظام تدفق الهواء لضمان تحقيق مستوى عالٍ من الكفاءة في أخذ عينات الهواء وانتقال الجسيمات بفعالية إلى المرشح. وتُستخدم النُظم في العادة داخل المرافق النووية، ويمكن أيضاً استخدامها خارج المرافق النووية، ويمكن تركيبها في المختبرات المتنقلة. وتستخدم نُظم كشف الغاز المشع آليات مماثلة لتدفق الهواء للحصول على العينات، ولكنها تقرأ مستويات نشاط الغاز مباشرة.

6-3-4- قياس طيف غاما

يمكن إجراء قياسات طيف غاما على العينات، وعبوات النفايات، وفي الميدان، حيث يمكن أن توفر مؤشراً سريعاً لمدى شدة الحادث النووي وطبيعته. ويُعد قياس طيف غاما طريقة غير متلفة قادرة على تحديد شدة أشعة غاما المنبعثة من العنصر المقاس وطاقاتها. وتوفِّر انبعاثات

غاما المُجمّعة والمحللة طيف غاما الذي يُميِّز البصمة الإشعاعية للعناصر المقاسة من حيث المواد الباعثة لأشعة غاما، ويجعل من الممكن تقييم النشاط الإشعاعي للمادة بعد إجراء معايرة مناسبة

ويُستخدم نوعان من الكواشف لقياس طيف غاما، هما الومَّاضات، مثل بلورات يوديد الصوديوم (NaI) أو كواشف بروميد اللنثانوم ($LaBr_3$)، وأشباه الموصلات، مثل الزنك المطعوم بتيلوريد الكادميوم (CZT) أو كاشف الجرمانيوم. ويختلف القرار باختلاف نوع الكاشف. وتشمل وحدة الكشف عن الجرمانيوم على دورق ديوار للنيتروجين السائل أو مُبرّد كهربائي. ويمكن حمل مقياس طيف غاما يدوياً أو تركيبه على مركبة (سيارة أو شاحنة أو هليكوبتر أو طائرة أو مركبة تُسيّر عن بُعد تحت الماء، أو روبوت، وما إلى ذلك) ويمكن استخدامه مع النظام العالمي لتحديد المواقع.

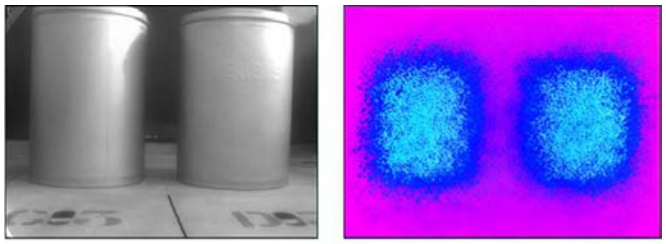
6-3-5- التصوير بأشعة غاما

يمكن استخدام الكاميرا الجيمية الوميضية بعد وقوع حادث نووي لكشف النقاط الساخنة/تركيزات النشاط الإشعاعي، من أجل تحسين النمذجة (عند الاقتران مع قياس طيف غاما) ولتخطيط التدخلات. ويوجد كثير من التعقيبات المنبثقة عن الخبرة المكتسبة في ما يتصل باستخدام الكاميرات الجيمية الوميضية في التصرف في النفايات الموروثة التاريخية.

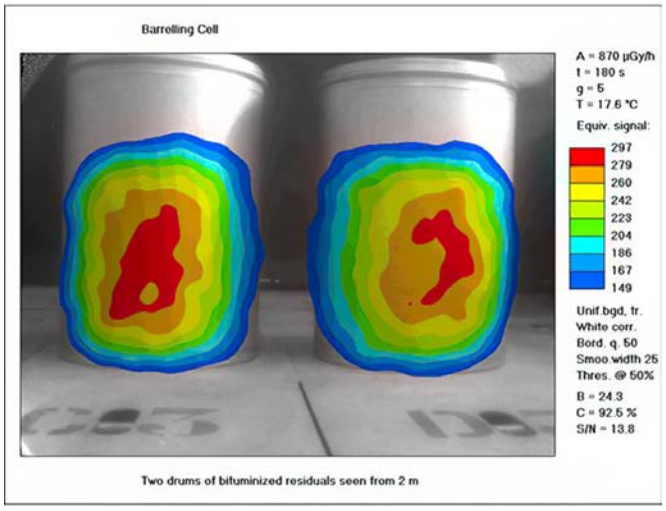
ويتكون التصوير بأشعة غاما من صورة مرئية للمنطقة المستهدفة مع ملف تعريف غاما متراكب يوضح موقع الإشعاع، إلى جانب نظام ألوان متدرج يُشير إلى حجم الإشعاع، كما هو موضح في الشكل-12.

6-3-6- عد النيوترونات

يُستخدم نظام عد النيوترونات في قياس النيوترونات المنبعثة من المواد الانشطارية والأكتينيدات الأخرى، ويُستخدم لأغراض حساب المواد النووية. ويعتمد العد الخامل للنيوترونات على بصمة الأكتينيدات التي تعتمد على التحليل الكيميائي الإشعاعي للعينات. ولا يمكن تحديد مصدر النيوترونات بمجرد كشفها. ويلزم الحصول على الحد الأدنى من المعرفة بخصائص النفايات المتدفقة. وتعتمد معظم الطرق على صمامات الكشف التناسبي باستخدام الهيليوم-3 (^3He) أو الكواشف المملوءة بثالث فلوريد الكلور (BF_3). وتعتبر طرق عد النيوترونات من طرق تحديد الخصائص المعقدة بطبيعتها. ولا توجد طرق نيوترونية بسيطة— فكل منها يتطلب أخصائي في الفيزياء لديه معرفة واسعة لإدارة حملة القياس من أجل ضمان دقة تفسير النتائج. وتُتاح حالياً نُظم العد الخامل للنيوترونات من أجل تحديد خصائص الأحجام التي تقل عن 1 م^3 أو 1,5 م^3، في حين أن البحث والتطوير ما زال جارياً لتحديد خصائص الأحجام الأكبر.



صورة جاما الصورة المرئية



الصورة المعالجة والمتراكبة

الشكل-12- مثال على نظام للتصوير بأشعة غاما. بإذن من مختبر التكامل بين النُظم والتكنولوجيا التابع للمفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة.

6-3-7- التحليل المُتلف

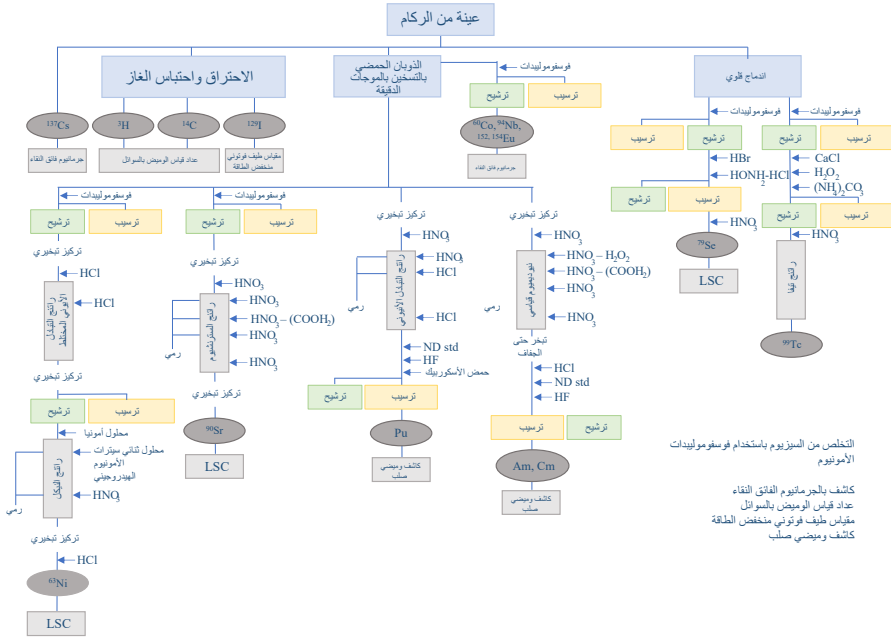
يمكن أن يتطلب الحصول على بيانات محددة ودقيقة عن النويدات المشعة والتركيب الكيميائي لمواد النفايات طرقاً تحليلية متلفة. وقد تحتاج عينات المواد الصلبة إلى إذابة أو هضم قبل التحليل. وقد يكون من الضروري إجراء عزل أو فصل للمادة محل الاهتمام المراد تحليلها.

وفي محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، أنشئ نظام منظم مؤلف من طرق تحليلية للنفايات المشعة الضعيفة الإشعاع المتولدة من مختبرات الأبحاث قبل وقوع الحادث، بهدف إجراء تحديد بسيط وسريع. وطُبقت الطرق على النفايات الناتجة عن الحوادث بعد إجراء تعديلات محددة تبعاً للعينة. ويظهر الشكل-13 العملية المعدلة. وخُلطت العينات الصلبة، مثل

الرُكام والنباتات، لمجانستها بعد طحنها أو تقطيعها إلى قطع صغيرة [94]. وفي حالة الحاجة إلى إزالة السيزيوم-137 الذي يؤدي في كثير من الأحيان إلى زيادة مستوى الخلفية، استُخدم مركب فسفوموليبدات الأمونيوم قبل التحديث. ولتحليل التريتيوم (^{3}H) والكربون-14 (^{14}C) واليود-129 (^{129}I)، أكسدت العينات عن طريق الحرق لتحويلها إلى الحالة الغازية واستعادتها في شكل سائل. ثم استُخدمت المستخلصات الصلبة لعزل النويدات المشعة من السترنشيوم والأكتينيدات [95].

6-4- أمثلة على تحديد الخصائص من الحوادث النووية التي وقعت في الماضي

يُناقش هذا القسم استراتيجيات وتقنيات تحديد الخصائص التي استُخدمت في الحوادث النووية التي وقعت في الماضي والدروس المستفادة منها.



الشكل-13- طريقة تحليلية استُحدثت لتحليل التريتيوم (^{3}H)، والكربون-14 (^{14}C)، والكوبالت-60 (^{60}Co)، والنيكل-63 (^{63}Ni) والسيلينيوم-79 (^{79}Se)، والسترنشيوم-90 (^{90}Sr)، والنيوبيوم-94 (^{94}Nb)، والتكنتيوم-99 (^{99}Tc)، واليود-129 (^{129}I)، والسيزيوم-137 (^{137}Cs)، واليروبيوم-152 (^{152}Eu)، واليروبيوم-154 (^{154}Eu)، والنويدات المشعة الباعثة لجسيمات ألفا في عينات الركام المجموع في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية. بتصرف من المرجع [94]

6-4-1- حادث ثري مايل آيلند

استُخدمت عدة طرق لتحديد الخصائص في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية بعد وقوع الحادث للتأكد من ظروف المفاعل، وتحديد التركيبات الكيميائية والنويدات المشعة للنفايات السائلة والصلبة لأغراض المعالجة والتخلص من النفايات، ودعم جهود إزالة التلوث [96]. واستُخدمت التقنيات الروتينية والمطورة خصيصاً للحصول على ما يلي

(أ) عينات من المواد الغازية أو السائلة أو الصلبة من نُظم المحطة، وقلب المفاعل التالف، والمناطق المحيطة به [97].
(ب) نتائج التحليلات الكيميائية والإشعاعية [98–100].
(ج) المعلومات المرئية والمتعلقة بالأبعاد داخل قلب المفاعل والمحطة [101]؛
(د) حالة المحطة من خلال الحسابات واختزال البيانات بناءً على المعرفة بالعمليات.

ويتضمن المرجع [96] مناقشة مستفيضة تتناول الأهداف التحليلية والتقنيات المستخدمة للحصول على البيانات المطلوبة. وتُناقش طرق الحصول على البيانات الناجحة وغير الناجحة. وكانت الدروس الرئيسية المستفادة من تحديد الخصائص بعد حادث محطة ثري مايل آيلند للقوى النووي هي أن التحديد الحقيقي للخصائص والعمليات الميدانية أكثر فعالية بكثير من أي نهج نظري. وكان تحديد الخصائص هو حجر الأساس في اتخاذ القرارات التقنية والتخطيط والهندسة. وفي الحالات التي يكون فيها تحديد الخصائص أصعب خطوة، فإنه يُقدم في العادة أهم البيانات. وكانت جهود تحديد الخصائص متكررة ومستمرة

ومن المهام الرئيسية في المتابعة إدارة البيانات: تجميع البيانات التقنية وتنظيمها ونشرها. وبمجرد الشروع في عملية التنظيف في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، تم توليد وثائق لتخطيط العينات والتحليل من أجل المساعدة في تنظيم جهود أخذ العينات والتحليل وتجميع النتائج التحليلية السابقة المرتبطة بالجهود التحليلية الراهنة. وبهذه الطريقة، اعتمدت هذه الوثائق على الخطط السابقة، وأسفرت عن هيكل منظم [102].

وكما ذُكر من قبل ساد شعور عام بعدم ثقة الجمهور بعد حادث ثري مايل آيلند. وكانت إحدى المحاولات لتحسين الشفافية وتزويد الجمهور بالمعلومات من خلال إنشاء برنامج لرصد الجرعات داخل المناطق المحيطة بمحطة ثري مايل آيلند للقوى النووية والذي أصبح يُعرف باسم برنامج الرصد الإشعاعي للمواطنين [103]. ونُفذ البرنامج بالتعاون بين وزارة الطاقة في الولايات المتحدة وإدارة الموارد البيئية في بن سلفانيا، وجامعة ولاية بن سلفانيا ووكالة حماية البيئة الأمريكية. وأتاح البرنامج وسيلة للجمهور لقياس مستويات الجرعة الإشعاعية بشكل مستقل، وأتاح للمواطنين وسيلة شفافة لتقييم المخاطر الناتجة عن الحادث.

6-4-2- حادث تشرنوبل

من السمات المميزة لحادث تشيرنوبيل وجود علامة 'جسيمات ساخنة' في الغبار المشع المتساقط [3، 104–111] الذي كان يشمل مكونين أساسيين هما: جزيئات الوقود النووي الدقيقة المشتتة ('جسيمات الوقود') وجسيمات التكثيف، التي تشكلت نتيجة تكثّف منتجات الانشطار المتطايرة (النظائر المشعة لليود والتلوريوم والسيزيوم) على أسطح حاملات الهباء المختلفة. وتكونت الجسيمات غير المؤكسدة أثناء التدمير الميكانيكي للوقود النووي، ووجدت بكثرة في الأثر الغربي للجسيمات المنطلقة، وتشكلت مباشرة بعد الانفجار. وفي الحريق الذي اندلع لاحقاً في المفاعل، تأكسد الوقود النووي وانطلقت جزيئات مؤكسدة شكلت آثاراً شمالية شرقية وجنوبية، بالإضافة إلى أنها تراكبت مع أجزاء من الأثر الغربي الأوّلي [106]. ويُشكل تلوث التربة في المنطقة الواقعة في حدود 30 كم آثاراً واضحة المعالم: الأثر الغربي الضيق للانطلاق الأول، والأثر الشمالي الغربي والأثر الجنوبي الذي يتكون من عدة آثار متراكبة. ويرتبط أعلى تلوث في التربة بالأثر الغربي الممتد نحو قرية Tolstoy Les، والأثر الشمالي الممتد نحو قريتي Usiv و Masany 108]. وكان المصدر الرئيسي للمعلومات والبيانات المتعلقة بالظروف الإشعاعية داخل المنطقة المحظورة هو نظام الرصد الإشعاعي الذي يرد وصف موجز له أدناه

ويتولى مركز EcoCenter التابع للمؤسسة الحكومية الخاصة إجراء رصد مستمر للظروف الإشعاعية في المنطقة المحظورة. ويُحدد المركز المذكور نقاط المراقبة/أخذ العينات، والبارامترات المراد رصدها وتواتر عمليات أخذ العينات. ويشمل برنامج الرصد الوسائط البيئية التي يحدث فيها نزوح للنويدات المشعة (التربة وتصريف المياه في البيئة الطبيعية، والكائنات الحيّة، والهواء، والمياه الجوفية، والمياه السطحية) ويُنفذ على المستوى الإقليمي، وكذلك على الأجسام التكنولوجية المنشأ والبيئية المحددة التي يُحتمل أن تكون خطرة في المنطقة المحظورة. وتشمل شبكة الرصد الإشعاعي 147 نقطة مراقبة و138 بئر مراقبة

ويتم إجراء المراقبة بأعلى معدل تواتر باستخدام النظام الآلي لرصد الإشعاعات، الذي يقيس معدل جرعة غاما الخارجية عبر شبكة من نقاط المراقبة. ويتم أخذ عينات من الغلاف الجوي والمياه السطحية والمياه الجوفية والأنظمة البيئية بشكل أقل تكرارًا مقارنة بأخذ عينات باستخدام النظام الآلي لرصد الإشعاعات. وتُحلل العينات البيئية بحثاً عن السيزيوم-137 (^{137}Cs) والسترنشيوم-90 (^{90}Sr) (الملوثات المشعة الرئيسية المثيرة للقلق) بالإضافة إلى نويدات ما وراء اليورانيوم المشعة الباعثة لأشعة ألفا - البلوتنيوم-238 (^{238}Pu)، والبلوتنيوم-239 (^{239}Pu) والبلوتنيوم-240 (^{240}Pu)، والأميريشيوم-241 (241Am). ويشمل برنامج الرصد السنوي في العادة جمع ما يتراوح بين 4500-5000 بيئية وإجراء ما يتراوح تقريباً بين 000 10 و000 11 تحليلاً للنشاط الإشعاعي.

ويتم اختيار طرق تحديد خصائص النفايات المشعة حسب متطلبات التخلص من النفايات. وعلى سبيل المثال، تُحدد في العادة خصائص النفايات الصلبة والسائبة القصيرة العمر الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي يُراد التخلص منها في بورياكوفكا باستخدام نظام لعدٍّ العناصر في الموقع بالاعتماد على تقنية كانبرا لقياس طيف غاما. وبعد تحديد الخصائص، يتم إعداد شهادة للتخلص من النفايات، وتُنقل النفايات إلى الموقع الذي يتم فيه التخلص منها. وتخضع النفايات المراد التخلص منها في مرافق الخزن القريبة من سطح الأرض في مُجمع فيكتور لإجراءات تحديد الخصائص باستخدام المعدات والمختبرات الموجودة في محطة معالجة النفايات المشعة السائلة والمُجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة

وعقب الحادث مباشرة وعلى المدى القريب نُفذت عدة تدابير وأنشئت مرافق للتصرف في النفايات على المدى القصير داخل المنطقة المحظورة، وهو ما تطلب بعد ذلك تحديداً للخصائص في الموقع. وشمل ذلك ما يلي:

(أ) إنشاء تسعة أماكن خزن مؤقت للنفايات المشعة دُفنت فيها النباتات الملوثة والتربة السطحية وحطام المباني في الموقع داخل الخنادق والتلال للتقليل من المجال الإشعاعي في المنطقة المجاورة لمحطة القوى النووية.

(ب) إنشاء ثلاثة مواقع للتخلص من النفايات المشعة لاستقبال النفايات المشعة الناتجة عن جهود تصفية الحادث خارج هيكل الساتر: موقع التخلص من النفايات المشعة في بيدليسني، والمرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية (يُشار إليه أيضاً بمرفق المجمع)، وأُغلق كلاهما بعد الانتهاء من تدابير التصفية، ومرفق التخلص من النفايات المشعة في بورياكوفكا، وهو مرفق للتخلص من النفايات على شكل خندق وما زال قيد التشغيل للتخلص من النفايات السائبة الضعيفة الإشعاع.

وبعد ذلك، نُفذت إجراءات التحديد الميداني للخصائص داخل الموقع خلال الفترة بين عامي 1994 و1995 لتقييم هذه المواقع. وتولى معهد عموم روسيا للأبحاث الإنمائية والعلمية الخاصة بالتكنولوجيا الصناعية تطوير منهجية تحديد الخصائص واختبارها لإجراء مسح في الفترة بين عامي 1991 و1992 في الغابة الحمراء، وهي منطقة تبلغ مساحتها 10 كم^2 تحيط بمحطة تشرنوبل للقوى النووية [112-114]. وشملت طرق تحديد الخصائص ما يلي:

— الفحص البصري (مثل هبوط التربة؛ وشذوذ الغطاء النباتي)؛
— استخدام مختبر متنقل مجهز لإجراء عمليات التقصي الأرضي وتحديد مواقع الخنادق والتلال.

— حفر آبار مسح بعمق 1 متر في شبكة مربعة بمساحة 5 م^2، وذلك باستخدام التسجيل الجيني بزيادة رأسية قدرها 0,2 م؛
— تحسين شبكة أخذ العينات عند اكتشاف حالات شذوذ في معدل جرعة جاما (أكثر من 3 ميكروسيفرت/ساعة) [113].

وبناءً على نتائج حملة تحديد الخصائص، قُدمت توصية بتطبيق تقنيات القياس التالية لتعزيز جهود تحديد الخصائص في المنطقة المحظورة[115].

(1) مقاييس طيف غاما المحمولة الموثوقة لقياس التوزيعات الزاوية والطيفية.
(2) معدات النيوترونات الخاملة والنشطة لقياس المواد الانشطارية والقابلة للانشطار.
(3) مختبر الكيمياء الإشعاعية لتحليل العينات الملوثة بعناصر ما وراء اليورانيوم.

6-4-3- حادث فوكوشيما دايتشي

شمل تحديد خصائص المواد والنفايات الملوثة في فوكوشيما مجموعة من الأنشطة والتقنيات الخاصة بالمواد العضوية والركام والمياه

(أ) يُجمع الركام والأشجار والنفايات الثانوية الناتجة عن معالجة المياه في الموقع وتُنقل إلى الوكالة اليابانية للطاقة الذرية (إيباراكي) عدة مرات سنوياً لتحليل النشاط الإشعاعي: العدد الإجمالي للعينات هو 70 عينة تقريباً في السنة. وأظهرت نسبة تركيز السترنشيوم-90 إلى السيزيوم-137 في الركام اتجاهاً تناسبياً يختلف باختلاف الموقع الذي جُمعت فيه العينة. ويجري جمع البيانات باستمرار لتحسين دقة الارتباط.
(ب) من الصعب أخذ عينات لتحليلها من أوعية امتزاز السيزيوم و/أو الحمأة الناتجة عن نظام معالجة المياه، وذلك بسبب معدلات الجرعات العالية. ويلزم بالتالي إجراء تقييم غير مباشر عن طريق مقارنة تحليلات النشاط الإشعاعي في المياه الملوثة والمياه المعالجة.
(ج) على الرغم من أن كمية البيانات محدودة، تُقيّم أرصدة جميع تيارات النفايات في الموقع بالاستناد إلى التحليلات والتقديرات وعمليات النمذجة. وتُقدَّر الأرصدة للأغراض التحليلية من خلال إنشاء نماذج انتقال النويدات المشعة بناءً على سلوك تفريغ النويدات المشعة من المفاعل، وسلوك الذوبان في المياه الملوثة، وسلوك امتزاز النويدات المشعة على مواد البناء والمواد الممتزة. وتُجمع مجموعات بيانات الأرصدة لكل تدفق من تيارات النفايات استناداً إلى التقييمات باستخدام النتائج التحليلية والنمذجة.

ومن الأنشطة الجارية المهمة زيادة عدد العينات التي تخضع للتحليل، وتحسين دقة تقديرات تحديد الخصائص. وتقوم الوكالة اليابانية للطاقة الذرية بتطوير مرفقين مخصصين لتطوير تكنولوجيات معالجة النفايات والتخلص منها. وسيشمل المرفقان مختبرين، يُركز الأول على الركام الضعيف الإشعاع والنفايات الثانوية الناتجة عن معالجة المياه الملوثة، بينما يُركز المرفق الثاني على النفايات القوية الإشعاع الناتجة عن المياه الملوثة وحطام الوقود.

ويشمل العديد من المبادئ التوجيهية وصفاً لإجراءات تحديد الخصائص خارج الموقع في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، ومن ذلك على سبيل المثال، المبادئ التوجيهية لمسح التلوث [116]، والمبادئ التوجيهية لإزالة التلوث [61]. والمبادئ التوجيهية لبرنامج النقل التجريبي [88]. ولأغراض القياس الفعلي للنفايات التي ترد إلى موقع الخزن المؤقت، يجري حالياً تطوير نُظم جديدة لرصد المركبات من أجل تقييم معدل الجرعة في الهواء.

7- جمع النفايات ومناولتها واسترجاعها

الدروس الرئيسية المستفادة:

- يمكن أن توجد النفايات في مجموعة واسعة من الأشكال (مثل التربة، والغطاء النباتي، وركام المباني، والمعدات، والمركبات والنفايات القابلة للانحلال، وتنظيف الطرق، والرواسب في ميازيب الأمطار، والرماد، والحمأة، وما إلى ذلك)، ويمكن أن تكون منتشرة في مناطق جغرافية واسعة، بما في ذلك المناطق الحضرية والمناطق الحرجية والمناطق الزراعية والمناطق النائية.
- يمكن أن توجد النفايات في أماكن داخل الموقع وخارجه.
- سيوفِّر فصل النفايات حسب النوع والمادة والمكان و/أو مستويات الإشعاع ركيزة لتحسين إدارة النفايات في المستقبل.
- قد تكون هناك حاجة إلى معدات تعمل عن بُعد في المناطق القريبة من مصدر الحادث.
- قد تكون هناك حاجة إلى اتخاذ تدابير طوارئ (مثل تغطية بعض المناطق بتربة إضافية لتوفير تدريع) في المراحل الأولى من الحدث. وسيكون لذلك أثر على مقدار المواد التي يتعيّن معالجتها كنفايات لاحقاً.
- يتعيّن النظر في طرق الاسترجاع من الخزن المؤقت (على سبيل المثال، ستتحلل المواد البيولوجية وتصدأ المعادن أثناء الخزن).

- هناك حاجة إلى سجلات مفصلة للمواد المخزّنة لكل موقع من أجل توفير أساس للاسترجاع والتصرف في هذه المواد في المستقبل.
- يمكن أن يؤدي جمع المواد الملوثة وتجميعها إلى تقليل الخطر الإشعاعي الذي يتعرض له العمال والجمهور. ومع ذلك، يتعيّن أن تؤخذ في الاعتبار جرعة العامل والجهد المبذول في جمع المواد ونقلها (على سبيل المثال، قد يكون من المأمون ترك المادة في الموقع للخزن المؤقت).

7-1- الجمع الأوّلي للنفايات

يرتبط كثير من التحديات في التصرف في النهايات بعد وقوع حادث بالجمع الأوّلي للنفايات، ولا سيما النفايات الموجودة خارج موقع الحادث. ويمكن أن تكون النفايات منتشرة جغرافياً على نطاق واسع، وقد تشمل مجموعة كبيرة من المواد التي تتميّز بمجموعة كبيرة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية والإشعاعية. وستشمل النفايات ما هو موجود في موقع الحادث، والنفايات الناتجة عن تنظيف موقع الحادث وترميمه، والنفايات الناتجة عن ترميم المناطق الملوثة خارج الموقع، والنفايات الثانوية الناتجة عن معالجة نفايات أخرى. وستكون النفايات في هذه المرحلة الأوّلية في معظمها نفايات غير معالجة (نفايات خام) يمكن أن يكون لها درجة عالية من التلوث السطحي. ويمكن أن يؤدي جمع النفايات أيضاً إلى أخطار إضافية، مثل تكوين جسيمات مشعة عالقة في الهواء (غبار) يمكن أن تنشر التلوث بسهولة إلى المناطق المجاورة.

وأثناء المراحل الأوّلية للحادث، قد يلزم جمع المواد الملوثة بسرعة، وذلك في كثير من الأحيان في ظروف صعبة، وقد يتعيّن نقلها إلى مواقع خزن مؤقت من أجل تقليل مخاطر الإشعاع المباشرة على العمال والجمهور. ولا يُتاح في كثير من الأحيان سوى قليل من الوقت للتخطيط أو فصل المواد بطريقة سليمة حسب نوعها أو خصائصها

وتُشير الخبرة السابقة في ما يتصل بهذه المراحل الأوّلية إلى أن ما يستخدم فيها هو المعدات المتاحة بسهولة، حتى لو لم تكن تلك المعدات مناسبة تماماً للمهمة، ويمكن توقع صعوبات في إزالة التلوث بفعالية من المعدات. ونتيجة لذلك، يمكن أن تصبح المعدات نفسها نفايات مشعة. وقد تشمل هذه المعدات ما يُستخدم منها في البناء، وبراميل النقل والحاويات المتوافرة بسهولة، وعربات الشحن بالسكك الحديدية، وما إلى ذلك.

ويمكن للنُظم القائمة لجمع النفايات أن تكون وسيلة فعالة لجمع وتركيز الملوثات. ويتعيّن أن تؤخذ الجوانب التالية في الاعتبار

(أ) أشكال النفايات المركزة التي يمكن أن تنتج عن حركة المواد الملوثة من خلال عمليات المعالجة العادية؛ ومن ذلك على سبيل المثال، الحمأة الناتجة عن تنقية المياه، وحمأة الصرف الصحي، ورماد الحرق، ورماد المواقد، واللحاء، ومرشحات الهواء، وغيرها.
(ب) فئات و/أو تصنيفات النفايات أثناء عملية الجمع لضمان فصلها بفعالية من أجل التصرف فيها مستقبلاً.
(ج) متانة حاويات الجميع والخزن المؤقت (مثل الأكياس البلاستيكية، والصناديق المعدنية، وغيرها).
(د) النفايات ذات النشاط الإشعاعي الأقوى، التي ستحتاج إلى احتياطات خاصة، مثل التدريع الإضافي، والتعامل عن بُعد، والحاويات التي تكون على مستويات عالية من السلامة، وما إلى ذلك.

وتصف المبادئ التوجيهية لإزالة التلوث التي وضعتها وزارة البيئة اليابانية [61] أمثلة كثيرة لطرق جمع النفايات التي استُخدمت عقب حادث فوكوشيما دايتشي.

7-2- مناولة المواد الكبيرة و/أو السائبة

يمكن أن ينتج عن الحوادث النووية كميات كبيرة من العناصر الكبيرة (مثل المعدات التالفة والمركبات الملوثة ومواد البناء، وغيرها) أو المواد السائبة الملوثة (مثل التربة والنباتات وركام المباني وما إلى ذلك) التي يتعيّن جمعها والتصرف فيها كنفايات. ويمكن في كثير من الأحيان جمع هذه المواد ونقلها باستخدام معدات البناء الثقيلة القياسية، مثل الجرافات والرافعات والشاحنات القلابة والحفارات وما إلى ذلك. وفي حالة المناطق الشديدة التلوث (أي المناطق التي يرتفع فيها معدل الجرعة المحيطة)، قد يلزم إجراء تكييف خاص للسماح باستخدام مقصورة مدرّعة لعامل التشغيل و/أو استخدام التحكم عن بُعد.

وإذا كان النقل في المجال العام مطلوباً لنقل النفايات، وإذا كانت النفايات تتطلب أن تُنقل في عبوة من النوع 'باء'، فإن التصرف في هذه المفردات الكبيرة يصبح أكثر إشكالية. وغالباً ما تكون سعة الحاوية من النوع باء صغيرة عندما تقارن، على سبيل المثال، بعبوات الشحن الصناعية المصممة وفقاً لمواصفات المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس. ويمكن أن يستغرق

تصميم الحاويات ذات السعة الكبيرة من النوع 'باء' وترخيصها وتصنيعها خمس سنوات أو أكثر (انظر القسم 10)

وترد في الأشكال من 14 إلى 17 بعض الأمثلة على المعدات المعدّلة في محطة تشرنوبل للقوى النووية. ومن أجل إجراء مهام متنوعة لجمع النفايات ومعالجتها في البيئات القاسية بعد وقوع حادث، كانت هناك حاجة إلى نُهج جديدة تماماً ومبتكرة باستخدام الوسائل المتاحة. وتتطلب المعدات الأساسية لتحريك التربة ومعالجة المواد تركيب درع وتعديل المركبات الموجودة للإمساك بالتربة وتجريفها وكنسها ونقلها. وتحتوي جميع هذه المعدات على مقصورات تشغيل مغلقة و/أو مدرّعة. ويمكن أيضاً تشغيل بعض المعدات عن بُعد. وعُدِّلت المركبات العسكرية الموجودة في بعض الحالات، في حين صُنِّعت مركبات أخرى حسب الطلب. وانتهى الأمر بمعظم المركبات إلى أن تصبح نفايات مشعة بعد أن استوفت الغرض منها. ويمكن الرجوع إلى وصف للمعدات المستخدمة في سلسلة التقارير التقنية الصادرة عن الوكالة في تسعينات القرن الماضي؛ ومنها على سبيل المثال، المراجع [48، 117–121]

وفي محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، تُستخدم الرافعات والروبوتات لإزالة الركام من المفاعل والمباني الأخرى. ويوضح الشكل-18 الإزالة التدريجية للركام في الوحدة 3 بعد الانفجار في عام 2011 وحتى الانتهاء من إزالة الركام في عام 2014 والظروف اعتباراً من عام 2020. ويُنقل الركام إلى منطقة الخزن في الموقع بواسطة شاحنة قلابة.

ويمثل التخلص من النباتات الملوثة مشكلة صعبة في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، وذلك بسبب حجم التلوث خارج الموقع ومساحته ومستوياته. واستُخدمت معدات كبيرة، وفي بعض الحالات، تُشغّل عن بُعد لإزالة الغطاء النباتي في مناطق ذات معدلات جرعات هواء عالية نسبياً، كما هو مبيّن في الشكل-19.

ومن الموروثات التي نتجت حادث مفاعلي وندسكيل مدخنة المفاعل الذري الملوثة. وتُحاط المدخنة التي يبلغ ارتفاعها 125 م بمرافق موروثة أخرى تحتوي على نفايات مشعة، وبالتالي لا يمكن استخدام طرق الهدم التقليدية. وفي عام 2019، بدأت شركة Sellafield Ltd في هدم المدخنة باستخدام رافعة بارتفاع 152 متراً (الشكل20-) لإنزال كُتل يبلغ وزنها 6 أطنان إلى مستوى الأرض من أجل التخلص منها باعتبارها نفايات ضعيفة الإشعاع جداً [122] .

7-3- التقييم عن بُعد للمواد في الهياكل المتضررة

قد يكون من الصعب على الموظفين الوصول إلى المباني التي لحقت بها أضرار واسعة، وقد تكون شديدة التلوث لدرجة لا يمكن معها دخولها. ووجدت النُظم الروبوتية تطبيقات متزايدة لاستخدامها في تلك الحالات، إذ يمكن استخدامها لاستكشاف المواد الملوثة التي يتعيّن

جمعها وتحديد تلك المواد. ويجري حالياً تطوير هذه النُظم لأداء مهام محددة، وكانت هناك خبرة كبيرة في هذا المجال في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. ويؤدي الروبوت الذي يتم التحكم فيه عن بُعد والموضح في الشكل-21 دوراً مهماً في تقليل تعرض داخل مبنى المفاعل

وفي ما يلي بعض المعدات الموجهة عن بُعد التي يعكف على تطويرها معهد البحوث الدولي لإخراج المحطات النووية من الخدمة، لاستخدامها في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية

- MHIMEISTeR، وهو روبوت يتم التحكم فيه عن بُعد، يُستخدم لأداء أعمال إزالة التلوث ومهام أخذ العينات الخرسانية من قلب المفاعل.
- نوعان من الروبوتات المتحولة التي يمكنها أن تعدّل وضعيتها أو شكلها في الماء أو في المساحات الضيقة المحاطة بعوائق. ولكن أول روبوتين 'قادرين على تغيير الشكل' أصبحا محصورين بعد اختبارهما، ولكن العمل استمر، مما أسفر عن تطوير الروبوت PMORPH. وطوِّرت هذه الأجهزة في البداية لفحص منطقة الطابق السفلي داخل وعاء الاحتواء الأوّلي في الوحدة 1 كمقدمة لإزالة حطام الوقود في نهاية المطاف.

واستمر معهد البحوث الدولي لإخراج المحطات النووية من الخدمة في تطوير ونشر مزيد من الروبوتات الغاطسة لاستخدامها في هياكل الاحتواء داخل الوحدات الأخرى في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية لجمع البيانات التي تتيح النظر في مختلف خيارات الإخراج من الخدمة وسيناريوهاته

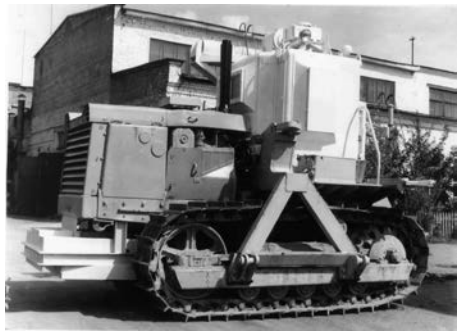
7-4- الاسترجاع من الخزن

قد يلزم جمع المواد الملوثة بسرعة، ويحدث ذلك في كثير من الأحيان في ظروف صعبة، وقد يلزم نقلها إلى مواقع خزن مؤقت خلال المراحل الأوّلية للحادث. ويتطلب ذلك في العادة استرجاع النفايات في نهاية المطاف من موقع الخزن المؤقت الأصلي لمعالجتها والتخلص منها في نهاية المطاف.

الشكل-14- استُخدمت المركبة الهندسية العسكرية المدرّعة من طراز IMR-2 التي تعود إلى الحقبة السوفياتية على نطاق واسع بعد الحادث لإجراء أعمال الاستطلاع الإشعاعي والتفكيك وإزالة الحطام وجمع النفايات وغير ذلك من الأنشطة ذات الصلة بالتنظيف. بإذن من متحف تشرنوبل الوطني الأوكراني.

الشكل-15- ناقلة أفراد مدرعة عسكرية من الحقبة السوفياتية استُخدمت في أعقاب حادث تشرنوبل لنقل العمال المشاركين في أنشطة التنظيف الخطرة وإجراء أعمال الاستطلاع الإشعاعي. بإذن من متحف تشرنوبل الوطني الأوكراني.

a.


b.

الشكل-16- جرارات معدّلة مستخدمة في التصدي لحادث تشرنوبل. (أ) جرار من طراز MTZ-80 استُخدم لتنظيف الشوارع وجمع الغبار والنفايات المشعة. (ب) جرار تشيليابينسك المعدل ذو التدريع الثقيل المستخدم في تنظيف المناطق المجاورة لمفاعل الوحدة رقم 4 المتضررة وفي نقل الإمدادات. بإذن من متحف تشرنوبل الوطني الأوكراني.

الشكل-17- مركبة لتحريك التربة مسيّرة عن بُعد من مقصورة محكمة الغلق استُخدمت في محطة تشرنوبل للقوى النووية. بإذن من الجمعية الأوكرانية للصداقة والعلاقات الثقافية مع الدول الأجنبية.

الشكل-18- إزالة الركام وتثبيته باستخدام الرافعات في الوحدة رقم 3 في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية: بعد الحادث – 2011 (أعلى الصورة إلى اليسار)؛ قيد التطويرأثناء إزالة الركام - 2015 (أعلى الصورة إلى اليمين)؛ الحالة المستقرة الراهنة - 2020 (إلى الأسفل). الصورتان العلويتان بإذن من شركة طوكيو القابضة للطاقة الكهربائية.

الشكل-19- آلات بناء غير مأهولة يتم التحكم فيها عن بُعد لإزالة النباتات في المناطق خارج الموقع في منطقة فوكوشيما. بإذن من شركة كاجيما.

الشكل-20- تركيب رافعة بطول 152 م في سيلافيلد لهدم مدخنة Windscale Pile 1. بإذن من الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة.

الشكل-21- روبوت التحكم عن بُعد (ASTACO-SoRa) يُستخدم لإزالة الركام والحطام في مباني المفاعل، مما يُقلل بشكل كبير من الجرعة التي يتلقاها العمال. بإذن من شركة طوكيو القابضة للطاقة الكهربائية.

الشكل-22- منشأة استرداد النفايات المشعة الصلبة في المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة، تشرنوبل. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

الشكل-23- رواق مخصص لنقل حاويات النفايات يُسيّر عن بُعد ويربط منشأة استرداد النفايات المشعة الصلبة في تشرنوبل بالمجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

وبالنظر إلى أن النفايات ربما لا تُعبأ قبل خزنها الأوّلي بعد وقوع الحادث، فإنها قد تكون في حالة متدهورة عندما يحين وقت استرجاعها. ومن ذلك على سبيل المثال أن المواد العضوية ستكون عرضة للتحلل، وذلك في بعض الأحيان في غضون فترات زمنية قصيرة جداً. ولذلك من المستصوب، عندما يكون ذلك ممكناً، تعبئة النفايات لتيسير استرجاعها لاحقاً في شُكل يُقلل إلى أدنى حد من احتمالات تدهور العبوات أو النفايات. ويمكن استخدام الحاويات المقاومة للتآكل التي لها نقاط معالجة طويلة الأمد وقوية أو مصممة بحيث يمكن التعامل معها بسهولة باستخدام آلات المناولة القياسية. وحيثما يكون تحلل النفايات ممكناً، يتعيّن بذل أفضل الجهود لتقليل هذا التدهور، ربما عن طريق التكييف، إذا كان طريق التخلص مفهوماً جيداً. وقد يلزم بدلاً من ذلك، عندما يتعذر إجراء التكييف، استخدام تقنيات الاستصلاح لاحقاً

وفي محطة تشرنوبل للقوى النووية، شُيدت منشأة لاسترداد النفايات المشعة الصلبة المبيّنة في الشكل-22 في المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة لاستعادة النفايات من المرفق القائم لخزن النفايات المشعة الصلبة. وتطلب التعامل مع حجم النفايات الصلبة وتركيزها تجهيز منشأة استرداد النفايات المشعة الصلبة بمعدات لفتح النفايات ومناولتها عن بُعد في المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة، ونقلها لاحقاً عبر رواق نقل مخصص لهذا الغرض (الشكل-23) إلى محطة معالجة النفايات المشعة الصلبة للمعالجة والتحضير للتخلص منها

وتتضمن المنشورات السابقة، مثل المراجع [123، 124]. إرشادات بشأن استرجاع النفايات لإخضاعها لمزيد من المعالجة. ومع ذلك، يقل حجم هذه الخبرة في العادة بكثير عن المطلوب في حالة وقوع حادث نووي كبير

8- معالجة النفايات

الدروس الرئيسية المستفادة:

- معايير قبول النفايات في مرافق المعالجة أو التخلص منها قد لا تكون معروفة على وجه اليقين عند الشروع في المعالجة.
- قد تكون هناك حاجة إلى مزيد من البحث والتطوير لتأهيل طرق المعالجة والتكييف المناسبة لأنواع محددة من النفايات أو النفايات التي تنطوي على مشاكل والتي تنشأ نتيجة لحادث نووي.

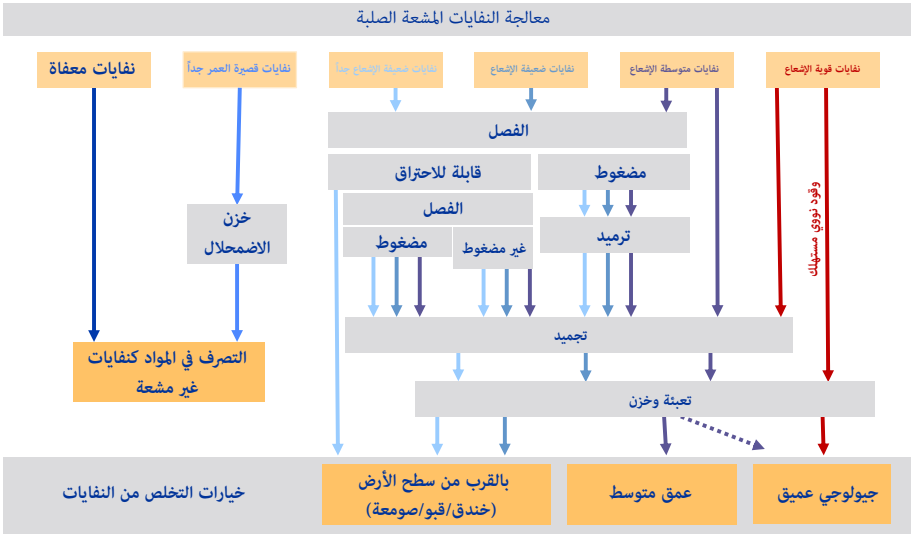
- يتطلب تشييد مرافق جديدة وتشغيلها في المناطق الملوثة إلى مراعاة أثر مستويات الإشعاع المحيط.
- قد يلزم توفير حماية إضافية و/أو معالجة عن بُعد لبعض تيارات النفايات بسبب مستويات النشاط الإشعاعي.
- قد تحتاج المعالجة أيضاً إلى مراعاة الجوانب غير الإشعاعية، مثل الخصائص الكيميائية والبيولوجية والمعادن الثقيلة وغيرها من المواد السامة المحتملة التي قد تكون موجودة في النفايات بمستويات أعلى من المعتاد.
- سيلزم وضع معايير الوقاية من الإشعاعات عند أي معالجة تتم في مناطق غير خاضعة للرقابة (على سبيل المثال، في العراء).

وفي سياق هذا المنشور، تشمل 'المعالجة' المعالجة التمهيدية للنفايات (فرزها وفصلها) ومعالجتها وتكييفها وتعبئتها. وتُناقش هذه الأنشطة بالتسلسل في الأقسام التالية من هذا القسم. ويصور الشكلان 24 و25 المخططات الشاملة لمعالجة النفايات الصلبة والنفايات السائلة. والهدف من معالجة النفايات السائلة هو إما تحويلها إلى صورة صلبة للتخلص منها أو التجهيز لتصريفها

وفي حالات ما بعد الحوادث، تحتاج المعالجة إلى مراعاة الأُطر الزمنية القصيرة والكميات الكبيرة، وتيارات النفايات المعقدة والمفتقرة إلى تحديد جيد لخصائصها و/أو المتنوعة. ويمكن النظر في استخدام المرافق الثابتة أو المتنقلة. ويرد مزيد من وصف النُظم المتنقلة في المرجع [62]. ويمكن أيضاً النظر في تكييف المرافق غير المشعة لاستخدامها في معالجة النفايات المشعة.

8-1- المعالجة التمهيدية

تشمل المعالجة التمهيدية أنشطة مثل تحديد الخصائص والفرز والفصل وإزالة التلوث. ويُناقش تحديد الخصائص بالتفصيل في القسم 6.



الشكل-24- عرض تخطيطي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة. بتصرف من المرجع [125].

8-1-1- الفرز والفصل

من أجل تيسير التصرف في النفايات بكفاءة، يتعيّن فرزها وفصلها وفقاً لمعايير محددة مسبقاً. وسوف تعتمد هذه المعايير على الخطط والطرق المتاحة للتصرف في النفايات [126]. ويمكن أن تكون المعايير بسيطة نسبياً، ومنها على سبيل المثال:

- الفصل حسب المواد إلى مواد قابلة للاحتراق أو مواد غير قابلة للاحتراق (مثل المعادن).
- الفرز حسب معدل الجرعة.

ومع المضي قدماً في عملية التخطيط للتعافي من الحادث والتصرف في النفايات، يمكن إجراء فرز وفصل إضافيين

(أ) مستوى النشاط الإشعاعي. مستويات النشاط الإشعاعي للنويدات الباعثة لجسيمات بيتا وغاما، والنويدات المشعة الباعثة لجسيمات ألفا. ويُعد الفصل حسب مستويات النشاط الإشعاعي (مثل معدل الجرعة) أولوية أولى لحماية العمال والجمهور من النفايات الأوّلية. ويُعد وضع خريطة للتلوث (داخل الموقع أو خارجه) مهماً لفصل النفايات الناتجة عن

عمليات الاسترداد والنفايات الناتجة عن عمليات الترميم والنفايات الناتجة عن عمليات التنظيف.

(ب) المنشأ (استناداً إلى عملية رسم خرائط أماكن توليد النفايات؛ والمناطق المفصولة). ويمكن أن يساعد تصنيف النفايات تبعاً لوحدة المفاعل أو نقطة المنشأ في تحديد الخصائص الإشعاعية لاحقاً.

(ج) أنواع النفايات. تصنيف النفايات تبعاً لمجموعات تُمثل مجموعة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية ذات الصلة لتخطيط معالجة النفايات واختيار نوع حاوية النفايات أو لمزيد من الدراسة لطرق التكييف التي ستُنفذ في الخطوات المستقبلية.

(د) حجم النفايات المتولدة. يُسجل حجم النفايات الأوّلية المتولدة أثناء خزنها؛ ومع ذلك، من المهم تقدير حجم النفايات المتولدة الناتجة عن عمليات الاسترداد والنفايات الناتجة عن الترميم والنفايات الناتجة عن التنظيف لتخطيط مرافق معالجة النفايات وخزنها والتخلص منها الارتجالية أو المحددة الغرض.

وكان العمل الرئيسي في فصل النفايات وفرزها بعد حادث تشرنوبل هو تركيزات النشاط الإشعاعي، أو معدلات الجرعات، ولكن النوع المادي للنفايات كان أيضاً عاملاً بارزاً. وعلى سبيل المثال، صُممت مواقع التخلص من النفايات المشعة لاستقبال النفايات المشعة الصلبة الناتجة عن تصفية الحادث ولم يُحتفظ بها في هيكل الساتر أو خزنها في موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة والمرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية (توقف كلاهما على العمل بعد تدابير التصفية)، وموقع بورياكوفكا للتصرف في النفايات المشعة، وهو مرفق للتخلص من النفايات يتخذ شكل خندق وما زال قيد التشغيل للتخلص من النفايات السائبة الضعيفة الإشعاع.

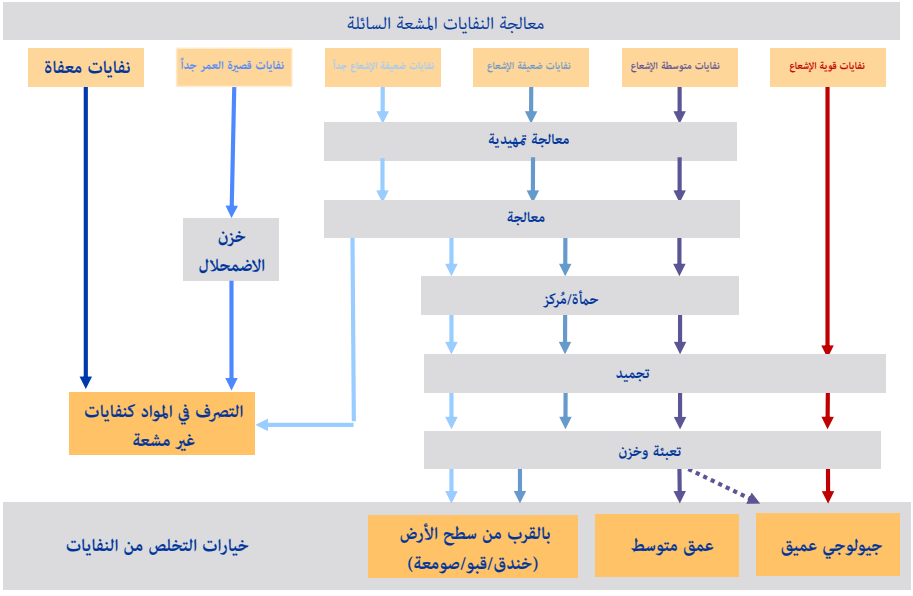
وصُمم موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة التي تصل جرعات أشعة غاما فيها إلى 50 رونتغن/ساعة (~500 مليسيفرت/ساعة) في الوحدة 'ألف-1' و250 رونتغن/ساعة (2,5 سيفرت/ساعة) في الوحدة 'باء'. ونتجت غالبية النفايات عن المنطقة الصناعية في محطة تشرنوبل للقوى النووية (Promploshadka) نتيجة لأنشطة التنظيف في الوحدة 4 المدمّرة وكذلك الوحدة 3 المتضررة. وصُممت المرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية للتخلص من النفايات المشعة الناتجة عن تنظيف الوحدتين 3 و4 التي كانت جرعات أشعة غاما تقل فيهما عن 50 رونتغن/ساعة (~500 مليسيفرت/ساعة).

وأنشئت تسعة أماكن للخزن المؤقت للنفايات المشعة في منطقة يبلغ نصف قطرها 10 كم حول محطة تشرنوبل للقوى النووية. وتحتوي هذه المنطقة على 000 1 خندق وتلال ترابية دُفنت فيها النباتات الملوثة والتربة السطحية وحطام البناء الناتج عن إزالة التلوث من الغبار

المتساقط في القرى المتضررة وأراضي المنطقة المحظورة. وأُغلقت جميع هذه المواقع بعد حملة التصفية (التنظيف) التي أُجريت خلال الفترة بين عامي 1986 و1988.

ويشمل الركام في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية الخرسانة والمعادن والبلاستيك. وجُمع الرُكام بعد انفجار الهيدروجين في الوحدات 1 و3 و4، وتم انتشاله من مباني المفاعل. وأُجريت عملية فرز للركام تبعاً لمعدل الجرعة (كما هو مبيّن في الشكل-26) وتم خزنه. وغُطيت أجزاء من الركام بالتراب لتقليل معدل الجرعة. وقُطعت الأشجار إلى جذوع وأغصان محتوية على أوراق، وجذور. وقُطعت أجزاء من نفايات الأشجار وغُطيت بالتربة لمنع اندلاع الحرائق ولتقليل معدل الجرعة. وتُخزّن حالياً النفايات المشعة الثانوية الناتجة عن معالجة المياه الملوثة ووقود التبريد، بينما يجري تصريف المياه الملوثة قليلاً من المصارف الفرعية الموجودة حول المفاعلات إلى البحر. وتُخزّن جميع النفايات الناتجة في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية داخل الموقع.

لم يحدث أساساً انطلاق لمواد مشعة خارجية في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية أثناء الحادث وبعده. ولذلك فإن جمع حطام البناء والتربة والنباتات الملوثة، وما إلى ذلك، لم يكن مشكلة عاجلة. وشمل التصرف في النفايات الصلبة في المقام الأول مناولة معدات ووسائط إزالة التلوث، ومبادلات أيونات معالجة المياه والممتزات، والحطام ومواد الوقود داخل مباني المحطة. ومع ذلك، كانت هناك حاجة إلى مرافق خزن النفايات في الموقع لدعم التعبئة اللاحقة



الشكل-25- عرض تخطيطي للتصرف في النفايات المشعة السائلة. بتصرف من المرجع [125].

ونقل النفايات للتخلص منها خارج الموقع [1]. وبعد وقوع الحادث مباشرة، استخدمت مظلة معدنية كانت تُستخدم سابقاً لأغراض الطلاء أثناء بناء المحطة لجمع النفايات الصلبة وخزنها مؤقتاً [1]. وفي عام 1980، حُددت في بيان الأثر البيئي البرنامجي [30]، المتعلق بإزالة التلوث والتخلص من النفايات المشعة الناتجة عن حادث ثري مايل آيلند، الحاجة إلى مرافق جديدة للتجميع والخزن في الموقع

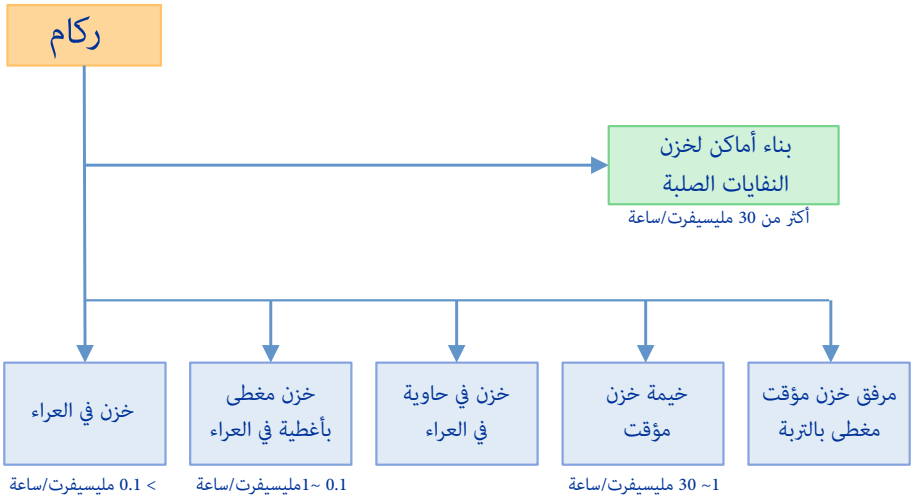
8-1-1-1- وحدة فرز التربة

في حالة وقوع حادث نووي، قد يلزم إزالة كميات كبيرة من التربة الملوثة والتخلص منها. وتتمثل الخطوة الأولى في تحديد خصائص النشاط الإشعاعي للتربة وإزالة التربة التي يزيد نشاطها الإشعاعي عن عتبة ثابتة. وتجمع وحدات فرز التربة عموماً بين وظيفة تحديد الخصائص (إجراء العد في العادة باستخدام ومَّضات كبيرة مصنوعة من البلاستيك) ووظيفة الفرز.

وعقب حادث فوكوشيما دايتشي، طوّرت وحدة فرز تربة عالية الخرج، مع إدراك ضرورة معالجة ملايين الأطنان من التربة [127]. وكشف التقييم الأول لتلوث التربة حول محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية والتعقيبات المستمدة من تجربة محطة تشرنوبل للقوى النووية أن التلوث يبقى على عمق يتراوح بين 5 و10 سنتيمترات، وأن التلوث يتركز على 'بقع مبرقشة' موضوعية. وتبيّن أن أكثر من نصف التربة المشتبه فيها غير ملوثة. وكانت التربة قابلة للمناولة باستخدام وحدة فرز التربة الآلية، مع مستوى كبير من الخرج يصل إلى 150 طناً في الساعة (الخرج الاسمي 100 طن في الساعة). وكانت الوحدة مجهزة بومضات بلاستيكية كبيرة الحجم. وبلغ حد الكشف 20 بكريل/كغ تقريباً للسيزيوم-137 (تبعاً للخلفية). وتراوحت دقة الفرز بين 30 كغ و40 كغ. وتعبأ هذه الوحدة المتنقلة داخل حاويتين بسعة 12 م بحسب مواصفات المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس من أجل السماح بالحركة السهلة من مكان المعالجة إلى أي مكان آخر. ويعرض الشكل-27 مبدأ وحدة فرز التربة.

8-1-2- إزالة التلوث

يمكن لإزالة التلوث (مثل مسح السطح أو كحته أو كشطه لإزالة المواد الملوثة) من بعض النفايات المحتملة (مثل المباني والمعدات) أن يُقلل بفعالية من حجم النفايات التي يتعيّن التصرف فيها، ويمكن أن يؤخذ ذلك في الاعتبار عند الاقتضاء. ومع ذلك، يتعيّن موازنة ذلك من خلال اعتبارات الفعالية، وتوليد نفايات ثانوية، وتوليد جسيمات عالقة في الهواء، وجرعة العامل أثناء عملية إزالة التلوث



الشكل-26- تجميع نفايات الركام في فوكوشيما دايتشي تبعاً لمعدل الجرعة السطحية ومتطلبات الخزن المؤقت.

ويمكن أيضاً إزالة التلوث لتمكين الموظفين من الدخول إلى المناطق التي يكون الوصول إليها غير مأمون، بسبب ارتفاع مستويات الإشعاع أو التلوث بالمواد السائبة أو مخاطر التلوث الأخرى. ويمكن تطبيق تقنيات إزالة التلوث المعيارية على المعدات والمباني الأصغر حجماً. ويمكن أيضاً تطبيق تقنيات أخرى، مثل التقنيات التي طوِّرت لمشاريع الإخراج من الخدمة على نطاق واسع

وبُذلت جهود دؤوبة لإزالة التلوث بعد حادث تشرنوبل، حيث كان الهدف الرئيسي لحملة التنظيف هو تهيئة الظروف لتيسير استمرار تشغيل الوحدات الثلاث المتبقية غير المتضررة في محطة القوى. وتركزت جهود إزالة التلوث في الموقع وفي المنطقة المجاورة أيضاً. وكانت نتيجة أعمال إزالة التلوث تقليل جرعات التلوث والإشعاع بأكثر من عشرة أضعاف. ويمكن الرجوع إلى تفاصيل عن الطرق والتكنولوجيا المستخدمة في إزالة التلوث في سلسلة لسلسلة التقارير التقنية التي نشرتها الوكالة في تسعينات القرن الماضي (على سبيل المثال، المرجع [48، 117–121]).

وتعتمد أنشطة إزالة التلوث أساساً على التقنيات القابلة للنشر الميداني والمتنقلة لأغراض التنظيف في تطبيقات بعينها. وأظهرت تجربة محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية أن مكانس شفط السوائل، وماكينات التنظيف بضغط الماء العالي، والكشط الميكانيكي للأسطح والتقنيات الموجهة عن بُعد، كانت جميعها ناجحة في إزالة التلوث من مناطق محددة. وبناءً على هذه التجربة، أُعدت مصفوفة لوصف فعالية التقنيات المستخدمة في مختلف تطبيقات إزالة التلوث (الجدول 3) [1].

الشكل-27- وحدة فرز التربة الملوثة المستخدمة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية. بإذن من شركة GRS VALTECH.

8-2- المعالجة

يعتمد اختيارعملية المعالجة على خصائص النفايات. وفي بعض الحالات، لا يمكن أن تكون المعالجة أحد الخيارات، كما كان الحال مع تدابير تصفية النفايات الصلبة في حادث تشرنوبل. وفي ما يتعلق بالنفايات الصلبة السائلة والرطبة (مثل الحمأة)، يوصى بإجراء عملية تصليد لتقليل احتمالات نزوح النويدات المشعة أو تشتتها. وعلى سبيل المثال، في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، بُحثت عدة وسائل للتجفيف من أجل تقليل المحتوى المائي في الحمأة (النفايات الثانوية الناتجة عن معالجة المياه الملوثة)، لزيادة قدرة مصفوفة التصليد. ويمكن النظر في إمكانية استخدام النفايات الصلبة البلدية وغيرها من المرافق والبنية الأساسية القائمة بعد تكييف المرافق بشكل مناسب

8-2-1- المواد الصلبة

هناك العديد من التقنيات المعيارية لمعالجة النفايات المشعة الصلبة، مثل الترميد، وضغط التربة، وإزالة التلوث، والتفتيت، وما إلى ذلك. ووصفت هذه التقنيات بالتفصيل في

منشورات أخرى، مثل المراجع [128–138]، وهي المدرجة في الجدول-4- واستناداً إلى نتائج تحديد الخصائص ونتائج الاختبار الأساسية المتعلقة بتقنيات المعالجة، يمكن تضييق نطاق التقنيات المرشحة ويمكن تحديد المسائل التي يتعيّن تناولها. وأثناء التركيز على المجموعة المختارة الضيقة من تقنيات المعالجة، يمكن أيضاً تحديد العناصر التقنية اللازمة لدراسة الخطوات التالية.

8-2-1-1- معالجة النفايات الصلبة في محطة تشرنوبل للقوى النووية

يُشار إلى مرافق معالجة النفايات الصلبة في موقع تشرنوبل للقوى النووية ومُجمع فيكتور القريب لدعم إخراج الوحدات من 1 إلى 3 من الخدمة، فضلاً عن وضع الوحدة 4 في حالة مأمونة، باسم المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة، وهو مجمع مجهز بقدرات لتحديد خصائص النفايات المسترجعة من الخزن في الموقع، ويحتوي على خلايا ساخنة للفصل ومرافق للترميد، والضغط الفائق للتربة، والتثبيت، والتعبئة

8-2-1-2- معالجة النفايات الصلبة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، لم تُستخدم البنية الأساسية القائمة للتصرف في النفايات (المحرقة وآلة ضغط التربة، وما إلى ذلك). وهذه المرافق صغيرة الحجم وأُعيد توظيفها من قبل لاستخدامها في أغراض أخرى. ومنذ وقوع الحادث، تم تركيب المرفقين الجديدين للترميد داخل الموقع. وبالإضافة إلى ذلك، تولّد مرافق الترميد خارج الموقع كميات كبيرة من رماد المحرقة. ويتطلب النهج المحافظ في سياسة التصرف في النفايات في اليابان متابعة مزيد من خفض حجم الرماد، كما هو موضح أدناه.

ويظهر في الشكل-28 مخطط انسيابي يوضح معالجة التربة والنفايات الملوثة بعد حادث فوكوشيما دايتشي. وعقب الحادث، احتوت البقايا الناتجة عن حرق النباتات الملوثة (مثل الأوراق المتساقطة والتربة الملتصقة بها) التي جُمعت في شرق اليابان على السيزيوم المشع. وحُرقت النفايات عند درجة حرارة تزيد على 800 درجة مئوية، مع تطاير أو تبخير أغلبية السيزيوم ونقله مع غازات المدخنة واحتجازه في مرشحات أسطوانية.

الجدول-3- تقييم فعالية تقنيات إزالة التلوث في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية [1]

الحالة	كميات كبيرة من الحطام السائب غير المحدود	إزالة الحطام السطحي الشديد الالتصاق	الطلاءات الملوثة على الخرسانة	الخرسانة الملوثة غير المطلية	الطلاءات الملوثة على الفولاذ	الفولاذ الملوث غير المطلي	الفولاذ المقاوم للصدأ الملوث
الشطف بالضغط المنخفض	أ، ب	ز	ن	ن	ز	ز	ز
الشطف بالضغط العالي	ب، ز	ز	ن	ن	ز	ز	ز
الشطف المتعدد المستويات	ز						
إعادة الغمر							
التعبئة والترشيح							
الأدوات البسيطة	م، ن	ج				ن	ز
الشفط الجاف/الشفط الرطب	ج، ح						
التنقية الميكانيكية		ج	ن	ن	ج	ج	ج
التقشير المائي			ج	ج	ج	ج	
الخدش المائي			ج	ج	ج	ج	
التقشير			ز	ن			
الخدش			ن	ن			
الشفط بالبخار		ج		ج	ج	ز	ن
التجليخ الجاف							
التجليخ السائل							
فوهة الخرطوم المرن							
الطلاءات القابلة للتقشير		ج	ج	ن	ز	ز	
الطلاءات الذاتية التقشير		ج	ج	ن	ز	ز	
الرغاوي الكيميائية						ن	ن
الكواشف/المنظفات		ج			ج	ج	ج

الجدول-3- تقييم فعالية تقنيات إزالة التلوث في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية [1] (تابع)

الحالة	تقليل مصدر المساحة العامة (الغرف/المقصورات)	الأسطح الرأسية الملوثة خارجياً	التلوث الداخلي، الأسطح العامودية	تلوث الجدران الخرسانية المجوّفة/المسامية	المساحات الكبيرة، تلوث مشبّع/داخلي	المعدات الملوثة	تلوث الأنابيب الداخلية
الكواشف/المنظفات	ج	ج				ج	
الرغاوي الكيميائية		ن				ن	
الطلاءات الذاتية التقشير	ن	ج				ن	
الطلاءات القابلة للتقشير	ن	ج				ج	
فوهة الخرطوم المرن							ن
التجليخ السائل							
التجليخ الجاف						ن	
الشفط بالبخار	ن	ن				ن	
الخدش							
التقشير							
الخدش المائي		ن	ن				
التقشير المائي		ن	ن				
التنقية الميكانيكية							
الشفط الجاف/الشفط الرطب	ج					ج	
الأدوات البسيطة	ج	ج				ج	
التعبئة والترشيح			ن	ن			
إعادة الغمر			ن	ن	ن		
الشطف المتعدد المستويات	ن	ج					
الشطف بالضغط العالي	ج	ج				ج	
الشطف بالضغط المنخفض	ج	ن				ج	

الجدول-3- تقييم فعالية تقنيات إزالة التلوث في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية [1] (تابع)

الحالة		
تلوث الأنابيب الخارجية، وحوامل الكابلات، وعُلب توزيع الوصلات، وما إلى ذلك	ج	ر
الشطف بالضغط المنخفض		
الشطف بالضغط العالي		
الشطف المتعدد المستويات		
إعادة الغمر		
التعبئة والترشيح		
الأدوات البسيطة	ج	
الشطف الجاف/الشطف الرطب	ج	
التنقية الميكانيكية		
التقشير المائي		
الخدش المائي		
التقشير		
الخدش		
الشفط بالبخار		ر
التجليخ الجاف		
التجليخ السائل		
فوهة الخرطوم المرن		
الطلاءات القابلة للتقشير		
الطلاءات الذاتية التقشير		
الرغاوي الكيميائية		ر
الكواشف/المنظفات		

أ ز: ممتاز.

ب م: متوسط.

ج ج: جيد.

ملاحظة: الخانات الفارغة تعني أنها غير منطبقة.

الجدول-4- ملخص تقنيات معالجة النفايات المشعة الصلبة [128-138]

نوع النفايات	التكنولوجيات المنطبقة				
	الترميد	ضغط التربة	إزالة التلوث	التفتيت	الطمر
	ن: التكنولوجيا ناضجة ومطبقة على نطاق واسع؛ ق: التكنولوجيا قيد التطوير أو محدودة الاستخدام؛ خانة فارغة: التكنولوجيا غير منطبقة على هذا التيار من النفايات				
مواد قابلة للاحتراق	ن	ن			
مواد غير قابلة للاشتعال		ن			
الركام السائب			ن		
مواد صلبة معدنية		ن	ن	ن	
التربة السائبة			ق		
رماد المحارق		ن			
الغطاء النباتي	ن	ن		ن	ن

وتوجد خارج موقع محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، قدرة كافية لخزن التربة في مدافن النفايات. ومع ذلك، في ما يتعلق بالرماد القوي الإشعاع نسبياً، ستُستنفد سعة مرافق الخزن قريباً، ولذلك استُحدثت تكنولوجيات لتقليص الحجم أو لإزالة التلوث. وهناك طريقة بسيطة، وهي غسل الرماد، وهي طريقة فعالة في حرق الرماد المتطاير من النفايات الصلبة البلدية، لأن السيزيوم المشع موجود في شكل قابل للذوبان في الماء. وتتوافر أيضاً عمليات حرارية أخرى لإزالة السيزيوم المشع بكفاءة تصل إلى 99,9 في المائة، من مواد مثل التربة والرماد وغير ذلك من الحطام. ويمكن أن يكون نظام صهر الرماد فعالاً أيضاً.

8-2-1-3- معالجة النفايات الصلبة في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية

صُنف نحو 75 في المائة من النفايات الناتجة عن الحادث في ثري مايل آيلند على أنها نفايات جافة منشطة [1]، مما أدى إلى حوالي 3800 متر مكعب من النفايات الجافة المنشطة.

وقُسمت هذه الفئة إلى نفايات مضغوطة (~ 36 في المائة)، ونفايات غير مضغوطة (~60 في المائة)، ونفايات جافة منشطة مستقرة (~3 في المائة). وتتألف فئة النفايات الجافة المنشطة المستقرة المحتوية على تركيزات نظائرية (بسبب ارتفاع محتواها من السترنشيوم-90 ومحتوى ما وراء اليورانيوم) مما حال دون التخلص منها في مرفق التخلص التجاري من الفئة 'ألف'. ولذلك كان لا بد من وضع هذه النفايات في حاويات على مستويات عالية من السلامة (انظر القسم 8-3 لمزيد من التفاصيل) لتيسير التخلص منها في نُظم التخلص من النفايات من الفئة 'باء' أو 'جيم'.

8-2-2- السوائل

لا يُعتبر خزن السوائل الملوثة لفترات زمنية طويلة ممارسة جيدة بشكل عام بسبب طبيعتها الشديدة الحركة، وبالتالي يُستخدم شكل من أشكال المعالجة لإزالة السائل أو تركيزه وتصليده في نهاية المطاف. ويرد وصف للتقنيات الأساسية المستخدمة في معالجة النفايات السائلة المشعة في مجموعة من المنشورات الأخرى، مثل المراجع [49، 140–149]، وترد قائمة بها في الجدول-5- وتشمل تقنيات المعالجة الترشيح والتبادل الأيوني (بما في ذلك طرق الكاتيونات- الأنيونات العامة، ووسائط التبادل الأيوني المحددة)، والتبخير، والترسيب الكيميائي، وتقنيات الأغشية.

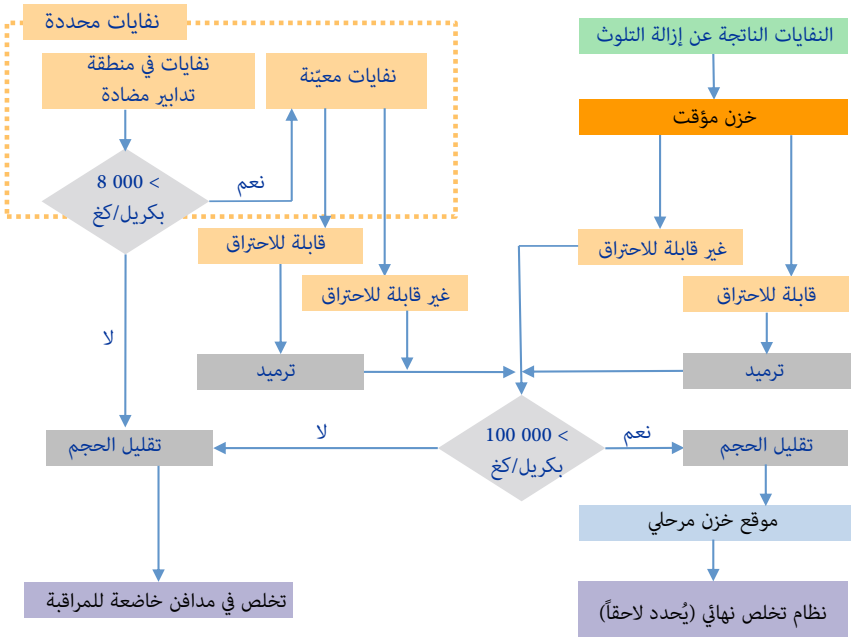
واستُخدمت الخبرة المكتسبة في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية بصورة مباشرة في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية كأساس للعديد من النُظم التي استُخدمت في معالجة السوائل. وعلى سبيل المثال، يُستخدم في نظام KURION لإزالة السيزيوم مادة الزيوليت كمادة ممتزة؛ واستُخدم الزيوليت بفعالية في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية لمعالجة المياه الملوثة [150]. ويمكن أيضاً معالجة السوائل العضوية عن طريق الحرق وباستخدام طرق الأكسدة الأخرى. وغالباً ما تُعالج الكميات الصغيرة من السوائل عن طريق التجميد المباشر.

8-2-2-1- معالجة النفايات السائلة في محطة تشرنوبل للقوى النووية

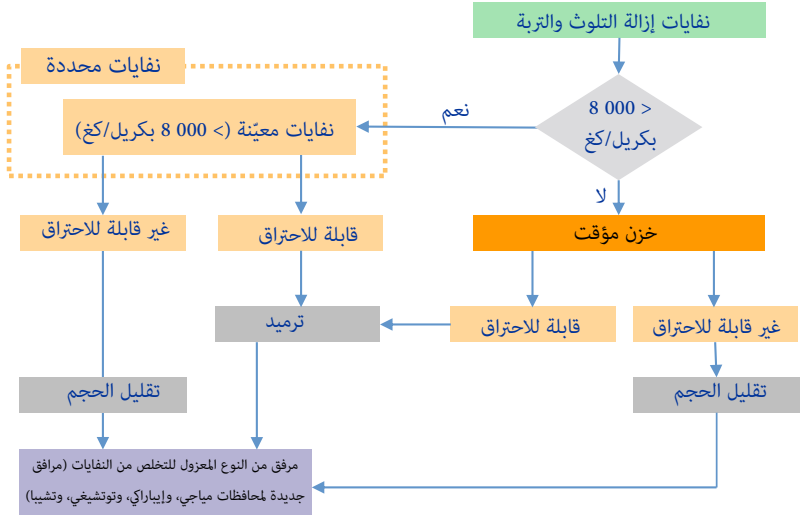
يوجد الجزء الأكبر من النفايات المشعة السائلة غير المعالجة (لا تشمل المياه الملوثة إشعاعياً المزمع معالجتها أو النفايات المشعة العضوية السائلة) في محطة تشرنوبل للقوى النووية في مرفقي الخزن التاليين:

(أ) مرفق خزن النفايات المشعة السائلة.
(ب) مرفق خزن النفايات المشعة السائلة والصلبة.

تدفق النفايات داخل محافظة فوكوشيما



تدفق النفايات خارج محافظة فوكوشيما



الشكل-28- مخطط انسيابي لمعالجة التربة والنفايات الملوثة داخل محافظة فوكوشيما وخارجها [139].

الجدول-5- ملخص تكنولوجيات معالجة النفايات المشعة السائلة [49، ومن 140 إلى 149]

نوع النفايات	التكنولوجيات المنطبقة				
	الترميد	الترشيح/الترشيح الفائق/ الانتشار الأسموزي العكسي	التبادل الأيوني [أ]	التبخير	الترسيب الكيميائي
مائية ضعيفة الإشعاع	ن		ن	ن	ن
عضوية ضعيفة الإشعاع	ن				
مائية قوية الإشعاع		ن/ق	ن/ق		ن/ق

ن: التكنولوجيا ناضجة ومطبقة على نطاق واسع؛ ق: التكنولوجيا قيد التطوير أو محدودة الاستخدام؛ خانة فارغة: التكنولوجيا غير منطبقة على هذا التيار من النفايات

[أ] قائمة الوسائط المستخدمة في نظام معالجة المياه في فوكوشيما دايتشي:

وعاء امتزاز السيزيوم (KURION) (1,7 × 1017 بكريل/وعاء (السيزيوم-137)).

- الزيوليت (SMZ، H، AGH، EH، KH).
- وعاء امتزاز السيزيوم الثاني (SARRY) (9 × 1016 بكريل/وعاء (السيزيوم-137)).
- الزيوليت (IE-96، IE-911).
- جهاز إزالة التلوث (8 × 1014 بكريل (السيزيوم-137)).
- الحمأة.
- النظام المتقدم لمعالجة السوائل.
- الكربون المنشط، والتيتانات، ومواد سيانور الحديدوز، والكربون النشط المشبّع بالفضة، وأكسيد التيتانيوم، وراتنج مخلبي، وممتز راتنجي.

وكان الهدف من هذه المرافق في الأصل توفير سعة تخزينية للنفايات السائلة التشغيلية بعد معالجتها (أي تقليل حجمها) عن طريق التبخير، كجزء من عمليات المحطة. وصُممت المخازن خصيصاً لثلاثة تيارات من النفايات

(1) مركز مُركّز قاع جهاز التبخير.
(2) راتنجات التبادل الأيوني.
(3) بيرلايت (الترشيح).

ويوجد حالياً ما يقرب من 000 20 م^3 من النفايات السائلة في صهاريج الخزن، منها نحو 500 13 م^3 عبارة عن مركزات قاع جهاز التبخير. وأنشئت محطة معالجة النفايات المشعة السائلة في عام 2006 لمعالجة هذه النفايات. وفي عام 2014، أُجري اختبار نشط للمحطة وجرى إنتاج 63 عبوة محتوية على نفايات مشعة سائلة مجمدة وأُرسلت إلى مُجمع فيكتور للتخلص منها

في عام 2018. وأصبح مشروع محطة معالجة النفايات المشعة السائلة يعمل بكامل طاقته في منتصف عام 2019، وسيقوم أيضاً بمعالجة المياه الملوثة إشعاعياً المستردة من هيكل الساتر. وتحتوي هذه المياه على قدر كبير من نويدات ما بعد اليورانيوم المشعة، بالإضافة إلى مواد عضوية ومواد أخرى تُستخدم في إخماد الغبار.

8-2-2-2- معالجة النفايات السائلة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

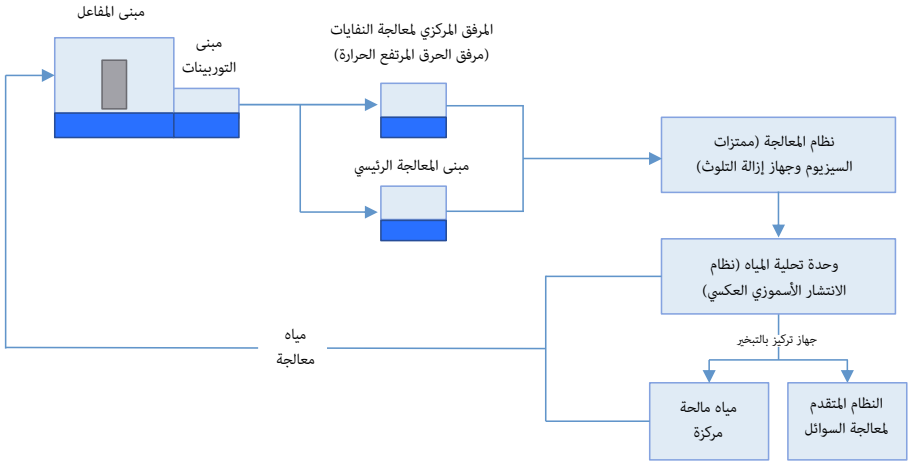
تشمل التحديات المحددة في التعامل مع السوائل المرتبطة بالحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية الكميات الكبيرة من السوائل، والتركيب الكيميائي المعقد أو المتنوع، وعدم القدرة على تصريف المياه 'النظيفة' المعالجة إشعاعياً (أو الإحجام) عن القيام بذلك. ويتطلب تعقد النفايات السائلة وتنوعها عملية من خطوات متعددة، باستخدام تكنولوجيات مختلفة مجتمعة، كما هو مبيّن في الشكل-29.

وتُملأ الممتزات بالزيوليت لإزالة السيزيوم باستخدام نظام KURION (انظر الجدول 5، الحاشية أ) وتشمل ممتزات السيزيوم الأوّلية المستخدمة في النظام ما يلي

(أ) الزيوليت المعدل بعوامل نشطة على السطح.
(ب) الهيرشيلايت.
(ج) الهيرشيلايت المعدل المشبع بالفضة.

وبالإضافة إلى ذلك، يستخدم شابازيت الزيوليت (IE[96])، وتيتانات السليكو البلورية (IE[911]) في ممتز السيزيوم الثاني. وبعد الاستخدام، تُخزّن ممتزات السيزيوم في الموقع. وطوِّرت نسخة متنقلة من معدات معالجة المياه لمعالجة المياه الشديدة التلوث (الشكل-30)

وبعد إزالة السيزيوم، تخضع المياه لمزيد من المعالجة. واستُخدم النظام المتقدم لمعالجة السوائل (انظر الشكل-29) لتحسين قدرات معالجة المياه الملوثة. وكان من الصعب على مرافق المعالجة القائمة إزالة المواد المشعة بخلاف السيزيوم، ولكن النظام المتقدم لمعالجة السوائل يمكنه إزالة معظم المواد المشعة، باستثناء التريتيوم. وبعد المعالجة بواسطة النظام المتقدم لمعالجة السوائل، تُخزن المياه في الصهاريج. وبحلول نهاية عام 2019، خُزّن أكثر من مليون م^3 من المياه المعالجة المحتوية على مستويات منخفضة من التريتيوم في ما يقرب من ألف صهريج، في انتظار قرار الحكومة بشأن التخلص النهائي منها. ويُعتبر التصريف في البحر أحد الخيارات التي بُحثت، وتُشير تقديرات وزارة البيئة إلى أنه يؤدي إلى تعرض الجمهور لجرعات إشعاعية ضئيلة جداً تقل عن 0,1 ميكروسيفرت/سنة - أي أقل من أربعة أضعاف التعرض لإشعاعات الخلفية الطبيعية [151].



الشكل-29- رسم تخطيطي لنظام معالجة المياه الملوثة الأساسي في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية.

الشكل-30- نظام متنقل لمعالجة المياه الملوثة في الخندق الرئيسي في فوكوشيما. بإذن من شركة طوكيو القابضة للطاقة الكهربائية.

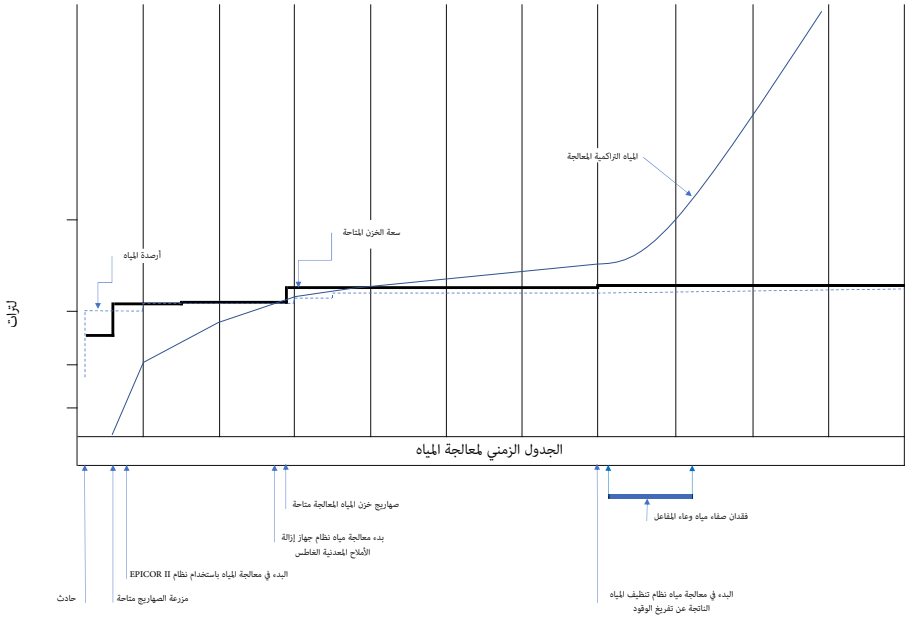
8-2-2-3- معالجة النفايات السائلة في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية

عولج أكثر من سبعة ملايين لتر من المياه في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية أثناء مدة التنظيف [2]. وعولجت المياه وأُجريت عمليات التصرف فيها على أربع مراحل

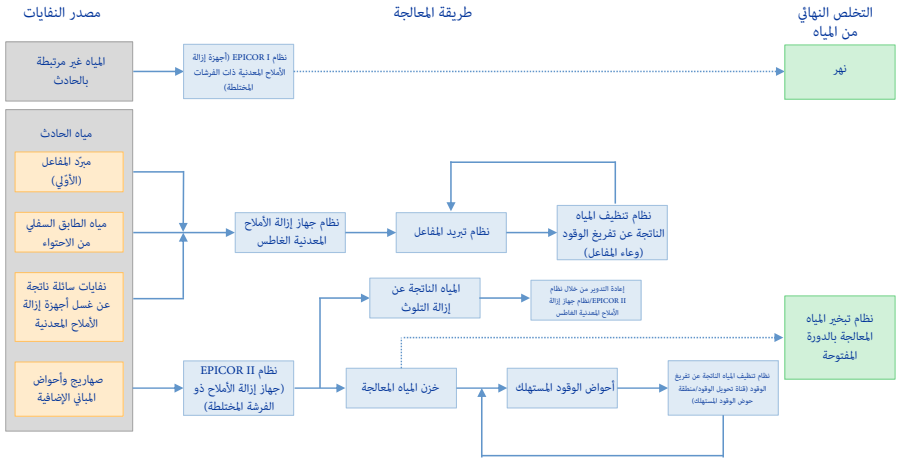
(أ) المرحلة 1- تثبيت الحالة ونقل المياه إلى مواقع مستقرة ومعالجة المياه عند الإمكان.
(ب) المرحلة 2- معالجة المياه على نطاق واسع واحتجاز النويدات المشعة.
(ج) المرحلة 3- الحفاظ على المياه المعالجة في حالة مقبولة لإعادة استخدامها أو التخلص منها.
(د) المرحلة 4- معالجة المياه والإعداد للتخلص النهائي منها.

ويعرض الشكل-31 جدولاً زمنياً لمعالجة المياه في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. وبعد فترة وجيزة من وقوع الحادث، ركزت عمليات التصرف في المياه في عام 1979 على احتواء المياه الملوثة ومعالجة/إطلاق مياه الصرف الصحي التي لم تكن ناتجة عن الحادث. وفي عام 1980، عولجت مياه المبنى الملحق. وعوجلت مياه الاحتواء في الطابق السفلي على مدى عامين من عام 1981 إلى 1982. وخلال الفترة من عام 1982 إلى عام 1985، عولجت مياه تبريد المفاعل. وأخيراً، خلال فترة تفريغ الوقود (1985-1990) عولجت المياه الناتجة عن عملية تفريغ الوقود. واعتباراً من عام 1990، بدأت معالجة المياه المعالجة المخزّنة باستخدام عملية التبخير.

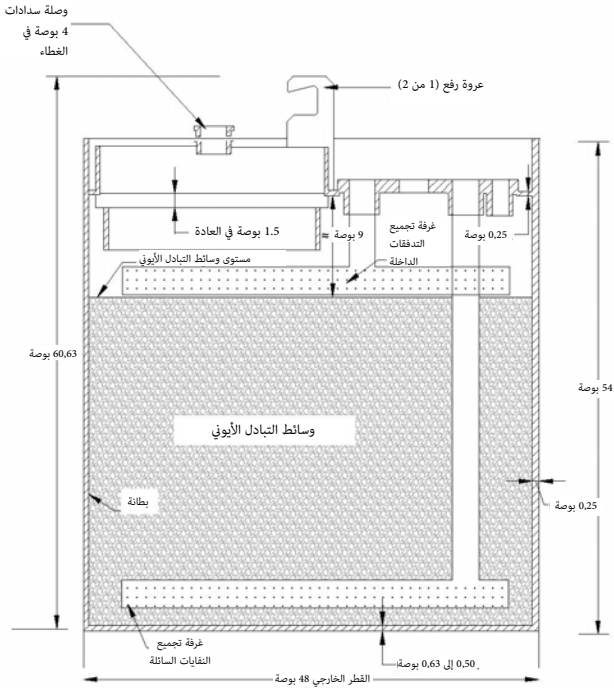
ويعرض الشكل-32 رسماً تخطيطياً يوضح منطق معالجة المياه على النحو الذي نُفذ في ثري مايل آيلند. وبعد وقوع الحادث مباشرة، تبيّن أن هناك حاجة إلى نظام لمعالجة المياه. وفي غضون سبعة أيام بعد وقوع الحادث، تم تركيب نظام EPICOR I وتشغيله [1]، وذلك في البداية لتنظيف المياه في المبنى الملحق. واستُخدم نظام EPICOR I في إزالة ما يقرب من 9×10^{12} بكريل (244 كوري) خلال عام ونصف العام من التشغيل. وتبيّن أن نظام EPICOR I لم يكن قادراً على معالجة كميات كبيرة من المياه المراد مناولتها، مما أدى إلى تصميم وتركيب نظام EPICOR II. وتم تركيب نظام EPICOR II في مبنى التنظيف الكيميائي المؤهل لمواجهة الزلزال، وقد صُمم لتيسير إدخال البطانات التي تحتوي على وسائط التبادل الأيوني وإزالتها باستخدام خط أحادي. ويحتوي المبنى على نظام تهوية موجود بالفعل ويمكنه توفير الحماية المطلوبة لأحواض المبادلات الأيونية العالية الأحمال. واستُخدم نظام EPICOR II في إزالة ما يقرب من 3×10^{15} بكريل (000 80 كوري) باستخدام الوسائط العضوية والزيوليت (الشابازيت) والفحم. ويرد في الشكل-33 رسم تخطيطي لوعاء نظام EPICOR II، كما يعرض الشكل-34 أوعية EPICOR II المثبتة في مبنى التنظيف الكيميائي.



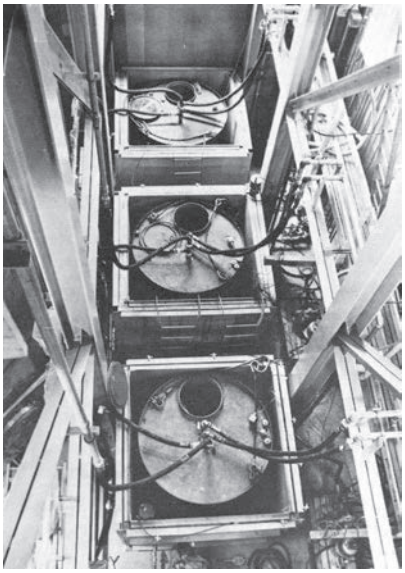
الشكل-31- تاريخ معالجة المياه وخزنها أثناء تنظيف الوحدة 2 في ثري مايل آيلند. بتصرف من المرجع [2].



الشكل-32- منطق معالجة المياه في الوحدة 2 في ثري مايل آيلند. بتصرف من المرجع [2].

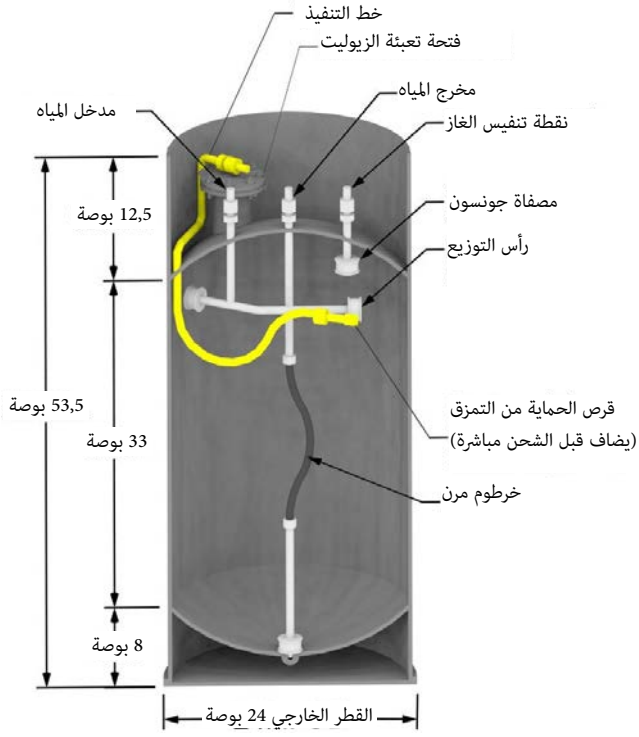


الشكل-33- مقطع عرضي لوعاء التبادل الأيوني النموذجي في نظام EPICOR II بتصرف من المرجع [2].



الشكل-34- أوعية نظام EPICOR II المركبة في مبنى التنظيف الكيميائي للوحدة 2 في ثري مايل آيلند. بإذن من مختبر أيداهو الوطني والهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة [152].

وتم تركيب نظام غاطس لإزالة الأملاح المعدنية في حوض الوقود المستهلك 'باء' [1]. وصُمم النظام لمعالجة النفايات السائلة القوية الإشعاع المحصورة في الطابق السفلي لمبنى احتواء المفاعل، ونظام تبريد المفاعل، ونظام التغذية التعويضية والتنقية الذي كان له نشاط إشعاعي أكبر من $3,7 \times 10^{9}$ بكريل/لتر (100 ميكروكوري/مليلتر). واختُبر النظام على نطاق واسع في المختبر لتحسين التصميم والأداء [153]. ورُشحت المياه المراد معالجتها جزئياً من خلال الزيوليت قبل إدخالها في أعمدة التبادل الأيوني في طبقة الراتنج. وأُجري تشغيل النظام في عدة أوضاع تسلسلية ومتوازية باستخدام مزيج من الزيوليت (الشابازيت) والوسائط الرملية. وبعد المعالجة في النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية، عولجت المياه مرة أخرى بواسطة نظام EPICOR II. وأزيل أكثر من $2,6 \times 10^{16}$ بكريل (000 700 كوري) من النشاط الإشعاعي باستخدام النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية. ويعرض الشكل-35 مقطعاً عرضياً لوعاء النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية.



الشكل-35- مقطع عرضي لوعاء النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية في الوحدة 2 في ثري مايل آيلند. بتصرف من المرجع [2].

وصمم نظام تنظيف مياه تفريغ الوقود لإزالة المواد الصلبة والحفاظ على مستويات معقولة للسيزيوم والسترنشيوم أثناء عملية تفريغ الوقود. وأزالت وسائط الزيوليت الموجودة في النظام ما يزيد على $2,6 \times 10^{14}$ بكريل (000 7 كوري) من النشاط الإشعاعي بينما أزالت نُظم الترشيح الجسيمات للحفاظ على نقاء المياه أثناء تفريغ الوقود

وأصبح التخلص من المياه بعد المعالجة مشكلة كبيرة في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، وذلك أساساً بسبب تركيزات التريتيوم المتبقية. وعلى الرغم من أن التصريف في النهر كان يمكن أن يؤدي إلى تخفيف كافٍ بحيث يتعرض المستخدم الأول في اتجاه مجرى النهر إلى أقل من 6 في المائة من الحد الرقابي، لم يكن التصريف المباشر ممكناً من المنظور السياسي آنذاك [2]. ولذلك، أنشئت صهاريج خزن مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ. وبحلول عام 1986، بلغت كمية المياه المتراكمة نحو 7,5 ملايين لتر. وكان تركيز التريتيوم في الماء ~$3,7 \times 10^{7}$ بكريل/لتر (1 ميكروكوري/مل) في الوقت الذي وقع فيه الحادث، ولكنه انخفض إلى ~$7,4 \times 10^{6}$ بكريل/لتر (0,2 ميكروكوري/مل) بسبب خلط مصادر المياه والتبخير واضمحلال التريتيوم. وروعيت في عملية اتخاذ القرار بشأن أفضل طريقة لمعالجة المياه الخيارات الثلاثة التالية

(أ) التصريف إلى النهر.
(ب) التبخير.
(ج) التجميد في ألواح خرسانية.

ووقع الاختيار على التبخير كطريقة للتخلص وتم تركيب جهاز التبخير على الرغم من أن التقديرات أشارت إلى أنه الخيار الأكثر تكلفة. ويتكون نظام التبخير من نظامين فرعيين، أحدهما للتبخير والآخر للتعبئة. ويوزّع المحلول المركز بشكل مستمر من خلال صهريج جهاز التركيز. وأُرسلت الأجزاء السفلية الناتجة من صهريج التركيز إلى المجفف وآلة التكوير للتخلص منها في نهاية المطاف في هيئة نفايات ضعيفة الإشعاع في مرفق تجاري. ويرد في المنشور الذي يتناول تنظيف وحدة ثري مايل آيلند 2 - التاريخ التقني: 1979-1990 [2] وصفاً لعمليات صنع القرار التي استُخدمت لتحديد نُظم معالجة المياه واختيارها.

8-2-3- النفايات الغازية

تشمل طرق المعالجة الأساسية للنفايات الغازية ترشيحها أو تنقيتها باستخدام نظام تهوية يليه تصريف في الغلاف الجوي. وللتحكم في دقة ضوابط الانبعاثات وتحسينها، سيلزم إجراء رصد الانبعاثات الغازية عند مخرج نظام العادم. وقد يكون من الضروري تركيب تهوية مناسبة أو تعزيز قدرة التهوية الموجودة بالفعل.

وفي محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، أشارت التقديرات إلى أن ~1,6 × 10^{15} بكريل (~43 000 كوري) من غاز الكربتون–85 [42] ستبقى في مبنى احتواء المفاعل بعد الحادث. ومن أجل استعادة إمكانية الوصول إلى المبنى وتجنب انطلاق مزيد من الكربتون غير الخاضع للرقابة، قام المالك والجهة الرقابية بتقييم عدة طرق لإطلاقه ووضع تقديرات متحفظة لجرعات الجمهور وبرنامج توعية عامة. وفي حزيران/يونيه - تموز/يوليه 1980، أُطلق الكربتون إلى الغلاف الجوي من خلال عملية تطهير خاضعة للرصد أثناء الظروف الجوية الملائمة للتشتت

وتؤدي المحارق المستخدمة لمعالجة النفايات الصلبة والسائلة إلى توليد نفايات غازية ثانوية تتطلب معالجة أيضاً. وتحتوي كل محرقة في اليابان على نظام لتنقية غاز المداخن، مثل المرشح الكيسي أو المرسب الكهربائي. ويتبخر السيزيوم في شكل كلوريد أثناء الحرق في بعض الحالات، تبعاً لطبيعة النفايات، ولكن عند استخدام التبريد السريع لتجنب تجديد الديوكسينات، يتكثَّف السيزيوم، ويمكن احتجاز أكثر من 99,9 في المائة بكفاءة في المرشحات الكيسية، في حين أن أكثر من 99 في المائة يمكن احتجازه في المرسب الكهربائي [154].

8-3- التكييف

يُعرّف التكييف على أنه العمليات التي تحوّل النفايات المشعة إلى شكل مناسب للمناولة والنقل والخزن و/أو التخلص منها. ويشمل التكييف في كثير من الأحيان ما يلي:

- تجميد النويدات المشعة؛
- التعبئة في حاويات؛
- التعبئة الإضافية (التعبئة الزائدة).

ويُعرَّف التجميد بأنه عملية تحويل النفايات إلى شكل نفايات عن طريق التصليد أو الطمر أو التغليف، لتقليل احتمالات نزوح النويدات المشعة أو تشتتها. وبالنسبة للعديد من تيارات النفايات المشعة، يحدث التجميد بالتزامن مع التكييف أو بالاقتران معه.

ويتطلب كثير من النفايات مزيداً من التكييف بعد المعالجة قبل الخزن أو التخلص منها على المدى الطويل. وهناك العديد من تقنيات التكييف القياسية، مثل السمنتة، وتجميد البوليمرات، والتزجيج والتحوية، وما إلى ذلك. ووصفت هذه التقنيات في منشورات أخرى مثل المرجع [125]، والمراجع الواردة فيه.

ويُعد تكييف النفايات المشعة خطوة مهمة في سبيل إعداد النفايات للخزن أو التخلص منها على المدى الطويل. ويمكن إجراء التكييف لعدة أسباب تشمل توحيد الممارسات و/أو

أشكال النفايات، ومتطلبات استقرار النفايات بناءً على تصميم المستودع أو معايير حالة الأمان، والمتطلبات التقنية المتصلة بنقل النفايات أو المنصوص عليها في اللوائح أو حسب ما تقتضيه الحاجة لمعالجة التفضيلات المجتمعية. وفي جميع الأحوال، لا بد من فهم سبب التكييف جيداً من أجل اختيار الطرق المناسبة

ويربط التكييف بين النفايات الخام أو النفايات المعالجة جزئياً والشكل النهائي المناسب لخزن النفايات أو التخلص منها على المدى الطويل

وعلى هذا النحو، يُشكل التكييف وظيفة أمان مهمة في نُظم التصرف في النفايات ويرتبط ارتباطاً وثيقاً بجميع خطوات المعالجة السابقة والخطوات التالية لخزن النفايات أو التخلص منها

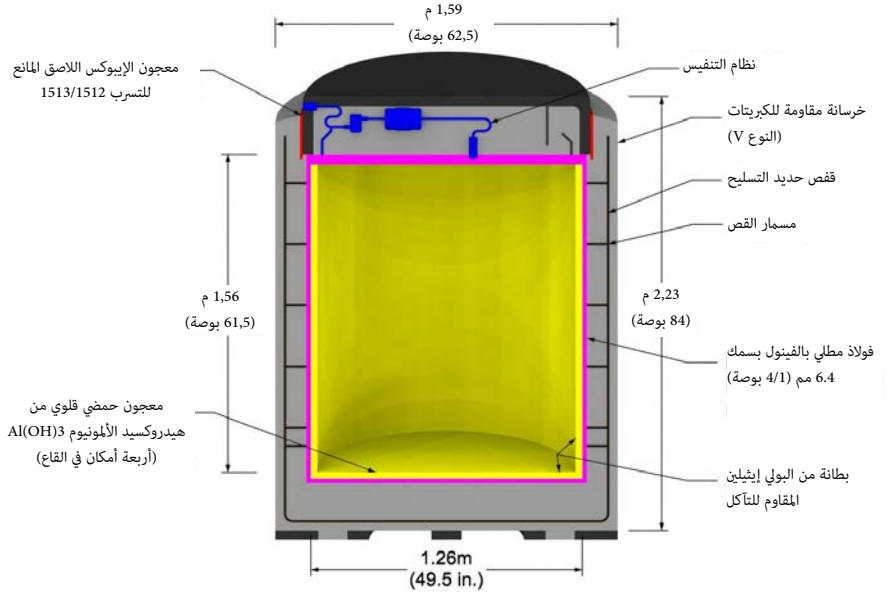
(أ) وفي ما يلي بعض الاعتبارات المهمة في اختيار تقنيات التكييف المناسبة للنفايات المتصلة بالحوادث وتقييمها:

(ب) يتعيّن أن يكون للخيار الأساسي سجل أداء جيد في ما يتعلق بتكييف النفايات المشعة، وأن يكون معروفاً عنه أنه موثوق وقوي. يؤدي العديد من تقنيات التكييف، مثل السمنتة، إلى زيادة كبيرة في الحجم، وينبغي النظر بعناية في هذا الاعتبار في ما يتعلق بالنفايات الناتجة عن الحوادث ذات الحجم الكبير، مثل التربة والحطام والركام العام. وغالباً ما تكون التعبئة البسيطة حلاً أفضل لهذه الأنواع من النفايات من أجل التقليل إلى أدنى حد من الزيادات في الحجم.

(ج) ستُحدد الأحجام الكبيرة أيضاً المتطلبات اللازمة للقدرة من أجل معالجة النفايات في غضون مدة زمنية معقولة. وغالباً ما تفتقر البنية الأساسية القائمة المخصصة للتصرف في النفايات إلى القدرة المطلوبة، وبالتالي فإنها قد لا تكون مناسبة للاستخدام الواسع النطاق بعد وقوع حادث نووي.

(د) قد يلزم إجراء بعض البحث والتطوير لتأهيل تقنية مناسبة. ويتسم كثير من تيارات النفايات التي تنشأ بعد وقوع حادث بتعقدها الكيميائي وتغيُّر تركيبها، وتحتوي على مواد قد تتداخل مع عملية التكييف (مثل المواد العضوية، والمعادن الثقيلة، والجسيمات الدقيقة جداً، والكلوريدات، والكبريتات، والمعادن المتفاعلة، مثل الألومنيوم والمغنيسيوم، وما إلى ذلك).

(ه) يتعيّن أن تكون تقنية التكييف قابلة للتطبيق على أنواع كثيرة من النفايات. ومن ذلك على سبيل المثال أن الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة المقواة بالخرسانة أثبتت أنها مقبولة للتخلص من الراتنجات والممتزات الأخرى الناتجة عن معالجة المياه في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. وتحتوي الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة على بطانة فولاذية مطلية مقاومة للتآكل. وأضيفت مادة الخزن المؤقت للتحكم في الأُس الهيدروجيني إلى الجزء السفلي من هذا النوع من الحاويات. وتُغلق هذه الحاويات عن



الشكل-36- رسم تخطيطي يوضح تصميم حاوية من الخرسانة المسلحة على مستويات عالية من السلامة. بتصرف من المرجع [2].

طريق ربط الغطاء بالجسم باستخدام مادة هلامية لاصقة وملاط من الجص مائع. ويسمح نظام التنفيس بخروج أي غازات إشعاعية متولدة. ويرد في الشكل-36 رسم بياني تخطيطي للحاوية العالية السلامة المصنوعة من الخرسانة المسلحة.

(و) من المهم لتطوير تقنية تكييف بكفاءة الحصول على تعقيبات عن طريق دراسة إمكانية التخلص من أشكال النفايات وتحديد متطلبات المعالجة من منظور أمان التخلص من النفايات.

(ز) يُعد التكييف باستخدام التقنيات الموضوعية أحد الاعتبارات المعقولة [128].

(ح) تشمل جوانب التقنيات التي تحتاج إلى تقييم ما يلي:

- المفهوم: التغيُّر، والمرونة، والحجم، والسعة، والبُعد، وما إلى ذلك.
- السمات: المزايا/العيوب، والقيود، والمتطلبات، والمشاكل، وما إلى ذلك.
- ظروف المعالجة: درجة الحرارة، والضغط، والحاوية، والاحتواء، وما إلى ذلك.
- الأداء والتجارب.

وأكثر مصفوفات التجميد استخداماً سواءً بالنسبة للنفايات الصلبة أو السائلة هي الأسمنت، نظراً للتكلفة المنخفضة والمتانة وتعدد الاستخدامات. ويمكن استخدام إضافات مختلفة لتحسين الأداء في أنواع مختلفة من النفايات. وتتوافر معدات الأسمنت بدءاً من المعدات الصغيرة جداً

(مثل الأحجام التي تقاس باللتر) إلى العمليات الكبيرة المستمرة (عدة أمتار مكعبة يومياً). ويمكن الرجوع إلى مزيد من التفاصيل عن معدات ونُظم التجميد في مراجع أخرى، مثل المراجع [130، 135، 143، 144، 148، 149].

8-3-1- المواد الصلبة

يمكن تكييف النفايات الصلبة إما عن طريق التجميد أو عن طريق التعبئة المباشرة. ويمكن أن يكون التجميد غير متجانس (التغليف) أو متجانساً (خلط النفايات الجسيمية مع مادة رابطة، مثل ملاط الجص الأسمنتي). وغالباً ما يُستخدم التغليف لملء الفراغ في الحاويات أو لتطويق الأجسام الأكبر حجماً (مثل الأجزاء المعدنية والركام وما إلى ذلك) في الحاوية، بينما يُستخدم التجميد المتجانس في حالة الجسيمات التي يمكن 'خلطها' بسهولة في مادة رابطة (مثل الرماد، وراتنجات التبادل الأيوني، والتربة، وما إلى ذلك). ويُلخص الجدول 6 التكنولوجيات التي يشيع توافرها

الجدول-6- ملخص تكنولوجيات تكييف النفايات المشعة الصلبة

نوع النفايات	التكنولوجيات المنطبقة				
	السمنتة المتجانسة	السمنتة بالتغليف	التزجيج	صهر المعادن	تجميد البوليمرات
رماد المحارق	ن		ن		
مواد غير قابلة للاشتعال	ن	ن	ن		ن
وسائط تبادل أيوني	ن				ن
ركام سائب[أ]		ن	ق		
مواد صلبة معدنية	ن	ن		ن	ن
تربة سائبة[أ]	ن		ق		

ن: التكنولوجيا ناضجة ومطبقة على نطاق واسع؛ ق: التكنولوجيا قيد التطوير أو محدودة الاستخدام؛ فارغة: التكنولوجيا غير منطبقة على هذا التيار من النفايات

[أ] يُلاحظ أن الكميات الكبيرة من المواد السائبة الضعيفة الإشعاع قد لا تحتاج إلى أي تكييف بخلاف التعبئة في حاويات مناسبة (سعة حجمية كبيرة).

وعند التعامل مع كميات كبيرة من النفايات الناتجة عن حادث نووي أو إشعاعي، تشمل الجوانب المهمة التي يتعيّن مراعاتها وتقييمها ما يلي

- المتطلبات العامة للتكييف، بما في ذلك معايير قبول النفايات.
- الخيارات التقنية المتاحة: التغيُّر، والمرونة، والحجم، والقدرة، والبُعد، والمكان، والثبات مقابل الحركة، والمركزية مقابل التوزع، والتكلفة، وما إلى ذلك.
- السمات التقنية للعملية: المزايا، والعيوب، والقيود، والمتطلبات الرقابية وغيرها، وما إلى ذلك.
- ظروف التشغيل والعمليات: درجة الحرارة، والضغط، والحاوية، والاحتواء، والتدريع، وما إلى ذلك.
- الأداء العام للنظام والخبرة التشغيلية.

وتُستخدم أشكال ملاط الجص على نطاق واسع لتجميد النفايات المشعة من أجل تيسير التخلص منها، وذلك بسبب تكلفتها المنخفضة. وهناك عدة عوامل يمكن أن تؤثر على أداء شكل النفايات المخلوطة بالملاط، والتي يمكن تخفيفها من خلال تركيبة الجص، أو مرونة العملية، أو سمات العبوات أو الخزن

(أ) كمية المعادن المتفاعلة ونوعها وشكلها الهندسي.
(ب) العوامل المثبطة مثل أوكسيد الزنك، والبورات وبعض المواد العضوية (على الرغم من استخدام الزنك بشكل عام كمادة مثبطة فإنه يمكن أن يؤدي إلى تقوية الأسمنت ميكانيكياً بمرور الوقت).
(ج) العوامل المعجلة، مثل حمض الستريك أو أملاح الألومينات (تبعاً للتركيز الأوّلي لحمض الستريك، نظراً لأنها يمكن أن تثبط أيضاً عملية التماسك؛ أويمكن أيضاً لأملاح الألومينات أن تؤثر على ثبات الأبعاد، ولا سيما في حالة النفايات السائلة).
(د) المواد التي تؤثر تأثيراً ضاراً على تموه الأسمنت، مثل بولي إيثيلين غليكول.
(ه) وجود مواد عضوية يمكن أن تؤثر على حركة النويدات المشعة.
(و) وجود مواد عضوية يمكن أن تؤثر على معدلات تآكل المواد المتفاعلة.
(ز) بيئة الخزن.
(ح) وجود الكلوريد بتركيزات منخفضة يقاومها الأسمنت ذو الأُس الهيدروجيني العالي؛
(ط) وجود مواد عضوية/سوائل حرة وتأثيرها على التآكل المستحث بالميكروبات.
(ي) وجود مواد عضوية يمكن أن تعمل كعوامل رغوية/حابسة للهواء.
(ك) المحتوى المائي الكبير ورداءة جودة مسحوق الأسمنت قد يؤديان إلى منتجات أضعف.

وتشهد محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية إجراء العديد من تجارب التصليد باستخدام المصفوفات غير العضوية (مثل الأسمنت والبوليمرات الجيولوجية، والزجاج المائي، والزجاج) باستخدام مواد اصطناعية تتألف من نفايات ثانوية ناتجة عن معالجة المياه الملوثة (مثل الزيوليت والحمأة). وتُقلل إعادة الاستخدام أيضاً من متطلبات الخزن. وتشمل الأنشطة الأخرى تجميع المعلومات عن تكنولوجيات معالجة النفايات الموجودة وتكييفها، وتقديم تقنيات التكييف المرشحة التي يمكن تطبيقها على النفايات التي تكون خصائصها مفهومة بشكل أفضل (النفايات الثانوية الناتجة عن معالجة المياه، والركام، والأشجار، وما إلى ذلك) [155]

وسيجري تجهيز مرفق معالجة النفايات الصلبة في المنطقة المحظورة في تشرنوبل بقدرات الفصل/الفرز ومرافق الترميد والضغط الفائق، بالإضافة إلى مرافق السمنتة/التمليط والتعبئة. ومع ذلك، لم تكن معظم النفايات المدفونة حالياً في الخنادق والتلال مجهزة مسبقاً، ومن المحتمل أن تُترك في مكانها. ومن المتوقع أن يكون للنفايات الموجودة في غالبية الخنادق أثر بيئي لا يُذكر على مدار 500 عام قادمة؛ وهو الإطار الزمني المتوخى لرفع التحكم الرقابي عن مرافق التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مُجمع فيكتور. ومع ذلك، من المقرر إصلاح عدد محدود من الخنادق والتلال القوية الإشعاع. وسيجري استرجاع النفايات ومعالجتها أو نقلها إلى أماكن أكثر ملاءمة، بما في ذلك مرافق التخلص القريبة من سطح الأرض في مجمع فيكتور. ويتعيّن استرجاع النفايات الصلبة والنفايات الأخرى المدفونة حالياً في موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة، وفصلها إلى تيارات ستُعبأ وتُنقل إلى مواقع التخلص الجيولوجي العميق والتيارات التي يمكن معالجتها أو تعبئتها للتخلص منها بالقرب من سطح الأرض. ويمكن مناولة النفايات الناتجة عن المرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات الصلبة في محطة تشرنوبل للقوى النووية على غرار النفايات الناتجة عن موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة

وفي محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، كان من الضروري تصليد بعض النفايات لتلبية متطلبات المياه الحرة و/أو متطلبات النفايات الثابتة قبل التخلص منها [1]. وتم تصليد ما يقرب من 100 برميل من محاليل إزالة التلوث باستخدام وسائط بوليمرية من إنتاج شركة DOW. وأُجريت عملية تصليد لحمأة الصهاريج في مصفوفة خرسانية. وأُجريت أيضاً عملية تصليد شملت 11 بطانة من بطانات التبادل الأيوني باستخدام الخرسانة قبل تطوير حاويات على مستويات عالية من السلامة وذات قدرة على التخلص من المياه.

وأُجري اختبار إيضاحي أيضاً لتقييم تجميد مواد التبادل الأيوني في المصفوفات البوليمرية والأسمنتية [156]. وأُجري أيضاً عرض إيضاحي لتزجيج وسائط التبادل الأيوني للزيوليت على نطاق واسع (لتزجيج محتويات بطانة واحدة). ومع ذلك، وبمجرد الموافقة على التخلص من مواد التبادل الأيوني في الحاويات ذات المستويات العالية من السلامة، تقرر أن عمليات التجميد لم تكن فعالة من حيث التكلفة [157، 158]

8-3-2- السوائل

لا تعتبر السوائل عموماً مناسبة للتخلص النهائي منها في مستودع للنفايات. ولذلك فإنها تحتاج إلى معالجة وتحويل إلى شكل صلب يمكن خزنه على المدى الطويل والتخلص منها في نهاية المطاف. وهناك عموماً خياران للتخلص من النفايات السائلة المائية: تصريف المواد النظيفة نسبياً إلى البيئة (على سبيل المثال كنفايات سائلة) أو تجميدها في شكل مادة صلبة. ونوقش ذلك بالفعل من قبل. ويتم في العادة تكييف السوائل كخليط متجانس (أي أنها تُخلط مباشرة مع مادة رابطة لتكوين مادة صلبة متجانسة). وتُعالج السوائل العضوية عموماً عن طريق الترميد أو التجميد. ويتناول هذا القسم تجميد السوائل/تكييفها في مصفوفة صلبة. ويلخص الجدول 7 التكنولوجيات التي يشيع توافرها.

وكما جاء من قبل فإن عملية التجميد هي الأكثر شيوعاً في حالة النفايات السائلة. ويمكن أن تحتوي النفايات السائلة الناتجة عن حادث نووي على مكونات تتداخل مع بعض عمليات السمنتة النموذجية (على سبيل المثال، المواد العضوية، والمعادن الثقيلة، والمحتوى الكبير من الكلوريد، وما إلى ذلك). ولذلك يلزم في العادة إجراء بعض أعمال البحث والاختبار لتكوين تركيبة مناسبة. ويمكن أيضاً أن تكون هذه السوائل متغيرة التركيب، ولذلك قد تكون هناك حاجة إلى أكثر من تركيبة واحدة

الجدول-7- ملخص تكنولوجيات تكييف النفايات المشعة السائلة

نوع النفايات	التكنولوجيات المنطبقة				
	السمنتة المتجانسة	التزجيج	البلورة	تجميد البوليمرات	البوليمرات الجيولوجية
مائية ضعيفة الإشعاع	ن	ن	ن	ن	ن
عضوية ضعيفة الإشعاع	ن				
مائية قوية الإشعاع	ن	ن			

ن: التكنولوجيا ناضجة ومطبقة على نطاق واسع؛ خانة فارغة: التكنولوجيا غير منطبقة على هذا التيار من النفايات

ويُلخص الجدول 8 السمات الرئيسية لمختلف عمليات السمنتة المستخدمة حالياً. وعادة ما تكون العمليات الآلية الواسعة النطاق هي الأنسب لمعالجة النفايات الكبيرة الحجم الناتجة عن الحوادث النووية.

8-4- الحاويات والتعبئة

تُشكل الحاجة إلى الخزن المؤقت للكميات الهائلة من النفايات الناتجة عن الحوادث أحد العوامل الرئيسية التي يتعيّن أن تؤخذ في الاعتبار عند إجراء تخطيط مسبق. ويصبح جمع النفايات وخزنها مؤقتاً ضرورياً، وغالباً ما يكون ذلك بسرعة كبيرة بعد وقوع حادث، لتقليل تعرض الجمهور والعمال للإشعاع بسبب انتشار المواد المشعة. ويُعتبر الفصل المؤقت لهذه النفايات حسب مستويات

الجدول-8- مقارنة عمليات السمنتة [159]

العملية	المزايا	العيوب
الخلط داخل البرميل	— تجانس جيد للمنتج — معدات معالجة بسيطة — مراقبة جيدة للجودة — مناسبة لتيارات النفايات المخلوطة — متغيِّر المجداف المفقود يساعد على تلافي توليد نفايات ثانوية ويُقلل من إمكانية انتشار التلوث — مناسبة للأحجام الصغيرة من النفايات	— متغير المجداف الثابت يولد نفايات ثابتة نتيجة تنظيف المجداف وإمكانية انتشار التلوث — قد يلزم إجراء معالجة تمهيدية للنفايات
الخلط باستخدام الخلاطات	— معدات معالجة بسيطة — مناسبة لتيارات النفايات المخلوطة — تجنب توليد نفايات ثانوية — مناسبة للأحجام الصغيرة من النفايات	— عدم التيقن من تجانس المنتج — رداءة مراقبة الجودة — قد يلزم إجراء معالجة تمهيدية للنفايات
الخلط اليدوي	— معدات معالجة بسيطة — مناسبة لتيارات النفايات المخلوطة — تجنب توليد نفايات ثانوية — مناسبة للأحجام الصغيرة من النفايات	— عدم التيقن من تجانس المنتج — رداءة مراقبة الجودة — قد يلزم إجراء معالجة تمهيدية للنفايات
الخلط داخل الخطوط	— تجانس جيد للمنتج — مراقبة جيدة للجودة — مناسبة للأحجام الكبيرة من تيارات النفايات — التشغيل المستمر	— توليد نفايات ثانوية — قد يلزم إجراء معالجة تمهيدية للنفايات — متطلبات كبيرة للصيانة
التشتت	— جيدة لتيارات النفايات ذات الأحجام الصغيرة جداً — عدم الحاجة إلى خلط	— عدم التيقن من تجانس المنتج — قد يلزم إجراء معالجة تمهيدية للنفايات

نشاطها الإشعاعي ونوعها (الكثافة والشكل) فعالاً لحماية الجمهور والعمال من التعرض للإشعاع. ويلزم أيضاً اختيار الحاويات المثالية للاحتفاظ بقدرات المناولة وإمكانية الاسترجاع. ويتعيّن أن توفِّر الحاويات بعض الحماية للنفايات، ويتعيّن أن تتحمل الحاويات نفسها الظروف البيئية إذا كانت ستُخزّن في العراء. وعلى سبيل المثال، ستؤدي ملامسة الماء إلى تحلل المواد العضوية، وسيؤدي ذلك إلى تكوين الهيدروجين والميثان، مما قد يُعرض لخطر اندلاع الحريق. وفي حالة النفايات الأقوى من حيث نشاطها الإشعاعي، يمكن أن يكون التحليل الإشعاعي أيضاً مصدر قلق، وقد تكون الحاويات المزودة بفتحات للتهوية ضرورية للسماح بإطلاق الغازات المتحللة إشعاعياً وغيرها من الغازات المتولدة؛ على سبيل المثال، انظر وعاء النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية في الشكل-35 والحاوية ذات المستويات العالية من السلامة في الشكل-36.

ويتعيّن بالتالي أن تكون مادة الحاوية متوافقة مع النفايات وبيئة الخزن. وقد تتعرض بعض مواد الحاويات، مثل الفولاذ الكربوني غير المطلي، للتآكل من الداخل (بسبب التفاعل مع النفايات) ومن الخارج (على سبيل المثال، بسبب رطوبة الجو). وتزداد أهمية هذه المشاكل كلما طالت مدة الخزن المقررة. ويمكن أن توفِّر الطلاءات والبطانات، مثل المطاط والإيبوكسي والدهانات الصناعية، حماية إضافية

ويمكن في كثير من الأحيان جمع النفايات الضعيفة الإشعاع وخزنها في حاويات من أنواع الأكياس المرنة التي يصل حجمها إلى بضعة أمتار مكعبة. ويتعيّن أن يراعى أن تكون الأكياس متينة بدرجة كافية لكي تتحمل فترة الخزن المتوقعة بالكامل دون أن تتمزق، مع السماح بسهولة المناولة والفتح عند استرجاع النفايات. وقوبلت هاتان المشكلتان عند استخدام حاويات الأكياس في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية - كانت الأكياس البلاستيكية الأوّلية من نوعية رديئة وتمزقت بعد فترة قصيرة، في حين كان من الصعب قطع الأكياس الأكثر متانة التي استُخدمت لاحقاً عند استرجاع النفايات للمعالجة

ويلزم استخدام معادن ذات سُمك أكبر أو مواد كثيفة أخرى، مثل الخرسانة، لتوفير حماية كافية، ولا سيما في الحاويات المؤقتة أو المرتجلة المستخدمة لخزن النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي يكون نشاطها الإشعاعي قوي نسبياً. والسبب في ذلك، من وجهة نظر الوقاية من الإشعاعات، هو أن الحاوية المعدنية أو الخرسانية تكون أكثر فعالية من الحاوية المصنوعة من البلاستيك في الوقاية من أشعة غاما المنبعثة من السيزيوم-134 والسيزيوم-137 في النفايات. ويلخص الجدول 9 أنواع الحاويات المستخدمة في العادة للنفايات الصلبة وتطبيقاتها

وتُستخدم الحاويات المؤقتة أو المرتجلة لفترات مؤقتة في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، في انتظار معالجتها أو خزنها في مرفق مخصص لهذا الغرض في المستقبل. وتُعزل وتُخزّن النفايات المتوسطة الإشعاع (مثل الممتزات العالية التركيز من السيزيوم-134 والسيزيوم-137) في حاوية خرسانية في برابخ صندوقية في فوكوشيما داييتشي. وتُحفظ بعض نفايات فوكوشيما الملوثة في حاويات بلاستيكية مرنة [61]. وهناك عدة أنواع متفاوتة من حيث

متانتها وقدرتها على منع تسريب المياه، ويعتمد الاختيار على النفايات وظروف الخزن. وتبيّن في كثير من الأحيان أن الحاويات الرخيصة ضعيفة من حيث مقاومة الأشعة فوق البنفسجية، وتتحلل عموماً خلال مدة عام عند استخدامها خارج مكان الخزن.

وفي بعض الحالات، يمكن استخدام حاوية ذات سعة كبيرة ومتاحة بسهولة وقادرة على استيعاب مكون كبير أو كمية كبيرة من المواد السائبة. ويمكن تكديس هذه الحاويات داخل مرفق خزن مؤقت أو خارجه، كما هو موضح في الشكلين 37 و38.

الجدول-9- أنواع حاويات النفايات الصلبة الناتجة عن حادث نووي كبير

نوع الحاوية	مثال على النفايات	ملاحظات
حاوية معدنية كبيرة (على سبيل المثال، حاوية شحن مصممة وفقاً لمواصفات المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس، وغيرها)	النفايات الثقيلة، والنفايات المعدنية، والنفايات القوية الإشعاع، وما إلى ذلك.	يمكن للحاوية خزن مكونات كبيرة ونفايات عالية الكثافة، ونفايات قوية الإشعاع نسبياً. يمكن استخدام الحاوية في العراء.
منصة تحميل صندوقية	النفايات المعدنية، والخرسانة، والتربة، وما إلى ذلك.	يمكن للحاوية خزن مكونات كبيرة ونفايات عالية الكثافة.
برميل أسطواني	النفايات المعدنية، والخرسانة، والتربة، والرماد، وما إلى ذلك.	يمكن للحاوية خزن المكونات الصغيرة والنفايات العالية الكثافة. قد تتطلب الحاويات المصنوعة من الفولاذ الطري بطانة لحمايتها من التآكل.
حاوية مرنة (على سبيل المثال، كيس مصنوع من البلاستيك)	الخرسانة، والتربة، والنباتات، وما إلى ذلك.	يمكن للحاوية خزن النفايات التي لا تتسبب في إتلاف الكيس البلاستيكي والنفايات المنخفضة الكثافة. تحتوي بعض الأكياس على تقوية للألياف لتحسين متانتها.
حاوية خرسانية	النفايات ذات النشاط الإشعاعي الأقوى.	يمكن للخرسانة السميكة الجدران أن توفِّر تدريعاً للوقاية من الإشعاعات.
النفايات السائبة (بدون حاوية)	الخرسانة، والتربة، والنباتات، وما إلى ذلك.	تكديس مؤقت للمخزونات من المواد المُجمّعة، في انتظار التخلص منها لاحقاً. خزن كميات كبيرة من المواد المنخفضة الأخطار.

الشكل-37- فوكوشيما حاويات الخزن المؤقت للنفايات. بإذن من شركة طوكيو القابضة للطاقة الكهربائية.

الشكل-38- محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية: مواقع الخزن المؤقت للنفايات في أكياس بلاستيكية.

ويمكن استخدام هذا النوع من الخزن في العراء لخزن النفايات الضعيفة الإشعاع جداً، ويتعيّن إيلاء عناية لاختيار مواقع هذه المرافق بحيث لا تتأثر بمياه الفيضانات وغيرها من الظواهر الطبيعية. وتُصنع هذه الحاويات المؤقتة حسب المواصفات المخصصة للاستخدام في حالات الطوارئ، وقد لا تكون مناسبة للتخلص النهائي. وبالتالي، يمكن أن تصبح هذه الحاويات نفسها نفايات بمجرد إفراغها. وقد يكون الحل الآخر هو تصنيع عبوات مُجمِّعة للتخلص من النفايات بحيث تسمح للنفايات بالبقاء في الحاوية المؤقتة الأصلية. وعلى سبيل المثال، تُستخدم حاويات الشحن الكبيرة المصممة وفقاً لمعايير المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس في بعض الدول الأعضاء كحاويات للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع، ويمكن استخدامها كعبوات مُجمِّعة.

وكما جاء من قبل، حالت المسائل الرقابية والسياسية دون التخلص من النفايات مباشرة بعد حادث محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. وفي البداية، رفض المحافظون في كل من ولاية واشنطن وكارولينا الجنوبية التخلص من نفايات ثري مايل آيلند في مرافق التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في هانفورد في واشنطن وبارنويل في كارولينا الجنوبية. وسمح محافظ ولاية واشنطن بشحن النفايات إلى هانفورد في أواخر عام 1979، ولكن لم تُقبل النفايات في مرفق دفن النفايات في بارنويل في ولاية كارولينا الجنوبية حتى عام 1987 [2]. وأتاح توافر هذه المواقع لاحقاً للتخلص من النفايات من الفئات 'ألف' و'باء' و'جيم' (أي وفق نظام تصنيف النفايات الضعيفة الإشعاع في الولايات المتحدة [29]). واستُخدمت عبوات النقل المعتمدة القائمة لنقل هذه النفايات

وفي نظام التصرف في النفايات في الولايات المتحدة، شكلت النفايات الأكبر من نفايات الفئة 'جيم' تحدياً فريداً للتخلص منها. وتم التوصل إلى اتفاق بين الهيئة الرقابية النووية ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة لكي تقبل وزارة الطاقة النفايات الأكبر من الفئة 'جيم' لأغراض البحث والتطوير من أجل تقييم تكنولوجيات المعالجة ونُظم الخزن وما إلى ذلك. وحدد هذا الاتفاق ستة أنواع من النفايات التي يمكن التخلص منها داخل النظام الخاص بوزارة الطاقة

(أ) النفايات الناتجة عن نظام EPICOR II.
(ب) النفايات الناتجة عن النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية.
(ج) وقود المفاعل.
(د) النفايات الملوثة بعناصر ما وراء اليورانيوم.
(هـ) راتنجات ومرشحات نظام التغذية التعويضية والتنقية.
(و) النفايات المشعة الصلبة الأخرى.

وتنازلت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة عن شرط تصليد الراتنجات المستخدمة في نظام EPICOR II في عام 1981، وبُذلت جهود لإيجاد وسائل لتعبئة بطانات الراتنجات

للتخلص منها في المواقع التابعة لوزارة الطاقة. وأثبتت الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة والمصنوعة من الخرسانة المسلحة أنها مقبولة للتخلص من راتنجات نظام EPICOR II في موقع هانفورد. ويظهر في الشكل-36 رسم بياني تخطيطي لحاوية على مستويات عالية من السلامة مصنوعة من الخرسانة المسلحة في ثري مايل آيلند.

وأُجري تقييم واسع النطاق لنفايات النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية. وكشفت هذه التحليلات عن أن شفط المياه والتنفيس والتخميل، لم تكن كافية للتحكم في توليد الهيدروجين المشع. ولذلك كان لا بد من استخدام نظام إعادة التوليف التحفيزي لإعادة توليف الهيدروجين والأوكسجين مرة أخرى وتحويلهما إلى ماء. ومن خلال الاختبارات اللاحقة، تم اختيار البلاديوم الموجود على مادة الألومينا الحفازة كعامل لإعادة التوليف. وكان الحل الناتج هو تعبئة البطانات من النُظم الغاطسة لإزالة الأملاح المعدنية في حاويات على مستويات عالية السلامة مبطنة بالبوليثيلين والتخلص من النفايات في موقع بارنويل في كارولينا الجنوبية بمجرد السماح بنقل الشحنات إلى موقع بارنويل

وفي محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، تُنقل مواد الملاط ومواد نفايات الممتزات المستهلكة الناتجة عن النظام المتقدم لمعالجة السوائل (انظر القسم 8-2-2-2) الذي يعالج كميات كبيرة من المياه الملوثة، إلى حاويات على مستويات عالية من السلامة (انظر الشكل-39)، وتُنقل إلى مرفق خزن مؤقت تُخزن فيه داخل برابخ صندوقية

وفي محطة تشرنوبل للقوى النووية، تُستخدم عبوتان رئيسيتان للنفايات. وتُكيَّف النفايات الضعيفة الإشعاع الصلبة والنفايات المتوسطة الإشعاع القصيرة العمر في حاويات خرسانية من النوع KZ-3.0 بسعة 3 م^3 (الشكل-40). وتُعالج النفايات الضعيفة الإشعاع السائلة والنفايات المتوسطة الإشعاع القصيرة العمر في محطة معالجة النفايات المشعة السائلة، وتُكيَّف باستخدام خليط أسمنتي في براميل نفايات معدنية من النوع MB-2IV بسعة 0,2 م^3 (الشكل-41). ويُلخص الجدول 10 مواصفات هذه الحاويات.

(ب)

(أ)

الشكل-39- حاويات على مستويات عالية من السلامة مستخدمة لخزن الملاط والممتزات المستهلكة الناتجة عن معالجة المياه الملوثة في فوكوشيما: (أ) في النظام المتقدم لمعالجة السوائل، و(ب) في منطقة الخزن. بإذن من شركة طوكيو للطاقة الكهربائية.

الجدول-10- ملخص حاويات النفايات الرئيسية في تشرنوبل

البيانات التقنية	KZ-3,0	MB-2IV (براميل أسطوانية بسعة 200 لتر)
الحجم المحدد في التصميم (م^3)	3,0	0,2
الطول الخارجي (مم)	1940	—
العرض الخارجي (مم)	1940	593 (الحد الأقصى للمحيط الخارجي عند الغطاء)
الارتفاع الخارجي (مم)	1650	856
سمك الجدار (مم)	150	1,5
وزن الحاوية الفارغة (كغ)	5600 (بدون الغطاء)	25
وزن الغطاء (كغ)	1000	—
الوزن الإجمالي (كغ)	15000	500
المادة	خرسانة مسلحة	فولاذ كربوني
الاستخدام	النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الصلبة	النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع السائلة المصلدة

الشكل-40- حاوية خرسانية من النوع KZ-3.0 مستخدمة في تشرنوبل: نسق مكونات الرفع والنقل (الجزء العلوي)؛ وغطاء النقل (الجزء الأوسط)؛ والخزن (الجزء السفلي). بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

والحاوية من النوع KZ-3.0 هي حاوية مدرعة بالخرسانة توفِّر حماية للأفراد أثناء النقل والخزن/التخلص. وهذه الحاوية مرخصة للاستخدام في تشرنوبل (محطة القوى النووية). وتُزوّد الحاوية بغطائين مختلفين مصنوعين من الخرسانة - للنقل والخزن أو التخلص على المدى الطويل - وهما موضحان أيضاً في الشكل-40.

الشكل-41- برميل أسطواني من النوع MB-0.2IV مستخدم في تشرنوبل. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

وتُنقل النفايات المكيّفة إلى مجمع فيكتور للتخلص منها في أقبية خرسانية. وتدعو استراتيجية التخلص من النفايات إلى وضع البراميل في الجزء المركزي من أقبية الخرسانية، مع وضع الحاويات الخرسانية بحيث تُشكل محيطاً مدرعاً حول البراميل. وباتباع هذه الاستراتيجية، يمكن تكديس البراميل في كل قبو في ما يصل إلى سبع طبقات، مع تكديس الحاويات الخرسانية وفقاً لذلك من أجل توفير التدريع طيلة عملية التخلص

وطيلة أعمال الاستصلاح المرتبطة بالحادث في محطة تشرنوبل للقوى النووية، استُخدمت حاويات نفايات مختلفة للاحتفاظ بالنفايات ذات المستوى الإشعاعي الأقوى المنقولة إلى موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة أو المرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية. ويمكن الرجوع إلى مزيد من المعلومات عن الحاويات في مواضع أخرى (على سبيل المثال، المرجع [117]). ومع ذلك، لم يُصمم أي من هذه الحاويات ليكون عبوة نفايات طويلة الأمد لاستخدامها في احتواء النفايات وتجميدها على المدى الطويل. ويتم احتواء النفايات من خلال الجدران والألواح الهيكلية الثقيلة المستخدمة في هذه المرافق التي تزوّد بعزل إضافي عن البيئة بواسطة غطاء أسمنتي سميك يوضع فوق النفايات المدفونة. وبالإضافة إلى ذلك، صُمم غطاء تربة هندسي متعدد الطبقات وتم تركيبه في كلا الموقعين لتوفير حماية إضافية من تسرب المياه. ودُفنت النفايات السائبة في الخنادق والتلال، ولم تُستخدم الحاويات

ويمكن الرجوع إلى إرشادات إضافية حول الحاويات المستخدمة في حالات الحوادث في منشورات أخرى، مثل المراجع [47، 49، 121، 160].

9- النقل والتحويل

الدروس الرئيسية المستفادة:

- يتعيّن أن تؤخذ في الاعتبار الحركة داخل الموقع (تغيير المكان) وخارج الموقع (النقل).
- قد يتطلب نقل المفردات السائبة (التربة والركام والنباتات) عبوات نقل كبيرة جداً. وقد يتطلب نقل المفردات الكبيرة (المعدات الملوثة، وغيرها) أيضاً اهتماماً خاصاً. وقد تتطلب القيود المفروضة على حجم عبوات النقل وكتلتها تقليل حجم العبوة لنقل بعض المواد.
- قد يلزم نقل سوائل سائبة.
- يمكن أن تتطلب معدلات الجرعات العالية (سواءً من النفايات نفسها و/أو من البيئة المحيطة) استخدام مركبات مسيّرة عن بُعد.
- في حالات الطوارئ، قد لا يكون التطبيق الصارم للوائح النقل الصادرة عن الوكالة ممكناً: أحد أسباب إنشاء منطقة محظورة هو إلغاء الحاجة إلى النقل عبر المناطق العامة.

توفِّر معايير الأمان الصادرة عن الوكالة في ما يتعلق بالتعبئة لأغراض النقل إرشادات بشأن النقل المأمون للمواد المشعة. وتلتزم الوكالة بهذه المعايير في عملياتها، وتُطبق الدول الأعضاء هذه المعايير على نطاق واسع من خلال لوائحها الخاصة بالأمان النووي. ويُستكمل العدد SSR-6 (الصيغة المنقحة Rev.1)، لائحة النقل المأمون للمواد المشعة [44]، بتحديثات دورية، وأُجري آخر تحديث في عام 2018 [161]. ويُستخدم نهج متدرج في ما يتعلق بالعبوات ووسائل النقل، تبعاً لخطورة المحتويات المشعة. ويمكن الاسترشاد بهذه المعايير في نقل النفايات بعد وقوع حادث نووي.

وأصدرت الوكالة معايير أمان ذات صلة كمواد استشارية لمعايير الأمان المحددة أعلاه [44]. ويهدف هذا المنشور إلى زيادة توضيح الحاجة إلى متطلبات النقل المتناسبة مع الخطر المتأصل في المواد التي تكون قيد الشحن، ويُشكل الأساس المنطقي لهذا التأكيد. ويُناقش المنشور أهمية التعبئة، ويُشير إلى ضرورة مراعاة سمات الأمان الكافي، بالقدر الممكن عملياً، بدءاً من تصميم العبوة. ومن خلال التركيز على موثوقية العبوة، يمكن تعميم اعتبارات النقل، مما يقلل الحاجة إلى طرق نقل خاصة.

ويمكن للعدد IAEA-TECDOC-1728، الصادر عن الوكالة، التحكم الرقابي في النقل المأمون للمواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية [43]، أن يوفِّر إرشادات إضافية بشأن شحن مواد النفايات السائبة الضعيفة الإشعاع. ويُقيِّم هذا المنشور الاستثناءات من لائحة النقل

المأمون للمواد المشعة [44] في حالة المواد الضعيفة الإشعاع جداً المرتبطة بالمواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية [43]. ويمكن أن تكون الحجج المستندة إلى المخاطر الواردة في هذا المنشور قابلة للتطبيق على الكميات الكبيرة من النفايات الضعيفة الإشعاع (مثل التربة والنباتات والحطام) الناتجة عن حادث نووي

وسيلزم نقل المواد المشعة طيلة برنامج التصرف في النفايات. وستتطلب تيارات النفايات المعقدة والمتنوعة المتوقعة بعد وقوع الحادث مجموعة متنوعة من براميل النقل وطرق النقل. ويمكن أن تتراوح احتياجات نقل النفايات بين شحن المفردات الكبيرة جداً والمفردات الصغيرة المختلفة الأحجام، مع نطاقات من النشاط الإشعاعي تتراوح بين ضعيفة جداً وقوية للغاية. ولذلك، من الضروري أن تقوم المنظمة في مرحلة التخطيط المسبق بإجراء تقييم كامل لطرق الشحن ومساراته المتاحة استعداداً للاحتياجات المستقبلية المحتملة. ويمكن بعد ذلك وضع خطط طوارئ تُعبِّر عن نتائج التقييم. وعلى سبيل المثال، في ما يتعلق بالمفردات الكبيرة للغاية، قد يكون النقل عن طريق السكك الحديدة هو الحل الأمثل، ولكن قد لا تكون خدمات السكك الحديدية متاحة بسهولة لمرفق معيّن. ويمكن للتخطيط للطوارئ أن يأخذ في الاعتبار أيضاً خيارات تطوير براميل كبيرة مناسبة للطرق أو الحصول عليها، و/أو تحديد منهجيات ممكنة عملياً لتقليل الحجم

ويتم النقل في الموقع (أي تغيير المكان داخل الموقع) وفقاً للقواعد المعمول بها في مجال النقل داخل الموقع وحالات أمان العبوات بما يتناسب مع الحالة؛ وعلى سبيل المثال، يمكن استخدام تدابير وقائية أخرى للتحكم في الجرعة والأثر، مثل التشغيل عن بُعد، والتدريع الموضوعي للمركبات، أو مبدأ المسافة، بدلاً من الاعتماد على جودة العبوة. ويتم النقل خارج الموقع وفقاً للوائح النقل الوطنية أو الصادرة عن الوكالة، باستخدام العبوات المرخصة حسب الحاجة، حيث تميل حالات الأمان إلى أن تكون حتمية. وعندما تُنقل النفايات خارج الموقع داخل منطقة محظورة أو داخل منطقة تعرضت لتلوث، يمكن مراعاة متطلبات أمان النقل المحلية. ونوقش النقل خارج الموقع إلى مرفق التخلص عن بُعد بمزيد من التفصيل في القسم 11-5-2

وسيكون نقل النفايات بعد وقوع حادث مختلفاً اختلافاً كبيراً عن العمليات الروتينية، وستكون المتطلبات المطبقة في العادة متجاوزة للإمكانات المتاحة في حالة ما بعد الحادث. وقد يكون تكييف براميل ومعدات النقل ضرورياً لدعم الاحتياجات الأكثر إلحاحاً. وقد يكون التواصل مع المنظمات الوطنية والدولية ضرورياً لمعالجة مسائل التعبئة والنقل

ومن المهم التأكد من أن لوائح أمان النقل مفهومة بوضوح، وأن هناك خبراء لقيادة برنامج النقل. وقد يكون الحوار والتنسيق مع الهيئات الرقابية ضرورياً لإيجاد حلول فريدة تسمح بشحن النفايات أو الحصول على إعفاء من المتطلبات الرقابية المطبقة في العادة من أجل التخفيف من عواقب الحوادث

وقد تتطلب بعض النفايات الناتجة عن الحوادث نقلها في عبوة من النوع 'باء' (بسبب النشاط الإشعاعي للنفايات أو معدل الجرعة الناتجة عن النفايات). وإذا لم يكن من السهل الحصول على حاوية معتمدة من النوع 'باء'، من المحتمل أن تكون هناك آثار كبيرة على التكلفة والجدول الزمني، حتى لو كان ذلك ينطوي فقط على استخدام عبوة من نوع آخر. ومن ذلك على سبيل المثال أن العبوات من النوع TruPACT-III مرخصة ومستخدمة في الولايات المتحدة الأمريكية لنقل النفايات المشعة. ومع ذلك، إذا تقرر استخدام الحاوية في المملكة المتحدة، سيلزم اتخاذ خطوات موافقة إضافية قد تستغرق مدة تتراوح بين عامين وثلاثة أعوام، ويُتبع في ذلك، على سبيل المثال، الإجراء الذي حددته شركة Low Level Waste Repository Ltd في المملكة المتحدة [162]. وفي ما يتعلق بالنفايات ذات النشاط النوعي المنخفض، قد يكون من الممكن استخدام العبوات الصناعية. ويمكن أن تكون سعة هذه العبوات أكبر من سعة العبوات من النوع 'باء'، ويمكن تصميمها وترخيصها وتصنيعها بسرعة أكبر بكثير من حاويات النوع 'باء'

وفي محطة تشرنوبل للقوى النووية، استُخدمت مركبات مدرعة بقوة لنقل النفايات من أجل دفنها في موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة ومرفق المرحلة الثالثة في تشرنوبل، لنقل النفايات إما سائبة أو في حاويات. وتُنقل النفايات الضعيفة الإشعاع من الموقع، وهي تتكون أساساً من تربة ملوثة، سائبة باستخدام شاحنات قوية التدريع للتخلص منها في موقع بيرياكوفكا للتخلص من النفايات المشعة. ونُقلت النفايات الناتجة عن التنظيف في المنطقة المحظورة والتي كانت مدفونة في خنادق أو أكمات كنفايات سائبة باستخدام مجموعة متنوعة من الشاحنات المدرعة. وترد في منشورات مثل المرجع [121] والمراجع الواردة فيه رسوم توضيحية لمركبات النقل المستخدمة

ولم تنقل بعد نفايات محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية خارج الموقع. ومع ذلك، تُنقل إلى خارج الموقع عينات من المواد المشعة المتولدة في الموقع لتحليل نشاطها الإشعاعي. وتُخزن عينات المواد المشعة في دلاء ثم تُحمّل على شاحنة وتنقل إلى معهد البحوث الذي يبعد نحو 100 كم عن محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. وينص التشريع على الإجراءات المتبعة في النقل. ولتيسير النقل، تُستخدم تكنولوجيات النظام العالمي لتحديد المواقع وتكنولوجيا المعلومات التي تُعد أيضاً فعالة لخزن البيانات وحفظ السجلات.

وفي حالة محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية، أُرسل أكثر من 000 40 شحنة من المواد المشعة خلال مدة جهود التنظيف. وشمل ذلك شحنات المغسولات الملوثة والعينات المختبرية وفي نهاية المطاف مواد الوقود من قلب المفاعل. وأُجريت الشحنات باستخدام السكك الحديدة والطرق السريعة والجو، بل وحتى البريد الأمريكي. وشكلت التعبئة والنقل جزءاً مهماً من برنامج

التنظيف، وأنشئت منظمة مخصصة للتعبئة والشحن. وجُمعت الحاويات المستخدمة في ثلاث فئات

(أ) حاويات تجارية 'قوية الإحكام'.
(ب) حاويات مصممة وفقاً لمواصفات وزارة النقل في الولايات المتحدة.
(ج) حاويات مرخصة من الهيئة الرقابية في الولايات المتحدة.

واستُخدمت الحاويات القوية الإحكام للمواد المصنفة على أنها أقل من الفئة 'ألف' وشُحنت وفق شروط شحن 'الكميات المحدودة' أو المواد المشعة ذات النشاط النوعي المنخفض. وحُددت مواصفات لهذه الحاويات اشترطت متطلبات خاصة بنوع المادة التي تُشحن في هذا النوع من الحاويات. وعلى سبيل المثال، بالنسبة لأي مواد نفايات، اشتُرط أن تكون الحاوية مصنوعة من المعدن ومزوّدة بغطاء شديد التحمل

وتندرج العبوات من النوعين 'ألف' و'باء' ضمن فئة الحاويات الممتثلة لمواصفات وزارة النقل، واستُخدمت على نطاق واسع في ثري مايل آيلند. ويعتمد امتثال العبوة في هذه الحاويات على الأداء، مما يعني أن العبوة (التي أُعد نسق مكوناتها للاستخدام في الشحن) يتعيّن أن تفي بالمعايير المحددة التي وضعتها وزارة النقل للغرض المقصود. ويحتفظ الشاحن بشهادة اعتماد العبوة.

وتتعلق العبوات المرخصة من الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة بالشحنات التي تزيد عن الفئة 'ألف'. وبالنسبة لهذه الحاويات، يلزم الحصول على ترخيص من الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة. وبالنسبة لهذه الشحنات، كان اختيار العبوة المناسبة لهذا الغرض مهماً لضمان الالتزام بحدود العبوة.

وتطلب نقل البطانات الموجودة في الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة في نظام EPICOR II برميلاً كبيراً. وحُدد برميل الشحن CNS 14-190 باعتباره الخيار الوحيد المتاح. ويظهر الشكل-42 العملية المعدلة. وتم تطوير عدد قليل من البراميل ورُخصت من الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة لتيسير نقل شحنات مواد نفايات محددة من محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية. وتم تطوير برميل الشحن CNS 11-13C من النوع 'باء' لنقل البطانات المستخدمة في النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية لأغراض التخلص منها (الشكل-43). وكان البرميل مؤهلاً للشحنات التي تصل إلى 600 واط، وعلى مدى عمر جهود التنظيف، نُقلت نفايات النظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية التي تحتوي على حوالي $5,7 \times 10^{15}$ بكريل (000 155 كوري) من النشاط الإشعاعي.

الشكل-42- البرميل CNS 14-190 أثناء فحصه في ثري مايل آيلند. بإذن من مختبر أيداهو الوطني [25].

الشكل-43- تجهيز البرميل CNS 1-13C للشحن في ثري مايل آيلند. بإذن من مختبر أيداهو الوطني والهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة [152].

10- الخزن

الدروس الرئيسية المستفادة:

- يمكن النظر في الخزن المركزي والخزن الموزّع حسب طبيعة النفايات وحجمها وتوزيعها الجغرافي.
- قد لا يكون من العملي تعبئة بعض النفايات (مثل المركبات والحطام الكبير، وما إلى ذلك) قبل خزنها؛ ومع ذلك، قد يكون من المستصوب تعبئة المفردات الأصغر حجماً لسهولة التعامل معها.
- يمكن أن ينشأ عن إعادة استخدام المرافق القائمة أو إعادة توظيفها إلى تقليص الجداول الزمنية وزيادة عدد خيارات الخزن المتاحة. وقد تكون هناك حاجة إلى حلول خزن مؤقت أوّلي يمكن نشرها بسرعة في المراحل المبكرة من وقوع الحادث.
- ويتعيّن تطبيق التدابير الأمنية المناسبة على النفايات التي تحتوي على كميات كبيرة من المواد النووية الخاصة و/أو المواد المشعة المحمولة العالية التركيز التي يمكن تحريفها لأغراض الإرهاب الإشعاعي.
- يتعيّن أن تراعي جميع حلول الخزن الاسترجاع النهائي للمواد المخزّنة للمعالجة والتخلص منها في نهاية المطاف.
- سيكون الخزن مطلوباً للنفايات المعالجة وغير المعالجة.
- قد تحتاج النفايات حاويات الخزن إلى الحماية من التأثيرات البيئية (الأمطار والرياح والفيضانات وأشعة الشمس وما إلى ذلك) لمنع تدهور النفايات (خاصة المواد العضوية) وللسيطرة على انتشار التلوث.
- يتعيّن الاحتفاظ بسجلات كاملة ودقيقة لمواقع النفايات المخزنة وأنواعها.
- يتعيّن تزويد مناطق خزن النفايات السائلة بسمات مناسبة لاحتواء الانسكاب.

10-1- اعتبارات أولية

يلزم اختيار التكنولوجيات المناسبة لخزن النفايات داخل الموقع وخارجه. وبالإضافة إلى التكنولوجيات النووية، تتاح مجموعة كبيرة من تكنولوجيات الخزن القائمة للأغراض العامة، ويمكن أخذها في الاعتبار. ويعتمد التخطيط على ما إذا كانت النفايات المراد خزنها سائلة أم صلبة، ومستوى نشاطها الإشعاعي، وما إذا كانت ستُخزن في موقع الحادث أو بالقرب منه، أو

خارج الموقع. وبعد حادث دايتشي، وضعت وزارة البيئة مبادئ توجيهية محددة لخزن النفايات خارج الموقع [163]

وسيتعيّن النظر في الحلول القصيرة الأجل (المؤقتة) والطويلة الأجل. ويُقصد بالخزن المؤقت أو المرتجل مرفق يمكن إنشاءه بسرعة للتعامل مع المشاكل المباشرة المرتبطة بخزن النفايات المجمّعة أثناء انتظار تخطيط مرافق أكثر قوة وبنائها. ولا يُقصد بالخزن عموماً سوى الاستخدام على المدى القصير لحين تشغيل مرفق أكثر قوة. ويتم الخزن المؤقت عموماً في مرفق خزن قائم أو مبنى أو مساحة خارجية، أو في مرافق أو مساحة يمكن تحويلها بسهولة لهذا الغرض. ويمكن خزن النفايات في حاويات بسيطة أو قوية، أو في شكل سائب، بدون حاوية، حسب ما تقتضيه الحاجة. وقد يكون من الصعب تحقيق التدريج الكافي للنفايات في مرفق الخزن المؤقت. ومن المهم أيضاً اتخاذ تدابير لمنع التسرب من هذه المرافق وانتشار التلوث.

ويُقصد بالخزن لأغراض خاصة المرافق الهندسية الطويلة المدى. ويمكن أيضاً استخدام مرافق الخزن المرتجلة والمخصصة لأغراض محددة كمناطق تجميع لفصل النفايات لمزيد من المعالجة أو للتخلص منها. وعلى الرغم من أن المرفق المبني لهذا الغرض قد يكون مصمماً لفترات خزن طويلة، لا يعني ذلك أن النفايات ستُخزن في المرفق إلى الأبد. وسوف تتأثر خطط الخزن بالتخطيط الذي يتم تنفيذه للتخلص النهائي من النفايات. وستؤثر خيارات التخلص المتاحة أو التي سيجري تطويرها على الفترات الزمنية التي يتعيّن أن تبقى فيها مرافق الخزن متاحة. ويمكن إنشاء وحدات خزن مخصصة لأغراض محددة إما في الموقع أو خارجه أو في المناطق المحظورة. ويمكن بناؤها في نظام مركزي أو موزع. وتُصمم هذه المرافق في كثير من الأحيان في شكل وحدات معيارية قائمة بذاتها لاستيعاب احتياجات الخزن الإضافية، حسب ما تقتضيه الحاجة. وتستخدم هذه المرافق في الخزن في انتظار معالجة النفايات تمهيداً للتخلص النهائي منها. ومع ذلك، من الممكن خزن النفايات في هذه الحالة المؤقتة لفترة طويلة، تبعاً لما إذا كان سيجري إيجاد حلول للتخلص النهائي من النفايات ومدى توافر تلك الحلول. وفي ضوء ذلك، من الضروري مراعاة وتخطيط كامل دورة عمر التصرف في النفايات. وقد يتطلب الأمر كثيراً من الوقت والجهد لتخطيط مرفق لخزن النفايات وتشييده وتشغيله. ومن الضروري النظر في الموارد البشرية المطلوبة للنقل وتصميم مرفق الخزن وتصميمه وتشييده وتشغيله، ومدى تأثرها بقرار تحديد الموقع ولا سيما ما إذا كان المرفق سيكون داخل الموقع أو خارجه، وما إذا كان الخزن مركزياً أو غير مركزي

وستمضي عملية التخطيط للخزن وتنفيذها على المراحل التالية:

(أ) تقدير/تقييم حالة النفايات المشعة وكمياتها.

(ب) تقييم إمكانية استخدام مرافق الخزن القائمة؛ وستتضح في هذه المرحلة الأولويات والقيود الزمنية في التعامل مع مختلف أنواع/فئات النفايات.

(ج) التخطيط لمرافق الخزن المؤقت إذا كانت مرافق خزن النفايات المشعة القائمة تفتقر إلى السعة الحالية أو عندما لا توجد مرافق خزن مناسبة. ويمكن النظر في الخيارات التالية:

- المعدات والمواد التي يمكن الحصول عليها بسرعة (الخيام والكتل الخرسانية والألواح الفولاذية للأشغال الهندسية المدنية العامة، وما إلى ذلك).
- الحاويات التي يمكن الحصول عليها بسرعة (الحاويات المرنة، وحاويات الأغراض العامة، وما إلى ذلك).
- المرافق المؤقتة التي يمكن إقامتها (الخيام، والمرافق الخاملة، وغيرها).
- النُظم التي يتطلب ترخيصها فترات زمنية قصيرة (استخدام تكنولوجيات بسيطة ومجربة، وما إلى ذلك). وقد يكون من الممكن تبسيط عمليات الترخيص أو تسريع وتيرتها، تبعاً للعمليات الرقابية المتبعة في الدولة العضو.
- النُظم التي تتطلب فترات قصيرة لتشييدها (تسوية الأرض، ووضع الألواح الفولاذية، والتغطية بالتربة، وما إلى ذلك).
- النُظم المعزولة (اختيار منطقة نائية تحل فيها المسافة محل التدريع).

(د) تشييد مرافق خزن مؤقت وتشغيلها.

(هـ) التخطيط لخزن النفايات والتخلص منها على المدى الطويل؛ وسواءً كانت هذه المرافق مطلوبة أو غير مطلوبة، يعتمد ذلك على الاستراتيجية التي سيجري الأخذ بها في نهاية المطاف للتخلص من النفايات.

10-2- المسائل المتعلقة بتخطيط الخزن

تدعم المبادئ التالية المتعلقة بالوقاية من الإشعاعات تصميم مرافق الخزن وتطبيق ممارسات الخزن ويتعيّن تطبيقها عند القيام بذلك:

(أ) الاحتواء: تجنب انتشار المواد المشعة بسبب الظروف الجوية، مثل الأمطار والرياح، أو النشاط البشري أو الحيواني، وما إلى ذلك.

(ب) العزل: الحد من التعرض الروتيني للإشعاعات المنبعثة من النفايات المشعة التي تكون قيد الخزن.

(ج) التدريع: الحد من تعرض العمال للنفايات المشعة المخزّنة.

(د) المدة الزمنية: تقليل زمن تعرض العمال للإشعاعات.

وعلى سبيل المثال، في حالة وقوع حادث، من المرجح ألا يكون هناك وقت كافٍ لبناء هيكل خزن خرساني يوفِّر حماية للنفايات. وبالتالي، قد يلزم توفير التدريع المطلوب بوسائل أخرى. وعلى سبيل المثال، إذا استخدمت خيمة للخزن المؤقت، قد تُشترط حماية عامة الجمهور عن طريق وضع الخيمة في مكان معزول، مع فرض قيود على الوصول إليها. وتشمل تدابير الحد من تعرض العمال للإشعاع إنشاء جدران حماية مؤقتة (على سبيل المثال، الكُتل الخرسانية المستخدمة في الأشغال الهندسية المدنية العامة)، وتقصير مدة العمل، وتحديد منطقة الخزن بشكل واضح، وتحديد إجراءات مناولة النفايات ووضعها ورصدها

وسيكون الاعتبار الإضافي للخزن على المدى القصير والطويل هو التطبيق الوقائي لأحكام أمنية إضافية من أجل حماية فئات معيّنة من المواد من السرقة والتحريف لاستخدامها في أغراض شائنة. ويتعيّن تطبيق التدابير الأمنية المناسبة على النفايات التي تحتوي على كميات كبيرة من المواد النووية الخاصة و/أو المواد المشعة المحمولة العالية التركيز التي يمكن تحريفها لأغراض الإرهاب الإشعاعي. وعلى سبيل المثال، تخضع عموماً المقادير المحددة غير المؤثرة من المواد النووية الخاصة لضوابط أمنية محددة وضوابط بشأن المساءلة عن المواد، ويمكن تطبيقها في أقرب وقت ممكن عملياً بعد وقوع حادث. وكنتيجة طبيعية لذلك، هناك اعتراف بالمخاوف الدولية بشأن سرقة المواد المشعة أو تحريفها بكميات مثيرة للقلق، ولا سيما المواد المحمولة. وفي ضوء السلوك الانتحاري لبعض الأفراد المتطرفين، ربما لم يعد من المجدي تطبيق المفاهيم السابقة القائلة بأن مستويات الإشعاع العالية المرتبطة بهذه المواد تجعلها تحمي نفسها بنفسها. ومن المناسب تطبيق معايير معقولة لتوفير التدابير الأمنية، مثل الحواجز و/أو مراقبة المواد. وعلى سبيل المثال، تقتضي اللائحة المعمول بها في الولايات المتحدة (CFR 37 10) تطبيق مثل هذه التدابير الأمنية على تركيزات محددة من النويدات المشعة للمواد المحمولة (على سبيل المثال، يحتوي مصدر من الفئة 2 من الكوبلت-60 على ≤ 0,3 تيرا بكريل)

ويتعيّن معالجة المسائل التالية القصيرة الأجل أثناء التخطيط للخزن:

(أ) مكان مرافق خزن النفايات: داخل الموقع أو خارجه، أو داخل مناطق التلوث المحظورة أو خارجها، واتخاذ ترتيبات خزن مؤقت موضوعي في مناطق التلوث الساخنة بهدف الانتقال لاحقاً، على سبيل المثال، إلى إزالة التلوث أو التكييف والخزن على المدى الأطول.

(ب) نوع مرفق الخزن وطريقة استخدامه: مرفق مؤقت (مثل برميل للنفايات المشعة القوية الإشعاع، أو حاوية كبيرة، أو خيمة خزن مؤقت، أو ترتيبات بشأن المواد السائبة)، والاستخدام المؤقت لمرفق خزن قائم بالفعل، وما إلى ذلك، ومنهجية وضع النفايات واسترجاعها في المستقبل.

(ج) الفترات المطلوبة لخزن النفايات: الفترة الزمنية المتوقعة قبل توافر مرفق خزن طويل الأجل للنفايات، وضمان القدرة على التحمل على المدى القصير/المتوسط.

(د) المعالجة الفورية للنفايات المشعة، حسب ما تقتضيه الضرورة؛ ومن ذلك على سبيل المثال، أنشطة إزالة التلوث الإشعاعي وتقليل حجم النفايات.

وبالنظر إلى أن الاعتبارات المذكورة أعلاه تتعلق فقط بالتدابير المؤقتة، من المهم النظر في التخطيط لحلول خزن أطول أجلاً و/أو دائمة ووضع هذه الحلول، إلى جانب أي مرافق معالجة وتكييف في آن واحد بالقدر الممكن عملياً

وفي حين أن من المسلّم به أن الضغوط الزمنية ستقتضي ضمان احتواء المواد المشعة الخطرة على الفور، من المهم إنشاء وحفظ سجلات جيدة لجميع النفايات التي يتم تحديدها والتصرف فيها. ومن المهم أيضاً ملاحظة سلوك الملوثات الموجودة في النفايات وكيفية تفاعلها مع البيئة. وعلى سبيل المثال، حتى مستويات التلوث المنخفضة نسبياً يمكن أن تولّد تركيزات عالية في المياه المتسربة عندما تُخزّن كمية كبيرة من النفايات، وتكون الملوثات قابلة للذوبان، ولا يتم توفير حماية سليمة للمواد المخزّنة لحمايتها من تسرب المياه. وقد يتطلب ذلك حماية إضافية للصرف (على سبيل المثال، تحويل مسار مياه الأمطار والمياه الجوفية بعيداً عن مرفق الخزن لمنع تلوثها).

وعلاوة على ذلك، من المهم أيضاً تقييم وفهم مسائل التفاعلات الكيميائية المرتبطة بالنفايات. ويُبرز حدث وقع في شباط/فبراير 2014 في المحطة التجريبية لعزل النفايات في الولايات المتحدة الأمريكية المشاكل المتعلقة بالمواد غير المتوافقة في النفايات المخزّنة. وحدث انطلاق إشعاعي ضئيل من خلال قناة هواء العادم بسبب تمزق برميل خزن النفايات (الشكل-44) في المقصورة رقم 7 من المستودع الجيولوجي العميق [164]. وخلصت التحقيقات في سبب الحادث إلى أن تصدع البرميل كان ناتجاً عن خليط غير متوافق من نفايات أساسها النترات مع مادة ممتزة عضوية تُستخدم في عملية التعبئة. ومن الممكن أيضاً تحفيز التفاعل بواسطة مواد النفايات الأخرى الموجودة في البرميل. وللمساعدة في تقصي الحدث، صُنعت كاميرا يمكن أن تصل إلى 25 م تقريباً داخل الغرفة ومزوّدة بقدرة على الدوران المتأرجح بما يصل إلى 10 امتار تقريباً. ويسمح النظام بإجراء فحص عن بُعد للبرميل المتصدع والبراميل الأخرى داخل الغرفة. وينصب الدرس الرئيسي المستفاد من هذا الحدث على الإخفاق في توقع الخطر الذي ينشأ عن خلط مواد عضوية مع نفايات ملحية أساسها النترات والإخفاق في تقديم تحليل مسبق لهذا الخطر. وأدى ذلك إلى تقييم غير مناسب لمحتويات البرميل وعدم امتثال مولّد النفايات لمعايير قبول النفايات في المحطة التجريبية لعزل النفايات. وكانت الضوابط الإجرائية والتشغيلية الإضافية أقل من كافية. وشملت النتائج الإضافية التي أسفر عنها التحقيق في الحادث من حيث ظروف الموقع عدم كفاية تصميم نظام التهوية وبرامج إدارة الأمان، مما أدى إلى تفاقم تأثيرات الحادثة [165].

الشكل-44- برميل مشقوق في المقصورة رقم 7، الغرفة 7، من المستودع الجيولوجي في المحطة التجريبية لعزل النفايات. بإذن من وزارة الطاقة في الولايات المتحدة [164]

واكتُشف في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية في عام 2015، غاز الهيدروجين في بعض الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة المحتوية على ملاط النظام المتقدم لمعالجة السوائل التي تكون قيد الخزن في مرفق خزن داخل الموقع. وبالإضافة إلى ذلك، تكونت برك من السوائل الشفافة على عدة حاويات، واعتُبر ذلك مسألة ذات صلة. وقامت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية بالتحقيق في هذه المسائل وخلصت إلى أنها ربما تكون قد حدثت بسبب ما يلي

(أ) تولدت محاليل طافية بسبب ترسب الملاط في الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة؛

(ب) تولدت الغازات عن طريق التحليل الإشعاعي للمياه الموجودة في ملاط الرواسب.

(ج) تؤدي الغازات إلى زيادة حجم ملاط الرواسب، ويرتفع بالتالي مستوى المحلول.

(د) يفيض المحلول من الحاوية التي على مستوى عالٍ من السلامة ويخرج في بعض الحالات من الفتحات والفجوات الموجودة في الأغطية ليتراكم فوقها.

وخلصت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية إلى أن إمكانية اشتعال غاز الهيدروجين المتولد عن التحلل الإشعاعي للمياه في الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة كان منخفضاً. وعلاوة على ذلك، ولمنع التسرب من الغطاء، قامت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية بتصريف السائل المتراكم من الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة المخزنة وبدأت في ملء مزيد من الحاويات بكمية أقل من الملاط لمنع التسرب وتراكم السوائل في المستقبل على الأغطية [166]

10-3- اختيار حلول الخزن المناسبة

تتطلب إدارة الحوادث الواسعة النطاق في مراحلها المبكرة اتخاذ قرارات استراتيجية سريعة بشأن التصرف في النفايات المشعة على الأجل القصير من أجل التقليل إلى أقصى حد ممكن عملياً. ويمكن أن تشمل هذه القرارات النظر في ما يلي:

(أ) ما إذا كانت النفايات ستُعالج أو سيزال تلوثها لتقليص حجمها و/أو تقليل أضرارها، أو ما إذا كانت النفايات ستُجمع وسيجري احتواءها وخزنها، في انتظار مزيد من التوضيح بشأن استراتيجية التصرف فيها.
(ب) ما إذا كانت إمكانات الخزن المتاحة ستُستخدم أو سيجري تعديل مساحة المبنى القائم، أو توفير مرافق خزن مؤقت
(ج) الجداول الزمنية لاستخدام المرافق المؤقتة.
(د) اختيار نوع الحاوية ومرفق الخزن.
(هـ) استخدام الخزن المركزي أو الخزن الموزع.
(و) اتخاذ ترتيبات خزن دائم طويل الأجل.

ويُلخص الجدول 11 متطلبات الاختيار والعوامل ذات الصلة التي يستند إليها القرار.

الجدول-11- عملية اختيار خزن النفايات الناتجة عن الحوادث

المتطلبات	الاحتمالات	العوامل المؤثرة في اتخاذ القرار
المعالجة أو الخزن	الجمع والخزن الفوريين مقابل المعالجة الفورية لإزالة التلوث/تقليص الحجم/تقليل أضرار النفايات	— كميات النفايات — توافر تكنولوجيات التنظيف — توافر سعة الخزن — القيود الزمنية — معدلات الجرعة الإشعاعية/مستويات التلوث
متطلبات مرافق الخزن المؤقت والأعمار الزمنية المرتبطة بها	استخدام مرافق الخزن القائمة مقابل توفير مرافق خزن مؤقت	— سعة مرافق الخزن القائمة — كميات النفايات — تحمل مرافق الخزن المؤقت — مدى قبول الجمهور لمرافق الخزن المؤقت
اختيار نوع معدات الخزن المؤقت	النفايات الصلبة: حاوية، أو خيمة، أو ما إلى ذلك. النفايات السائلة: صهريج جاهز للاستخدام، أو ما إلى ذلك.	— مستوى النشاط الإشعاعي للنفايات — مكان مرافق الخزن (أي العزل) — كميات النفايات — الطريقة المتبعة في معالجة/تكييف النفايات — التحمل — التدريج وإمكانات الاحتواء
اختيار نوع الخزن	الخزن من النوع المركزي مقابل الخزن من النوع الموزّع	— الظروف الجغرافية والاجتماعية للمكان — كفاءة الخزن — نقل النفايات — تشغيل مرافق الخزن وصيانتها

10-4- هياكل الخزن المؤقت المرتجلة

يتطلب تخطيط وتحديد مواصفات الخزن المؤقت المرتجل (مثل الخيام أو حاويات النفايات الصلبة، أو صهاريج النفايات السائلة، أو توليفة منها) من أجل كسب الوقت لخزن النفايات المشعة في مرفق خزن مبني لهذا الغرض، فهم البارامترات الأساسية، مثل أحجام النفايات المتولدة، وتركيزات النشاط الإشعاعي، وأنواع النفايات. وقد لا تكون الخبرة في مجال الخزن التقليدي مفيدة

ومن الضروري النظر في الخيارات التالية لتقليل التعرض للإشعاع في الخزن المؤقت المرتجل للنفايات

(أ) إنشاء مخزن مؤقت مرتجل في منطقة معزولة ومنفصلة.

(ب) وضع هذه النفايات في معدات مؤقتة مرتجلة (على سبيل المثال، حاوية أو خيمة).

(ج) إضافة درع مؤقت (على سبيل المثال، تغطية الصهريج بالتربة، واستخدام حاوية مزودة بقدرات تدريعية، مثل سُمك الجدار الكبير، واستخدام الكتل الخرسانية المستخدمة في أشغال الهندسة المدنية العامة).
(د) استخدام حاويات القمامة المملوءة بالتربة كجدران للتدريع.
(هـ) استخدام السلال المبطنة داخل أقبية محمولة ومدرعة.
(و) توضيح خطوات العمل لتقليص المدة التي يستغرقها خزن النفايات.
(ز) عمر مرفق الخزن.

ومن الضروري أن يؤخذ في الاعتبار أن هذا الخزن حل قصير المدى لحين تخطيط وتنفيذ الخطوة التالية للخزن المؤقت المحدد الغرض. ولخُصت الخيارات المختلفة في الجدول 12، كما وضحت الأمثلة في الشكلين 45 و46.

ويمكن للخزن المؤقت للمياه الملوثة أن يسبب مشاكل كبيرة إذا كانت الكميات المستخدمة كبيرة، كما هو الحال في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية. ولتيسير التشييد، استُخدم في البداية صهريج من الأنواع المزودة بوصلات مشفهة الحافة (الشكل-47، الجزء العلوي)، ولكن حدث تسرب من الوصلات وغُيِّرت الصهاريج إلى أنواع ملحومة، كما هو موضح في الشكل-47 (الجزء السفلي).

وحدث تسرب للمياه الملوثة من الصهاريج التي لم تكن مزودة بعدادات لحساب منسوب المياه، ولم يُكتشف انخفاض منسوب المياه. وقررت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية تركيب عدادات لمعرفة منسوب المياه في الصهاريج. ويوفِّر نظام المصدات المزدوجة حول الصهاريج حماية إضافية في حالة حدوث تسرب

الجدول-12- خيارات خزن النفايات في مرافق الخزن المؤقت المرتجلة

النفايات المستهدفة	الخزن داخل الموقع	الخزن خارج الموقع
النفايات الصلبة	— خيمة (مع/بدون كتلة خرسانية للتدريع) — حاوية (مع/بدون جدار سميك للتدريع) — أخرى	— أكياس بلاستيكية (عزل الأكياس التي تحتوي على نفايات قوية الإشعاع في الجزء الأوسط أو الجزء السفلي، مع/بدون تغطية بالتربة للتدريع) — الخزن في منطقة ملوثة بالفعل
النفايات السائلة	— صهريج جاهز للاستخدام (مع/بدون تغطية بالتربة للتدريع) — إعادة استخدام معدات الخزن الخاملة	— صهريج جاهز للاستخدام

الشكل-45- مواقع التجميع المؤقتة للتربة والحطام الملوث في بلدة أوكوما، محافظة فوكوشيما. بإذن من بلدة أوكوما.

الشكل-46- صهاريج خزن المياه الملوثة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية.

الشكل-47- صهاريج خزن المياه الملوثة السائبة في فوكوشيما: مشفهة بحواف رابطة (الجزء العلوي) وملحومة (الجزء السفلي). بإذن من شركة طوكيو القابضة للطاقة الكهربائية.

10-5- هياكل الخزن المؤقت المحددة الغرض

في انتظار المعالجة النهائية للنفايات والتخلص منها، لا غنى عن إنشاء مخازن مؤقتة مبنية لهذا الغرض من أجل تحقيق وقاية مستقرة ومناسبة للجمهور والعاملين من الإشعاعات. وعند التخطيط وتحديد المواصفات الخاصة بالخزن المؤقت المحدد الغرض، من الضروري مراعاة الخيارات والشروط التالية

(أ) رصد النفايات، ومعالجتها في المستقبل، ونقلها، وتعبئتها، والتخلص منها.
(ب) البنية الأساسية.
(ج) مكان مرفق الخزن.

(د) طبيعة النفايات وخصائصها.
(هـ) توافر الأفراد المتخصصين للتصميم/التشييد/التشغيل/الصيانة.
(و) المسؤوليات المتعلقة بالتخطيط والتشييد والتشغيل.
(ز) عمر مرفق الخزن.
(ح) الحاجة إلى التفتيش والاسترجاع.
(ط) متطلبات التفتيش على الهيكل والنفايات و/أو عبوات النفايات.
(ي) استرجاع النفايات و/أو عبوات النفايات.

ويُعد مفهوم المرفق المركزي لخزن النفايات المشعة المتولدة بكميات كبيرة على مساحة واسعة خياراً جيداً من الناحية الاقتصادية والعملية. وعند التخطيط لمرفق خزن مركزي من هذا القبيل، من الضروري أيضاً التخطيط في الوقت نفسه لكل من معالجة النفايات ونقلها إلى المرفق المركزي، وكذلك للتخلص منها في نهاية المطاف.

وتتشابه المفاهيم الخاصة بمرفق الخزن المحددة الغرض مع المفاهيم الموضحة في المرجع [167]، على الرغم من أنها قد تكون أوسع نطاقاً، وذلك بسبب الكميات الكبيرة من النفايات المراد التصرف فيها. ويوضح الجدول 13 إمكانية تطبيق التكنولوجيات المختلفة المتاحة

10-5-1- الخزن المحدد الغرض في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

ويظهر في الشكل-48 مثال لمرفق محدد الغرض من أجل خزن مؤقت لأبراج امتزاز السيزيوم في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية.

وتُخزن أوعية امتزاز السيزيوم في برابخ صندوقية مصنوعة من الخرسانة. ويبلغ معدل الجرعة خارج البربخ الصندوقي نحو 10 مليسيفرت/ساعة. ويزوّد نوع آخر من أوعية امتزاز السيزيوم، وهو النوع النشط المبسّط لاسترجاع الماء واسترداده، وهو مزود بدرع، ويُقيّم معدل الجرعة عند نحو 1 مليسيفرت/ساعة. وتُخزن الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة في البرابخ الصندوقية المصنوعة من الخرسانة لمنع وصول التأثير السماوي إليها وحمايتها من الإشعاعات فوق البنفسجية

10-5-2- الخزن المحدد الغرض في محطة تشرنوبل للقوى النووية

تُخزّن النفايات المشعة السائلة في مرافق خزن مشيّدة بطريقة خاصة: يُحتفظ بالنفايات السائلة في خمس حاويات بسعة 5000 م^3، ويُحتفظ بالنفايات المشعة السائلة - الصلبة في عشرة صهاريج بسعة 1000 م^3. وتُعالج النفايات السائلة ويتم تكييفها في محطة معالجة النفايات

المشعة السائلة ويُخزن المنتج (الشكل-49) في انتظار نقله والتخلص منه لاحقاً في قبو خرساني بالقرب من مرافق التخلص السطحي في مجمع فيكتور.

وبالمثل، يوفّر المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة أيضاً خزناً مؤقتاً لحاويات النفايات (الشكل-50) قبل نقلها إلى مرافق التخلص من النفايات بالقرب من سطح الأرض في مجمع فيكتور. وبالإضافة إلى ذلك، يُتاح في موقع محطة تشرنوبل للقوى النووية خزن مؤقت لعبوات النفايات القوية الإشعاع والنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الطويلة العمر، في انتظار توافر مستودع جيولوجي عميق في المستقبل. وتُكيَّف أولاً النفايات في برميل بسعة 165 لتراً، ثم يُحاط هذا البرميل بملاط داخل برميل سعته 200 لتر.

الجدول-13- التطبيقات النموذجية لمختلف تكنولوجيات الخزن

نوع الخزن	نفايات غير مكيّفة			نفايات مكيّفة	
	صلبة	سائلة	سائبة/رُكام	نفايات ضعيفة الإشعاع	نفايات متوسطة الإشعاع/ نفايات قوية الإشعاع
صهريج		X			
صومعة فوق الأرض					X
صومعة فوق الأرض					X
مستودع محصّن	X		X	X	X
قبو مدرّع فوق الأرض					X
خندق	X		X	X	X
مبنى مدرّع	X			X	X
مبنى غير مدرع	X		X	X	X [أ]
أكمة			X		
برميل					X
حاوية خرسانية	X		X	X	X

[أ] عند الاستخدام مع حاوية مدرعة.

الشكل-48- مثال يوضح خزن أبراج امتزاز السيزيوم في فوكوشيما. بإذن من شركة طوكيو القابضة للطاقة الكهربائية

وبالإضافة إلى إمكانات التخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الطويلة العمر، يوفِّر مجمع فيكتور أيضاً مرافق الخزن التالية:

(أ) مرفق الخزن بالقرب من سطح الأرض للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الصلبة المحتوية على نويدات مشعة طويلة العمر (النفايات المشعة الصلبة - 3)؛
(ب) مرفق الخزن بالقرب من سطح الأرض للنفايات القوية الإشعاع الصلبة المحتوية على نويدات مشعة طويلة العمر (النفايات المشعة الصلبة - 4)؛
(ج) مرفق خزن النفايات القوية الإشعاع المزججة والنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع الطويلة العمر.

ويجري تطوير مرفق لخزن الوقود النووي المستهلك في تشرنوبل (محطة القوى النووية).

01-5-3- الخزن المحدد الغرض في محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية

بعد مدة قصيرة من وقوع حادث ثري مايل آيلند، تبيّن أن خزن المياه مشكلة مهمة [2]. وفي الوقت الذي وقع فيه الحادث، كانت سعة خزن المياه 000 680 لتر. ومع ذلك، لم يكن هناك سوى 000 190 لتر من المساحة المتاحة. وسرعان ما أصبحت عملية التصرف في المياه وخزنها

الشكل-49- قاعة لخزن السوائل المعالجة في محطة تشرنوبل لمعالجة النفايات المشعة السائلة. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

الشكل-50- مرفق خزن مؤقت للنفايات الصلبة في المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة تظهر فيه حاويات من النوع KZ-3 لخزن النفايات الصلبة الضعيفة والمتوسطة الإشعاع القصيرة العمر المعاد معالجتها. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية".

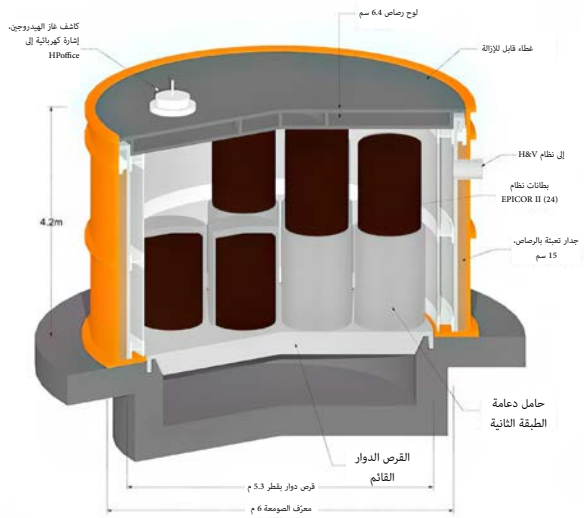
ضرورة تشغيلية. وأُجريت عملية تجميع أول مرفق لخزن المياه (الذي يُشار إليه باسم 'مزرعة صهاريج الخزن') في حوض الوقود المستهلك 'ألف' ويتكون من ستة صهاريج بسعة متاحة قدرها 000 416 لتر. واستُخدمت هذه الصهاريج لخزن المياه القوية الإشعاع. وبسبب منع التصريف المباشر للمياه المعالجة إلى نهر سسكويهانا، باتت هناك حاجة لخزن المياه المعالجة. وأنشئ صهريجان لاحتواء المياه المعالجة التي لا تزال تحتوي على كميات ضئيلة من النشاط الإشعاعي. وأُدخلت هذه الصهاريج المصنوعة من الفولاذ الكربوني المطلية بالإيبوكسي بسعة 1,4 مليون لتر في الخدمة في عام 1981 بالتزامن مع زيادة معالجة المياه المرتبطة بنظام EPICOR II، والنظام الغاطس لإزالة الأملاح المعدنية. واستُخدمت عدة صهاريج أخرى حول المحطة في بعض الأحيان. وعلى سبيل المثال، استخدم صهريجان من الفولاذ المقاوم للصدأ بسعة 000 850 لتر لحفظ المياه الممتزجة بحمض البوريك والمحتوية على مستويات منخفضة من الإشعاع. وأُعيد بعد ذلك تدوير هذه المياه واستخدامها كمياه للشطف قبل المعالجة

وكانت سعة خزن النفايات الصلبة ضئيلة جداً قبل وقوع الحادث. ومع ذلك، وبمجرد الشروع في عملية التنظيف، بدأت النفايات الصلبة تتراكم بسرعة في الموقع [1]. وكانت هذه النفايات الصلبة التي تكونت في مرحلة مبكرة عبارة عن نفايات ومواد التبادل الأيوني المستهلكة. ومع بدء عملية التنظيف، سيطرت المرشحات الأولية في نظام التبادل الأيوني والبطانات المملوءة بالراتنجات على مستويات نشاط للنفايات الصلبة. وفي ضوء المسائل الرقابية والسياسية التي نشأت في أعقاب الحادث، كان شحن النفايات خارج الموقع للتخلص النهائي منها مسألة صعبة. ولذلك، أصبحت مرافق الخزن المؤقت ضرورية. وصُممت هذه المرافق بحيث تكون مرنة بالقدر الذي يمكنها من استيعاب خزن النفايات وتجميعها للشحن خارج الموقع. وبعد وقوع الحادث مباشرة، أُعيد تنظيم نسق مكونات المرافق القائمة لخزن النفايات. واستُخدمت مظلة خزن الطلاء لأغراض الخزن المؤقت للنفايات المتوسطة التلوث، والملابس الواقية، والنفايات الناتجة عن إزالة التلوث، وما إلى ذلك. وأنشئت منطقة خزن مؤقت لوسائط التبادل الأيوني بجوار أبراج التبريد في الوحدة 2 في ثري مايل آيلند داخل منطقة مزوّدة بمصدات. واستُخدمت في البداية وحدة مناولة المواد المشعة في منطقة التجارب الشمالية رقم 607 (Hot Shop of TAN-607) لخزن البطانات المستخدمة في نظام EPICOR II في نسق على شكل صومعة قبل الشحن للتخلص منها (الشكل-51). ومع ذلك، نشأت بسرعة الحاجة إلى مرافق خزن مؤقت مصممة هندسياً. وأُدخل مرفق الخزن المعروف باسم 'حقل النفايات' في الخدمة. ويتكون المرفق المؤلف من وحدات معيارية من وحدتين للخزن وحوض صرف مشترك. وسمح التصميم بإضافة وحدات أخرى، ولكن لم تكن هناك حاجة إليها على الإطلاق. وتحتوي كل وحدة على 6 صفوف من 10 خلايا. ويرد في الشكل-52 رسم تخطيط يوضح الوحدة المعيارية. ويبلغ سمك جدران الوحدة متر واحد، مع غطاء بسمك 1 م لتوفير الحماية اللازمة. وكان قطر كل خلية مترين وارتفاعها 4 م. وتم تركيب خط صرف في كل خلية لصرف المياه في الحوض. واستُخدم نظام رافعة لتحريك بطانات التبادل الأيوني وبراميل الخزن داخل الخلايا وخارجها. وأنشئ المرفق

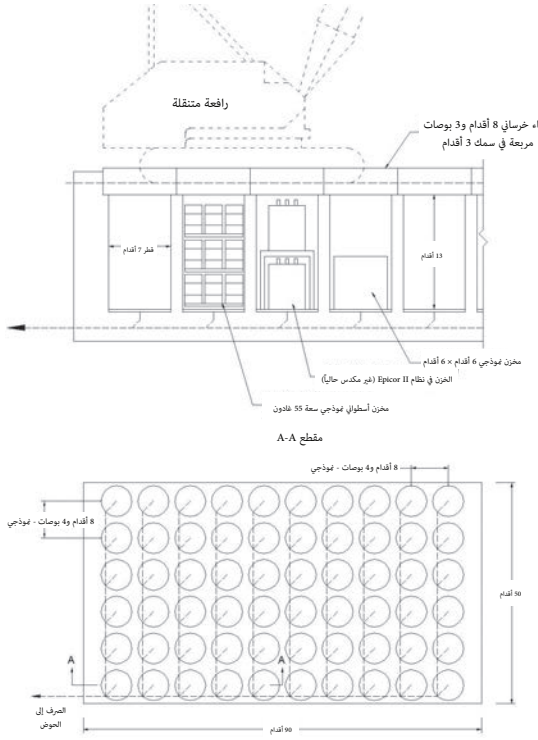
المؤقت لتجميع النفايات الصلبة في عام 1982 من أجل توفير مساحة خزن إضافية لاستيعاب براميل النفايات الضعيفة الإشعاع (بسعة 208 لترات) وصناديق النفايات الضعيفة الإشعاع. ومرة أخرى، أتاح التصميم تيسير شحن المواد إلى مرافق التخلص من النفايات خارج الموقع.

وبدأ تشغيل مرفق مناولة النفايات وتعبئتها في عام 1987. واستُخدم هذا المرفق الكبير لتجميع النفايات الصلبة وتعبئتها ولإزالة التلوث. وتستند مبررات التكلفة التي تبلغ 1,7 مليون دولار أمريكي إلى التخفيض الكبير في أحجام النفايات (تحسينات بنسبة تتراوح بين 25 و30 في المائة في كفاءة التعبئة) والسماح بالإفراج التجاري عن المواد الملوثة. وقُلص حجم النفايات القابلة للضغط باستخدام ضاغطة التربة الأسطوانية التي رُكبت في المبنى الإضافي، ومعالجة الوقود لزيادة تقليص حجم النفايات.

صومعة نظام EPICOR II



الشكل-51- رسم تخطيطي لصومعة في نظام EPICOR II في وحدة مناولة المواد المشعة في منطقة التجارب الشمالية رقم 607 في ثري مايل آيلند. بتصرف من المرجع [25].



الشكل-52- رسم تخطيطي لمرفق لتجميع النفايات الصلبة في ثري مايل آيلند. بتصرف من المرجع [2].

11- التخلص من النفايات

الدروس الرئيسية المستفادة:

- أدى عدم إجراء جرد للنفايات وعدم توثيقها وتحديد خصائصها وفصلها بشكل مناسب إلى تقليص خيارات التخلص منها في المستقبل والتسبب في زيادات كبيرة في التكاليف.
- يتطلب دفن النفايات غير المعزولة وغير المحددة الخصائص بسرعة وبدون تخطيط عملية استرداد وإعادة دفن كثيفة الموارد بتكلفة كبيرة، إلى جانب تعرض العمال لجرعات إشعاعية كبيرة.
- أدّت المكونات غير الإشعاعية الموجودة في النفايات إلى زيادة التعقيدات التقنية وتكاليف التخلص من النفايات.

- يمكن أن يؤدي تحديد تصاميم التخلص من النفايات استناداً إلى الخبرة في المرافق القائمة إلى التعجيل بتطوير قدرة جديدة للتخلص من نفايات الحوادث.
- تُشكّل المشاركة المناسبة التوقيت وتبادل المعلومات بشفافية مع المجتمعات المحلية وأصحاب المصلحة الآخرين جزءاً مهماً من تخطيط التخلص من النفايات وتنفيذه.
- يُشكل تحديد مواقع مرافق التخلص الجديدة مسألة مثيرة للجدل، بغض النظر عما إذا كان الموقع المقترح قريباً من موقع الحادث أو بعيداً عنه.
- يؤدي تخفيف النفايات في محيط الحادث عن طريق الحرث تحت التربة إلى زيادة إجمالي أحجام النفايات وتكاليف التخلص منها.
- يؤدي تجميع النفايات أو خزنها بصورة مؤقتة أو استخدام السوائل لإزالة التلوث من المركبات أو المعدات أو المواد الأخرى في ظل ظروف احتواء غير مناسبة إلى تلويث التربة والمياه الجوفية، مما يزيد من أحجام النفايات وتكاليف التخلص منها.
- أدى استخدام وحدات ذات سعة كبيرة جداً للتخلص من النفايات، والتي شيدت على مراحل، إلى تحقيق وفورات الحجم التي أدّت إلى خفض كبير في تكلفة الوحدة والتكاليف الإجمالية للتخلص من النفايات.
- أدى التخلص من النفايات بطريقة غير متوافقة مع حالة الأمان (على سبيل المثال في أماكن غير مناسبة بيئياً أو بدون حواجز هندسية كافية) إلى الإغلاق المبكر لمرافق التخلص من النفايات واستردادها وإعادة التخلص منها في المستقبل بتكلفة كبيرة.
- في حالات الطوارئ الكبيرة الماضية، ثبت أن الأموال المتاحة غير كافية للتخلص من النفايات، وتطلب ذلك في بعض الأحيان تمويلاً دولياً. وركز هذا الدعم بشكل عام على أولويات أخرى غير التخلص من النفايات.

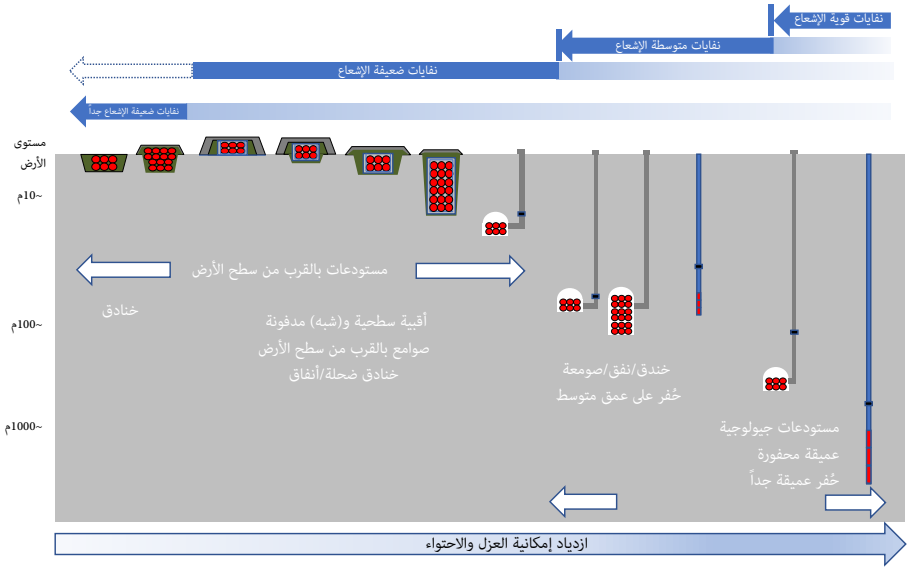
ستتطلب النفايات التي تنتج بسبب التصدي للحوادث والتنظيف والمعالجة تخلصاً منها في نهاية المطاف، داخل الموقع أو خارجه. وتبعاً لمستوى التخطيط الوطني المسبق الذي يتم إجراؤه بالفعل، قد يكون من الممكن التخلص من بعض النفايات بصورة دائمة أثناء أعمال المعالجة المبكرة. وسيتطلب التخلص من النفايات المتبقية تطوير مرافق جديدة - وهي عملية يمكن تسريع وتيرتها إذا أُجري تخطيط مسبق كافٍ (انظر القسم 4). وقد يلزم تأجيل القرارات المتعلقة بالتخلص من النفايات المتبقية عندما يكون التخلص منها في الموقع غير مناسب وعندما لا توجد استراتيجية وطنية شاملة للتصرف في النفايات. وعلى سبيل المثال، يمكن أن يشمل الحل الأنسب للتخلص من بعض النفايات استخدام مرفق وطني متعدد الاستخدامات. ويمكن ألا يكون متاحاً لعدة عقود. وهذه الحالة الثانية يمكن أن تنشأ في جميع الدول الأعضاء تقريباً في ما يتصل بتوجيه بعض فئات النفايات الناتجة عن الحوادث إلى مرفق وطني للتخلص الجيولوجي من النفايات الأقوى إشعاعياً. ويتعيّن بالتالي تحقيق تكامل وثيق بين تخطيط خزن النفايات

والتخلص منها. ويمكن عموماً ملاحظة اتباع خيارات التخلص من نفايات الحوادث الاستراتيجية نفسها المتبعة للتخلص من النفايات الناتجة عن العمليات العادية في المرافق. ونوقشت خيارات التخلص من جميع فئات النفايات في المبادئ والنُهج المستخدمة في تصميم مستودعات النفايات المشعة [26]. ويلخص الشكل-53 مفاهيم التصميم في مجال التخلص من النفايات.

وتُثار عدة أسئلة عند وضع استراتيجية للتخلص من النفايات وتنفيذ هذه الاستراتيجية. وتشمل هذه الأسئلة ما يلي

- كيف يمكن أن تؤثر أحجام النفايات على أنشطة التخلص من النفايات على المستوى الوطني؟
- ما هي أنواع المرافق التي قد تكون مطلوبة للتخلص من مختلف أنواع النفايات؟
- ما مقدار حجم النفايات المطلوب التخلص منها؟
- كيف يمكن العثور على مواقع لمرافق التخلص من النفايات؟
- كيف يمكن تحقيق المستوى الأمثل لتشغيل مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث؟

وتُفحص هذه المسائل العامة بالتتابع في الأقسام التالية من هذا الفصل.

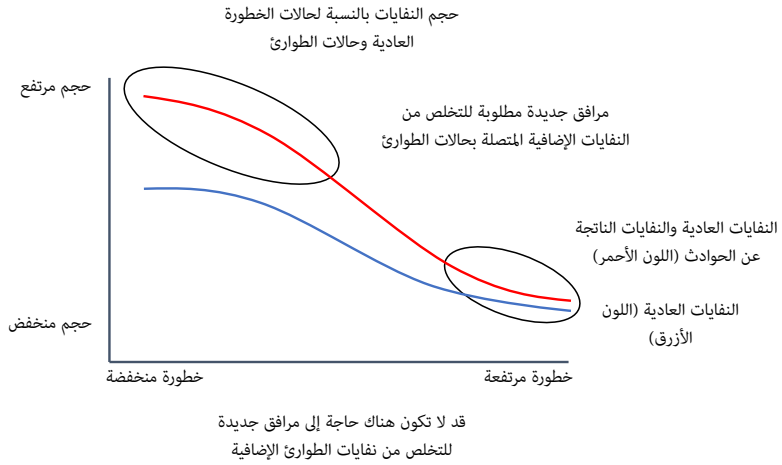


الشكل-53- رسم توضيحي تخطيطي لمجموعة خيارات التخلص التي تتراوح بين التخلص بالقرب من سطح الأرض والتخلص العميق، التي تؤخذ في الاعتبار حالياً أو التي طُبقت على مختلف فئات النفايات المشعة. مستنسخ من المرجع [26]

11-1- آثار حجم النفايات على أنشطة التخلص من النفايات على المستوى الوطني

يعتمد تحليل الحلول المناسبة للتخلص من النفايات على الخطر الذي تمثله الأنواع المختلفة من النفايات التي يتم التصرف فيها. وفي سياق المناقشة التالية، يُستخدم مصطلح 'الخطر' بمعناه العام الذي يشمل المحتوى من النويدات المشعة (النشاط الإشعاعي) والثبات (العمر النصفي)، وكذلك المكونات الكيميائية أو البيولوجية.

ويبين الشكل-54 العلاقة العامة المتوقعة بين الحجم والخطر بالنسبة للنفايات المتولدة من حالة طوارئ نووية أو إشعاعية، إلى جانب العلاقة بالنسبة للعمليات الروتينية غير الطارئة. ومن المفترض أن تكون النفايات الناتجة عن الطوارئ في أغلبها مواد كبيرة الحجم ومنخفضة الخطورة، ويمكن أن تكون أكبر عشرات المرات في حجمها مقارنة بالنفايات التشغيلية العادية، كما لوحظ في أعقاب حادث فوكوشيما داييتشي. وفي هذه الحالة، من المرجح إلى حد كبير ألا تكون هناك قدرة كافية للتخلص من النفايات بما يستوعب هذا الحجم المتزايد الكبير من النفايات، وهو الحالة التي يتناولها أساساً هذا المنشور. ومع ذلك، حتى لو كان من الممكن استيعاب النفايات جزئياً أو كلياً، قد يخلص صانعو القرار إلى أن أفضل مسار للعمل هو بناء قدرة جديدة بغض النظر عن ذلك، لتجنب إزاحة القدرة التي يُعتمد عليها للتخلص من النفايات المتولدة من العمليات الروتينية. وبالتالي، فإن أحد العوامل الاستراتيجية التي من المرجح أن تكون غير قابلة للقياس والتي يتعيّن النظر فيها، هو تعطيل النظام الوطني العادي للتصرف في



الشكل-54- النسب النسبية للنفايات العادية الخطرة نسبياً والنفايات الناتجة عن الحوادث التي قد يلزم التخلص منها في نهاية المطاف.

النفايات وتأثيره على مولدات النفايات الأخرى التي تعتمد على البنية الأساسية الشاملة للتصرف في النفايات. وفي حالة الطوارئ، يمكن لأجزاء من هذه البنية الأساسية، بما في ذلك القدرات المخصصة في العادة للتصرف في النفايات غير المشعة، أن تُشكل عنصراً مهماً في استراتيجية التصدي الشاملة.

وعلى النقيض من ذلك، من المأمول أن يكون حجم النفايات العالية الخطورة الناتجة عن حالة الطوارئ صغيراً نسبياً. وتبعاً لحالة البرنامج النووي في الدولة العضو المتضررة، قد لا تضيف أحجام النفايات العالية الخطورة الناجمة عن حالة الطوارئ شيئاً يُذكر إلى كميات الوقود النووي المستهلك أو النفايات القوية الإشعاع أو النفايات المتوسطة الإشعاع التي يلزم التخلص منها. وفي هذه الحالة، سيكون من الأفضل استخدام مستودع جيولوجي أو مرفق آخر هندسي متقدم للتخلص من النفايات المتولدة أثناء العمليات الروتينية، بدلاً من بناء قدرة جديدة للتخلص من النفايات. ومن المرجح أن يكون المرفق المخصص لهذه النفايات العادية العالية الخطورة فريداً من نوعه ومصمماً بدقة كبيرة، وسيكون أكثر قابلية للتوسع بنسبة تتراوح بين 5 و10 في المائة، حسب الحاجة. وفي الوقت الحاضر، لن يكون لدى معظم الدول الأعضاء مرفق جيولوجي عامل للتخلص من النفايات لعقود عديدة، ولن يكون هناك تخطيط لبعضها حتى النصف الثاني من هذا القرن. ويبدو أنه لا مفر في حالة وقوع حادث كبير في أي دولة عضو من الحاجة إلى خزن محدد الغرض على المدى الطويل من النوع الذي نوقش في القسم السابق من أجل استيعاب نفايات الحوادث العالية الخطورة لعقود من الزمن.

ولكن الدول الأعضاء التي ليست لديها برامج نووية واسعة النطاق، قد لا تولّد نفايات ذات نشاط إشعاعي أقوى في ظل الظروف العادية (أي أن منحنى النفايات العادي في الشكل-54 لم يمتد إلى الجانب الأيمن). ومن شأن هذه الحالة أن تؤدي إلى معضلة إضافية تتمثل في التخلص من النفايات الأكثر خطورة مما هو متوقع في البرنامج الوطني للتصرف في النفايات

11-2- تحديد أنواع مرافق التخلص من النفايات التي قد تكون مطلوبة باستخدام نهج متدرج

يمكن أن تستفيد القرارات المتعلقة باختيار التكنولوجيا المناسبة للتخلص من النفايات من نهج متدرج قائم على المخاطر ويراعي التكاليف. وتُقترح المبادئ التالية لتنفيذ هذا النهج

(أ) التخلص من النفايات باستخدام مفهوم التخلص من النفايات المتاح الأكثر بساطة الذي يمكن من خلاله إثبات الأمان وحماية البيئة، بما يتوافق مع الأخطار الموجودة. وفي

حالة عدم وجود طريق مناسب للتخلص من النفايات، سيلزم خزن النفايات المعنية لحين التوصل إلى حل للتخلص منها.

(ب) سيتطلب التخلص من النفايات الأكثر خطورة استخدام مستويات أعلى من الهندسة لتوفير العزل والاحتواء المناسبين، بما في ذلك التخلص من النفايات على أعماق أكبر.

(ج) بافتراض أن مرافق التخلص من النفايات متاحة، يمكن أولاً النظر في إمكانية استخدامها وكيفية استخدامها، قبل النظر في تطوير مرافق جديدة. وقد يلزم الحصول على إذن رقابي إضافي وبالتالي إجراء تحليلات إضافية للمرافق القائمة لقبول النفايات الناتجة عن الحوادث، من أجل تلبية المتطلبات التي تقتضيها بالفعل إجراءات معايير قبول النفايات والإجراءات التشغيلية القائمة.

(د) فصل النفايات بحيث لا تُدمج مكونات النفايات الملوثة بصورة طفيفة والأقصر عمراً مع مكونات النفايات الطويلة العمر الشديدة التلوث (انظر القسم 8-1). ويُستصوب أيضاً فصل النفايات حسب الخطر الإشعاعي وغير الإشعاعي.

(هـ) الأخذ بمعايير واضح لتحديد المواد التي يتعيّن مناولتها كنفايات مشعة والمواد التي يمكن التخلص منها كنفايات غير إشعاعية، أو لإعادة تدويرها أو إعادة استخدامها.

ويوضح الجدول 14 النهج المتدرج، ويحدد نوع تكنولوجيا التخلص من النفايات الذي يمكن أن يكون الأنسب لأنواع معيّنة من النفايات الناتجة عن حالات الطوارئ. ولا يعرض هذا الجدول سوى معلومات نوعية، ويتعيّن اتخاذ القرارات المتعلقة بالتخلص من النفايات تبعاً لكل حالات على حدة، مع الأخذ في الاعتبار ظروف الحادث الفعلية، وخصائص النفايات، والمتطلبات الرقابية المنطبقة، والاستراتيجية الشاملة المعتمدة للتنظيف في الحادث

وعلى الرغم من أن حالة الطوارئ يمكن أن تتسبب في توليد كميات كبيرة جداً من النفايات التي من المرجح أن تتطلب تطوير قدرة جديدة في مجال التخلص من النفايات، سيتعيّن تطبيق ممارسات التخلص من النفايات بطريقة 'عادية' قدر المستطاع، لضمان الأمان التشغيلي والأمان الطويل الأجل. ولتحقيق هذه الغاية، يمكن أن يكون النهج المتدرج فعالاً عندما يكون مستوى التحكم المراد تطبيقه على النفايات الناتجة عن حالة الطوارئ متناسباً مع خطورة المادة، بحيث يكون مستوى الأمان الذي يتحقق عن طريق التخلص الدائم من النفايات مماثلاً للأمان الموجود في الحالة التشغيلية 'العادية'.

ويمكن للتخطيط المسبق (انظر القسم 4-1) تحديد المرافق القائمة التي يمكن استخدامها ويمكن أن يطوِّر طرقاً عامة للتخلص من النفايات وتصاميم أوّلية لتيسير إنشاء المرافق الجديدة إذا دعت الحاجة إلى ذلك. ومع ذلك، ستعتمد المتطلبات النهائية لهذه المرافق على طبيعة حالة الطوارئ وحجم النفايات وخصائصها. وبالمثل، ستُحدد حالة الأمان للمرافق بنفس الطريقة التي تُحدد بها الحالة 'العادية'، باستخدام العناصر نفسها ونقاط النهاية نفسها. وسيساعد التخطيط

المسبق على تيسير إعداد حالة الأمان ووضع المعايير الأوّلية لقبول النفايات. ويمكن تحديد المعايير العامة لقبول النفايات خلال عملية التخطيط المسبق بما يناسب أنواع المرافق التي قد تكون مطلوبة، بناءً على الخبرة الدولية في تشغيل المستودعات المماثلة والتعامل مع حالات الأمان التي أُعدت لها. ومن شأن معرفة مسارات التخلص المقصودة التي ستُصبح متاحة ومعايير قبول النفايات النموذجية في المرافق المقصودة أن يتيح للمراحل الأوّلية للتصرف في النفايات بالمضي قدماً بكفاءة.

11-3- عدد المرافق المطلوبة للتخلص من النفايات وحجمها ونوعها

من الاعتبارات المهمة أيضاً المساحة المادية التي تشغلها وحدات التخلص من النفايات، والطرق، ومناطق انتظار المركبات، ومناطق استلام النفايات وفحصها، والوظائف الإدارية وظائف الدعم الأخرى، بالإضافة إلى المنطقة العازلة غير المطورة لرصد المسافة الفاصلة عن استخدامات الأراضي المجاورة والحفاظ عليها. ويمكن أن تزداد المساحة المطلوبة إذا كان المقصود هو الوصول إلى السكك الحديدة أو عمليات معالجة النفايات. والاستفادة من المنافع التي تحققها وفورات الحجم، قد يكون من المناسب أيضاً تخصيص حيز للتوسع المحتمل في مناطق التخلص من النفايات في المستقبل.

ويمكن أن تشهد التقديرات الأوّلية لحجم الطوارئ زيادة كبيرة مع مرور الوقت، بسبب عدة عوامل. ويتعيّن أن يؤخذ ذلك في الاعتبار عند تحديد حجم الموقع المطلوب، بما في ذلك المساحة الكافية لوحدات التخلص من النفايات والمنطقة غير المطورة المحيطة. ويمكن استخدام هذه المنطقة غير المطورة للرصد البيئي؛ وتشييد الطرق المطلوبة؛ adوالمباني الإدارية؛ ومرافق استلام النفايات وتفريغها؛ واختبار النفايات المحتملة ومعالجتها وتعبئتها وغير ذلك من الأنشطة

ويمكن شحن كميات كبيرة من النفايات الضعيفة الإشعاع أو الضعيفة الإشعاع جداً بطريقة فعالة من حيث التكلفة إلى مرافق التخلص ذات السعة الكبيرة المطورة تحديداً لمثل هذه النفايات. وهناك خبرة كبيرة في التخلص من كميات كبيرة جداً من حُطام المباني وغيره من الحُطام الناتج عن هدم الهياكل، والنفايات الصلبة البلدية، والنفايات الكيميائية الخطرة، ومخلفات معالجة اليورانيوم، وغيرها من المخلفات الناتجة عن التعدين، والنفايات المشعة الضعيفة الإشعاع أو الضعيفة الإشعاع جداً، بطريقة تحمي صحة الجمهور والبيئة. ويشمل جزء كبير من هذه الخبرة التخلص من النفايات السائبة، والنفايات غير المعبأة باستخدام مفاهيم تصميم التخلص من النفايات بالقرب من سطح الأرض. وبينما تُفضل في العادة التضاريس المستوية، هناك خبرة أيضاً في التخلص من النفايات في الوديان التي تكون فيها الأراضي المتاحة محدودة. ويمكن بعد ذلك استخدام المرافق ذات السعة الأصغر التي يتطلب تشييدها وتشغيلها تكلفة أكبر بتكلفة أعلى

للتخلص من النفايات لكل وحدة، بحيث يقتصر ذلك على الأحجام الأقل من النفايات الأقوى إشعاعاً.

وتوضح التجربة الفرنسية مع مرافق التخلص في مركز دولاب (Centre de l'Aube) ومورفيليه (Morvilliers) أن مرافق التخلص المختلفة التي تتعامل مع أنواع مختلفة من النفايات يمكن أن تكون موجودة على مسافة قريبة [76]. ويمكن أن يتيح ذلك اقتسام التكلفة الكبيرة للطرق المشتركة والمرافق والبنية الأساسية اللازمة للدعم الإداري. ومن المهم أيضاً التأكد من وجود مسافة كافية بين المرافق لتيسير رصد مستقل لأداء المرفق.

ويختلف العمق الذي يتم عنده التخلص من النفايات والاستخدام المحتمل للحواجز الهندسية لتقييد حركة الملوثات تبعاً لنوع النفايات والتربة المحلية والظروف الهيدرولوجية وغيرها من الظروف البيئية، مثل المناخ واستخدام الأراضي في المناطق المجاورة، واللوائح المعمول بها، واعتبارات أخرى. وقد تكون هناك حاجة إلى دفن النفايات في أعماق ضحلة لتوفير فصل مناسب عن المياه الجوفية أو طبقة صخور الأساس المنفذة. ويشيع استخدام بطانات من الصلصال المضغوط أو بطانات الأغشية الاصطناعية أو مجموعات من هذه الحواجز لمنع نزوح السوائل من وحدات الدفن. وقد لا يلزم استخدام البطانات في حالة النفاذية المنخفضة جداً في ظروف تربة الموقع، أو في المناطق الصحراوية التي يقل فيها جداً معدل هطول الأمطار ويرتفع فيها معدل التبخر النتحي

ويوضع في العادة غطاء فوق النفايات للحد من تسرب المياه والتحكم في تصريف المياه السطحية بمجرد وصول وحدات التخلص من النفايات إلى سعتها القصوى. ويمكن في كثير من الأحيان زيادة هذه السعة عن طريق ملء وحدات التخلص من النفايات بما يتجاوز سطح الأرض الأصلي، وذلك باستخدام المصدات الترابية والسدود الهندسية لضمان المستوى الكافي من ثبات المنحدر

وقد يكون التخلص المشترك من أنواع متعددة من النفايات مقبولاً، ويُقلل ذلك من عدد مرافق التخلص الجديدة المطلوبة وأنواعها. وتسمح الولايات المتحدة الأمريكية، على سبيل المثال، بالتخلص المشترك من التربة السائبة المحتوية على نسبة ضئيلة من التلوث، والحطام، والركام الناتج عن أعمال الهدم والنفايات الأخرى الضعيفة الإشعاع جداً لمرافق التخلص من النفايات الكيميائية الخطرة المأذون بها

الجدول-14- النهج المتدرج لاختيار التكنولوجيا المفضلة للتخلص من النفايات، مع زيادة العزل والاحتواء في أسفل الجدول

المفهوم الأساسي	مثال لمفاهيم التصميم	مجموعات النفايات	مثال لأنواع النفايات	ملاحظات على خواص النفايات
الخزن بالقرب من سطح الأرض				
خنادق ترابية	— خندق ترابي بسيط مزوّد بما يكفي من الحواجز الطبيعية أو الحواجز الهندسية — غطاء هندسي	النفايات المعفاة، النفايات القصيرة العمر جداً	— الركام والحطام الناتج عن المباني في المنطقة — التربة والمفردات الكبيرة والنفايات السائبة	— مواد صلبة خاملة كيميائياً ذات خطر إشعاعي منخفض جداً — إمكانية استخدام مدافن النفايات القائمة بالفعل أو حفر التشييد المعدة بشكل مناسب/المحاجر
	— خندق ترابي هندسي — غشاء أرضي و/أو — بطانة صلصالية مضغوطة — غطاء هندسي — نظام رصد السوائل المرتشحة — متغيرات التصميم لمراعاة الظروف المناخية الرطبة والقاحلة	النفايات الضعيفة الإشعاع جداً، النفايات الضعيفة الإشعاع	— ركام مباني المنطقة — التربة والمفردات الكبيرة والنفايات السائبة — التربة المتأثرة كيميائياً — المركبات والمعدات الكبيرة — النفايات البيولوجية (الماشية، والمحاصيل، والأشجار، والأغطية النباتية، وغيرها) — معدات الوقاية الشخصية والأدوات والخرق — رماد المحارق	— المواد الصلبة التي يمكن أن تتلوث إشعاعياً — العمر النصفي الإشعاعي قصير نسبياً و/أو تركيزات النشاط الإشعاعي منخفضة — المحتوى العضوي أعلى (مثل المواد النباتية والمواد القابلة للانحلال)
الهياكل الهندسية بالقرب من سطح الأرض	— الأقبية الخرسانية، الصوامع	نفايات ضعيفة الإشعاع	— ركام مبنى المفاعل — التربة التي يمكن أن تتعرض لتلوث كيميائي — معدات الوقاية الشخصية والأدوات ومواد التنظيف — السوائل والحمأة المكيّفة والمصلدة — رماد المحارق	— نفايات صلبة مُجمدة، مع إمكانية التخلص من بعض النفايات السائبة الملوثة — قصيرة العمل في أغلبها، مع عدد محدود من النويدات المشعة الطويلة العمر — تركيزات النشاط الإشعاعي أعلى مما في الخنادق الترابية — محتوى عضوي منخفض نسبياً ولا يحتوي على سوائل حرة

الجدول-14- النهج المتدرج لاختيار التكنولوجيا المفضلة للتخلص من النفايات، مع زيادة العزل والاحتواء في أسفل الجدول (تابع)

المفهوم الأساسي	مثال لمفاهيم التصميم	مجموعات النفايات	مثال لأنواع النفايات	ملاحظات على خواص النفايات
التخلص الجيولوجي من النفايات				
التخلص من النفايات في أعماق متوسطة	— المرافق الموجودة تحت سطح الأرض (المناجم والأنفاق) — السراديب والأنفاق والصوامع — مفهوم التخلص في حُفر التنقيب	نفايات متوسطة الإشعاع	— أجزاء المفاعل الداخلية والأنابيب المشععة — السوائل والحمأة المكيّفة والمصلدة — ركام تدريع المفاعل — رماد المحارق	— نويدات مشعة طويلة العمر وتركيز كبير من النويدات المشعة القصيرة العمر — محتوى عضوي منخفض نسبياً — سوائل، إذا كانت موجودة في حاويات على مستويات عالية من السلامة
التخلص الجيولوجي العميق	— مستودع جيولوجي عميق محدد الغرض	نفايات قوية الإشعاع، نفايات متوسطة الإشعاع	— الوقود النووي المستهلك والتالف — أجزاء المفاعل الداخلية المشععة — السوائل والحمأة المصلدة القوية الإشعاع	— إمكانية توليد حرارة — تركيزات كبيرة من النويدات المشعة الطويلة العمر — نفايات صعبة ذات خصائص لا تساعد على احتوائها على المدى الطويل

11-4- تحديد مواقع المرافق الجديدة للتخلص من النفايات بعد وقوع حادث

تُشير التجربة إلى أن تحديد مواقع مرافق جديدة للتخلص من النفايات سينطوي على تحديات كبيرة. وتبعاً للحالة، قد يتعيّن اتخاذ قرارات سياسية لتحديد مواقع جديدة للتخلص من النفايات وفقاً لجدول زمني مضغوط. وبينما يمكن تسريع وتيرة بعض مهام تحديد المواقع، لا يمكن تنفيذ مهام أخرى بسرعة دون المساس بحالة الأمان. وتتطلب أي عملية معجّلة موافقة السلطات الرقابية. ويلزم تحقيق توازن بين الشعور المناسب بالإلحاح وإتاحة الوقت الكافي لأداء جميع الأعمال الضرورية وتوعية الجمهور بشكل صحيح. وقد تتطلب الأهداف الزمنية من السلطات الرقابية النظر في منح استثناءات من أجل تسريع وتيرة إجراء دراسات تحديد خصائص الموقع أو غيرها من الأعمال، دون المساس بالأمان.

11-4-1- تحديد مواقع مرافق التخلص من النفايات في ما يتعلق بالمنطقة الملوثة

من المسائل الأساسية التي يمكن أن تنشأ تحديد ما إذا كان ينبغي البحث عن مواقع داخل المنطقة الملوثة أو خارجها. ويمكن أن ينطوي هذا الاختيار على عوامل تقنية واقتصادية واجتماعية وسياسية متنافسة. وفي نهاية المطاف، ستستند القرارات إلى ظروف الحوادث المحددة وسياسات الدول الأعضاء. وتشمل الأسئلة التي يتعيّن أخذها في الاعتبار عند تقييم أماكن المواقع البديلة ما يلي

- هل المنطقة القريبة من موقع الحادث مناسبة بيئياً للتخلص من النفايات بناءً على متطلبات التصريح والمعايير الرقابية الأخرى؟
- هل سيؤدي تحديد الموقع في المنطقة الملوثة إلى الإضرار بالقدرة على رصد أداء المرفق الجديد للتخلص من النفايات والتصدي بشكل مناسب للإطلاقات غير المتوقعة؟
- هل يمكن تحقيق أي وفورات في تكاليف النقل أو غيرها من التكاليف عن طريق التخلص من النفايات بالقرب من موقع الحادث عن طريق مطالبة المجتمعات المحلية نفسها التي تعاني من أكبر آثار الحادث بتحمل عبء التخلص منها أيضاً؟ وإذا كان الأمر كذلك، فهل يمكن حل هذه المشكلة من خلال منافع وحوافز اقتصادية خاصة؟
- إذا كانت هناك حاجة إلى مرافق متعددة، فهل يتعيّن أن تكون في موقع مشترك لتحقيق الكفاءة الاقتصادية أو أن تكون موزّعة على مناطق جغرافية متفرقة لتقاسم عبء استضافة مرافق متعددة على نطاق أوسع؟ وإذا كان الأمر كذلك، ما هي آثار التشتت التي يمكن أن تنشأ عن النقل؟

— هل تتوافق الاستخدامات المستقبلية المتوقعة للأراضي في منطقة الحادث مع تطوير مرافق جديدة للتخلص من النفايات ؟

11-4-2- حوافز المجتمع المحلي كوسيلة لتسريع وتيرة تطوير المرافق الجديدة

كما جاء أعلاه، فإن تقديم المزايا والحوافز للمساعدة في تحديد أماكن مقبولة محلياً للمرافق الجديدة يؤدي إلى نتائج مختلطة. ومع ذلك، لا يُتاح سوى قدر محدود من الخبرة في هذا المجال، ولذلك فإن هذا النهج يستحق الدراسة. ويمكن لتقديم الحوافز أن يُسرّع كثيراً من عملية تحديد المواقع إذا ظهر مجتمع محلي متطوع واستمر دعم المرفق خلال الفترة الزمنية اللازمة للحصول على الأذون المطلوبة لتشييد مرفق جديد.

وعلى الجانب الاخر، قد يضيع وقت ثمين إذا لم يظهر أي متطوعين أو إذا تضاءلت رغبة المجتمع المحلي الأوّلية في استضافة موقع جديد للتخلص من النفايات بعد بدء المشروع. ويمكن التخفيف من أثر السيناريو الأخير من خلال تحديد مضيفين متطوعين متعددين. وقد يؤدي إخفاق العملية التطوعية أيضاً إلى تصورات سلبية قد تزيد من المعارضة في المجتمعات المحلية الأخرى عندما يُعاد توجيه عملية تحديد الموقع والبدء فيها من جديد.

وبالنظر إلى أن تقديم الحوافز لا يضمن النجاح، قد يكون من المستصوب المضي قدماً في مسارات متوازية متعددة لتحديد موقع تشييد مرفق جديد للتخلص من النفايات، بما في ذلك العمليات التي لا تعتمد على مجتمع محلي متطوع.

11-4-3- تطبيق معايير تحديد المواقع في حالة وقوع حادث

تشمل العملية العادية لتطبيق معايير ملاءمة الموقع المتعدد السمات عند تحديد المواقع المفضلة للتخلص من النفايات في العادة تطبيق المكونات الاستثناء والتقدير تدريجياً. وتشمل معايير الاستثناء الخصائص التي يمكن أن تؤدي إلى استبعاد النظر في مناطق واسعة أو مواقع بعينها للتخلص من النفايات فيها. وتُستخدم بعد ذلك المعايير التقديرية للتمييز بين الأماكن الأكثر ملاءمة والأماكن الأقل ملاءمة.

وفي حين أن الأحكام التقنية ضرورية بالاستناد إلى مدى توافر البيانات، فإن معايير الاستثناء تكون في العادة مطلقة بصورة أكبر. ولا يمكن عموماً حل المشاكل الناشئة عن عوامل الاستثناء عن طريق التدابير الهندسية المتاحة بشكل معقول. وتشمل الخصائص التقنية الاستثنائية للتخلص بالقرب من سطح الأرض في العادة المسطحات المائية السطحية، والسهول الفيضية، ومناطق الصدوع الزلزالية النشطة أو المحتملة، والمناطق التي تعاني من تحات كبير أو تدهور واسع النطاق، وظروف المياه الجوفية الارتوازية أو الضحلة، ومناطق استخراج الموارد النفطية أو

المعدنية، والنمو السكاني المتوقع. وقد تشمل الخصائص البيئية الاستبعادية الأراضي الرطبة أو الحياة البرية المعيّنة أو موائل النباتات النادرة والمناطق البرية أو مناطق المناظر الخلابة. وأخيراً، قد تشمل الخصائص الثقافية وخصائص استخدام الأراضي الاستبعادية المواقع الأثرية والتاريخية والمتنزهات ومناطق الاستجمام. وفي حالة وقوع حادث نووي، قد يكون من المبرر اختيار الموقع في منطقة مستبعدة في العادة في غير ظروف الحوادث. وعلى سبيل المثال، إذا كانت هناك حاجة إلى تهجير دائم للسكان المقيمين المتضررين (في منطقة حظر طويل الأجل) قد يدفع ذلك إلى النظر في موقع يكون في غير ذلك من الحالات مستبعداً بسبب وجود السكان الحاليين. وعلى العكس من ذلك، فإن النمو السكاني المتوقع في المنطقة يمكن أن يؤدي إلى استبعاد النظر في مواقع مواتية بيئياً.

وتستند المعايير التقديرية إلى الأهمية النسبية، على النحو الذي تُحدده القيم الاجتماعية والسياسية والقيود العملية. وتشمل الخصائص التقنية التقديرية شروطاً تقبل الحواجز الهندسية أو الحلول التقنية الأخرى، ولكنها لا تزال مفيدة لفرز المواقع الأكثر ملاءمة من المواقع الأقل ملاءمة. وتُستخدم مجموعة متنوعة من التقنيات لترجيح أو تصنيف أهمية عوامل تحديد المواقع التقديرية للمساعدة في توجيه فرز مناطق المواقع غير المستبعدة للعثور على أماكن مواتية. وقد تشمل الظروف التقنية المواتية المياه الجوفية العميقة أو المحصورة أو غير الصالحة للشرب؛ قيد التطوير والتربة السطحية العميقة أو المنخفضة النفاذية (non-porous bedrock)؛ والتضاريس غير الحادة. وقد تشمل أمثلة الخصائص البيئية واستخدامات الأراضي والخصائص الثقافية التقديرية الأراضي الزراعية والحرجية، وتوافر المرافق وخطط استخدام الأراضي المحلية. ويمكن أن يكون الوصول عبر الطرق المتاحة وخدمات السكك الحديدية عاملاً تقديرياً مهماً للغاية.

11-5- عمليات مرافق التخلص من النفايات بعد وقوع حادث

يمكن أن يتطلب التخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث المختلفة عن النفايات الناتجة عن الظروف الروتينية معايير إضافية لقبول النفايات. وقد تحتاج المتطلبات الجديدة الخاصة بالمرفق إلى موافقة السلطات الرقابية المسؤولة. ويمكن مشاركة وكالات متعددة في التصدي لمكونات النفايات غير الإشعاعية.

ويعتمد إثبات الامتثال في وقت قبول النفايات في مرفق التخلص منها في العادة إلى الاعتماد على مجموعة من إجراءات الفحص المادي والوثائق التي تُعد في إطار برنامج محدد لإدارة الجودة. وتبعاً لنوع النفايات الطارئة المعنية، قد يشمل الفحص المادي فتح العبوات وأخذ عينات من النفايات وإجراء اختبارات مختبرية. وتُشير الدراسات المستفادة من الحوادث السابقة إلى أن التطبيق السليم لمعايير قبول النفايات يتطلب إجراءات مفصلة ورقابة صارمة ومستقلة

لتجنب التخلص من النفايات بطريقة غير سليمة. ويمكن أن يؤدي ضعف مستوى التحكم في عمليات فرز قبول النفايات إلى الإخلال كثيراً بأداء مرفق التخلص من النفايات

وتنطبق معايير قبول النفايات أيضاً على مرافق خزن النفايات أو مناطق الخزن المؤقت المحتوية على نفايات تُشحن لاحقاً للتخلص منها، وهي مهمة أيضاً بالنسبة لهذه المرافق، على النحو الذي نوقش في القسم 3-1. وقد يؤدي عدم وضع هذه المعايير وتطبيقها بشكل مناسب في هذه الأماكن إلى المخاطرة بتأخيرات ممتدة في إعداد النفايات للشحن، ورفض الشحنات في مواقع التخلص من النفايات، وغير ذلك من الآثار الضارة. ولهذا السبب، من المهم أن يتأكد القائمون بتشغيل مرافق التخلص من النفايات من أن خزن النفايات وسائر عمليات التمهيد للتخلص منها تخضع أيضاً لبرامج مناسبة لفرز النفايات وإدارة الجودة.

11-5-1- تشييد مرفق جديد للتخلص من النفايات

يمكن أن يختلف تشييد مرفق للتخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث عن تشييد مرفق في غير ظروف الحوادث من عدة جوانب. وتوضح التجربة الحالية أن من الممكن اتباع الممارسات التالية لتسريع وتيرة عملية التشييد دون المساس بالأمان، إذا خُططت العملية ونُفذت بطريقة سليمة

(أ) يمكن تشييد وحدات التخلص من النفايات على مراحل منفصلة وقابلة للتمديد، مما يسمح ببناء منطقة للتخلص الأوّلي من النفايات واستخدام هذه المنطقة، ثم القيام بعد ذلك بتشييد مراحل جديدة يمكن توصيل كل منها بالآخر. ويُستخدم تصميم ما يُسمى بالخنادق المبطنة ببطانات مستمرة للتخلص من النفايات في مرفق التخلص من النفايات الخطرة والنفايات الضعيفة الإشعاع جداً بالقرب من غراند فيو، أيداهو، في الولايات المتحدة الأمريكية [168].

(ب) يمكن أن يُساعد التسلسل المحكم لعمليات التشييد، بدءاً من التعبئة المسبقة لمعدات التشييد الضرورية والأفراد إلى الموقع، في تسريع الجداول الزمنية. وتوجد أدوات قياسية لإدارة المشاريع في صناعة التشييد لتحقيق هذا الغرض.

(ج) يمكن تشييد المرافق الداعمة والطرق ومناطق انتظار المركبات والأسيجة ومرافق صيانة المعدات والبنية الأساسية الداعمة الأخرى أثناء عملية التصريح بإنشاء وحدة التخلص من النفايات

(د) يمكن أيضاً تعبئة مرافق الدعم الأخرى، مثل المكاتب الإدارية ومكاتب الأمن المتنقلة، ومرافق تبديل الملابس والاستحمام للعمال، إلى موقع العمل قبل التشييد.

(هـ) يُعزز التنسيق مع الهيئات الرقابية إجراء استعراض في الوقت المناسب للرسومات المطابقة للبناء الفعلي بعد التشييد، مما يُقلل من الوقت بين اكتمال التشييد والإذن بعمليات وضع النفايات.

وتنطبق التدابير الخاصة عموماً إذا أُجريت عمليات التشييد على أرض ملوثة. وقد يشمل ذلك ما يلي من اعتبارات

— تنفيذ برنامج قياس الجرعات الإشعاعية لعمال التشييد، إلى جانب التدريب المناسب.
— إجراءات التعامل مع الملابس والأدوات والمعدات الملوثة - قد تشمل هذه الإجراءات الجمع بين إزالة التلوث والتخلص من هذه المواد.

11-5-2- النقل إلى مرفق التخلص من النفايات خارج الموقع: الطرق والوسائل والمعدات

يمكن أن تؤدي الكميات الكبيرة من النفايات المرتبطة بحالة الطوارئ إلى فرض أعباء على الممارسات التشغيلية العادية المتبعة في الدولة العضو لتحميل النفايات السائبة وغيرها من النفايات ونقلها وفحصها في الموقع المحدد للتخلص من النفايات. وهناك خبرة كبيرة في ما يتعلق بمعالجة كميات كبيرة من النفايات، كما هو موضح أدناه، وترد أمثلة محددة للنفايات الناتجة عن الحوادث في القسم 9.

ويُشكل الاختيار بين الطرق البرية والسكك الحديدية أو الجمع بينهما باستخدام حاويات شحن النفايات المتعددة الوسائط جانباً مهماً من تخطيط التخلص من النفايات. وينبغي مراعاة ظروف الطرق، بما في ذلك الحاجة المحتملة إلى تحسينات، وإيلاء المراعاة المناسبة لحدود وزن المركبة. وإذا استُخدمت السكك الحديدية، قد يلزم توفير خطوط سكك حديدية فرعية للخروج من الخط الرئيسي وإعادة الدخول إليه. وعلاوة على ذلك، سيلزم توفير مرافق تحميل النفايات وتفريغها عند طرفي الشحن والاستلام.

ويمكن أن يستوعب شحن النفايات بالسكك الحديدة كميات كبيرة وفقاً لجدول زمني سريع، ولا سيما إذا استُخدمت وحدات من القطارات المخصصة لشحنات النفايات فقط. ويمكن نقل النفايات الصلبة في عربات السكك الحديدة المفتوحة الجانبين المغطاة بأغطية مصنوعة من قماش مشمع مرن أو الأغطية الصلبة. ويمكن تغليف النفايات داخل عربة السكك الحديدية ببطانة بلاستيكية لتيسير تحميلها في موقع الحادث.

ويمكن أن يستوعب النقل باستخدام الشاحنات أيضاً كميات كبيرة من النفايات. وتغطى النفايات السائبة في العادة بغطاء مصنوع من القماش المشمع. ويمكن زيادة سعة الحمولة عن طريق استخدام شاحنات النقل المتعددة المحاور مع مقطورة متصلة بالمركبة، والتي تقوم

بتوزيع الوزن الإجمالي. ويمكن زيادة حدود الوزن المسموح به على الطريق مؤقتاً عند التصدي لحادث، شريطة الحصول على الموافقات الحكومية المناسبة. وتبعاً لمستويات الإشعاع المباشرة في النفايات، قد يلزم إجراء تدريع في مقصورة قيادة الشاحنة للحد من الجرعات التي يتعرض لها السائق، ويمكن تطبيق برنامج قياس الجرعات على الأفراد.

ويمكن استخدام مجموعة متنوعة من حاويات الشحن، تبعاً لنوع النفايات. وفي ما يتعلق بالعبوات التي تحتوي على جرعات إشعاعية عالية، قد تكون هناك حاجة إلى براميل نقل معتمدة. ويمكن أيضاً شحن مكونات المفاعلات الكبيرة سليمةً عن طريق الصنادل أو السكك الحديدية أو المقطورات المتخصصة.

11-5-3- مرافق تحميل الشحنات وتفريغها

سيلزم الحصول على معدات ومرافق تحميل وتفريغ متوافقة في موقع الحادث، ومرافق التخلص من النفايات، وأي أماكن وسيطة، مثل مناطق التجميع المؤقت، أو الخزن المؤقت، أو مرافق المعالجة. وتبعاً لحجم النفايات التي يتم مناولتها، ووسائل النقل المستخدمة، قد يتطلب ذلك مساحات كبيرة. وعلى سبيل المثال، قد يكون من المفيد أن تشمل مرافق السكك الحديدية في الموقع سككاً حديدية فرعية متعددة لاستيعاب عربات السكك الحديدية التي تنتظر التفريغ والتنظيف والفحص والإفراج عنها مرة أخرى للخروج إلى خط السكك الحديدية الإقليمي الرئيسي.

وتتوافر مجموعة متنوعة من المعدات التي يمكن الحصول عليها بسهولة لنقل النفايات وتفريغها. ويمكن أن تُستخدم في نقل النفايات السائبة الشاحنات المزودة بمكبات خلفية أو جانبية، أو الشاحنات المسطحة التي تحمل صناديق متعددة الوسائط أو غيرها من الصناديق، والمقطورات المغطاة التي تحتوي على براميل أو نفايات أخرى موضوعة في حاويات. وفي ما يتعلق بالعبوات ذات معدلات الجرعات العالية، قد يكون التفريغ بواسطة الرافعة أو غيرها من معدات المناولة عن بُعد مناسباً.

وتخضع مرافق التفريغ للبرامج والإجراءات الخاصة بالتدريب والأمان الصناعي وضمان الجودة وقياس جرعات الأفراد وغيرها من برامج وإجراءات الوقاية من الإشعاعات التي تُطبق على سائر مرافق التخلص من النفايات.

11-5-4- التحقق من معايير قبول النفايات في مرفق التخلص من النفايات

تُشير التجربة إلى أن استقبال أعداد كبيرة من شحنات نفايات الحوادث يمكن أن يُجهد قدرة المرفق على فحص جميع النفايات الواردة بشكل مناسب. ويتطلب التكيُّف مع هذه الظروف عموماً زيادة عدد الموظفين والتدريب والإشراف الدقيق، وزيادة وتيرة عمليات التفتيش لضمان

اتباع الإجراءات. ومن الوسائل الأخرى لتحديد المجالات التي تتطلب تحسينات زيادة عمليات المراجعة في برامج ضمان الجودة. وقد تشمل الأنشطة التي تستحق اهتماماً خاصاً ما يلي

- تنسيق التحقق من النفايات بين العاملين في مرفق التخلص وجميع مرافق التصرف في النفايات التي تقوم بشحن النفايات تمهيداً للتخلص منها.
- استعراض وثائق الشحن للتحقق من استيفاء معايير قبول النفايات.
- القياسات الإشعاعية المباشرة للشحنات الواردة، وكذلك المعدات الخارجة من المناطق الخاضعة لمراقبة إشعاعية.
- عمليات التفتيش البصري وأخذ عينات النفايات واختبارها للتحقق من خصائص النفايات.
- زيادة وتيرة معايرة الأجهزة.
- التوثيق وحفظ السجلات الخاصة بالنفايات المستلمة والمكان الذي يتم التخلص من النفايات فيه (يشيع استخدام شبكة وحدات التخلص من النفايات) للمساعدة في الاسترجاع، إذا اقتضت الحاجة ذلك.

وللتقليل إلى أدنى حد من رفض شحنات النفايات وزيادة ضمان الامتثال لمعايير قبول النفايات، يمكن أن يكون للاستعانة بموظفين مدربين في موقع الحادث وأي مرافق وسيطة لنقل النفايات أو معالجتها دوراً مفيداً في الإشراف على إعداد الشحنة وإجراء رقابة مستقلة. وقد يكون من المناسب أيضاً الحصول على موافقة مسبقة على برامج ضمان الجودة في مثل هذه الأماكن الموجودة خارج الموقع. ومن خلال هذه التدابير، يمكن لمشغّل مرفق التخلص من النفايات تحديد ما يلي بشكل أفضل

(أ) مصدر النفايات في منطقة الحادث.
(ب) إجراء التحديد الكافي لخصائص النفايات وفصلها عن أنواع النفايات الأخرى غير المتوافقة.
(ج) تنفيذ المعالجة الممكنة بشكل صحيح؛
(د) توافق مستويات الإشعاعات المباشرة على الشحنات السائبة وعبوات النفايات مع الحدود المقررة في مرفق التخلص من النفايات.

11-5-5- الرصد والمراقبة التشغيليين في مرفق التخلص من النفايات

تبعاً لتيارات النفايات الناتجة عن حالة الطوارئ وتصميم مرافق التخلص من النفايات، قد يلزم تطوير برامج الرصد والمراقبة. ويمكن أن تشمل المجالات التي قد تتطلب مثل هذا الاهتمام بما يلي:

- توسيع نطاق رصد المياه الجوفية لمراعاة المواد الكيميائية الخطرة أو غيرها من المكونات غير الإشعاعية المثيرة للقلق.
- الغازات المتولدة عن تحلل النفايات العضوية.
- اعتبارات الحماية من الحرائق، في حالة زيادة أحجام النفايات القابلة للاحتراق أو تولد كميات كبيرة من غاز الميثان بمرور الوقت.
- اعتبارات الأمان الصناعي المتعلقة بالاستخدام المحتمل لمعدات مناولة النفايات الجديدة، والتعرض للأخطار الإضافية، مثل المواد الكيميائية أو النفايات المعدية، وغيرها من المخاوف المتعلقة بأمان العمال.

11-6- الخبرة في التخلص من النفايات بعد الحوادث الكبيرة

بغض النظر عن الحوادث الكبيرة المستخدمة كأمثلة في هذا المنشور، تُكتسب الخبرة الأكثر شمولاً ذات الصلة بالتخلص من النفايات الكبيرة الحجم الناشئة في المناطق الملوثة من التصرف في النفايات الموروثة الناتجة عن أنشطة تطوير الأسلحة النووية التاريخية. وتشمل الأمثلة استصلاح المرافق المتصلة بالأسلحة النووية في الولايات المتحدة، وسيلافيلد في المملكة المتحدة، وعمليات التنظيف في مارالينغا في أستراليا (انظر التذييل السادس).

وعندما تكون أحجام النفايات صغيرة نسبياً، وعندما توجد مرافق لقبول النفايات من أجل التخلص منها، فإن التخلص من النفايات خارج المنطقة الملوثة يُشكل في كثير من الأحيان الخيار المفضل. وتشمل الأمثلة التخلص من النفايات الناتجة عن الاستصلاح في مرافق الأسلحة النووية الأصغر حجماً في الولايات المتحدة (على سبيل المثال، المستودع القريب من سطح الأرض، والتخلص من النفايات في حفر التنقيب في موقع نيفادا للأمن القومي)، ومشروع المحطة التجريبية لعزل النفايات، والنفايات الناتجة عن المرافق الملوثة في المناطق الحضرية، مثل حادثة تشتت مصدر مجهول في غويانيا في البرازيل (انظر التذييل الخامس) [169].

ونُفذت أيضاً مجموعة من عمليات التخلص من النفايات داخل المناطق الملوثة وخارجها. وشمل ذلك في العادة أعمال الحفر وإزالة النفايات الشديدة التلوث للتخلص منها خارج الموقع، مما سمح بالتخلص من المواد الأقل تلوثاً بالقرب من موقع الطوارئ. ومن أمثلة هذه الاستراتيجية برامج التخلص من النفايات في مارالينغا في أستراليا، وبالوماريس في إسبانيا [75، 170–172].

وأدى التصدي لحالة الطوارئ في تشرنوبل إلى التخلص بسرعة من النفايات دون تحديد خصائصها بصورة مسبقة أو دون إجراء الأعمال الهندسية المفصلة لمرافق التخلص من النفايات [3]. ومن المرجح أن تستمر متابعة الإجراءات الاستصلاحية لعقود من الزمن. وتوجد أيضاً خبرة واسعة النطاق في استصلاح النفايات الموروثة في سياقات التخلص غير الهندسية دون التحضير لحالة الأمان.

ويمكن أن يُشكل التخطيط المسبق إطاراً لتقييم خصائص الموقع وتحديد الحد الأدنى لمعايير التصميم الهندسي اللازمة في حالة وقوع حادث.

وتدل الخبرة المكتسبة من الممارسات الموروثة إلى أن عدم وضع أو تطبيق معايير لقبول النفايات بشكل متسق يمكن أن يؤدي إلى الحاجة إلى استصلاح موسع في المستقبل. وشمل ذلك استرداد النفايات عن طريق استخراجها وإعادة التخلص منها لاحقاً، وهي عملية تنطوي على تكلفة هائلة وتستغرق وقتاً طويلاً، إلى جانب الاحتمالات الكبيرة لزيادة تعرض العمال للأخطار الإشعاعية وغيرها. وأُزيلت النفايات وأُعيد دفنها على نطاق واسع في استصلاح المواقع المتصلة بالأسلحة في الولايات المتحدة الأمريكية.

وتختلف الخبرة في توقيت التخلص من النفايات اختلافاً كبيراً. ولا يُشجّع العدد SF-1 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، معايير الأمان الأساسية [173]، على ترك الأجيال القادمة تتحمل عبء التخلص من النفايات المشعة، ويعني ذلك ضرورة التخلص المأمون من النفايات في الوقت المناسب. وتُمثل القدرة على تجنب تمرير الأعباء بعد وقوع حادث تحدياً في حالة حادث تشرنوبل وحادث فوكوشيما داييتشي، إذ يتم التخلص من النفايات على فترات زمنية طويلة بسبب الكميات الكبيرة من النفايات وتياراتها المتنوعة، والحاجة إلى تطوير قدرات جديدة في مجال التخلص من النفايات. واستُخدمت أيضاً عمليات الإخراج المتأخر من الخدمة في أعقاب حالة الطوارئ التي شهدتها الوحدة 2 في ثري مايل آيلند، وحالة الطوارئ في مفاعل وندسكيل 1. وفي حالة الحوادث النووية الصغيرة النطاق واستصلاح المواقع الموروثة، أُجريت عمليات التخلص السريع من النفايات باستخدام قدرات التخلص القائمة.

وحالما توضع الخطط للمضي قدماً في التخلص من النفايات، تنشأ مجموعة مختلفة من التحديات المتعلقة بالتوقيت. وإذا كانت قدرات التخلص القائمة كافية لاستقبال جميع النفايات المرتبطة بالحوادث، يمكن تحديد المهام والجداول الزمنية بقدر معقول من الثقة، بشرط توافر الموارد المالية والبشرية الكافية. وتُتاح هنا خبرة واسعة من خلال تطبيق الأدوات المقبولة عموماً في مجال إدارة المشاريع لتخطيط وتنفيذ تسلسل تحديد المواقع، بالإضافة إلى تحديد خصائص الأحجام الكبيرة من النفايات ومعالجتها وتجهيزها وتحميلها ونقلها واستلامها والتخلص منها.

وفي الحالات التي لا تتوافر فيها قدرات للتخلص من النفايات ولا تُتاح أموال كافية للقيام بذلك، كان القرار المتخذ على المستوى الوطني هو تأخير التخلص من النفايات. وفي اليابان، اتُخذ قرار في أعقاب حادث فوكوشيما داييتشي بأن يتم الاعتماد على الخزن الطويل الأجل ريثما تُحدد الأماكن والتكنولوجيات المفضلة للتخلص من النفايات في المستقبل. وفي أوكرانيا، أدى نقص الموارد المالية إلى إحراز تقدم محدود في التخلص من النفايات.

12- خاتمة: قيمة التأهب

من غير الممكن التنبؤ بطبيعة أي حادث نووي وحجمه في المستقبل. ومع ذلك، هناك الآن خبرة واسعة في بعض الدول الأعضاء في ما يتعلق بآثار الحوادث الكبيرة وفعالية التصدي لها. وتُزوّد الخبرة العملية والدروس المستفادة في ما يتعلق بالتصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث الواردة في هذا المنشور للدول الأعضاء ركيزة جيدة للتخطيط المسبق للخيارات والحلول الممكنة للتصرف في النفايات الناتجة عن الحوادث. ويمكن إدماج هذه الخبرة مع عقود من المعرفة المكتسبة من التصرف في النفايات الكبيرة الحجم الناتجة عن تنظيف المواقع الموروثة الملوثة الرئيسية ومن إخراج محطات القوى النووية من الخدمة. وتوفّر هذه المعلومات معاً أساساً سليماً لفهم مشاكل التصرف في النفايات التي سينطوي عليها التصدي للحوادث.

ومن الدروس الرئيسية المستفادة أن التصرف المأمون والفعال من حيث التكلفة في النفايات الناتجة عن حادث نووي كبير أثبتت أنها مهمة شاقة، وكان الممكن تبسيطها لو وضعت خطط طوارئ مسبقة على المستوى الوطني وعلى مستوى المرفق. ويمكن للدول الأعضاء إجراء تخطيط مسبق واستعدادات من شأنها تحسين فعالية التصرف في النفايات وترميم المواقع بشكل كبير في حالة وقوع حادث نووي. ويمكن أن يعتمد هذا التخطيط المسبق على تحديد سيناريوهات الحوادث المحتملة وتحليلها لمرافق نووية محددة، ويمكن أن يشمل ذلك دراسات تتناول خيارات التصرف في النفايات على المستويين الإقليمي والمحلي، وتمارين تُشارك فيها المنظمات التي ستكون معنية بالتصدي للحادث. ويمكن للتخطيط المسبق أن يوجه إجراءات التصدي من أجل ضمان تحديد الحلول التكنولوجية والبرنامجية السليمة في أعقاب الحوادث، ويمكنه توجيه إجراءات الطوارئ كلما ظهرت الأحداث وتغيرت الظروف المتصلة بالحادث داخل الموقع وخارجه. وستُساعد جهود التخطيط المسبق أيضاً أصحاب المصلحة والجمهور في فهم الخيارات والنُهج التي ستكون متاحة للتصرف في النفايات.

ولذلك، فإن وجود استراتيجية واضحة المعالم للتصرف في النفايات وعملية التخطيط مسألة ضرورية لتحقيق النجاح. وبدون استراتيجية واضحة، يمكن أن تحد إجراءات التصدي المتخذة في أعقاب الحادث من نطاق خيارات التصرف في النفايات في المستقبل، ويمكن أن تزيد التكاليف بصورة كبيرة وتؤدي إلى تعرض العمال لجرعات إشعاعية كبيرة. وستوفِّر استراتيجية التصرف في النفايات التي تُخطط مسبقاً إطاراً سليماً لعملية اتخاذ القرارات المتعلقة باختيار التكنولوجيا والتصرف في النفايات، وتحديد مواقع مرافق التخلص من النفايات، وهو ما سيحتاج إلى العمل تحت ضغوط زمنية شديدة في بداية وقوع الحادث، وكذلك طيلة المدة الطويلة التي يستغرقها تنظيف الموقع واستصلاحه.

ومن خلال التخطيط المسبق القوي، يمكن للدول الأعضاء أيضاً أن تُجهز نفسها للتقليل إلى أدنى حد من مقدار النفايات التي يلزم التخلص منها، وفصل النفايات حسب نوعها ومستوى نشاطها الإشعاعي، ومعالجة النفايات المخزّنة أو إعدادها للتخلص منها، ثم التخلص منها بطريقة مأمونة ومتسمة بالكفاءة وفعالة من حيث التكلفة. ومن الأهمية لبرامج التصرف في النفايات إجراء جميع الأعمال بطريقة تحمي العمال وعامة الجمهور والبيئة، وفقاً للمعايير المقبولة

التذييل الأول

حادث المفاعلين في وندسكيل

أُجري توثيق دقيق للحريق الذي اندلع في مفاعل وندسكيل 1 في عام 1957، سواءً في ذلك الوقت أو في الدراسات التي أُجريت لاحقاً. ويُقدم هذا التذييل لمحة عامة موجزة عن الحادث والتصرف في النفايات التي نتجت عنه.

أولاً-1- المفاعلان في وندسكيل

أنشئت محطة Windscale Works (التي تُشكل حالياً جزءاً من موقع سيلافيلد)، الواقعة على الساحل الغربي لكمبريا في المملكة المتحدة، في عام 1947 بمفاعلين مهدأين بالغرافيت ومبردين بالهواء، بقدرة بلغت 180 ميغا واط لإنتاج البلوتونيوم لأغراض الدفاع الوطني، والنظائر المشعة للتطبيقات الطبية والعسكرية والصناعية. وكانت قضبان وقود اليورانيوم الطبيعي مغطاة بعُلب من الألومنيوم المُزعنف. وبدأ تشغيل المفاعل 1 في تشرين الأول/أكتوبر 1950 (الشكل-55).

وأُجريت عملية التلدين الروتينية، عن طريق رفع درجة حرارة قلب المفاعل، بصورة دورية في الفترة بين عامي 1952 وتشرين الأول/أكتوبر 1957 لإزالة طاقة فيغنر في الغرافيت. ووقع الحادث في المفاعل 1 أثناء إحدى عمليتي التلدين.

أولاً-2- حريق المفاعل 1

في 10 تشرين الأول/أكتوبر 1957، أدّت عمليات التلدين إلى ارتفاع غير متوقع في درجة حرارة قلب المفاعل. وأدّت محاولة تبريد قلب المفاعل عن طريق نفخ الهواء عبر قنوات الوقود إلى اشتعال النيران في بعض القنوات. وأزيل الوقود يدوياً من القنوات المحترقة وأُجريت محاولة لإطفاء الحريق باستخدام ثاني أكسيد الكربون، ولكن دون جدوى. وفي النهاية، أُخمد الحريق عن طريق ضخ ~ 000 7 م^3 من الماء عبر قلب المفاعل. وصُرِّفت هذه المياه في البحر أو في نظام تصريف المياه السطحية. ويرد وصف مفصل للحادث في المراجع [60، 174، 175]، إلى جانب تقييم أُجري مؤخراً للعواقب والآثار في المرجع [176]. وصدر تقرير لجنة التحقيق التي عينتها

على الفور هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة بعد أسبوعين من وقوع الحادث. ونُشر تقرير اللجنة ('تقرير بيني') الذي أشرف على إعداده السير ويليام بيني لاحقاً في عام 1988، ويمكن الرجوع إليه في المرجع [177].

وتسبب الحريق في إطلاق النشاط الإشعاعي العالق في الهواء من كومة المفاعل. وعلى الرغم من الكومة كانت مزودة بمرشحات ثبتت فعاليتها العالية، انتشر عمود من التلوث خارج الموقع. وطيلة فترة انطلاق الإشعاعات، أُجريت قياسات لمستويات تلوث الهواء في الموقع وفي المنطقة. واستمرت هذه القياسات طيلة فترة الإطلاق، وكان من الواضح أن الحادث لم يتسبب في أي تعرض كبير للإشعاع الخارجي بين الأفراد الذين يعيشون في المنطقة، وأن التعرض الخارجي بين عامة الجمهور في المنطقة المجاورة كان ضئيلاً [178]. وعلى مسافة أبعد، امتد عمودان من النشاط الإشعاعي بنفس الحجم إلى الجنوب والشرق، وترسب اليود-131 عبر منطقة ميدلاندز الإنكليزية، واكتُشف التلوث في أماكن بعيدة، مثل بلجيكا.

ونتج الخطر الذي تعرض له الجمهور بسبب الحريق عن الاستنشاق والابتلاع والإشعاع الخارجي الناجم عن نواتج الانشطار، وكان الخطر الصحي الرئيسي الذي تعرض له العمال والجمهور ناتجاً عن اليود المشع. وأُجريت مسوح للغدة الدرقية من أجل تقييم التأثيرات، وعثر

الشكل-55- المفاعلان 1 و2 في وندسكيل. بإذن من الشركة المحدودة للتصرف في النفايات المشعة.

على أعلى مستوى للنشاط الإشعاعي في الغدة الدرقية لدى موظف في هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة، إذ بلغ 0,5 ميكرو كوري. وأُجريت أيضاً مسوح لتقييم مدى تعرض العمال للسترنشيوم-89/السترنشيوم-90 وتبين أن أعلى المستويات المكتشفة لم تكن تزيد على عُشر الحد الأقصى للحمل المسموح به في الجسم. وتبيّن أن مستويات السيزيوم المشع منخفضة بشكل مقبول في العينات البيولوجية [179]. وكان من الممكن في مرحلة مبكرة التخلي عن الحاجة إلى اتخاذ تدابير طوارئ بالاستناد إلى الاستنشاق أو الإشعاع الخارجي. واختُبرت خطورة الابتلاع المحتمل الناتج عن المراعي الملوثة من خلال جمع الحليب من المزارع المحلية. وبات ضرورياً بسبب محتوى اليود-131 تقييد توزيع الحليب من جميع أنحاء الموقع، وفي نهاية المطاف في مساحة تبلغ نحو 500 كم^2. وجُمع نحو 000 3 م^3 من الحليب وتم التخلص منه[1]. وأُجري أيضاً تحليل لإمدادات مياه الشرب في كمبرلاند ولانكشير وشمال ويلز بحثاً عن أي نشاط إشعاعي، وتبيّن أن مستوى التلوث كان أقل بكثير مما يمكن أن يُشكل خطراً [178]

أولاً-3- التصرف في النفايات الصلبة

ظل المفاعلان مغلقين دون أي تلدين إضافي لقلبيهما، واعتُبر المفاعل 1 غير قابل للإصلاح. وبدأت المرحلة الأوّلية للتنظيف في عام 1958، واكتملت إلى حد كبير بحلول عام 1959 [180]. وأزيل جانب كبير من الوقود من داخل المفاعل 1 وأُرسل لخزنه و/أو إعادة معالجته.

وأثناء التنظيف الأوّلي، أُرسلت النفايات الصلبة التي شملت مرشحات المداخن ومختلف أنواع الحطام من المفاعل 1، إلى المرافق المتاحة في موقع وندسكيل، بما في ذلك صومعة خزن النفايات الصلبة (المستخدمة في خزن مواد إزالة الوقود)، وخنادق التخلص من النفايات في وندسكيل لدفن النفايات الضعيفة الإشعاع، ومستودع نفايات المجموعة الشمالية (مبنى ذو سقف مسطح محاط بجدران من الطوب دفنت فيه النفايات). وهناك عدد قليل من السجلات المتعلقة بعمليات التصرف في النفايات في هذه المرافق، ويتعيّن تقدير الأرصدة الحالية من السجلات التاريخية الأخرى، بما في ذلك السجلات الموجودة في المحفوظات الوطنية والمحطات المرسلة. وفي عام 1981، تقرر عدم وجود خطر نشوب حريق في قلب المفاعل وعدم وجود مشكلة حرجية من انهيار قلب المفاعل، مما سمح ببدء الإخراج من الخدمة في منتصف الثمانينات. واكتملت عملية إخراج المرحلة الأولى من الخدمة في تموز/يوليه 1999.

ولم يكتمل الإخراج النهائي للمفاعلين من الخدمة. وأدّت مجموعة من المقترحات وبعض أنشطة الإخراج من الخدمة المبكرة، إلى جانب العديد من التغييرات في المسؤوليات التنظيمية

[1] انظر: القوى النووية والبيئة، https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/9781849731942.

المتعلقة بالموقع، والتحسينات المستمرة في تقنيات إدارة الإخراج من الخدمة، إلى العديد من التغييرات في الخطة. وشمل ذلك مؤخراً زيادة مشاركة أصحاب المصلحة، ولا سيما أصحاب المصلحة المعنيين بتحديد الحالة النهائية المرغوبة للموقع. وتتمثل إحدى المسائل الرئيسية في التحديد المطلوب لخصائص المواد قبل إعداد التصميم المفصل والشروع في الأعمال المادية التي من شأنها أن تولِّد نفايات. ويدعم تحديد الخصائص تخطيط التصرف في النفايات لتحديد طرق التصرف في النفايات وحالات البحث والتطوير والأمان المطلوبة لتنفيذ أعمال الإخراج من الخدمة.

ويشمل مخطط إخراج المفاعل 1 من الخدمة هيكلاً مبنياً فوق غطاء المفاعل مزوداً بفتحة في الغطاء لتيسير نشر الأدوات والمعدات. وسيتيح ذلك في البداية استرجاع خراطيش الوقود والنظائر المتبقية حالياً في قلب المفاعل ومعالجتها لاحقاً. وتوضع الخراطيش في بطانات من الفولاذ الطري ثم تُغلف داخل البطانة باستخدام بوليمر عضوي. وسيجري بعد ذلك حشو البطانة في برميل مصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ تبلغ سعته 500 لتر، مما سيؤدي إلى وجود فراغ سيملأ بالملاط بين البرميل والنفايات المغلفة. وستُخزن البراميل التي يبلغ سعة كل منها 500 لتر بصفة مؤقتة في مخزن سيلافيلد المدرّع في انتظار التخلص منها في نهاية المطاف في مرفق التخلص الجيولوجي الوطني المقرر. ووقع الاختيار على البوليمر بدلاً من الملاط الإسمنتي التقليدي لأن معدن اليورانيوم يمكنه في الظروف القلوية أن يتفاعل ويولد نواتج ضخمة الحجم ومتفاعلة.

ومن المتوقع أن تكون هناك حاجة إلى عدد من أنماط البطانات لاستيعاب الطبيعة المختلفة لمختلف مكونات تيار النفايات الناتجة عن الوقود والنظائر، مثل توفير درجة أعلى من التدريع لخراطيش الكوبلت، والغرض من ذلك هو إجراء العمليات في حملات، بحيث تشمل كل حملة إزالة خراطيش من نوع معيّن، بالإضافة إلى تعبئة المفردات التي تكون قد استرجعت بالفعل ووضعت قيد الخزن. وتتفاوت حالة خراطيش الوقود والنظائر المتبقية في المفاعل 1 بعد الحريق، وتتراوح بين سليمة ورماد وحطام. ويعتبر الرماد توليفة من أكاسيد وهيدروكسيدات اليورانيوم والأغلفة ومواد مصادر النظائر.

وسيوضع غرافيت المفاعل 1 في سلال توضع داخل صناديق سعة كل منها 3 م^3 (الشكل-56)، سيجري تصديرها أيضاً إلى مستودع سيلافيلد المدرع في انتظار التخلص النهائي منها في مرفق التخلص الجيولوجي الوطني. ولن يغلف الغرافيت المسترد لحين إيجاد حلول للمشاكل المتعلقة بطاقة فيغنر والحاجة المحتملة لتلدين الغرافيت. ولكي تبقى خيارات التغليف والتلدين مفتوحة، ستُصمم سلال النفايات بحيث يمكن استرجاعها من الصناديق التي يبلغ سعة كل منها 3 م^3 إذا تبيّن أن ذلك ضروري، وستُعبأ بالنفايات بطريقة تسمح بنفاذ الملاط في المستقبل، وإزالة الفراغ غير الضروري.

الشكل-56- الصندوق الذي تبلغ سعته 3 م3 لغرافيت المفاعل 1 ونفايات المفاعل الأخرى التي سيجري التخلص منها في نهاية المطاف في مرفق التخلص الجيولوجي الوطني. بإذن من الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة.

وإلى أن يحين الوقت الذي يكون فيه مرفق التخلص الجيولوجي الوطني متاحاً، ستوضع النفايات المتوسط الإشعاع الناتجة عن إخراج المفاعل 1 من الخدمة في مخازن مؤقتة في موقع سيلافيلد. ويتوافق ذلك مع الخيارات المفضلة لدراسات تحديد الخيارات السابقة، ويتفق مع مبدأ القرب للتصرف في النفايات. ويتيح ذلك وضع حاويات النفايات مباشرة في موقع خزن مأمون دون الحاجة إلى إعداد عبوات النفايات المتوسطة الإشعاع للنقل على الطرق العامة في هذا الوقت. وأوصت هيئة التفتيش على المنشآت النووية بأن النفايات والمواد المشعة المخزنة حالياً ستحتاج إلى احتواء لمدة زمنية إجمالية لا تقل عن 150 عاماً [181]. وللحفاظ على العمر المطلوب للصناديق التي تبلغ سعة كل منها 3 م^3 والبراميل التي يبلغ سعة كل منها 500 لتر، سيجري التحكم في الجو داخل المخزن الوسيط للحد من تكون الكلوريدات والتحكم في درجة الحرارة والرطوبة.

التذييل الثاني

حادث ثري مايل آيلند

تقع محطة ثري مايل آيلند للقوى النووية في ثري مايل آيلند على نهر سسكويهانا في بلدة لندنديري، بنسلفانيا، في الولايات المتحدة الأمريكية. وتحتوي المحطة على وحدتين منفصلتين من مفاعلات الماء الخفيف المضغوط، وهما الوحدتان 1 و2 في ثري مايل آيلند، ودخلت الوحدتان طور التشغيل في عام 1974. واستمرت الوحدة 1 في ثري مايل آيلند في العمل حتى أُغلقت نهائياً في أيلول/سبتمبر 2019. ووقع الحادث في 28 آذار/مارس 1979 في الوحدة 2 في ثري مايل آيلند. ويُقدم هذا التذييل وصفاً موجزاً للحادث والتصرف في النفايات التي تولدت عنه.

ثانياً-1- حادث الوحدة-2 في ثري مايل آيلند

نتج الحادث عن عدة أعطال ميكانيكية تفاقمت بسبب عدم تعرف مشغّل المحطة على فقدان ظروف حادث التبريد وعدم اليقين بشأن حالة صمامات النظام. وكانت النتيجة حدوث انصهار جزئي لقلب المفاعل. ولحسن الحظ، لم ينطلق سوى القليل جداً من المواد المشعة من الاحتواء، وكانت الآثار على صحة الجمهور والبيئة ضئيلة. ومع ذلك، استغرقت عملية التنظيف بعد الحادث أكثر من 14 عاماً، بتكلفة تزيد على مليار دولار أمريكي.

وكان ما يقرب من مليوني شخص يعيشون حول الوحدة 2 في ثري مايل آيلند أثناء الحادث، وتُشير التقديرات إلى أنهم تلقوا متوسط جرعة إشعاعية لم تكن تزيد سوى 0,1 مليسيفرت على جرعة إشعاعات الخلفية [42]. وقامت مختلف الوكالات الحكومية المكلفة برصد المنطقة بجمع عينات بيئية من الهواء والماء والحليب والنباتات والتربة والمواد الغذائية. وعُثر على مستويات منخفضة جداً من النويدات المشعة التي نتجت عن الإطلاقات التي حدثت عقب وقوع الحادث. ومع ذلك، على الرغم من الأضرار الجسيمة التي لحقت بالمفاعل، لم ينتج عن الإطلاق الفعلي سوى تأثيرات ضئيلة على الصحة البدنية للأفراد أو على البيئة (الجدول 15).

الجدول-15- النفايات الصلبة والسائلة الناتجة عن حادث ثري مايل آيلند

ثري مايل آيلند	
النفايات الصلبة (النوع والكمية)	النفايات السائلة (النوع والكمية)
النفايات النشطة الجافة (الخرسانة، وحطام قلب المفاعل، والمواد الناتجة عن إزالة التلوث، والنفايات الناتجة عن مراقبة العمل، وما إلى ذلك): ~ 3900 م^3 إجمالاً (36 في المائة نفايات مضغوطة، و60 في المائة غير مضغوطة، و3 في المائة مستقرة، و1 في المائة نفايات أخرى) النفايات الصلبة الرطبة (مواد التبادل الأيوني، والحمأة، وما إلى ذلك): ~ 1200 م^3 إجمالاً الفئة ألف: 93 في المائة؛ الفئة باء: 4 في المائة؛ الفئة جيم: ~3 في المائة؛ أكبر من الفئة جيم: ~1 في المائة	مياه ضعيفة الإشعاع (أقل من 1 ميكروكوري /مل): المياه غير الناتجة عن الحوادث مياه متوسطة الإشعاع (1-100 ميكروكوري /مل): أرضية مبنى مناولة الوقود وصهاريج تصريف مبرد المفاعل نفايات سائلة قوية الإشعاع (> 100 ميكروكوري /مل): الطابق السفلي لمبنى المفاعل ونظم التغذية التعويضية والتنقية إجمالي 7500 م^3

ملاحظة: ملاحظة في تصنيفات النفايات في الولايات المتحدة، يعتمد التصنيف على تركيزات بعض النويدات المشعة. الفئة ألف: الخلفية حتى 700 كوري/م^3؛ الفئة باء: 0,04 إلى 700 كوري/م^3؛ الفئة جيم: 44 إلى 7000 كوري/م^3.

وأُغلق حالياً مفاعل الوحدة 2 في ثري مايل آيلند وأزيلت نسبة 99 في المائة من وقوده. وجرى تصريف نظام تبريد المفاعل وأزيل التلوث من المياه المشعة وجرى تبخيرها. وشُحنت النفايات المشعة الناتجة عن الحادث إلى خارج الموقع للتخلص منها أو خزنها. وبعد إزالة النفايات، وضعت الوحدة 2 في ثري مايل آيلند في وضع الخزن الطويل الأجل الخاضع للرصد في انتظار الإغلاق الدائم للوحدة 1 في ثري مايل آيلند، [42]. وفي كانون الأول/ديسمبر 2020، نُقل ترخيص الوحدة 2 في ثري مايل آيلند إلى متعهد لإخراجها من الخدمة [56] .

ثانيا-2- التصرف في النفايات الناتجة عن الحادث

وقام معهد بحوث الطاقة الكهربائية بتوثيق التحديات والقرارات التي اتُخذت في أعقاب الحادث، واستعرض الأسئلة والمسائل المحددة، والخيارات التي قيِّمت للتنظيف والتصرف في النفايات، والإجراءات المتخذة، وعواقب هذه الإجراءات [182]. ويتضمن تقرير آخر صادر عن معهد بحوث الطاقة الكهربائية معلومات تقنية وتشغيلية مفصلة بشأن جميع جوانب التصرف في النفايات بعد الحادث [183]. ويلخص هذا التذييل ما ورد من معلومات في هذا التقرير وفي غيره من التقارير

وتولدت النفايات الصلبة والسائلة (المياه الملوثة أساساً) والوقود المنصهر بعد وقوع الحادث. وجرى التصرف في أكثر من 5000 م^3 من النفايات المشعة الصلبة (الجافة والرطبة) خلال مدة عملية التنظيف. وأُجريت معالجة لأكثر من أربعة ملايين لتر من المياه الملوثة باستخدام المبادلات الأيونية ونُظم الممتزات لإزالة النويدات المشعة، مما أدى إلى توليد نفايات صلبة رطبة كان لا بد من التخلص منها. وانتُشل نحو 000 140 كغ من حطام قلب المفاعل ونُقل هذا الحطام في 52 شحنة إلى مختبر أيداهو الوطني حيث لا يزال حتى اليوم قيد الخزن الجاف.

وتجاوزت بعض النفايات حدود الدفن التجاري في الولايات المتحدة، ولا يمكن التخلص منها في المواقع القائمة. وأُجري تقييم تناول بيان الأثر البيئي البرنامجي، وتم التوصل إلى اتفاق بين الهيئة الرقابية النووية ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية لكي تقبل وزارة الطاقة هذه النفايات لأغراض البحث والتطوير، ولتقييم تكنولوجيات المعالجة، ونُظم الخزن، وما إلى ذلك

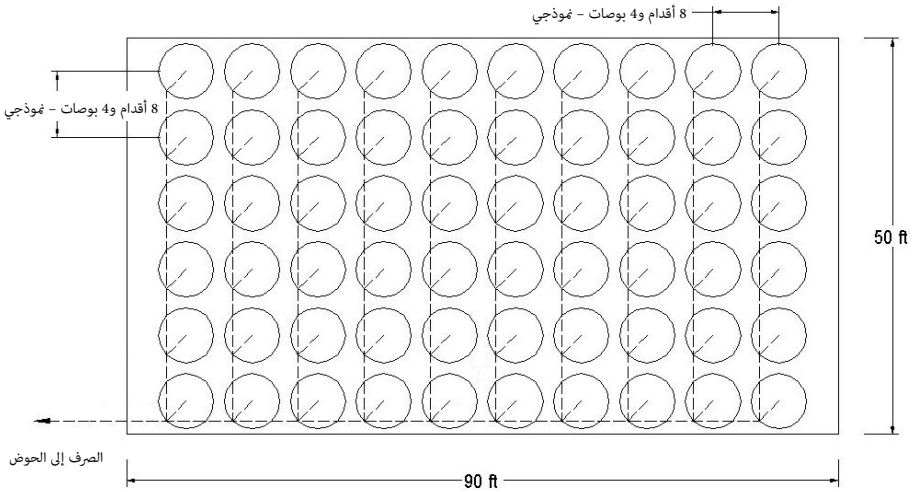
ومرت عملية التنظيف بأربع مراحل تشغيلية متداخلة من عام 1979 إلى عام 1990: تثبيت المحطة، والتصرف في النفايات، وإزالة التلوث، وتفريغ الوقود. وكان الأمان هو الاعتبار المهيمن في تخطيط الأنشطة وتنفيذها. واتُخذ قرار بعدم إعادة تشغيل المفاعل في المراحل المبكرة، مما ساعد على تركيز أنشطة معالجة النفايات وإزالة التلوث. واتُبعت استراتيجية لتطبيق تكنولوجيات تنظيف مرنة ومتوازية لتجنب توقف المشروع وللتقليل إلى أدنى حد من البدء من نقطة الصفر. وعمل فريق الإدارة أيضاً مع الهيئات الرقابية وأصحاب المصلحة لإيجاد حلول مقبولة

واعتُبر الحصول على بيانات عن خصائص المواد وتحليل هذه البيانات أمراً بالغ الأهمية لدعم اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن تثبيت المحطة، ونهج التنظيف، والتصرف في النفايات. وأنشئت قدرات تحليلية موسّعة في الموقع، على الرغم من أنه كان لا بد من شحن العديد من العينات أيضاً خارج الموقع إلى مرافق أخرى لتحليلها. وأصبح نقل هذه المواد مسألة مركزية وباتت وظيفة منسق التعبئة عنصراً مهماً في عملية التنظيف.

ولم يحدث أساساً انطلاق مواد مشعة خارجية أثناء الحادث أو بعده، ولذلك شملت عملية التصرف في النفايات الصلبة أساساً مناولة معدات ووسائط إزالة التلوث، ومبادلات الأيونات والممتزات المستخدمة في معالجة المياه، والحطام ومواد الوقود المرتبطة بالوقود في المفاعل. وكان الشاغل الرئيسي المتعلق بالتصرف في النفايات في أعقاب الحادث يتعلق باسترجاع المياه الملوثة ومعالجتها ومناولتها، وكان لا بد من تطوير نُظم لمعالجة المياه للتغلب على هذا الشاغل. وأنشئ نظام EPICOR II في مبنى التنظيف الكيميائي المؤهل لمواجهة الزلازل من أجل تيسير إدخال البطانات المحتوية على وسائط التبادل الأيوني وإزالتها باستخدام سكة حديدية أحادية الخط. وأزيل ما يقرب من 3×10^{15} بكريل (000 80 كوري) من النشاط الإشعاعي من ~000 000 4 لتر من المياه، باستخدام الوسائط العضوية والزيوليت والفحم. وكان لا بد أيضاً من تطوير نُظم مختلفة لإدارة المياه من أجل معالجة النفايات السائلة القوية الإشعاع.

(التي كان يحتوي عليها الطابق السفلي من مبنى المفاعل ونُظم تبريد المفاعل وتنقيته التي كان نشاطها الإشعاعي > 100 ميكروكوري/مل من الماء) ولإزالة المواد الصلبة والحفاظ على مستويات السيزيوم والسترنشيوم داخل الحدود المقبولة أثناء تفريغ الوقود، وذلك باستخدام وسائط الزيوليت ونُظم الترشيح لإزالة الجسيمات. وكان توفير سعة تخزينية كافية للمياه مسألة مهمة أثناء التنظيف

وكانت سعة خزن النفايات الصلبة ضئيلة جداً قبل وقوع الحادث. ومع ذلك، بمجرد الشروع في التنظيف، بدأت النفايات الصلبة في التراكم بسرعة في الموقع. وكانت النفايات الصلبة التي تكونت في المراحل المبكرة عبارة عن نفايات ومواد مستهلكة ناتجة عن التبادل الأيوني. وفي وقت لاحق، هيمنت المرشحات الأوّلية في نظام التبادل الأيوني المستهلكة والبطانات المملوءة بالراتنج على مستويات نشاط النفايات الصلبة. وتعذر شحن النفايات خارج الموقع للتخلص النهائي منها بسبب المسائل الرقابية والسياسية في أعقاب الحادث، وأصبحت مرافق الخزن المؤقت ضرورية. وصُممت هذه المرافق لتكون مرنة من أجل استيعاب خزن النفايات وتجميعها تمهيداً لشحنها خارج الموقع. وبعد وقوع الحادث مباشرة، أُعيد تنظيم نسق مكونات المرافق القائمة لخزن النفايات، ولكن سرعان ما ظهرت الحاجة إلى مرفق خزن مؤقت مصمم هندسياً. وفي عام 1980، أُدخل في الخدمة مرفق خزن يُعرف باسم 'حقل النفايات'. ويتكون هذا المرفق المعياري من وحدتين للخزن وحوض صرف مشترك. وتحتوي كل وحدة على 6 صفوف من 10 خلايا (الشكل-57). ويبلغ سُمك جدار الوحدة م واحداً، مع غطاء يبلغ سمكه م واحداً لتوفير التدريج. ويبلغ قطر كل خلية مترين وارتفاعها 4 م، مع وجود خط تصريف في الحوض. واستُخدم نظام رافعة لتحريك بطانات التبادل الأيوني وبراميل الخزن داخل الخلايا وخارجها.



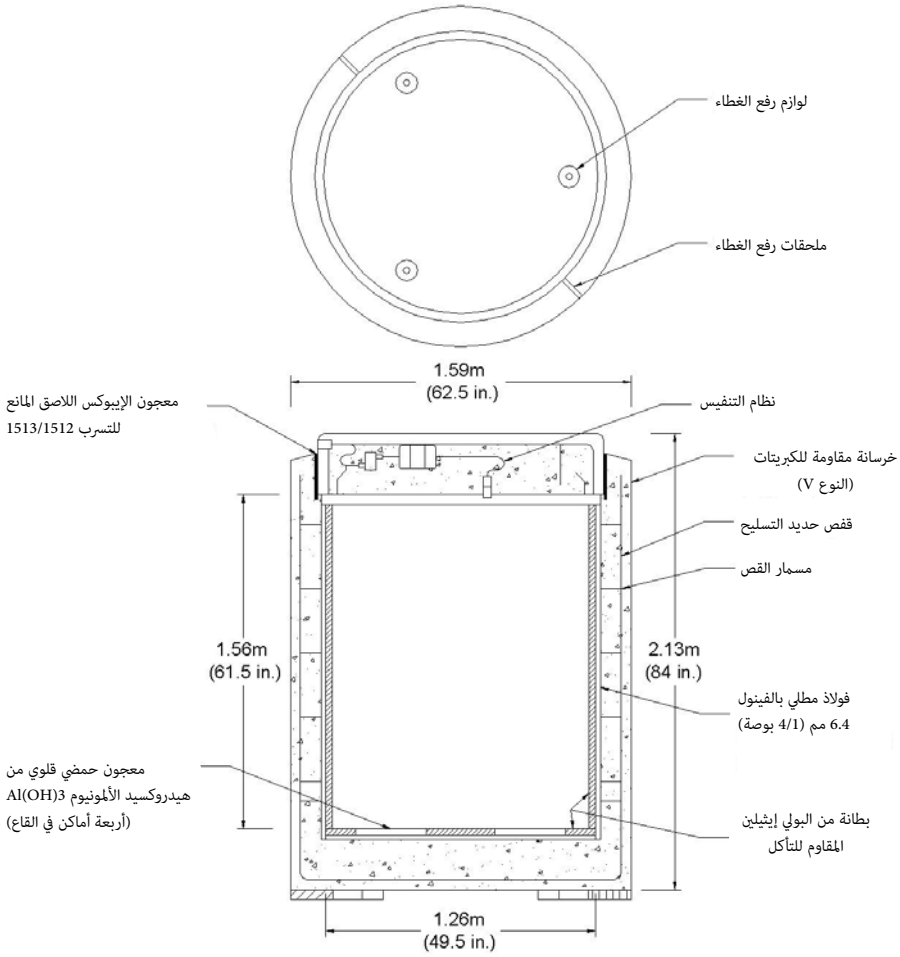
الشكل-57- منطقة تجميع النفايات الصلبة المشيّدة خارج الوحدة 2 في ثري مايل آيلند. بتصرف من المرجع [2].

شُيد مرفق تجميع النفايات الصلبة المؤقت في عام 1982 لتوفير مساحة خزن إضافية لبراميل النفايات الضعيفة الإشعاع (208 لترات) وصناديق النفايات الضعيفة الإشعاع. ومرة أخرى، أتاح التصميم تيسير شحن المواد إلى مرافق التخلص من النفايات خارج الموقع. وبدأ تشغيل مرفق مناولة النفايات وتعبئتها في عام 1987 لتجميع النفايات الصلبة وتجميعها وإزالة التلوث. وخفض المرفق بشكل كبير أحجام النفايات (تحسينات تراوحت بين 25 و30 في المائة في كفاءة التعبئة) وسمح بالإطلاق التجاري للمواد الملوثة. واستُخدمت ضاغطة أسطوانية عادية لتقليص حجم النفايات القابلة للضغط

وتعذر التخلص من النفايات بعد الحادث مباشرة بسبب المسائل الرقابية والسياسية. وفي البداية، رفض المحافظان في ولايتين اثنتين التخلص من نفايات الوحدة 2 في ثري مايل آيلند في مرافق التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في هانفورد (ولاية واشنطن) وبارنويل (كارولينا الجنوبية). وسمح محافظ واشنطن بشحن النفايات إلى هانفورد في أواخر عام 1979، ولكن لم تُقبل النفايات الضعيفة الإشعاع أيضاً في مرفق بارنويل حتى عام 1987.

وشكلت النفايات الأقوى إشعاعاً تحدياً، ولكن تم التوصل إلى اتفاق بين الهيئة الرقابية النووية ووزارة الطاقة في الولايات المتحدة قبلت بمقتضاه وزارة الطاقة النفايات 'الأعلى من الفئة جيم' لأغراض البحث والتطوير لتقييم تكنولوجيات المعالجة ونُظم الخزن وما إلى ذلك. وشمل ذلك عدة أنواع من النفايات، بما فيها الوقود، وراتنجات نظام EPICOR II، والمرشحات، والمواد الملوثة بعناصر ما وراء اليورانيوم، والبطانات المستخدمة في محطات إزالة التلوث المتخصصة (نُظم غاطسة لإزالة الأملاح المعدنية). وتنازلت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة عن شرط تصليد راتنجات نظام EPICOR II في عام 1981، وبُذلت جهود لتطوير وسائل لتعبئة بطانات الراتنجات من أجل التخلص منها في مواقع وزارة الطاقة. وثبت أن الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة والمصنوعة من الخرسانة المسلحة التي نتجت عن ذلك (انظر الشكل-58) مقبولة للتخلص من راتنجات النظام EPICOR II في موقع هانفورد.

وكانت الحاوية التي على مستويات عالية من السلامة تحتوي على بطانة فولاذية مطلية ومقاومة للتآكل. وأُضيفت مادة عازلة للتحكم في الأُس الهيدروجيني، إلى قاع الحاوية، وأُغلقت الحاوية عن طريق ربط الغطاء بجسم الحاوية باستخدام مادة هلامية لاصقة وملاط انسيابي. وسمح نظام التنفيس للغازات المتحللة بالخروج من الحاوية. وأُجري تقييم موسع تناول طرق التخلص من النفايات الناتجة عن النُظم الغاطسة لإزالة الأملاح المعدنية؛ والنظم المستخدمة لإزالة الأملاح من السوائل القوية الإشعاع في الطابق السفلي من مبنى المفاعل. وتتكون النفايات الأوّلية الناتجة عن النُظم الغاطسة لإزالة الأملاح المعدنية من بطانات. ولأغراض التخلص من النفايات، وضعت البطانات الناتجة عن نظام غاطس لإزالة الأملاح المعدنية في عبوات من الحاويات التي على مستويات عالية من السلامة المبطنة بالبولي إيثيلين، ونُقلت إلى موقع بارنويل للتخلص منها بمجرد السماح بإرسال الشحنات إلى موقع بارنويل.



الشكل-58- تصميم حاوية على مستوى عالٍ من السلامة مصنوعة من الخرسانة المسلحة. بتصرف من المرجع [2].

التذييل الثالث

حادث تشيرنوبيل

في نيسان/أبريل 1986، دمر انفجار وحريق محطة تشرنوبل للقوى النووية الواقعة بالقرب من كييف، في الاتحاد السوفياتي السابق. ومن المسلّم به أنه أسوأ حادث وقع على الإطلاق في مرفق للقوى النووية. وتسبب الحادث في وقوع وفيات على الفور وفي مرحلة مبكرة، وأدى إلى تلوث شديد في مناطق واسعة مما يُعرف الآن بأوكرانيا وبيلاروس، ومستويات منخفضة من التلوث قابلة للكشف في معظم أنحاء أوروبا. وكان لا بد من نقل عدد كبير من السكان المحليين بصورة دائمة، وأنشئت 'منطقة محظورة' في المناطق الأكثر تلوثاً التي من المتوقع أن تستمر حتى أجل غير مسمى في المستقبل. وكان أثر الحادث على المجتمعات المحلية وعلى تطوير القوى النووية، سواءً في الاتحاد السوفياتي السابق أو في جميع أنحاء العالم، هائلاً. وتستمر عملية الاستصلاح في الموقع بعد أكثر من 30 عاماً، وستمتد لعقود أخرى في المستقبل.

ويوضح هذا التذييل بإيجاز الأعمال الهائلة التي نُفذت للتصرف في النفايات التي تولدت داخل الموقع وخارجه منذ وقوع الحادث مباشرة وحتى الوقت الحاضر. وقامت دراسات ومنشورات عديدة بتسجيل ومناقشة كل من برنامج التصرف في النفايات والحادث نفسه، بما في ذلك عواقبه الصحية، ولكن العمق والتفاصيل الواردة في هذه المصادر تتجاوز قدرة هذا التذييل الموجز على تناولها بالكامل.

ثالثاً-1-حادث تشرنوبل

كان المفاعل رقم 4 الذي وقع فيه الحادث، واحداً من أربعة مفاعلات عالية القدرة مزودة بقنوات، ومفاعلات مبرّدة بالماء الخفيف ومهدئة بالغرافيت في محطة تشرنوبل للقوى النووية. ونتج الحادث بسبب سوء تصميم نظام أمان التفاعل وإخفاق المشغّل [184]. وحدث ذلك أثناء اختبار كان الهدف منه تحسين أمان المفاعل في حالة انقطاع القوى الكهربائية. وعُطلت عدة ميزات مهمة متعلقة بأمان المفاعل من أجل إجراء الاختبار الذي خرج عن نطاق السيطرة بسرعة كبيرة لدرجة أن المشغلين لم يتمكنوا من منع حدوث انفجار هائل. ويُشير أحد النماذج إلى انفجاراً أولياً في القنوات الموجودة أسفل المفاعل أدى إلى تمزيق غطاء الاحتواء الذي يزن 1000 طن ورفع قلب المفاعل مسافة 30 م خارج عمود المفاعل تماماً. وانفجر قلب المفاعل في الهواء داخل غرفة المفاعل، مما أدى إلى تدمير المبنى وتطاير شظايا الوقود في البيئة المباشرة لمباني

المفاعل وموقع محطة القوى النووية الأوسع، وأشارت التقارير إلى العثور على إحدى مجمعات الوقود على مسافة 1600 متر [185]. وسقط ما يقرب من نصف قلب المفاعل مرة أخرى في عمود المفاعل. وأثناء الانفجار، انصهر جزء من الوقود والمكونات الأخرى واندفعت إلى أجزاء من مبنى المفاعل، وتصلدت في شكل 'حمم' (أو 'كوريوم'). واشتعلت النيران في القلب المكشوف المصنوع من الغرافيت، مما تسبب في حدوث الجزء الأكبر من التلوث العالق في الهواء الذي انتشر عبر أوروبا ونصف الكرة الشمالي. وباءت المحاولات الأوّلية لإخماد الحريق عن طريق إلقاء آلاف الأطنان من المواد الصلبة السائبة (الرمل والرصاص والدولوميت المسحوق وما إلى ذلك) في المفاعل من طائرات الهليكوبتر، وزادت من انتشار التلوث بالجسيمات العالقة في الهواء. واحترق الغرافيت وأُخمد الحريق بعد تسعة أيام.

وخلال الأشهر السبعة التي تلت الحادث، أنشئ ساتر (هيكل الساتر أو 'التابوت') لحماية الأجزاء المتبقية المكشوفة من مبنى المفاعل من العناصر والسماح بالشروع في بعض أعمال الاستصلاح. ويُغطى حالياً المفاعل وهيكل الساتر (الذي كان في حالة غير مستقرة بصورة متزايدة) بالكامل باستخدام نظام الاحتواء المأمون الجديد: وهو هيكل مقوس اكتمل إنشاؤه بتمويل دولي في عام 2018. وسيجري تفكيك المفاعل رقم 4 وهيكل الساتر الخاص به داخل نظام الاحتواء المأمون الجديد.

ثالثاً-2-نفايات الحادث

أسفرت أنشطة التنظيف خلال العقود الثلاثة التي تلت وقوع الحادث عن كمية هائلة من النفايات التي يتم التصرف فيها حالياً في 17 مرفق للخزن أو التخلص من النفايات في الموقع أو في مكان آخر داخل المنطقة المحظورة (انظر الجدول 16). وتحتوي هذه المرافق معاً على أكثر من 13 مليون متر مكعب من المواد. وقد يتم التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع الإضافية المتولدة بسبب هدم المفاعل رقم 4 وهيكل الساتر القديم في الموقع، بينما ستُخزن النفايات المتوسطة الإشعاع والنفايات القوية الإشعاع لفترات طويلة داخل نظام الاحتواء المأمون الجديد. ولم يُحدد بعد مستقبل نفايات الوقود، ولم تتبلور حتى الآن صورة متفق عليها بشكل كامل حول المكان الذي يوجد فيه جميع الوقود في الموقع وحوله.

كما يتبين من الجدول 16، تُشكل التربة الملوثة داخل المنطقة المحظورة الجزء الأكبر من النفايات التي نتجت عن الحادث. ومن المشاكل المعيّنة أن بعض هذه التربة يحتوي على جسيمات دقيقة من الوقود – ترسبت غيمة من حطام الوقود الناعم بصورة غير متساوية عبر المنطقة المحظورة، في الغالب إلى الغرب والشمال وبالقرب من محطة القوى النووية، ولكنه امتد لمسافة وصلت إلى 100 كيلومتر عبر شريط ضيق إلى الغرب [187]. ولكن الملوثات الغالبة

الجدول-16- الكمية الإجمالية المقدّرة للنفايات المشعة في المرافق داخل المنطقة المحظورة في تشرنوبل (بتصرف من المرجع [186])

نوع مرفق الخزن	عدد المرافق	حجم النفايات ($م^3$)	النشاط (بكريل)
مواقع التخلص من النفايات	3	631 519	5 420
مرافق الخزن المؤقت	9	1 296 588	1 840
هيكل الساتر (بما في ذلك الموقع الصناعي)	1	662 500	740 000
مرافق الخزن في محطة القوى النووية	4	19 794	385
تربة المنطقة المحظورة	—	11 000 000	8 130
المجموع	17	13 610 401	755 775

والأكثر انتشاراً في المنطقة المحظورة هي النويدات المشعة الناتجة عن الانشطار. ويرد في الجدول 17 توزيع أكثر تفصيلاً لمواد النفايات في مختلف المرافق الموجودة في الموقع وفي المنطقة المحظورة.

وأجري التجميع الأوّلي للنفايات خلال الأشهر الثمانية عشر بعد الحادث مباشرة، حيث بدأ تشييد هيكل الساتر وأثناء إزالة التلوث من الموقع الصناعي بأكمله، واتُخذت استعدادات لإعادة تشغيل المفاعلات الثلاثة الأخرى في محطة القوى النووية. وبدأت الفترة الرئيسية لإزالة التلوث في المنطقة الواسعة من المنطقة المحظورة، بما في ذلك المناطق المأهولة بالسكان، في أواخر عام 1986، واستمرت حتى أواخر عام 1988. وخلال هذه الفترة، نُقل كثير من النفايات التي كانت قيد الخزن المؤقت إلى مواقع خزن طويل الأجل

وكانت المرحلة الأولى من عملية جمع النفايات والتخلص منها هي المرحلة الأكثر صعوبة في أنشطة إزالة التلوث في الموقع، إذ شملت جمع حطام قلب المفاعل وحطام المفاعل الذي كان يحتوي على مستويات عالية من النشاط الإشعاعي. وساعد الأفراد العسكريون، مستخدمين مركبات مدرعة مزودة بوسائل إضافية للوقاية من الإشعاعات، في جمع الحطام المتناثر في حاويات معدنية (كانت في البداية حاويات القمامة المنزلية المزودة بأغطية) ونُقلت طبقة من التربة السطحية، مع جزء من الحطام، إلى حدود مبنى المفاعل المنهار باستخدام الجرفات. وغُطيت المنطقة التي جرى تنظيفها بألواح من الخرسانة المسلحة السابقة التجهيز. وكانت فترات نوبات العمل قصيرة وأُجري تطهير للمركبات بعد كل نوبة عمل. ودفنت في البداية بعض الحاويات المعدنية التي كانت تحتوي على نفايات قوية الإشعاع في موقع التخلص العادي، وغطيت بألواح

خرسانية وتربة، واستُحدث بعد ذلك نظام وضعت فيه حاويات خلف ما أُطلق عليه الجدران 'الأوّلية' حول حافة مبنى المحطة المدّمر، وغطيت بالحصى والرمل والخرسانة. وبات ذلك يُشكل في نهاية المطاف جزءاً من هيكل الساتر أو أصبح محصوراً داخله

وطورت أماكن الخزن المؤقت لاستيعاب التربة السطحية المُجمّعة والمجرفة من منطقة الموقع الأوسع التي لم تكن مغطاة بألواح خرسانية. وكانت هذه النفايات القوية الإشعاع تحتوي أيضاً على حطام الوقود والمفاعل، وجُمعت في حاويات سعة كل منها 1 م^3. ووضع بعضها في مرفق غير مكتمل للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في الموقع [188]. وفي المجمل، أزيلت التربة السطحية من مساحة تزيد على نصف مليون متر مربع من الموقع

وتمثلت المشكلة الخطيرة بشكل خاص في إزالة العديد من أطنان مواد قلب المفاعل (بما في ذلك 16,5 طناً من مجمعات الوقود و182 طناً من الغرافيت) التي قُذفت إلى أسطح المباني المجاورة، بما في ذلك مفاعل الوحدة 3 - بمساحة بلغت نحو 3000م^2.

الجدول-17- التوزيع المفصل للنفايات ومكانها في حادث تشرنوبل

(البيانات مقدمة من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية")

النفايات المشعة المرتبطة بهيكل الساتر			
الكتلة المحتوية على الوقود التي يزيد فيها محتوى الوقود النووي على 1 في المائة			
المواد المشعة	نوع النفايات المشعة حسب معدل الجرعة أو النشاط الإشعاعي	الكمية	الكتلة (بالأطنان)
مجمعات الوقود المحتوية على وقود طازج	نفايات قوية الإشعاع	48 قطعة	5,5
مجمعات الوقود المحتوية على وقود مستهلك		129 قطعة	14,8
الغبار الذي يزيد فيه محتوى الوقود النووي على 1 في المائة (الكتلة) وحجم جسيمات يصل إلى عدة مئات من الميكرونات		---	≈50
الكُتل المحتوية على وقود شبيه بالحمم		---	1 250
شظايا قلب المفاعل		لا توجد بيانات	
معادن اليورانيوم الثانوية		---	0,01

الجدول-17- التوزيع المفصل للنفايات ومكانها في حادث تشرنوبل (تابع)

(البيانات مقدمة من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية")

المواد المشعة	نوع النفايات المشعة حسب معدل الجرعة أو النشاط الإشعاعي	الكمية	الكتلة (بالأطنان)
النفايات المشعة المرتبطة بهيكل الساتر (تابع)			
النفايات المشعة الصلبة في هيكل الساتر التي يقل فيها محتوى الوقود النووي عن 1 في المائة			
المعدات المعدنية (معدل الجرعة > 10 مليسيفرت/ساعة	نفايات قوية الإشعاع		23 240
هياكل المباني، بما فيها الخرسانة العادية والخرسانة المسلحة والألواح الخرسانية والعوارض الداعمة، والركام (معدل الجرعة > 10 مليسيفرت/ساعة)		38 000 م^3	---
الغرافيت		---	≈700
الغبار > 10 مليسيفرت/ساعة	نفايات متوسطة الإشعاع، نفايات ضعيفة الإشعاع	--- ---	
هياكل المباني، بما فيها الخرسانة العادية، والخرسانة المسلحة، والألواح الخرسانية، والعوارض الداعمة، والركام (معدل الجرعة > 10 مليسيفرت/ساعة)		299 000 م^3	---
المعدات المعدنية (معدل الجرعة > 10 مليسيفرت/ساعة		---	18 200
المواد غير المعدنية، بما فيها البلاستيك والكابلات والعزل الحراري، وغيرها (معدل الجرعة > 10 مليسيفرت/ساعة)	---	5 000 م^3	18 200
النفايات المشعة السائلة في هيكل الساتر			
المحاليل المائية، واللُب، والزيت ومعلقاته (النشاط النوعي < 3,7 × 108 بكريل/م^3)	نفايات متوسطة الإشعاع، نفايات ضعيفة الإشعاع	2 500 - 5 000 م^3	
المحاليل المائية المحتوية على أملاح يورانيوم، واللُب، والزيت ومعلقاته (النشاط النوعي < 3,7 × 108 بكريل/م^3)	نفايات متوسطة الإشعاع، نفايات ضعيفة الإشعاع	500-600 م^3	

الجدول-17- التوزيع المفصل للنفايات ومكانها في حادث تشرنوبل (تابع)

(البيانات مقدمة من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية")

النفايات المشعة المرتبطة بهيكل الساتر (تابع)			
النفايات المشعة الصلبة داخل الموقع في هيكل الساتر			
المواد المشعة	نوع النفايات المشعة حسب معدل الجرعة أو النشاط الإشعاعي	الكمية	الكتلة (بالأطنان)
الوقود النووي المدفون في الأرض	نفايات قوية الإشعاع		≈ 0,6
حاويات شظايا قلب المفاعل والمواد الأخرى المدفونة في الأرض (على طول الخط 'ألف'، المحور 68)	نفايات قوية الإشعاع نفايات متوسطة الإشعاع	600 1 100	
التربة السائبة (الصخور المسحوقة، والرمل، والحصى)	نفايات قوية الإشعاع نفايات متوسطة الإشعاع نفايات ضعيفة الإشعاع	600 2 000 137 000	
الخرسانة العادية، وألواح وكُتل الخرسانة	نفايات قوية الإشعاع نفايات متوسطة الإشعاع نفايات ضعيفة الإشعاع	900 5 800 131 000	
الهياكل المعدنية	نفايات ضعيفة الإشعاع		1 440

الجدول-17- التوزيع المفصل للنفايات ومكانها في حادث تشرنوبل (تابع)

(البيانات مقدمة من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية")

النفايات المشعة قيد الخزن في موقع محطة تشرنوبل للقوى النووية					
النفايات المشعة الصلبة			النفايات المشعة السائلة		
النوع	الحجم ($م^3$)	النشاط (بكريل)	النوع	الحجم ($م^3$)	النشاط (بكريل/ $م^3$)
النفايات القصيرة العمر الضعيفة والمتوسطة الإشعاع	2 002	4,22E+6	بقايا التبخر	13 581	28 175.4
النفايات القوية الإشعاع	515	1,4E+8	راتنجات التبادل الأيوني	4 110	552,4
النفايات الطويلة العمر الضعيفة والمتوسطة الإشعاع	1,5	1,38E+5	اللُب	2 298	1,688
			الزيت المشع المستهلك وخليط الزيت والوقود	145,3	0,181

الجدول-17- التوزيع المفصل للنفايات ومكانها في حادث تشرنوبل (تابع)

(البيانات مقدمة من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية")

النفايات المشعة داخل المنطقة المحظورة				
مواقع التخلص من النفايات المشعة				
المرفق	الحجم ($م^3$)	النشاط (بكريل)	الوضع	تعليق
بورجاكوفكا	690 000	2,54E+15	تشغيلية	أساساً نفايات ضعيفة ونفايات متوسطة الإشعاع؛ ولكن توجد بعض النفايات القوية الإشعاع في الخنادق المبكرة
بيدليسني	3 960	2,59E+15	توقفت العمليات	تحتوي على نفايات متوسطة الإشعاع ونفايات قوية الإشعاع في شكل كُتل مواد محتوية على وقود
المرحلة الثالثة في محطة تشرنوبل للقوى النووية	26 200	3,02E+14	توقفت العمليات	تحتوي على نفايات ضعيفة الإشعاع ونفايات متوسطة الإشعاع ونفايات قوية الإشعاع في مقصورة واحدة
مُجمع فيكتور	670	1,73E+11	تشغيلية	مصممة للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع
المجموع	720 380	5,47E+15		

الجدول-17- التوزيع المفصل للنفايات ومكانها في حادث تشرنوبل (تابع)

(البيانات مقدمة من المؤسسة الحكومية المتخصصة "محطة تشرنوبل للقوى النووية")

النفايات المشعة داخل المنطقة المحظورة (تابع)				
أماكن الخزن المؤقت للنفايات المشعة				
المرفق	الحجم ($م^3$)	النشاط (بكريل)	الوضع	تعليق
مرفق سترويبازا الجديد	21 950	6,61E+12	—	التربة السطحية الملوثة والنباتات والحطام الناتج عن أعمال التشييد
مرفق سترويبازا القديم	40 150	3,52E+13	—	التربة السطحية الملوثة والنباتات والحطام الناتج عن أعمال التشييد
نيفتيبازا	95 430	3,09E+13	—	التربة السطحية الملوثة، وأشجار الصنوبر الميتة، والحطام الناتج عن أعمال التشييد
تشيستوغالوفكا	874	7,11E+10	—	النفايات من الموقع الصناعي والمناطق المجاورة له في محطة القوى النووية
محطة يانوف	30 000	3,70E+13	أُجريت تحقيقات جزئية	التربة السطحية وأشجار الصنوبر الميتة والحطام الناتج عن أعمال التشييد
محطة كوباتش	110 000	3,33E+13	أُجريت تحقيقات جزئية	النفايات الناتجة عن التشييد والهدم
الغابة الحمراء	500 000	3,74E+14	أُجريت تحقيقات جزئية	الأشجار الملوثة، وطبقة التربة السطحية، والفرش الحرجي، وبعض ركام المباني
بيشانوي بلاتو	57 288	5,31E+12	—	طبقة التربة السطحية الملوثة
بريبيات	16 000	2,59E+13	أُجريت تحقيقات جزئية	الآلات والأخشاب ونفايات التشييد والنفايات المنزلية الملوثة، وغيرها
مجموع أماكن الخزن المؤقت للنفايات المشعة	871 692	1,99E+15	—	—

وأُجريت تلك الأعمال يدوياً، حيث دُفعت المواد إلى داخل مبنى المفاعل المدمّر أو جمعت في حاويات وأزيلت بواسطة رافعة أو طائرة هليكوبتر إلى أحد مواقع الخزن. ووضعت بعض المواد في أكياس حول محيط المباني وغُلفت بالخرسانة في مكانها [188]

وتطلبت أيضاً مرافق الوحدة 3 المجاورة عملية تطهير داخلي كبير من أجل السماح بتشغيل محطة القوى النووية، وتعرضت الوحدتان 1 و2 أيضاً لتلوث شديد بسبب النويدات المشعة العالقة في الهواء التي دخلت عبر نُظم التهوية. وأُجري تطهير شمل أكثر من 24 مليون م^2 من المرافق الداخلية وأكثر من 6 ملايين م^2 من المنطقة المحيطة خلال الفترة بين عامي 1987 و1988، مما أدى إلى تلوث 000 38 طن من المعدات وأكثر من 000 16 طن من النفايات المشعة التي تعيّن نقلها والتخلص منها

وعقب التنظيف الأوّلي للموقع، تحول الاهتمام إلى تنظيف المناطق الواقعة داخل دائرة نصف قطرها 30 كم والمحتوية على أعلى مستويات ترسب النشاط الإشعاعي على السطح. وكانت المناطق الأكثر تلوثاً تقع على بُعد على خمسة كم من محطة القوى النووية، وشملت مدينة بريبيات التي كان قد جرى إخلاؤها. وهُدمت عدة مبانٍ مؤقتة أو 'مرتجلة' كانت أسطحها مغطاة بمستويات عالية من التلوث. ولم يكن ممكناً تطهير مساحة كبيرة من المدينة بنجاح. وسرعان ما تلوثت مرة أخرى الأجزاء التي أزيل منها التلوث [189].

ثالثاً-3- الترتيبات الأوّلية للتخلص من النفايات

في عام 1986، كانت الطريقة المفضلة للتخلص من النفايات في أعقاب الحادث هي التخلص منها داخل الموقع في المكان الذي تشكلت فيه (على النحو الذي نوقش أعلاه في ما يتعلق بنفايات محطة القوى النووية). ويرجع ذلك أساساً إلى الخيارات التقنية لجمع الكميات الهائلة من النفايات وتعبئتها ونقلها، وعدم وجود مرافق خزن عادية قادرة على استقبال تلك النفايات. وبالإضافة إلى ذلك، تطلبت الحالة اتخاذ إجراءات عاجلة. ومع ذلك، اعتُبرت المرافق المحلية مؤقتة، مع النظر في إعادة التخلص من النفايات في المرافق التي تُلبي متطلبات الأمان البيئي على المدى الطويل. وشُكلت لجنة للتصرف في النفايات واستقرت على المكان والتصميم والحاجة إلى التشييد العاجل لمرافق التخلص من النفايات بالقرب من قريتي بوراكوفكا وبيدليسني، على بُعد بضعة كيلومترات من محطة القوى النووية

وخلال مرحلة الطوارئ، أُعد 51 موقعاً للخزن في المنطقة المحظورة لاستخدامها كمخازن مؤقتة لاستيعاب 500 135 م^3 من النفايات. وشُيدت تلك المخازن بسرعة وكانت تصاميمها بسيطة للغاية: خنادق بعمق تراوح بين 3 و5 أمتار مع بطانة مقاومة للماء مصنوعة من الكلوريد المتعدد الفاينيل - وبمجرد امتلائها، تُلف حواف البطانة فوق الجزء العلوي من النفايات ويغطى الخندق

بتربة نظيفة. وكانت الخنادق موجودة في بعض الأحيان في حفر وأخاديد، وأدى الإفراط في ملء المخازن في بعض الأحيان إلى ارتفاع مستوى النفايات في أكوام مغطاة بالتربة. وخلال الفترة بين عامي 1987 و1988، نُقلت بعض النفايات إلى مواقع التخلص من النفايات المشعة في بوراكوفكا وبيدليسني، ولكن لا توجد سجلات باقية توثق حركة المواد التي حدثت. وكان أحد مواقع التخلص المؤقت الشهيرة يُعرف باسم الغابة الحمراء، حيث تسبب النشاط الإشعاعي المترسب في الإجهاز على غابة مساحتها 200 هكتار من الصنوبر الأسكتلندي كانت تقع مباشرة تحت الغمامة الغربية التي كانت تحتوي على الجسيمات المنطلقة من قلب المفاعل. وقُطعت الأشجار وتم التخلص منها في الموقع داخل خنادق مغطاة بالتربة. وبشكل عام، على الرغم من إجراء بعض التقديرات، لا توجد قوائم جرد موثوقة لمحتويات النفايات التي جرى التخلص منها في العديد من الأماكن المستخدمة في محطة القوى النووية وحولها في هذه المرحلة المبكرة [190]. وتُشير تقديرات عام 2012 إلى وجود ما يقرب من 400 886 متر مكعب من النفايات في مرافق الخزن المؤقت [191]

وصُمم الموقع الذي أنشئ لاحقاً للتخلص من النفايات المشعة في موقع بورياكيفكا للتخلص من النفايات المشعة على طول الخطوط التقليدية لمستودع للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع بالقرب من سطح الأرض (الشكل-59)، مع 30 خندقاً مبطناً، بسعة تبلغ نحو 000 23 م^3 لكل خندق. ويعتبر المرفق قادراً على توفير عزل مناسب للنفايات في منطقة غير مأهولة للسكان.

ويحتوي موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة الذي أنشئ في الوقت نفسه بالتوازي مع موقع بورياكيفكا للتخلص من النفايات المشعة، على نفايات قوية الإشعاع سائبة أو غير محتفظ بها في عبوات تحت طبقة من الخرسانة موضوعة داخل جدران خرسانية مبنية على قاعدة خرسانية فوق سطح الأرض، بحجم إجمالي يبلغ نحو 000 11 م^3. ويغطى المرفق اليوم بأسقف معدنية. ولم يتم إجراء أي تقييم للأمان في هذا المرفق. وطورت المرحلة الثالثة لموقع التصرف في النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية في موقع المحطة من خلال الاستفادة من 'المرحلة الثالثة' لمرفق الخزن الذي لم يكن قد اكتمل (في الوقت الذي وقع فيه الحادث) للمخلفات الضعيفة الإشعاع والمخلفات المتوسطة الإشعاع. ويتألف المرفق من سبعة خنادق مبطنة بالخرسانة بعمق خمسة أمتار تقريباً وطول يتراوح بين 90 م و140 م، ووضعت النفايات في حاويات معدنية تبلغ مساحتها 000 18 1 م^3 تقريباً، ومغطاة بألواح خرسانية وطبقة ترابية

الشكل-59- موقع بورياكيفكا للتخلص من النفايات المشعة. بإذن من المؤسسة الحكومية المتخصصة "المؤسسة الحكومية المركزية للتصرف في النفايات المشعة".

ثالثاً-4- الدروس المستفادة في المرحلة المبكرة من فترة التصرف في النفايات

خلال فترة التنظيف المبكر، من بين الدروس المستفادة في ما يتعلق بالتصرف في النفايات، ما يلي

(أ) لم تكن هناك معدات مناسبة متاحة فوراً لجمع النفايات ونقلها، ولا سيما النفايات القوية الإشعاع. ولم يكن أداء المعدات المحولة جيداً في بيئة الإشعاعات القوية.

(ب) لم يكن هناك نظام لتحديد خصائص النفايات وفصلها بفعالية، أو لحساب المواد. وأدى الافتقار إلى هذه المعلومات إلى صعوبات في اتخاذ القرارات المتعلقة بالتصرف في النفايات في الوقت الحاضر.

(ج) لم يكن هناك أي إجراء لمناولة النفايات في مرحلة الطوارئ. ولم تكن هناك تصاميم لإنشاء أماكن خزن مؤقت وتشغيلها بسهولة وبما يفي بمعايير الأمان، كما لم تكن هناك تصاميم لمواقع الدفن التي أنشئت بسرعة لخزن النفايات القوية الإشعاع على المدى الطويل.

ثالثاً-5- المرافق الحالية لخزن النفايات والتخلص منها

منذ ثمانينات القرن الماضي، أُجريت أعمال لإزالة النفايات من كثير من الخنادق المؤقتة المتعددة. وأزيلت بصفة خاصة النفايات من بعض المواقع التي حدث فيها تلوث للمياه السطحية. وما زالت هناك اليوم تسع مناطق للخزن المؤقت للنفايات (أماكن الخزن المؤقت للنفايات المشعة) في المنطقة الواقعة على بُعد 10 كم من موقع محطة القوى النووية، وأُعدت المواقع الثلاث للتخلص من النفايات المشعة في بورياكيفكا، وبيدليسني، والمرحلة الثالثة في محطة تشرنوبل للقوى النووية بعد فترة وجيزة من وقوع الحادث

وما زال موقع بورياكيفكا للتصرف في النفايات المشعة قيد الاستخدام، بينما يجري تطوير مرافق جديدة في الموقع. وأُجريت أعمال لتثبيت موقع بيدليسني للتخلص من النفايات المشعة وتركيب سقف معدني في عام 2013. ولكن بيدليسني تمثل مرفقاً موروثاً للحوادث غير مناسب لأرصدة المخزونات التي يحتوي عليها. وما زالت المعرفة بنُظم الحواجز المستخدمة فيه محدودة أو غير كافية، ومن المتوقع إزالة المخزون الموجود فيه ونقله إلى موقع للتخلص منه بطريقة مناسبة عندما يكون ذلك متاحاً. ولا تعتبر المرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية مناسبة أيضاً للتخلص النهائي وما زال الموقع غير مكتمل، وتوجد حواجز هندسية تعتبر غير كافية. ولم يُجهز المرفق بنُظم لحماية المياه، وتتشبع الأجزاء السفلية من المرفق بالمياه الجوفية بصورة دورية. وبالإضافة إلى ذلك، ظهرت فجوات في الغطاء الترابي. وأخيراً، تقع المرحلة الثالثة من موقع التخلص من النفايات المشعة في محطة تشرنوبل للقوى النووية بالقرب من مسطح مائي سطحي، وبالتالي فإن هذا الموقع يعتبر غير مناسب للأمان على المدى الطويل

ويضم مجمع فيكتور الذي يقع على بعد 17 كم تقريباً من محطة القوى النووية، عدداً من المرافق لمناولة النفايات وخزنها، وكذلك عدة مرافق للتخلص من النفايات بالقرب من سطح الأرض: المرفق 1 للتخلص من النفايات المشعة الصلبة المعبأة في حاويات، والمرفق 2 للتخلص من النفايات المشعة الصلبة السائبة، ومرفق التخلص الهندسي بالقرب من سطح الأرض (يُشار إليه أيضاً باسم القطعة 3). ويجري توسيع هذه القدرات من خلال مرافق جديدة للتخلص من النفايات بالقرب من سطح الأرض، ومخازن للنفايات القوية الإشعاع والوقود المستهلك. ومن المتوقع أن يتمكن مجمع فيكتور في نهاية المطاف من استقبال معظم النفايات الناتجة عن إخراج الوحدات من 1 إلى 3 من الخدمة.

وفي موقع محطة القوى النووية نفسها، هناك عدد من المرافق الأحدث التي لا تزال قيد التشغيل، وذلك على سبيل المثال لاستقبال النفايات الناتجة أثناء تشييد الأساسات لساتر نظام الاحتواء المأمون الجديد. وما زالت النفايات السائلة تتولد بكميات كبيرة، وتشمل المرافق الجديدة محطة معالجة النفايات المشعة السائلة التي أُدخلت في الخدمة في عام 2018 لمعالجة وتصليد نحو 000 20 م^3 من النفايات السائلة المتراكمة.

وخلال الفترة من 1978 حتى 2003، استمر تشغيل مرفق لخزن النفايات الصلبة الموروثة يتألف من هيكل خرساني فوق الأرض مقسم إلى ثلاثة أقسام بسعة إجمالية تبلغ 4000 م^3 تقريباً لخزن جميع أنواع النفايات الصلبة (بما فيها النفايات القوية الإشعاع). ويجري تطوير مرفق جديد لاسترجاع النفايات الصلبة كجزء من المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الجديد في الموقع لإزالة النفايات من مرفق خزن النفايات الصلبة. ويمثل مشروع المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة أحد مكونات البرنامج المتكامل للتصرف في النفايات المشعة لكامل محطة القوى النووية، ويشمل استرجاع النفايات ومعالجتها وتعبئتها للخزن المؤقت أو التخلص النهائي منها. ويشمل ذلك تقليص الحجم من خلال الضغط والترميد والتصليد من خلال التجميد في الخرسانة. وتوجد أيضاً محطة لصنع البراميل والصناديق الخرسانية في الموقع لاحتواء النفايات [192]. وفي شباط/فبراير 2004، أُدخل في الخدمة مرفق مؤقت مرحلي لخزن النفايات القوية الإشعاع الصلبة لاحتواء النفايات لحين الانتهاء من المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة. ويتألف المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة من مجموعة من المرافق المشيدة وفقاً للمعايير الدولية الحديثة في مجال التصرف في النفايات. وتشمل مرافق المجمع مرفق خزن مؤقت للنفايات الطويلة العمر الضعيفة والمتوسطة الإشعاع والنفايات القوية الإشعاع، ومرفقاً لاسترجاع النفايات المشعة الصلبة مخصصاً للنفايات المشعة المسترجعة من مخازن النفايات الصلبة القائمة في محطة تشرنوبل للقوى النووية، ومحطة معالجة النفايات المشعة الصلبة.

وسيبدأ تفكيك مبنى مفاعل الوحدة 4 وهيكل الساتر الأصلي داخل هيكل نظام الاحتواء المأمون الجديد، ومن المتوقع أن يولّد ما يقرب من 3350 برميلاً من النفايات القوية الإشعاع والنفايات الطويلة العمر الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي ستجري مناولتها في المجمع الصناعي للتصرف في النفايات المشعة الصلبة، وكذلك كمية هائلة من النفايات الأضعف إشعاعاً والنفايات السائلة الأخرى. وبالتالي، من المتوقع أن تستمر أنشطة مناولة النفايات وتوليدها حتى عام 2065 على الأقل، وهو الوقت المتوقع للانتهاء من التفكيك والاستصلاح في الموقع

التذييل الرابع

حادث فوكوشيما دايتشي

كان زلزال توهوكو العظيم الذي بلغت قوته 9 درجات بمقياس درجة العزم الزلزالي (M_w) في 11 آذار/مارس 2011 وما صاحبه من موجات تسونامي كارثة طبيعية هائلة تسببت في مقتل أكثر من 18 000 شخص على الساحل الشرقي لشمال هونشو في اليابان. وطغت الأحداث على محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية الواقعة على الساحل، مما تسبب في فيضانات وانقطاع كامل للقوى الكهربائية لمدة طويلة، وأصفر ذلك عن انهيار ثلاثة من المفاعلات الستة (الوحدات من 1 إلى 3) وانفجارات هيدروجينية دمرت مباني الوحدات 1 و3 و4. ويُقدم هذا التذييل لمحة عامة موجزة عن الحادث وما أعقبته من أعمال للتصرف في النفايات الناتجة عن الأضرار التي لحقت بمحطة القوى النووية وانطلاق النشاط الإشعاعي. وقدمت الوكالة وصفاً مفصلاً [193]، استُمد منه جانب كبير من المعلومات الواردة في هذا التذييل.

رابعاً-1- أثر الزلزال وموجات التسونامي

عندما وقع الحادث، كانت ثلاث من وحدات المفاعلات الستة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية قيد التشغيل، وكانت ثلاث منها في حالة إغلاق دوري لإعادة تزويدها بالوقود أو للتفتيش عليها. وأدى الزلزال إلى إغلاق تلقائي للمفاعلات العاملة (الوحدات من 1 إلى 3)، ولكنه أدى إلى فقدان القوى الكهربائية الخارجية التي تصل إلى محطة القوى النووية من الشبكة الكهربائية. وبعد وقت قصير من وقوع الزلزال، ضربت سلسلة من موجات التسونامي ساحل هونشو على المحيط الهادئ. وبلغ ارتفاع التسونامي الثاني 14 م في فوكوشيما، وتخطى جدران الدفاع ضد موجات تسونامي، مما أدى إلى إغراق الطوابق الأرضية والأقبية في مباني المفاعل في المحطة وتدمير مولدات القوى الكهربائية التي تعمل بالديزل في حالات الطوارئ للوحدات من 1 إلى 4، والتي كانت تقع على ارتفاع منخفض. وأدى أثر التسونامي إلى تبديد أي إمكانية للتحكم الفعلي في المفاعلات التي كانت لا تزال قيد التشغيل، والتي بدأت درجة حرارتها في الارتفاع (حرارة الاضمحلال). ونجم عن ذلك في نهاية المطاف انهيار قلب المفاعل في الوحدات من 1 إلى 3 وانفجارات غاز الهيدروجين في الوحدات 1 و3 و4، مما أدى إلى تدمير مباني المفاعل وأثر بشكل أكبر على القدرة على العمل في الموقع وتنظيفه في نهاية المطاف. وأدى التنفيس والأضرار التي لحقت بأوعية احتواء المفاعلات إلى انطلاق النشاط الإشعاعي

العالق في الهواء وترسبه سواءً في البحر أو على الشاطئ، على طول المنطقة الساحلية المحيطة بفوكوشيما والمقاطعات المجاورة. واتُخذ قرار بإجلاء السكان عن منطقة تقع على بُعد 20 كم من محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية.

ولم يسفر الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية ولا انطلاق النشاط الإشعاعي عن أي وفيات. وأُجري إجلاء لنحو 000 300 شخص، منهم 000 160 شخص تم تهجيرهم لأجل طويل، مما تسبب في ضغوط كبيرة أسفرت، كما أكدت التقارير، عن مئات الوفيات المبكرة. وتجري أعمال الاستصلاح في منطقة أُجري فيها إجلاء كامل للسكان. وتُحاط هذه المنطقة بمنطقة أكبر سُمح فيها لبعض الأشخاص الذين تم إجلاءهم بالعودة، وتخضع المنطقة أيضاً لبرنامج تنظيف كبير. وستستمر أعمال التنظيف والاستصلاح والإخراج من الخدمة لعدة عقود. وسيجري إخراج محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية من الخدمة (ولم يحدث أي تشغيل للمفاعلات السليمة منذ وقوع الحادث)، على الرغم من عدم التوصل إلى قرار بعد بشأن الحالة النهائية للموقع.

رابعاً-2- التصرف في النفايات

وبدأت مرحلة الطوارئ، التي أفضت إلى حالة الإغلاق البارد لمحطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية في نهاية عام 2011 تقريباً، وبدأت هنا المرحلة الرئيسية لتحقيق الاستقرار في الموقع والاستصلاح خارج الموقع. ولم يكن هناك في ذلك الوقت قانون ينظم التخلص من النفايات الناتجة عن الحوادث والمواد الملوثة إشعاعياً، ولم يكن مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن التشغيل العادي بالقرب من سطح الأرض في محطة القوى النووية متاحاً للتخلص من النفايات الملوثة المشعة. ويلخص الجدول 18 النفايات التي تولدت بسبب الحادث.

رابعاً-2-1- النفايات الناتجة عن الاستصلاح خارج الموقع

ركزت أنشطة الاستصلاح على تكثيف إزالة التلوث في المناطق السكنية لمراقبة التعرضات الخارجية، مع تركيز مراقبة التعرضات الداخلية على القيود ورصد المواد الغذائية والأعلاف الحيوانية، واستصلاح الأراضي الزراعية. وكانت هذه الأنشطة هي المولدات الرئيسية للنفايات المشعة حتى الآن. واتخذت الحكومة اليابانية نهجاً محافظاً في وضع حدود الجرعة للأشخاص، مما أدى إلى زيادة كبير في حجم أعمال الاستصلاح التي كانت ضرورية، وأثر ذلك أيضاً على الحركة والمعالجة العامة للسكان. وانتهت أعمال الاستصلاح في العديد من البلديات، وسُمح بعودة السكان الذين تم إجلاءهم.

الجدول-18- النفايات الصلبة والسائلة الناتجة عن حادث فوكوشيما دايتشي

التصرف في النفايات المشعة في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

النفايات الصلبة (الأنواع والكمية)	النفايات السائلة (الأنواع والكمية)
الركام: — < 0,1 مليسيفرت/ساعة: 200 268 م^3 — 0,1 - 1 مليسيفرت/ساعة: 500 م^3 — غرفة خزن النفايات الصلبة: 100 21 م^3 الأشجار المقطوعة: 200 134 م^3 معدات الوقاية الشخصية المهملة: 200 48 م^3 النفايات المتولدة من معالجة المياه: — وعاء امتزاز السيزيوم، الوعاء المستهلك في النظام المتقدم لمعالجة السوائل: 686 4 وعاءً — الحمأة: 597 م^3	النفايات السائلة: — مياه النفايات المكثفة: 345 9 م^3 — المياه المعالجة (بما فيها المياه الناتجة عن معالجة السترنشيوم): 434 201 1 م^3

الاستصلاح خارج موقع محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية

التصرف في النفايات داخل محافظة فوكوشيما

النفايات الصلبة (الأنواع والكمية)	النفايات السائلة (الأنواع والكمية)
التربة من أنشطة إزالة التلوث خارج الموقع: — ~14 مليون م^3 النفايات داخل منطقة التدابير المضادة: المنقولة إلى مواقع الخزن المؤقت: 000 630 2 طن الرماد الناتج عن الترميد بالحرق: — < 000 100 بكريل/كغ: 1,55 مليون م^3 — > 000 100 بكريل/كغ: 000 20 م^3 النفايات المعيّنة (أكثر من 000 8 بكريل/كغ): — رماد المحارق: 912 231 م^3 — أخرى: 700 28 م^3	لا يتوقع توليد نفايات سائلة

التصرف في النفايات خارج محافظة فوكوشيما

النفايات المعيّنة (أكثر من 000 8 بكريل/كغ): — رماد المحارق: 841 8 م^3 — أخرى: 732 18 م^3	لا يتوقع توليد نفايات سائلة

ووضعت استراتيجية للتصرف في النفايات خارج الموقع، بما في ذلك ما يلي:

(أ) التجميع في مواقع الخزن المؤقت القريبة من مكان إزالة التلوث.
(ب) النقل من مواقع الخزن المؤقت إلى مرفق خزن مرحلي.
(ج) تقليص حجم المواد القابلة للاحتراق عن طريق الترميد في محارق النفايات الصلبة البلدية المتاحة المزودة بنُظم لتنظيف الغازات المنبعثة لاحتجاز السيزيوم-134 والسيزيوم-137.
(د) تقليص حجم التربة عن طريق الغسل لفصل السيزيوم أو المكونات الغنية بالسيزيوم.
(هـ) التخلص من النفايات، تبعاً لمحتوى النشاط الإشعاعي، في مرفق الخزن المرحلي أو في مدافن النفايات البلدية الشائعة الاستخدام أو المعينة لأغراض خاصة أو بالقرب من مرافق التخلص من النفايات بالقرب من سطح الأرض.
(و) إجراء جرد لتتبع النشاط والكميات المتراكمة.

ومما يُعقد عملية التنظيف الحاجة أيضاً إلى التعامل مع 'النفايات الناتجة عن الكوارث' الناجمة عن آثار الزلزال والتسونامي في جزء كبير من المنطقة المتضررة أيضاً من التلوث المشع. ويُقدّر إجمالي كمية النفايات الصلبة الملوثة التي كان لا بد من التعامل معها داخل منطقة الاستصلاح الداخلية (منطقة إزالة التلوث الخاصة) بنحو 000 800 طن. ويوجد أيضاً ما يقرب من 000 160 طن إضافي من 'النفايات المعيّنة' (التي يزيد نشاطها الإشعاعي على 8000 بكريل/كغ)، وتتألف في جانب كبير منها من رماد المحارق والحمأة.

وحُفرت الطبقة السطحية من التربة والمواد الأخرى، وأُعطيت الأولوية للمناطق التي يستخدمها الجمهور والأطفال. وحُددت البؤر الساخنة من خلال المسح وشملت، على وجه الخصوص، المناطق التي تتدفق إليها مياه الأمطار أو تتجمع فيها. ويتراكم التلوث في الغابات، ولا سيما على أوراق الأشجار واللحاء، ويؤدي أيضاً حرق الأخشاب إلى تركيز التلوث في الرماد. ولتجنب تراكم الرماد الملوث للغاية، خُزنت كميات كبيرة من اللحاء غير المعالج. وتشمل أنشطة إزالة التلوث التي تولد نفايات إزالة التربة والغطاء النباتي وغسل الهياكل.

وكان من بين التحديات الرئيسية خزن المواد الملوثة إشعاعياً التي تولدت بعد الاستصلاح والتخلص من تلك المواد. وكان تحديد مواقع الخزن المؤقت محفوفاً بصعوبات بسبب مخاوف أصحاب الأراضي وصعوبة الحصول على موافقتهم، ذلك أن العديد من أصحاب الأراضي كانوا قد هجروا إلى مناطق بعيدة في اليابان. واتُخذت ترتيبات مفصلة بين الحكومات على المستويات الوطنية والإقليمية والمحلية بشأن سُبل تحديد مواقع خزن النفايات ومرافق التخلص منها وكيفية توجيه النفايات إليها في مناطق البلديات المختلفة داخل النطاقات التي كانت مشمولة بأعمال الاستصلاح. ولا يُناقش هذا التذييل الموجز هذه الترتيبات. وكإجراء مرحلي، كدست بعض المواد في أكوام مغطاة في أكياس رمل مقاومة للعوامل الجوية أو أكياس أو حاويات مقاومة للماء

بالقرب من المواقع التي أزيل التلوث منها قبل نقلها إلى مواقع خزن مؤقت مصممة خصيصاً لهذا الغرض.

وعند نقطة التجميع، يُراعى في فصل المواد الملوثة شكل النفايات (قابلة للاحتراق/غير قابلة للاحتراق/تربة) وتركيز نشاط السيزيوم (< 800 بكريل/كغ؛ < 000 100 بكريل/كغ؛ > 000 100 بكريل/كغ). وتُعالج النفايات التي يقل تركيز نشاطها عن 8000 بكريل/كغ بالطرق المعتادة المستخدمة مع النفايات غير الملوثة إشعاعياً (الاحتراق، وإعادة تدوير المعادن والبلاستيك، وتحويل المواد العضوية إلى سماد، وما إلى ذلك) ويتم التصرف منها كنفايات صلبة بلدية، باستخدام البنية الأساسية القائمة المخصصة للنقل، والمناولة، وتقليص الحجم، والتخلص في مدافن النفايات الصلبة البلدية. وتتطلب النفايات المعيّنة (التي تزيد على 8000 بكريل/كغ) ترتيبات خاصة للنقل والمعالجة وإعادة تدويرها في نهاية المطاف وإعادة استخدامها، أو التخلص منها في مدافن معيّنة مزودة بنُظم لجمع السوائل المرتشحة والتحكم في الغازات والرصد

وبعد الخزن المؤقت، ستُنقل النفايات إلى مرفق الخزن المرحلي. ويجري النظر في أنواع مختلفة من التصاميم لمرفق الخزن المرحلي، تبعاً لنشاط النفايات وبيئة الموقع، بما يشمل مرافق الخنادق المبطنة المزودة أو غير المزودة بنظم لإدارة المياه، والهياكل الخرسانية العالية الجودة. ووقع الاختيار على موقع لمرفق الخزن المرحلي بالقرب من محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية، ومن المتوقع أن يحتوي المرفق على ما يتراوح بين 16 و22 م^3 من النفايات - أغلبها تربة ملوثة بعد تقليص حجمها، وسيجري الاحتفاظ بها في مرفق في شكل خندق. وستخزّن الأحجام الأصغر كثيراً من النفايات الأقوى إشعاعاً (> 000 100 بكريل/كغ) في مبانٍ خرسانية في المرفق.

وسيجري التخلص من النفايات المعيّنة في نهاية المطاف في مدافن نفايات مزودة بنُظم للتحكم في السوائل المرتشحة، وسيتعيّن تحديد موقعها وتشييدها في بعض المناطق.

ولم توضع اللمسات الأخيرة على ترتيبات التخلص النهائي من النفايات خارج الموقع. ومن المتوقع أن يبقى الجزء الأكبر من التربة في مرفق الخزن المرحلي في موقعه (سيشمل ذلك توليفة من أنشطة إعادة الاستخدام المحدود للأراضي داخلها، وإعادة الاستخدام الخاضع للرقابة بعد 30 عاماً)، بينما ستُنقل النفايات القوية الإشعاع المتبقية وسيجري التخلص منها خارج محافظة فوكوشيما.

الشكل-60- إزالة التلوث وجمع التربة في منطقة زراعية (إلى اليسار) ومرفق خزن مؤقت للتربة (إلى اليمين). بإذن من بلدة أوكوما.

رابعاً-2-2- النفايات من التثبيت وإزالة التلوث في الموقع

تولدت النفايات المشعة الصلبة أثناء عملية الوصول إلى المرافق النووية المتضررة والوصول بها إلى حالة من الاستقرار. وتولدت في وقت لاحق كميات كبيرة من النفايات أثناء إجراء برنامج الاستصلاح. وكانت النفايات الأوّلية عبارة عن ركام وحطام آخر (خرسانة ومعادن وبلاستيك) وأشجار مقطوعة ونباتات. وبالمقارنة مع النفايات التي تنشأ عن العمليات الروتينية فإن الكميات تكون أكبر كثيراً وتكون مستويات التلوث أعلى بكثير

وبحلول منتصف عام 2015، نُفذت أعمال التنظيف الرئيسية قبل الإخراج من الخدمة وخُزن نحو 160 000 م^3 من الحطام ونحو 83 000 م^3 من الأشجار المقطوعة في الموقع. ويُفصل الحطام (الناتج عن المباني المتضررة وأنشطة التنظيف المختلفة في الموقع) بناءً على معدلات الجرعات السطحية وأنواع المواد (على سبيل المثال، الخرسانة أو الفولاذ) ويُخزن في مجموعة من الهياكل، بما في ذلك الأكوام المغطاة بالتربة، والخيام، وعدة مئات من حاويات النقل التقليدية والمباني المعاد توظيفها (انظر الشكل-60). ويخزّن الركام في أكمات مغطاة بأغطية غير منفذة تحت طبقة من التربة لتقليل التعرض للإشعاع. وكُدست الأشجار المقطوعة (اجتث كثير منها للسماح ببناء مرافق للتصرف في المياه الملوثة)، بعد إزالة الغطاء النباتي، في أكوام يصل ارتفاعها إلى 5 امتار، مما يسمح بتدفق الهواء والتروية لمنع نشوب الحرائق.

وتتألف خارطة الطريق الخاصة بالإخراج من الخدمة من ثلاث مراحل، تم الانتهاء من مرحلتها الأولى (إزالة الوقود المستهلك من أحواض الخزن) في الوحدة 4 في أواخر عام 2014. وتشمل المرحلة الثانية إجراء الاستعدادات اللازمة لإزالة بقايا الوقود من المفاعلات المتضررة، وستستمر حتى نهاية العقد الثاني من هذا القرن، وسينصب التركيز في المرحلة النهائية على إخراج الموقع من الخدمة، وسيستمر ذلك ما يتراوح بين 30 و40 سنة أخرى. ولا يمكن الشروع في إخراج المرفق من الخدمة (إزالة الهياكل والنُظم والمكونات) إلا بعد إزالة الوقود وحطام الوقود. وفي المرحلة النهائية، من المرجح أن تستغرق إزالة حطام الوقود من المفاعلات وقتاً أطول بكثير مما كانت عليه في الوحدة 2 في ثري مايل آيلند ، حيث تحقق ذلك في نحو 12 عاماً. ويسمح التخطيط بفترة تصل إلى 30 عاماً.

وأثناء الإخراج من الخدمة، وبحلول نهاية دورة إزالة الوقود، تُشير التقديرات المتحفظة إلى أنه سيجري توليد نحو 560 000 م^3 من المواد الملوثة. وتبلغ السعة المقررة لمرفق الخزن المركزي 160 000 م^3 تقريباً. ومن المفترض معالجة الفرق بين الكمية المتوقعة البالغة 560 000 م^3 والكمية المقررة عن طريق الفصل المناسب للنفايات وتقليص الحجم وإعادة التدوير. وبدأ تشغيل وحدة محرقة جديدة للنفايات في الموقع في آذار/مارس 2016.

رابعاً-2-3- التصرف في النفايات السائلة

شكل التصرف في الأحجام الكبيرة من المياه الملوثة الناتجة عن الحاجة المستمرة إلى تدوير المياه لتبريد المفاعلات المتضررة أو الناتجة عن تسرب المياه السطحية والجوفية لمباني المفاعلات المتضررة مسألة رئيسية. ويتم التصرف في نحو 800 م^3 من المياه الملوثة يومياً. ويُعاد تدوير نصف المياه من خلال احتواء المفاعل لتبريد حطام الوقود، بينما يعالج النصف الآخر لإزالة التلوث. ومن خلال السماح بالتدفق الطبيعي المستمر إلى الطوابق السفلية المتضررة، تنخفض احتمالات انتقال التلوث إلى الخارج في الأرض. ويُخزن ما يقرب من مليون طن من المياه المعالجة داخل الموقع في نحو 900 صهريج

واستُخدمت مجموعة متنوعة من محطات معالجة المياه لاستخلاص المكونات المشعة من النفايات، بما في ذلك مرفق إزالة النويدات المشعة المتعددة: النظام المتقدم لمعالجة السوائل. وتولد هذه المرافق نفايات ثانوية، مثل الحمأة والملاط وأوعية الامتزاز ووسائط الامتزاز، والتي يُحتفظ بها في حاويات خرسانية تُكدس في مخازن خارجية مؤقتة مزودة بأغطية خرسانية. وعلى الرغم من إزالة معظم النويدات المشعة، من غير الممكن إزالة التريتيوم، ويعني ذلك عدم إمكانية تصريف المياه حالياً. وفي نهاية عام 2018، أشارت التقديرات إلى أنه سيجري تجاوز سعة الخزن المقررة للمياه المعالجة (1,37 مليون م^3) في غضون ثلاث أو أربع أعوام [194]. ويجري تقييم التقنيات اللازمة لتزجيج النفايات الثانوية وتقليص حجمها.

ويطرح التصرف في النفايات داخل الموقع مشاكل معقدة في مجال البحث والتطوير، وكثير من هذه المشاكل غير مسبوق ومحفوف بتحديات. وهناك تعاون قائم بين المنظمات المحلية والخارجية، ويُستعان بالخبرة والمعرفة ذات الصلة من جميع أنحاء العالم.

التذييل الخامس

حوادث نووية أخرى

يصف هذا التذييل بإيجاز الخبرة المكتسبة في مجال التصرف في النفايات الناتجة عن تنظيف سلسلة من الحوادث النووية التاريخية سواءً في القطاع المدني أو القطاع العسكري.

خامساً-1- كيشتيم، الاتحاد السوفياتي السابق: 1957

نجم الحادث الذي وقع في جمعية ماياك للإنتاج في أيلول/سبتمبر 1957 عن انفجار صهريج يحتوي على محلول نفايات قوية الإشعاع ناتجة عن إعادة المعالجة في محطة إنتاج البلوتونيوم، بالقرب من مدينة كيشتيم في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية السابق، على بُعد نحو 100 كيلومتر جنوب منطقة سفيردلوفسك [176، 195]. وتسبب الحادث في تلوث نهر تيكا وبحيرة كاراشاي، حيث انطلق ما يقرب من 1016 بكريل من نواتج الانشطار، وكانت النويدات المشعة القصيرة العمر للسيريوم-144 والزركونيوم-95 تمثل 91 في المائة من النشاط الإشعاعي الإجمالي المنطلق. وبعد اضمحلال النويدات المشعة القصيرة العمر، نتج الخطر الإشعاعي الأطول أجلاً عن السترنشيوم-90 الذي بلغ نشاطه 4×10^{15} بكريل. وحدث ترسيب مشع في الظروف الجوية الجافة، مما أدى إلى تلويث مساحة بلغت 000 15 كم^2، وكان نشاط السترنشيوم-90 أعلى من 3,7 كيلو بكريل/م^2 [195]. وكان محتوى النشاط الإشعاعي للمواد المنطلقة في أغلبه نواتج انشطارية ونسب منخفضة جداً من نواتج التنشيط والأكتينيدات) من ذلك على سبيل المثال أن نظائر البلوتونيوم لم تكن تستأثر سوى بنسبة 0,0043 في المائة من النشاط الإشعاعي).

وبُذلت جهود كبيرة لفصل النفايات تبعاً لمادتها ومنشأها، ولكن بسبب ضغوط الوقت والكميات الكبيرة جداً من المواد، لم يكن من الممكن إجراء عملية موسعة لتحديد خصائص النفايات وفصل هذه المواد. وأُجري حرث عميق لأكثر من 6000 هتار من الأراضي الزراعية لدفن الطبقة السطحية من التربة الشديدة التلوث على عمق يزيد على 50 سنتيم، أي أقل من عمق تغلل جذور العديد من المحاصيل. وخلال الفترة بين عامي 1958 و1959، حرثت مساحة تزيد على 000 20 هكتار من الأراضي لتقليل امتصاص النباتات للتلوث وتقليل التعرض لأشعة غاما. وأزيل التلوث من المناطق الأقل تلوثاً عن طريق نقل الطبقة العليا من التربة إلى الأراضي الأكثر انخفاضاً، مثل حفر التشييد والخنادق المهجورة. وأزيل نحو 000 320 م^3 من التربة وتم التخلص

منها. وما زال استصلاح منطقة مایاك مستمرة، ومن الواضح أن عملية تحديد الخصائص الفعلية للموقع ستكون صعبة جداً وستستغرق مدة زمنية طويلة

ولا يمثل حادث كيشتيم مشكلة التلوث الأكثر خطورة في منطقة محطة مایاك. وبعد التوقف عن إلقاء محاليل النفايات القوية الإشعاع (في الفترة من عام 1949 إلى عام 1956) مباشرة في نهر تيكا، أُطلقت النفايات القوية الإشعاع بعد ذلك في بحيرة كاراشاي. ويبلغ حجم التلوث في بحيرة كاراشاي حالياً ~4,4 × 10^{18} [196]، أو نفس حجم التلوث الذي انطلق بسبب حادث تشيرنوبيل [197].

خامساً-2- بالوماريس، إسبانيا: 1966

في كانون الثاني/يناير 1966، اصطدمت طائرتان عسكريتان أمريكيتان، إحداهما كانت تقل أربعة أسلحة نووية حرارية، أثناء عملية نقل الوقود على متن الطائرة. وعُثر على ثلاث قنابل ملقاة على الأرض في اليوم التالي. وأصيب اثنان من الأسلحة بأضرار بالغة بسبب انفجار عبوة ناسفة غير نووية عند الارتطام بالأرض. وانتُشل الرابع في وقت لاحق سليماً من البحر. وأدى الانفجار إلى انتشار أكسيد البلوتونيوم في مساحة بلغت نحو 660 هكتاراً، مما أدى إلى تلويث التربة والمحاصيل الزراعية والنباتات الأخرى بالقرب من قرية بالوماريس، التي كان عدد سكانها في ذلك الوقت 000 2 نسمة تقريباً [198].

ووضعت التربة التي كانت تحتوي على مستويات من التلوث المشع الذي كان يزيد على 1,2 ميغا بكريل/م^2 في براميل بسعة 250 لتراً، وشُحنت إلى محطة نهر سافانا في ولاية كارولينا الجنوبية في الولايات المتحدة الأمريكية لدفنها. وأزيل التلوث من مساحة بلغت في مجموعها 2,2 هكتار باستخدام هذه التقنية، مما أدى إلى إنتاج 6000 برميل. وخُلطت التربة في سبعة عشر هكتاراً من الأراضي الأقل تلوثاً بعمق 30 سنتيم عن طريق التمشيط والحرث. وعلى المنحدرات الصخرية التي كان التلوث يزيد فيها على 120 ميغا بكريل/م2، أزيلت التربة باستخدام أدوات يدوية وشحنت إلى الولايات المتحدة الأمريكية في براميل [75].

وأنشئت ست مناطق لتوجيه أعمال الاستصلاح الأوّلية التي حُددت في اتفاق بين الحكومة الإسبانية وحكومة الولايات المتحدة. وشملت عملية التنظيف حرق المحاصيل المحتوية على مستويات من البلوتونيوم أقل من 400 عدة في الدقيقة. وغطيت المحاصيل التي تتجاوز هذا الحد وخُزنت ونقلت لاحقاً إلى الولايات المتحدة الأمريكية، بالإضافة إلى 823 م^3 من التربة التي كانت مستويات البلوتونيوم فيها تزيد على 000 60 عدة في الدقيقة. وأُجريت تروية وحراثة لنحو 115 هكتاراً من التربة المحتوية على مستويات من البلوتونيوم تراوحت بين 700 إلى 000 60 عدة في الدقيقة. ولم يتم إجراء أي استصلاح في مناطق التلال القريبة بسبب الانحدار الشديد.

وأدى إدخال الزراعة الكثيفة في ثمانينات القرن الماضي، إلى جانب زيادة السياحة في التسعينات، وبناء صهاريج المياه القريبة والفيضانات اللاحقة، إلى توسيع برنامج المراقبة الإشعاعية والقيود على استخدام الأراضي. وأُجري في هذا البرنامج تقييم لمدة المصدر المتبقي وتوزيعه في الأعماق من خلال التحديد الشامل للخصائص في منطقة تبلغ مساحتها 660 هكتاراً، وإجراء تحديد مكثف لخصائص مساحة 41 هكتاراً، ورسم خرائط للحُفر باستخدام ردار استكشاف باطن الأرض. وتشمل عملية أخذ العينات البيئية المستمرة الهواء والتربة والرواسب والمياه والنباتات والمنتجات الحيوانية. ويجري حالياً أخذ عينات قياسات أحيائية بشرية طوعية لتحديد صحة عامة السكان، وتوفير كشف مبكر عن الحالات الصحية، وتقليل مخاوف الجمهور. ويُشارك الجمهور أيضاً في تقييم خيارات العلاج الإضافية [172].

وكشفت دراسة استقصائية أُجريت في عام 2004 عن استمرار تلوث كبير في بعض المناطق، وقامت الحكومة الإسبانية بعد ذلك بمصادرة بعض قطع الأراضي التي كان من الممكن تخصيصها للاستخدام الزراعي أو لبناء المساكن. وفي عام 2006، اتفقت الحكومة الإسبانية وحكومة الولايات المتحدة الأمريكية على إزالة التلوث من المناطق المتبقية وتقاسم عبء العمل والتكاليف. وفي عام 2008، اكتشف خندقان كان الجيش الأمريكي يُخزن فيهما نحو 2000 م^3 من التربة الملوثة خلال عمليات 1966. وعُثر على الخندقين بالقرب من المكان الذي انتشل فيه أحد الأجهزة النووية في عام 1966، ومن المحتمل أن القوات الأمريكية حفرت الخندقين في اللحظة الأخيرة قبل مغادرة بالوماريس. وفي عام 2015، وقعت إسبانيا والولايات المتحدة الأمريكية اتفاقاً لمواصلة مناقشة تنظيف الأراضي الملوثة بالنشاط الإشعاعي وإزالتها.

وتشمل الدروس المستفادة في ما يتعلق بالتصرف في النفايات الناتجة عن حادث بالوماريس ما يلي:

- يمكن أن تتطلب استخدامات الأراضي المتغيرة والأكثر كثافة (مثل استخدام مبيدات الآفات)، وكذلك الظواهر الطبيعية (مثل الفيضانات) القيام لاحقاً بإجراء استصلاح موسع وتوسيع للقيود المفروضة على استخدام الأراضي.
- كانت الإجراءات الأوّلية المتخذة لإزالة التربة وترويتها وحرثها فعالة في تخفيف التلوث إلى مستويات أعمق في التربة.
- أثبت الجمع بين الغربلة الرطبة والجافة فعاليته في فصل جسيمات التربة حسب الحجم، ويُقلل ذلك إلى أدنى حد من حجم النفايات المشعة المطلوب التخلص منها.

خامساً-3- سيوداد خواريث، المكسيك: 1983

في كانون الأول/ديسمبر 1983، أُجري تفكيك لوحدة المعالجة الإشعاعية البُعادية التي كانت تحتوي على مصدر مشع مختوم من الكوبلت-60، وتصدع المصدر في ساحة خزن الخردة في سيوداد خواريث في المكسيك. وكان المصدر يحتوي على أكثر من 000 6 قرص من الكوبلت-60 بما مجموعه $1,7 \times 10^{13}$ بكريل، وكانت تلك الأقراص متناثرة بين الخردة المعدنية. واستُخدمت الخردة المعدنية في وقت لاحق في مسابك محلية، مما أدى إلى إنتاج آلاف الأطنان من المنتجات الملوثة. ولم يُكشف التلوث وشُحنت منتجات الفولاذ داخل المكسيك والولايات المتحدة الأمريكية. وفي الواقع، أُعلن عن أول اعتراف بوقوع حادث عندما كُشفت منتجات معدنية ملوثة في الولايات المتحدة الأمريكية بعد مرور أكثر من شهر. وفي هذه المرحلة فقط، تم تعقب الشحنة حتى تم الوصول إلى مصدرها في ساحة الخردة في سيوداد.

وأدى الحادث وما تبعه من تشتت إلى تلوث آلاف الأطنان من المنتجات المعدنية والعديد من المسابك والشوارع ومئات المنازل. وعُثر في الولايات المتحدة الأمريكية على عدة مئات من الأطنان من منتجات الفولاذ الملوثة. وبدأ تنفيذ برنامج للتنظيف على نطاق واسع [199]. وجُمعت أقراص الكوبلت-60 والمنتجات المعدنية الملوثة وخُزنت في حاويات خرسانية وبراميل مناسبة مصنوعة من الفولاذ. وبالإضافة إلى ذلك، جُمعت كميات كبيرة من التربة الملوثة والحطام من 814 مبنى من المباني المتأثرة، والتي هُدمت جزئياً أو كلياً، للتخلص منها. وفي المُجمل، جُمع 000 21 متر مكعب من النفايات المشعة في إطار برنامج التنظيف [200].

خامساً-4- غويانيا، البرازيل: 1987

في أيلول/سبتمبر 1987، عثر اثنان من السكان المحليين على وحدة علاج إشعاعي مهجورة في عيادة سابقة كان من المقرر هدمها. وكانت الوحدة تحتوي على مصدر مشع مؤلف من 5 $\times 10^{13}$ بكريل من السيزيوم-137. وقام السكان المحليون بإزالة المجمعة الدوارة المحتوية على المصدر، ونقلوها إلى منزل مجاور يعيش فيه أحدهم. وفي الأيام التالية، لحقت أضرار بالمعدات وقام عدة أشخاص بمناولة أجزاء منها. وانتشر التلوث على نطاق واسع، بما في ذلك داخل فناء إدارة الصحة العامة في غويانيا، حيث أودعت بقايا المصدر.

وخلال التصدي الأوّلي، اتُخذت بعض الإجراءات المبكرة لتأمين بقايا المصدر لدى الوكالة الوطنية لمراقبة الصحة (Vigilancia Sanitaria)، حيث غُطيت بالخرسانة. وبعد ذلك، اتُخذ قرار بإجراء مسح شامل قبل المضي قدماً في اتخاذ أي إجراء آخر. وفي المجمل، أصبح ما يقرب من 10 مواقع مختلفة ملوثة بدرجة كافية بحيث بات التنظيف ضرورياً. واكتشفت معدلات جرعات

تراوحت بين 50 و2000 ميليسيفرت/ساعة. وسرعان ما أصبح واضحاً للموظفين التقنيين أن تنظيف الموقع سيسفر عن كميات كبيرة من النفايات وسيلزم توفير موقع في منطقة غويانيا يمكن أن تنقل إليه النفايات المعبأة بطريقة سليمة وتُخزن فيه. ووقع الاختيار على منطقة خزن مؤقت في منطقة ذات كثافة سكانية منخفضة تبعد 20 كيلومتراً تقريباً عن غويانيا و2,5 كيلومتر من أباديا دي غوياس [201].

ونتج عن عملية التنظيف في نهاية المطاف ما يقرب من 3500 م^3 أو 6000 طن من النفايات الملوثة بالسيزيوم-137. وجرى التخلص من هذه النفايات في عام 1995 في مستودعين مشيدين على شكل أقبية خرسانية كبيرة بالقرب من سطح الأرض. وخُصص المستودع الأول للنفايات الضعيفة الإشعاع جداً (40 في المائة من حيث الحجم مع السيزيوم-137 < 87 بكريل/غ) وخُصص المستودع الثاني للنفايات الأقوى إشعاعاً (40 في المائة من حيث الحجم مع السيزيوم-137 > 87 بكريل/غ). وما زالت الدراسات جارية لتقييم أمان المواقع [202] .

وفي ما يلي بعض الدروس المستفادة في ما يتعلق بالتصرف في النفايات [201]:

(أ) يُساهم فحص خصائص التربة بدور قيم في تحديد الطبقة المراد إزالتها وتجنب إزالة كميات كبيرة من التربة النظيفة.

(ب) رأى السكان المحليون أن كمية المواد التي أزيلت كانت متناسبة مع المخاطر التي تعرضوا لها، مما تسبب في سوء فهم لأنشطة التصرف في النفايات.

(ج) أدت عمليات التشييد والخدمات الحضرية اللاحقة إلى إعادة المواد الملوثة المدفونة إلى السطح.

(د) أدى الافتقار إلى معايير الاستصلاح والمعلومات الخاصة بالموقع إلى استخدام نُهج متحفظة وتوليد ضغوط عامة وهدر وتكاليف غير ضرورية.

(هـ) من الضروري لاتخاذ قرارات جيدة بشأن الاستراتيجيات التي سيجري الأخذ بها إشراك السكان المحليين والمنظمات الحكومية وغير الحكومية.

(و) يلزم وضع سياسة واستراتيجية لاستصلاح المواقع الملوثة والتصرف في النفايات، وهو ما يمكن إدراجه كجزء من سياسة واستراتيجية للتصرف في النفايات على المستوى الوطني.

خامساً-5- أسيرينوكس، إسبانيا: 1998

في أيار/مايو 1998، حدث انصهار عرضي لمصدر العلاج الإشعاعي الطبي السيزيوم-137 الذي يبلغ نشاطه نحو 4,5 تيرا بكريل في فرن كهربائي في أسيرينوكس، وهو محطة لإعادة معالجة الخردة المعدنية في لوس باريوس، إسبانيا [203]. وتكونت بسبب السيزيوم-137 الذي

انطلق من المسبك سحابة مشعة فشلت كواشف المداخن في أسيرينوكس في كشفها، ولكنها اكتُشفت في النهاية في فرنسا وإيطاليا وسويسرا وألمانيا والنمسا. واحتُجزت بعض الأبخرة في نظام الترشيح، مما أدى إلى تلوث 270 طناً من الرماد الذي كان قد جُمع بالفعل. وأزيل الرماد وأرسل إلى محطتين للمعالجة كجزء من أعمال الصيانة الروتينية. واستقبل أحد المصانع 150 طناً استُخدمت بعد ذلك في عملية لتثبيت أحد المستنقعات، مما أدى إلى زيادة كتلة المادة الملوثة إلى 500 طن وتلويث المستنقع.

وكان الحد الأقصى لنشاط النفايات قبل بدء عمليات إزالة التلوث ما يقرب من 2000 بكريل/غ. ووضعت النفايات الناتجة في نوعين من الحاويات. ووضع الرماد في أكياس سعة كل منها 1 م^3، ووضعت النفايات المعدنية والبلاستيكية والورقية وغيرها في براميل سعة كل منها 220 لتراً. وفي المجمل، يُحتفظ بنحو 2000 طن من نفايات الرماد و150 طناً من النفايات الأخرى في مواقع مختلفة بهدف التخلص منها في مرفق الكبريل للتخلص من النفايات. وقُيّمت منهجيات المعالجة المختلفة لتقليص أحجام النفايات التي يلزم التخلص منها أو إخراجها من التصنيف بحيث يمكن التخلص منها كنفايات معفاة.

التذييل السادس

تنظيف المواقع النووية الموروثة

يصف هذا التذييل بإيجاز الخبرة في التصرف في الكميات الكبيرة من النفايات الناتجة عن تنظيف المواقع النووية الموروثة. وهذه النفايات ليست ناتجة عن حوادث، ولكن أحجامها والحالات النهائية المرغوبة للموقع والنُهج التي اتُبعت ترتبط بالتصرف في الكميات الكبيرة من النفايات الناتجة عن الحوادث النووية. وبالإضافة إلى ذلك، يتضمن هذا التذييل معلومات وثيقة الصلة بالمرافق الفرنسية للتخلص من الأحجام الكبيرة من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً الناتجة عن تفكيك المرافق النووية.

سادساً-1- مواقع القوى النووية المدنية الموروثة في المملكة المتحدة

دخلت أول مفاعلات قوى نووية تجارية في العالم في كالدر هول في وندسكيل (التي أصبحت الآن تُشكل جزءاً من سيلافيلد) في حالة حرجة في عام 1956، وكان الموقع محور أنشطة دورة الوقود في المملكة المتحدة طيلة 60 عاماً منذ ذلك الوقت. وفي عام 2004، أنشأت حكومة المملكة المتحدة الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة التي كُلفت بتنظيف الإرث النووي المدني في المملكة المتحدة والذي يتوزع عبر 17 موقعاً. وتشمل هذه المواقع مرافق إثراء اليورانيوم وتصنيع الوقود، ومواقع بحوث المفاعلات، ومواقع مفاعلات القوى النووية ومرافق إعادة معالجة الوقود المستهلك في سيلافيلد.

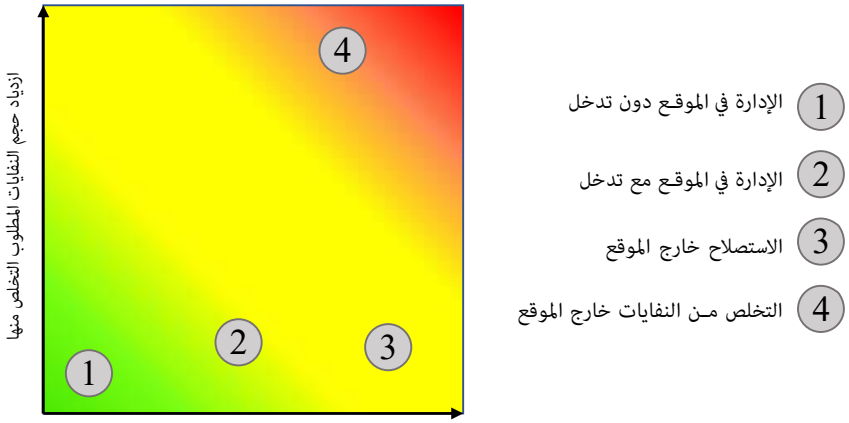
وقامت الهيئة النووية للإخراج من الخدمة بوضع استراتيجية وخطة لتنظيف الإرث النووي الذي يتم تحديثه كل خمس سنوات على الأقل [204]. ويُشكل الحد من الأخطار جانباً رئيسياً في الاستراتيجية، وهو يعطي الأولوية للعمل على أساس الأخطار الأشد أولاً. وعندما تكون المخاطر غير مقبولة، تُتخذ إجراءات عاجلة للحد منها. وعندما تكون المخاطر أقل أهمية، تؤخذ العوامل التقنية والاجتماعية والاقتصادية في الاعتبار بصورة أكبر. ومع ذلك، يبقى التركيز منصباً على الحد من المخاطر والأخطار إلى أقصى حد ممكن عملياً.

ومن الجوانب المهمة في تخطيط التنظيف إعداد حالة نهائية مناسبة: الحالة المادية للموقع بعد الانتهاء من جميع أعمال الاستصلاح. ويشمل ذلك تحديد كمية أي تلوث متبق في الأرض، أو يرتبط بأي مبانٍ أو هياكل لا تزال قائمة تحت سطح الأرض.

وبدلاً من تطبيق هدف واحد عام للتنظيف في جميع المواقع، تُصمم الحالات النهائية لكل موقع، مع مراعاة سيناريوهات إعادة الاستخدام المحتملة. وبالنظر إلى التوزيع الواسع للمواقع واختلاف الطلب الأراضي لأغراض إعادة التطوير، توضع أهداف التنظيف بحيث تكون متناسبة مع الاستخدامات الجديدة المرجحة. وفي حالات معيّنة، يمكن أن يعني ذلك ترك بعض التلوث في الموقع مراقبة المخاطر عن طريق تقييد الوصول. وفي حالات أخرى، قد يعني ذلك إزالة جميع التلوث المتبقي من الموقع للتمكين من إخراجه تماماً من التحكم الرقابي (إلغاء ترخيصه)، مما يسمح بإعادة استخدامه دون قيود. وبالتالي فإن مستوى الجهد المطلوب لتحقيق حالات نهائية مختلفة ومقدار النفايات المشعة المنتجة سيختلف، كما هو موضح في الشكل-61.

وتنطوي جهود التنظيف على أحجام كبيرة من النفايات التي تكون في معظمها ملوثة إشعاعياً بصورة طفيفة أو منشطة. وسينجم كثير من هذه المواد عن إخراج المرافق النووية من الخدمة (إنتاج الفولاذ، والخرسانة، والطوب، وما إلى ذلك)، ولكنها تشمل أيضاً التربة الناتجة عن استصلاح الأراضي الملوثة. ويُقدر الحجم التقديري الإجمالي للنفايات المشعة من جميع المصادر بما قدره 000 770 4 م^3، [205] وتشمل هذه النفايات ما يلي:

- نفايات ضعيفة الإشعاع جداً: 000 720 2 م^3.
- نفايات ضعيفة الإشعاع: 000 600 1 م^3.
- نفايات متوسطة الإشعاع: 000 449 م^3.
- نفايات قوية الإشعاع: 500 1 م^3.



الشكل-61- الأداء النموذجي لخيارات استصلاح الأراضي الملوثة في المواقع النووية في المملكة المتحدة مقابل معايير القرار الرئيسية. بتصرف من المرجعين [205، 206]

ويتعيّن اتباع طرق متناسبة في التصرف في هذه الأحجام الكبيرة من النفايات لضمان الاستخدام الفعال للموارد على المستوى الوطني. ووضعت استراتيجية وطنية منقحة للتصرف في النفايات الضعيفة الإشعاع جداً والنفايات الضعيفة الإشعاع في عام 2010 [207] واستُكملت بتحديثات في عام 2016 [208]. وتُعزز هذه الاستراتيجية موضوعين رئيسيين

(أ) التطبيق الواسع النطاق للتسلسل الهرمي للنفايات، ولا سيما لتحويل مزيد من المواد نحو مسارات إعادة الاستخدام وإعادة التدوير، بدلاً من التخلص منها؛
(ب) إجراء فصل أفضل للنفايات الضعيفة الإشعاع جداً عن النفايات الضعيفة الإشعاع، والتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في مرافق بشكل مدافن قريبة من سطح الأرض (بدلاً من الأقبية الهندسية)، بناءً على تقييم مناسب للمخاطر.

وهذه الاستراتيجية تدعمها سياسة منقحة لرفع الرقابة تسمح بالتصرف في مواد النفايات (والتخلص منها) باعتبارها 'خارجة عن النطاق' (أي غير مشعة) للأغراض الرقابية. وطورت الصناعة النووية في المملكة المتحدة دليلاً عملياً ومدونة لقواعد تطبيق رفع الرقابة، وهي تُميِّز بطريقة مفيدة بين المواد النظيفة التي يمكن التحقق من خلال المنشأ والسجلات من أنها لا تنطوي على أي إمكانية لأن تكون ملوثة أو منشطة، والمواد المستبعدة التي يمكن التحقق من خلال القياس من أنها تحتوي على مستويات نشاط إشعاعي أقل من الحدود التي تؤهل لرفع الرقابة [209]

وأدى التطبيق المشترك لرفع الرقابة، وفصل النفايات الضعيفة الإشعاع جداً والتخلص من النفايات على أساس المخاطر إلى تغيير كبير في طريقة التصرف في الأحجام الكبيرة جداً من النفايات الناتجة عن التنظيف في المملكة المتحدة.

وتُشغِّل المملكة المتحدة مرفقاً وطنياً واحداً للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع: مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع الذي يقع بالقرب من قرية Drigg بالقرب من موقع سيلافيلد. ويقبل هذا المستودع المصمم هندسياً على شكل قبو فوق سطح الأرض، النفايات الضعيفة الإشعاع التي تثبت بأسمنت وتوضع في حاويات. وتبلغ السعة القصوى لمرفق مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع 1,7 مليون م^3. وتم تمديد عمره التشغيلي عن طريق تحويل النفايات الضعيفة الإشعاع إلى مدافن نفايات بديلة (يجري حالياً تطويرها تجارياً)، وفقاً للسياسة الوطنية.

وفي ما يلي الدروس المستفادة بشكل عام من معالجة الإرث النووي:

(1) يمكن التصرف في النفايات المشعة الناتجة عن الحوادث (على سبيل المثال، حريق وندسكيل) كجزء من استراتيجية وطنية متكاملة للتصرف في النفايات من أجل التعامل مع جميع النفايات المشعة؛

(2) يتعيّن التخطيط لعملية التنظيف باستخدام أهداف نهائية محددة وعملية. ويتعيّن استخلاص الحالة النهائية (وبالتالي مستويات التنظيف) مع مراعاة عوامل الأمان والعوامل التقنية والاجتماعية والاقتصادية، التي قد تختلف من موقع إلى آخر.

(3) يمكن تحقيق استخدام أفضل للموارد من خلال اتباع نهج تناسبي قائم على المخاطر للتخلص من النفايات. ويمكن أن يؤدي تحويل النفايات المنخفضة المخاطر بعيداً عن المرافق الهندسية المكلفة إلى الحفاظ على القدرة على التخلص من النفايات وتيسير التخلص من تيارات النفايات الأخرى في الوقت المناسب.

سادساً-2- الولايات المتحدة الأمريكية: مواقع البحث والتطوير والإنتاج في مجال الأسلحة النووية الموروثة

يمثل استصلاح آلاف الأماكن الملوثة في مواقع متعددة في جميع أنحاء الولايات المتحدة الأمريكية والتي يُشارك كثير منها أو كان يشارك في السابق في أعمال البحث والتطوير وإنتاج الأسلحة النووية مهمة مستمرة منذ عقود من الزمن. وتشير التقديرات إلى أنه تم التخلص من أكثر من 10 م^3 من النفايات المتنوعة حتى الآن. وما زال العمل مستمراً في كثير من هذه الأماكن. وبشكل عام، تم بناء مرافق جديدة للتخلص من النفايات في الموقع وتوجد فيها أحجام كافية من النفايات لتحقيق وفورات في الحجم. ويُساهم هذا النهج أيضاً في تجنب تكلفة تحميل النفايات ونقلها وتفريغها في مرافق التخلص من النفايات التي تقع على بُعد مئات أو آلاف من الكيلومترات.

وأنشئت لجان استشارية من المواطنين المحليين لكل موقع من مواقع التنظيف لتزويد اللجان المحلية بالمعلومات وإشراكها في تخطيط الاستصلاح وتنفيذه. ونتيجة لذلك، وبفضل إنشاء مرافق جديدة للتخلص من النفايات بالقرب من المناطق الملوثة القائمة، ظلت المعارضة العامة المحلية محدودة.

ويعد مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن الترميم البيئي الموجود في محمية هانفورد بولاية واشنطن، واحداً من أكبر المرافق التي طوِّرت لهذا الغرض [210]. وافتتح الموقع في عام 1996، وتم تطويره لاستيعاب التربة والحطام الذي يحتوي على نفايات مشعة ضعيفة الإشعاع، بما في ذلك المواد المختلطة بمكونات كيميائية خطرة. ويستخدم مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن الترميم البيئي وحدات كبيرة منفصلة للتخلص من النفايات، وهي مزودة ببطانة سفلية غشائية واقية ونُظم صرف وأغطية هندسية. ويظهر التصميم في الشكل-62.

ويشمل مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن الترميم البيئي حالياً ثماني وحدات أو خلايا للتخلص من النفايات. ويبلغ عرض أحدث خلايا التخلص من النفايات 152 م، ويبلغ طولها

305 أمتار وعمقها 21,3 م، وتبلغ قدرتها الاستيعابية 2,8 مليون طن من النفايات. وأُدخلت تحسينات أخرى على وفورات الحجم للوصول بها إلى المستوى الأمثل من خلال استخدام نظام واحد لجمع السوائل المرتشحة (استخدمت التصاميم السابقة نظامين اثنين) واستبدال طبقة التصريف الحصوية التي يبلغ سمكها 30 سنتيم بمادة تركيبية أرضية، مما أدى إلى خفض التكاليف الرأسمالية وزيادة القدرة على استيعاب النفايات.

وفي المواقع الصغيرة الحجم، أو في حالة النفايات التي تتطلب تصميماً متخصصاً وممارسات تشغيلية للتخلص منها، تُستخدم مرافق التخلص المركزية الواقعة خارج الموقع للتخلص من النفايات من جميع أنحاء البلد. وتشمل الأمثلة على ذلك مستودع التخلص من النفايات الناتجة عن الترميم البيئي، والمستودع القريب من سطح الأرض والتخلص باستخدام حُفر التنقيب في موقع نيفادا للأمن القومي (موقع نيفادا للاختبارات سابقاً)، والمستودع الجيولوجي لمشروع المحطة التجريبية لعزل النفايات الذي يقبل نفايات عناصر ما وراء اليورانيوم من برامج الدفاع. ويتخلص موقع نيفادا للأمن القومي من خليط النفايات الكيميائية المشعة والخطرة، ولأغراض التخلص من النفايات، يستخدم خنادق مبطنة شبيهة بالخنادق المستخدمة في مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن الترميم البيئي، بالإضافة إلى التخلص من النفايات في حُفر التنقيب.

وتشمل الدروس المستفادة من تنظيف مواقع الأسلحة النووية الموروثة في الولايات المتحدة الأمريكية ما يلي:

(أ) يتيح وضع معايير للتنظيف على أساس كل موقع على حدة مرونة أكبر في تحسين حلول التخلص من النفايات.

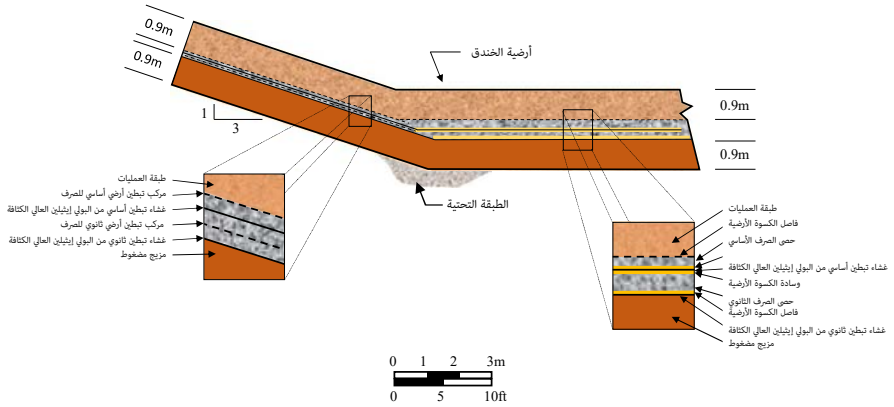
(ب) خُفضت تكاليف التخلص من النفايات لكل وحدة بشكل كبير عن طريق استخدام مرافق كبيرة الحجم وذات غرض واحد للتخلص من النفايات.

(ج) يُحقق اختيار موقع مرافق التخلص من النفايات بالقرب من موقع توليد النفايات وفورات كبيرة في تكاليف النقل.

(د) بالنسبة لعمليات التنظيف المعقدة، قد يلزم توفير مرافق متعددة للتخلص من النفايات بحيث يتم تصميمها وتشييدها وتشغيلها لأنواع مختلفة من النفايات من أجل الوصول بالحلول إلى المستوى الأمثل.

(ه) قد يكون تحقيق منافع هذه التجربة صعباً في حالة الحوادث النووية بسبب الضغط العام لتنفيذ حلول أسرع مما يتيحه هذا النهج؛

(و) تُشكل لجان المواطنين المحليين وسيلة فعالة لتزويد المجتمعات المحلية بالمعلومات وإشراكها في تخطيط عملية التنظيف وتنفيذها.



الشكل-62- مرفق التخلص من النفايات الناتجة عن الترميم البيئي في هانفورد. بإذن من وزارة الطاقة في الولايات المتحدة [210].

سادساً-3- أستراليا: موقع مارالينغا لتجارب الأسلحة النووية الموروثة

أجرت المملكة المتحدة في الفترة بين عامي 1952 و1957 تجارب أسلحة نووية في الغلاف الجوي في ثلاثة مواقع أسترالية، بما في ذلك مواقع في سلسلة جبال مارالينغا. وأسفرت هذه التجارب ومئات الاختبارات البسيطة عن ملوثات قوية الإشعاع طويلة العمر. وحُرث بعض هذه المواد التي تراوحت في حجمها بين الغبار القابل للاستنشاق والشظايا، في عام 1967 لتخفيف تركيزاتها وتقليل التجميع البشري والتشتت في البيئة. وشملت الشظايا أسلاكاً وصفائح فولاذية صدئة، والرصاص والبيتومين الباكليت الأصفر. وجُرِّفت كميات غير معروفة من أشد المواد خطورة ودفنت في حفر ضحلة بعمق 2-3 م. وفي عام 1979، أزيل 0,4 كغ من البلوتونيوم من حفرة الدفن ونُقلت إلى المملكة المتحدة

ولفتت ظروف التلوث انتباه الهيئات الرقابية الاسترالية في عام 1984، عندما اكتُشفت أعداد كبيرة من الجسيمات والشظايا الشديدة التلوث باليورانيوم والبلوتونيوم والأميريشيوم على السطح وبالقرب منه، في مساحة واسعة. وكان استنشاق البلوتونيوم هو الخطر الرئيسي. وكانت الأراضي الملوثة في السابق مملوكة للشعوب الأصلية التي كانت ترغب في استئناف ملكية الأراضي واستخدامها. واستجابت الحكومة عن طريق تزويد أصحاب المصلحة بالمعلومات وإشراكهم أثناء إجراء مسموح الأراضي ودراسات تحديد خصائص النفايات.

ووُضعت معايير التنظيف بناءً على حد التعرض البالغ 5 مليسيفرت/سنة. وتبيّن أن من غير المجدي اقتصادياً تنظيف المنطقة بأكملها وفقاً لهذا المعيار. ونتيجة لذلك، أنشئت 'منطقة غير سكنية' بمساحة 120 كم^2، اقتصر استخدامها البشري على السفر والصيد وإقامة المخيمات وغيرها من الأنشطة المؤقتة غير السكنية. وأنشئت أيضاً طرق بديلة تتجاوز المنطقة للحد من استخدامها. وأزيلت في هذه المنطقة غير المخصصة للإشغال التربة الملوثة في مناطق منفصلة تبلغ مساحتها الإجمالية 2,3 كم^2، بالإضافة إلى بعض الحطام الملوث. وأُجريت إزالة للتربة من المناطق الملوثة للوصول إلى مستويات أقل من 3 بكريل/م^2 في المتوسط على مساحة هكتار واحد

وشمل استصلاح حُفر دفن النفايات القوية الإشعاع تزجيجاً موضوعياً لنصف الحفر، واستُخرجت النفايات المتبقية في الحفر وأعيد دفنها في خندق جديد للتخلص من النفايات داخل الموقع بالقرب من سطح الأرض. وتوقفت عملية التزجيج الموضوعي بعد حدوث انفجارات تحت الأرض بسبب مواد مدفونة. وتم التخلص من نحو 000 263 م^3 من نفايات التربة على عمق 15 م، وغطيت النفايات بما لا يقل عن 5 م من التربة النظيفة. وما زالت القيود مفروضة على استخدام الأراضي في موقع التخلص من النفايات لمنع التسرب وتقليص احتمالات التعرض لأي شظايا غير مكتشفة. وسيُركز الرصد المستمر على العوامل التي تمس الصحة والأمان للزوار والمستخدمين في المناطق المستصلحة [211].

وتشمل الدروس المستفادة من تنظيف مارالينغا ما يلي:

(أ) طبيعة الجوانب المتصلة بالبيئة المحلية واستخدام الأراضي والمجتمع التي توجه عملية التخلص من النفايات وغير ذلك من القرارات.

(ب) إعطاء الأولوية لسيناريوهات معدلات الجرعات العالية.

(ج) أثناء التلوث، كانت الأرض عديمة القيمة وغير صالحة للسكن إلى الأبد: بعد مرور 40 عاماً، باتت الأرض تحظى بتقدير كبير من أصحابها، مما يثبت أن القيمة يمكن أن تتغيّر على مدى عقود من الزمن؛

(د) التخلص من النفايات غير المحددة الخصائص في حفر ضحلة يجعل عملية التنظيف لاحقاً صعبة ومكلفة.

(ه) الجمع بين التشاور مع أصحاب المصلحة والاستعانة بالخبرة العلمية والدعم الهندسي والتقني المتميّز يُعزز اطمئنان الجمهور وثقته.

(و) إدماج عناصر القابلية للزوال والاسترجاع في خطط التخلص من النفايات، مما يوفِّر مرونة في معالجة النفايات الطويلة العمر.

(ز) التزجيج الموضوعي، دون معرفة معقولة بمكونات النفايات المدفونة، ينطوي على مشاكل.

ويُلخص الجدول 19 تجربة تنظيف مواقع النفايات النووية الموروثة.

سادساً-4- فرنسا: التخلص من النفايات المشعة الضعيفة الإشعاع جداً الناتجة عن تفكيك المرافق النووية

افتتح مرفق التخلص من النفايات المشعة الضعيفة الإشعاع جداً في المركز الصناعي لجمع النفايات وخزنها والتخلص منها في مورفيليه في فرنسا في عام 2003. وتقرر إنشاء هذا المرفق نظراً لعدم وجود مستوى غير مشروط لرفع الرقابة عن تفكيك المرافق النووية في فرنسا، ويعني ذلك عدم إمكانية إعادة استخدام حجم كبير من المواد الناتجة عن التفكيك، وكان لا بد من التخلص من تلك المواد كنفايات، حتى مع وجود مستويات تلوث منخفضة جداً [212].

وكان المبدأ الأساسي الذي استند إليه تصميم المستودع هو الالتزام باللوائح التي تحكم مرافق التخلص من النفايات الخطرة غير المشعة. ومن خلال تطبيق هذا المبدأ، من الممكن استيعاب النفايات المشعة والمواد الكيميائية السامة. ويعتمد الاحتواء على تحديد طبقة صلصالية سطحية منخفضة النفاذية لإنشاء المستودع فيها.

الجدول-19- ملخص عمليات تنظيف مواقع النفايات النووية الموروثة

التجربة	النفايات المتولدة
تنظيف الموقع النووي المدني الموروث (المملكة المتحدة)	ما يُقدر بنحو 000 490 4 م^3 من جميع المصادر: معظمها من إخراج المرافق النووية من الخدمة، ولكنها تشمل التربة الناتجة عن استصلاح الأراضي الملوثة: — 000 840 2 م^3 (63,2 في المائة) من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً — 000 370 1 م^3 (30,5 في المائة) من النفايات الضعيفة الإشعاع — 000 286 م^3 (6,4 في المائة) من النفايات المتوسطة الإشعاع — 080 1 م^3 (0,1 في المائة) من النفايات القوية الإشعاع
استصلاح موقع الأسلحة النووية الموروث (الولايات المتحدة الأمريكية)	ما يُقدر بنحو 10 ملايين م^3 من النفايات المتنوعة التي جرى التخلص منها حتى الآن: — ما زال العمل جارياً في عدة مواقع، وأنشئت مرافق للتخلص من النفايات داخل الموقع، حسب مقتضيات الحاجة، حيث توجد كميات كافية من النفايات لتحقيق وفورات في الحجم.
تنظيف موقع مارالينغا لتجارب الأسلحة النووية (أستراليا)	منطقة غير سكنية بمساحة 120 كم^2 يقتصر استخدامها البشري على السفر والصيد وإقامة المخيمات وغير ذلك من الأنشطة المؤقتة غير السكنية: — إزالة مساحة إجمالية قدرها 2,3 كم^2 من التربة الملوثة والحطام في مناطق منفصلة استصلاح حفر دفن النفايات القوية الإشعاع: — التخلص من 000 263 م^3 من التربة على عمق 15 م وتغطيتها بما لا يقل عن 5 م من التربة النظيفة — التزجيج الموضوعي لنصف حفر الدفن القوية الإشعاع

وكما يظهر في الشكل-63، تُحفر خنادق التخلص من النفايات داخل طبقة من الصلصال الطبيعي، مع حماية جوانب الخندق وقاعه بشكل أكبر باستخدام غشاء أرضي غير مُنفذ. وتُحفر الخنادق على عمق 8 أمتار تحت مستوى الأرض وتصل إلى ارتفاع يبلغ أربعة أمتار فوق مستوى الأرض عندما يتم الانتهاء من إنشائها. وتوضع النفايات فوق الغشاء، بينما يوجه السقف المتحرك هطول الأمطار إلى نُظم الصرف، مما يحمل عمليات طيلة عملية التحميل. وتُقبل المواد المعبأة في حاويات وبعض المواد السائبة. وتُردم الخنادق بعد امتلائها وتُغلق بالغشاء نفسه. ويغطى المستودع في النهاية بالصلصال ويُعاد زرع غطاء نباتي فوقه. وتُستخدم فتحة فحص للتأكد من عدم تسرب المياه حول النفايات

وأثبت مرفق المركز الصناعي لجمع النفايات وخزنها والتخلص منها مستوى جيداً من الأداء خلال 10 سنوات من تشغيله، حيث تم التخلص من أكثر من 000 30 م^3 من النفايات سنوياً. وحُفر أكثر من 10 خنادق ومُلئت تلك الخنادق بالنفايات، وتكفي سعة الموقع لاستيعاب النفايات التي تصل إليه. ويوضع غطاء نهائي فوق الخنادق بمجرد امتلائها بالنفايات. ومن المتوقع أن يبقى المرفق قيد التشغيل لأكثر من 20 عاماً بقدرة استيعابية مخططة للتخلص من النفايات تبلغ 000 650 م^3. ويبلغ متوسط محتوى النشاط الإشعاعي للنفايات نحو 9 بكريل/غ.

وفي كانون الثاني/يناير 2014، تم تركيب نوع جديد من السواتر يُسمى Prémorails (انظر الشكل-64). ويعطي هذا الجهاز الفعال المسجل ببراءة اختراع، والذي طورته الوكالة الوطنية للتصرف في النفايات المشعة (وكالة أندرا)، الأولوية للأمان وسهولة الاستخدام لحماية الأقبية المستقبلية. ويتكون الجهاز من هيكل معدني يمكن تقسيمه إلى أجزاء، ويُثبت على قضبان، ويغطى بقماش مشمع. ويُركز الابتكار على ثلاثة جوانب:

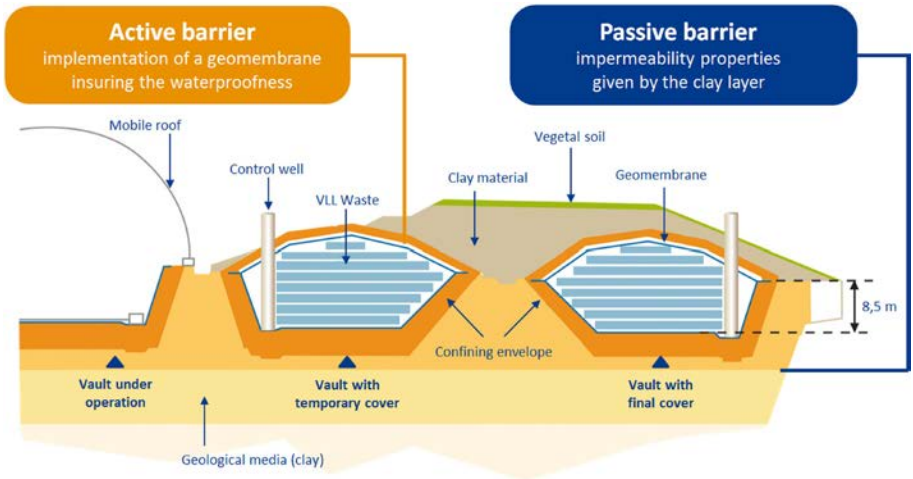
(أ) الاستقلالية: يتحرك الهيكل المرن والقابل للتقسيم حسب أقسامه المثبتة على القضبان، وليس من خلال استخدام معدات الرفع الكبيرة، كما كان الحال عليه في السابق؛

(ب) الختم: تُشكل الأقسام معاً ساتراً مانعاً لتسرب الماء بطول 180 م، مع إضافة أغطية من القماش المشمع الواقية الإضافية بين كل مجمّعة.

(ج) الأمان: يُساهم وجود ممر مركزي في الجزء العلوي الداخلي من الساتر في أمان تجميع الأقسام المختلفة وتفكيكها.

ويتسق نهج الأمان في مرفق مورفيليه مع النهج المعتمد في مرفق التخلص من النفايات المشعة الضعيفة الإشعاع في مركز دو لوب (Centre de l'Aube)، على بُعد 1,5 كم من مرفق المركز الصناعي لجمع النفايات وخزنها والتخلص منها، ويُركز على أثر المرفق في ما يتعلق بالسُمِّية الإشعاعية والسُمِّية الكيميائية للنفايات. وحُددت مخاطر السُمِّية في ما يتعلق بالعتبة أو القيمة المرجعية المحددة لكل من الزرنيخ، والزنك، والرصاص، والكادميوم، وللعناصر الكيميائية ذات

التأثيرات المسرطنة (الزرنيخ، والكادميوم). وتُحدد خصائص المخاطر الإشعاعية وفقاً لحسابات الجرعة. وتُقارن الجرعات بالحدود التي وضعتها الوكالة الرقابية بما يتوافق مع المعايير الدولية.



الشكل-63- تصميم مرفق مورفيليه للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في المركز الصناعي لجمع النفايات وخزنها والتخلص منها. بإذن من الوكالة الوطنية للتصرف في النفايات المشعة

الشكل-64- سواتر sliaroméP في مرفق المركز الصناعي لجمع النفايات وخزنها والتخلص منها.

المراجع

[1] DELTETE, P., HAHN, R., TMI2 Waste Management Experience, EPRI TR100640, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1992.

[2] HOLTON, W.C., NEGIN, C.A., OWRUTSKY, S.L., The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 — A Technical History: 1979-1990, EPRI NP6931, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1990.

[3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Radiological Assessment Reports Series No. 8, IAEA, Vienna (2006).

[4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chernobyl: Looking Back to Go Forward, Proceedings Series, IAEA, Vienna (2008).

[5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Present and Future Environmental Impact of the Chernobyl Accident, IAEA TECDOC1240, IAEA, Vienna (2001).

[6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, One Decade after Chernobyl: Summing Up the Consequences of the Accident, Proceedings Series, IAEA, Vienna (1996).

[7] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Situation of Storage and Treatment of Accumulated Water Including Highly Concentrated Radioactive Materials at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (155th Release), Press Release (2014), https://www.tepco.co.jp/en/press/corpcom/release/2014/1237952_5892.html

[8] COMITÉ DIRECTEUR POUR LA GESTION DE LA PHASE POST-ACCIDENTELLE, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, Policy Elements for PostAccident Management in the Event of Nuclear Accident, CODIRPA, Montrouge (2012).

[9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Followup IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas OffSite the Fukushima Daiichi NPP, Final Report NE/NEFW/2013, IAEA, Vienna, 2014.

[10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas OffSite the Fukushima Daiichi NPP, Final Report NE/NEFW/2011, IAEA, Vienna, 2011.

[11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on MidandLongTerm Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan, 25 November-4 December 2013, Mission Report, IAEA, Vienna, 2014.

[12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on MidandLongTerm Roadmap Towards the Decommissioning OF TEPCO'S Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan, 15-22 April 2013, Mission Report, IAEA, Vienna, 2013.

[13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, IAEA, Vienna (2009).

[14] منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومكتب العمل الدولي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، ومنظمة الصحة العالمية، المعايير المتوخى استخدامها في التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها، العدد GSG-2 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة، فيينا (2011).

[15] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها، العدد رقم GSR Part 5 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة، فيينا (2009).

[16] EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste from NPP s and Research Reactors, IAEA Safety Standards Series No. SSG40, IAEA, Vienna (2016).

[18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Fuel Cycle Facilities, IAEA Safety Standards Series No. SSG-41, IAEA, Vienna (2016).

[19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-3.1, IAEA, Vienna (2007).

[20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-6.1, IAEA, Vienna (2006).

[21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Large Volumes of Radioactive Waste Arising from Nuclear or Radiological Incidents, IAEA-TECDOC-1826, IAEA, Vienna (2017).

[22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Experiences and Lessons Learned Worldwide in the Cleanup and Decommissioning of Nuclear Facilities in the Aftermath of Accidents, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.7, IAEA, Vienna (2014).

[23] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning after a Nuclear Accident: Approaches, Techniques, Practices and Implementation Considerations, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.10, IAEA, Vienna (2019).

[24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Glossary: 2018 Edition, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2018).

[25] RENO, H.W., SCHMITT, R.C., Historical Summary of the Fuel and Waste Handling and Disposition Activities of the TMI-2 Information and Examination Programme (1980-1988), EGG-2529, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1988).

[26] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.26, IAEA, Vienna (2020).

[27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policy and Strategies for Environmental Remediation, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.1, IAEA, Vienna (2015).

[28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Remediation Strategies to Reduce the Radiological Consequences of Environmental Contamination, Technical Report Series No. 475, IAEA, Vienna (2012).

[29] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, 10 CFR 61, US Govt Printing Office, Washington, DC (1983).

[30] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Programmatic Environmental Impact Statement Related to Decontamination and Disposal of Radioactive Wastes Resulting from 28 March 1979 Accident Three Mile Island Nuclear Station, Unit 2, NUREG 0683 Supplement 1, Docket No 50-320, US Govt Printing Office, Washington, DC (1984).

[31] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Approach to Develop Waste Acceptance Criteria for Low and Intermediate Level Waste, IAEA, Vienna (in preparation).

[32] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Recycling Technology Development Strategy Study Group: Volume Reduction and Recycling for Intermediate Storage Removal, Technical Issues on Recycling, Presentation (2015), http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/proceedings_150721_06.pdf

[33] EAST JAPAN GREAT EARTHQUAKE RESPONSE RESEARCH COMMITTEE, Characterization Scheme for Recycled Materials from Incineration Bottom Ash of Disaster Wastes for Ground Materials, Fact Sheet (2012), http://geotech.gee.kyoto-u.ac.jp/JGS/Scheme_abstract01.pdf

[34] JAPAN CONSTRUCTION FEDERATION ASSOCIATION, List of Quality Standards Relating to the Reconstruction and Utilization of Disaster Waste, Fact Sheet (2012), www.nikkenren.com/pdf/disaster/2012_1109saigaihaiki.pdf

[35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels, Safety Reports Series No. 67, IAEA, Vienna (2012).

[36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna (2004).

[37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Reports Series No. 44, IAEA, Vienna (2005).

[38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, IAEA Safety Standards Series No. GSG-9, IAEA, Vienna (2018).

[39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Setting Authorized Limits for Radioactive Discharges: Practical Issues to Consider, IAEA-TECDOC-1638, IAEA, Vienna (2010).

[40] TYROR, J.G., PEARSON, G.W., “The medical implications of NPP accidents”, Medical Response to Effects of Ionizing Radiation (Proc. Conf. London 1989) UKAEA, London (1989).

[41] CHAMBERLAIN, A.C., Emission of Fission Products and Other Activities During the Accident to Windscale Pile No. 1 in October 1957, AERE-M3194, UKAEA, London, 1981.

[42] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Backgrounder on the Three Mile Island Accident, Fact Sheet (2018), https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html

[43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulatory Control for the Safe Transport of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM), IAEA-TECDOC-1728, IAEA, Vienna (2013).

[44] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition), IAEA Safety Standards Series No. SSG-26, IAEA, Vienna (2014).

[45] منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، منظمة الطيران المدني الدولي، ومنظمة العمل الدولية، والمنظمة البحرية الدولية، والمنظمة الدولية للشرطة الجنائية (الإنتربول)، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، واللجنة التحضيرية لمنظمة معاهدة الحظر الشامل للتجارب النووية، وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة، ومكتب الأمم المتحدة لتنسيق الشؤون الإنسانية، ومنظمة الصحة العالمية، والمنظمة العالمية للأرصاد الجوية، التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها، العدد GSR Part 7 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة، فيينا (2015).

[46] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Leadership, Management and Culture for Safety in Radioactive Waste Management, IAEA Safety Standards Series No. GSG-16, IAEA, Vienna (2022).

[47] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT NUCLEAR ENERGY AGENCY, Management of Radioactive Waste after a NPP Accident, NEA Report 7305, OECD, Paris (2016).

[48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Disposal of Waste from the Cleanup of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident, Technical Reports Series No. 330, IAEA, Vienna (1992).

[49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Abnormal Radioactive Wastes at NPPs, Technical Reports Series No. 307, IAEA, Vienna (1990).

[50] GENERAL ACCOUNTING OFFICE, Impact of Federal R&D funding on Three Mile Island Cleanup Costs, EMD-82-28, US GAO, Gaithersburg, MD (1982).

[51] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1817, IAEA, Vienna (2017).

[52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Restoration of Environments Affected by Residues from Radiological Accidents: Approaches to Decision Making, IAEA-TECDOC-1131, IAEA, Vienna (2000).

[53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Maintenance of Records for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-1097, IAEA, Vienna (1999).

[54] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Retrieval, Restoration and Maintenance of Old Radioactive Waste Inventory Records, IAEA-TECDOC-1548, IAEA, Vienna (2007).

[55] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Waste Inventory Record Keeping Systems (WIRKS) for the Management and Disposal of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1222, IAEA, Vienna (2001).

[56] NRC NEWS, NRC Approves License Transfer for Three Mile Island, Unit 2, Press Release (2020), https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2020/20-058.pdf

[57] BALOGA V. I. et al., 20 Years After Chornobyl Catastrophe: Future Outlook, National Report of Ukraine, Atika, Kiev (2006).

[58] THE NUCLEAR DAMAGE COMPENSATION FACILITATION CORPORATION, The Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation (NDF), Fact Sheet (2021), https://www.ndf.go.jp/files/user/soshiki/pamph_e.pdf

[59] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Mid- and Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Report (2019), https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191227_3.pdf

[60] ARNOLD, L., Windscale 1957: Anatomy of a Nuclear Accident, 3rd edn, Palgrave Macmillan, London (2007).

[61] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Decontamination Guidelines, Report (2013), http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/decontamination_guidelines_2nd.pdf

[62] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Mobile Processing Systems for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.8, IAEA, Vienna (2014).

[63] BONDARKOV, M. (Ed.), 30 Years of the Chernobyl Disaster (Reviews), KIM Publishing House, Kyiv (2016).

[64] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Summary Report on the Post-accident Review Meeting on the Chernobyl Accident, INSAG Series No. 1, IAEA, Vienna (1986).

[65] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, INSAG Series No. 7, IAEA, Vienna (1993).

[66] EG AND G IDAHO INC., ALLIED-GENERAL NUCLEAR SERVICES, ARGONNE NATIONAL LABORATORY, ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUE, SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Planning Report, GEND-001, Three Mile Island Operations Office, Washington DC (1980).

[67] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, INTERPOL, PREPARATORY COMMISSION FOR THE COMPREHENSIVE NUCLEAR-TEST-BAN TREATY ORGANIZATION AND UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS, Arrangements for Public Communication in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GSG-14, IAEA, Vienna (2020).

[68] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Reviewing the Two Years of Nuclear Safety Reform, Press Release (2014), https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu15_e/images/150330e0302.pdf

[69] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Decontamination Projects for Radioactive Contamination Discharged by Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Internal Report (2019), http://josen.env.go.jp/en/policy_document/

[70] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Communication and Stakeholder Involvement in Radioactive Waste Disposal, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.16, IAEA, Vienna (2022).

[71] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, International Roundtable on the Final Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, Summary Report NEA No. 7529, OECD, Paris, 2020.

[72] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).

[73] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Arrangements for the Termination of a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GSG-11, IAEA, Vienna (2018).

[74] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Technologies to Improve Efficiency of Waste Management and Cleanup After a Radiological Dispersal Device Incident: Standard Operational Guideline, EPA/600/R-13/124, US Environmental Protection Agency, Washington, DC (2013).

[75] LLERANDI, C.S., "Palomares: From the accident to the rehabilitation plan", Paper No. 2.3, paper presented at Int. Symp. on Decontamination: Towards the Recovery of the Environment, Fukushima, 2011.

[76] OUZOUNIAN, G., DUTZER, M., TORRES, P., Disposal of short-lived waste in France, News article (2012), https://www.neimagazine.com/features/featuredisposal-of-short-lived-waste-in-france/

[77] MOLITOR, N., DRACE, Z., JAVELLE, C., "Achievements and remaining challenges for the conversion of Chornobyl NPP Unit 4 into ecologically safe conditions", 30 Years of the Chernobyl Disaster (Reviews), KIM Publishing House, Kyiv (2016).

[78] EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, Chernobyl Unit 4 — Follow-up Actions, Short and Long Term Measures for Chernobyl NPP, Contracts (2022), https://nuclear.jrc.ec.europa.eu/tipins/contracts-chernobyl-unit-4-follow-actions-short-and-long-term-measures-chernobyl-npp

[79] NUCLEAR REGULATORY AUTHORITY, Order from NRA to TEPCO, Document No. 121107002, Correspondence (2012), https://www.nsr.go.jp/data/000069063.pdf

[80] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Implementation Plan of the Measures for the Specified Reactor Facilities at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Press Release (2013), https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2013/1228248_5130.html

[81] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Interim Storage Facility, Fact Sheet (2022), http://josen.env.go.jp/en/storage/

[82] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Guidance for the Reviews of Proposed Disposal Procedures and Transfers of Radioactive Material Under 10 CFR 20.2002 and 10 CFR 40.13(A), ML19295F109, US Govt Printing Office, Washington DC (2020).

[83] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Redevelopment and Reuse of Nuclear Facilities and Sites: Case Histories and Lessons Learned, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.2, IAEA, Vienna (2011).

[84] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, On Progress of Decontamination, Presentation (2015), http://josen.env.go.jp/material/session/pdf/015/mat05.pdf

[85] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Configuration Management in NPPs, Safety Reports Series No. 65, IAEA, Vienna, (2010).

[86] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process, EPA QA/G-4, US Environmental Protection Agency, Washington DC (2006).

[87] AREVA, AREVA Develops Two Innovative Solutions for Contamination Monitoring, Press Release (2012), https://www.sa.areva.com/EN/news-9623/japan-areva-develops-two-innovative-solutions-for-contamination-monitoring.html

[88] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Liaison and Coordination Meeting Regarding Transportation of Removed Soil to Intermediate Storage Facilities, Meeting Minutes (2020), http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/transportation_200129.pdf

[89] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, Monthly Progress Report (2020), https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/

[90] MIRION TECHNOLOGIES, In-Situ Measurements: FoodScreen™ Radiological Food Screening System, Data Sheet (2019), https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/c39444_foodscreen_spec_sheet_2.pdf?1562600743

[91] DUNSTER, H.J., HOWELLS, H., TEMPLETON, W.L., District surveys following the Windscale incident, October 19 J. Radiol. Prot. 27 (2007) 217-230.

[92] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, In Situ Underwater Gamma Spectroscopy System, Innovative Technology Summary Report OST/TMS ID 2990, USDOE, Idaho Falls, ID (2001).

[93] AREVA, Mapping Contamination at Fukushima with Robots, News Brief (2013), https://web.archive.org/web/20141115193411/http:/areva.com/EN/news-9866/japan-mapping-contamination-at-fukushima-with-robots.html

[94] YOSHIYUKI SATO, et al., "Radiochemical analysis of rubble collected from around and inside reactor buildings at Units 1 to 4 in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", Hot Laboratories and Remote Handling Working Group (Proc. 54th Ann. Mtg Mito, 2017) JAEA, Tokyo (2017).

[95] KOMA, Y., et al., Radiochemical analysis of rubble and trees collected from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. J. Nucl. Sci. Tech. 51, (2014) 1032-1043.

[96] URLAND, C S., TMI-2 Postaccident Data Acquisition and Analysis Experience, Interim Report, USDOE, Washington, DC, 1992.

[97] AKERS, D.W., ROYBAL, G.S., Examination of Concrete Samples from the TMI-2 Reactor Building Basement, GEND-INF-081, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1987).

[98] MEINKRANTZ, D.M., et al., First Results of Sump Samples Analyses — Entry 10, GEND-INF-011, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1981).

[99] MCISAAC, C.V., et al., Results of Analyses Performed on Concrete Cores Removed from Floors and D-Ring Walls of the TMI-2 Reactor Building, GEND-054, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1984).

[100] MCISAAC, C.V., KEEFER, D.G., TMI-2 Reactor Building Source Term Measurements: Surfaces and Basement Water and Sediment, GEND-042, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1984).

[101] RUSSELL, M.L., TMI-2 Core Cavity Sides and Floor Examinations December 1985 and January 1986, GEND-074, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1987).

[102] RUSSELL, M.L., et al., TMI-2 Accident Evaluation Programme Sample Acquisition and Examination Plan for FY87 and Beyond, EGG-TMI-7521, EG&G Idaho, Idaho Falls, ID (1987).

[103] BARATTA, A.J., GRICAR, B.G., JESTER, W.A., The Citizen Radiation Monitoring Programme for the TMI Area, GEND-008, Pennsylvania State University, University Park, PA (1981).

[104] KURINY, V.D., IVANOV, Y.A., KASHPAROV, V.A., et al., Particle associated Chernobyl fall-out in the local and intermediate zones. Ann. Nucl. Energy 20 (1993) 415–420.

[105] KASHPAROV, V.A, OUGHTON, D.H., ZVARICH, S.I., et al., Kinetics of fuel particles weathering and 90Sr mobility in the Chernobyl 30-km exclusion zone, Health Phys. 76 (1999) 251-259.

[106] KASHPAROV, V.A., et al., Kinetics of dissolution of Chernobyl fuel particles in soil in natural conditions. J. Environ. Radioact. 72 (2004) 335-353.

[107] BOBOVNIKOVA, Ts.I., VIRCHENKO, E.P., KONOPLEV, A.V., et al., Chemical forms of the long-living radionuclides and their transformation in the Chernobyl accident zone, Pochvovedeniye (Sov. Soil Sci.) 10 (1990) 20-25.

[108] KASHPAROV, V.A., LUNDIN, S.M., S.I. ZVARICH, Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout, Sci. Total Environ. 317 (2003) 105-119.

[109] KASHPAROV, V.A., LUNDIN, S.M., KHOMUTININ, Y.V., et al., Soil contamination with 90Sr in the near zone of the Chernobyl accident, J. Environ. Radioactiv. 56 (2001) 285-298.

[110] ISTC SHELTER, Analysis of the Current Safety of the Shelter Object and Forecast Assessment of the Development of the Situation: Report/ISTC 'Shelter' NAS Ukraine, Arch. No. 3601, Chernobyl (1996).

[111] IVANOV, Y.A., KASHPAROV, V.A., Long-term dynamics of the radioecological situation in terrestrial Chernobyl exclusion zone, Environ. Sci. Pollut. Res. 10 (2003) 13–20.

[112] ALL RUSSIAN DESIGN AND RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY, Survey and Inventory of Section 2.1 PVLRO 'Red Forest' 1992, Research Report/VNIPIPT, Moscow, 1992.

[113] STATE ENTERPRISE SCIENTIFIC AND TECHNICAL CENTER OF DECONTAMINATION AND COMPLEX OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, SUBSTANCES AND IONIZING RADIATION SOURCES, Research and Inventory of Section 5.1 PVLRO 'Neftebaza', STC KORO, Zhovti Vody (1994).

[114] ANTROPOV, V.M., et al. Review and Analysis of Solid Long-Lived and High Level Radioactive Waste Arising at the Chernobyl NPP and the Restricted Zone, EUR 19897, European Commission, Luxembourg (2001).

[115] BROWN, T.D., BILLON, F., Characterisation of Radioactive Waste Located at 'Shelter' Industrial Site, EUR 19844, European Commission, Luxembourg (2001).

[116] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Guidelines for the Contamination Survey Method, Fact Sheet (2012), http://www.env.go.jp/press/files/jp/18929.pdf

[117] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cleanup and Decommissioning of a Nuclear Reactor After a Severe Accident, Technical Reports Series No. 346, IAEA, Vienna (1992).

[118] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Planning for Cleanup of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident, Technical Reports Series No. 327, IAEA, Vienna (1991).

[119] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying, Technical Reports Series No. 323, IAEA, Vienna (1991).

[120] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Severely Damaged Nuclear Fuel and Related Waste, Technical Reports Series No. 321, IAEA, Vienna (1990).

[121] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Cleanup of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident, Technical Reports Series No. 300, IAEA, Vienna (1989).

[122] SELLAFIELD LTD, NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Demolition Starts on Windscale chimney, Press Release (2019), https://www.gov.uk/government/news/demolition-starts-on-windscale-chimney

[123] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Retrieval and Conditioning of Solid Radioactive Waste from Old Facilities, Technical Reports Series No. 457, IAEA, Vienna (2007).

[124] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Retrieval of Fluidizable Radioactive Wastes from Storage Facilities, IAEA-TECDOC-1518, IAEA, Vienna (2006).

[125] M.I. OJOVAN, Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies, Woodhead Publishing Series in Energy No 12, Woodhead Publishing, Cambridge (2011).

[126] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Categorizing Operational Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-1538, IAEA, Vienna (2007).

[127] FRENCH ALTERNATIVE ENERGIES AND ATOMIC ENERGY COMMISSION, Retour sur la Journée 'Fukushima, 4 ans après', News article (2015),

https://prositon.cea.fr/drf/prositon/Pages/Actualites/2015/actualit%C3%A9-20150519.aspx

[128] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technologies for In-situ Immobilization and Isolation of Radioactive Wastes at Disposal and Contaminated Sites, IAEA-TECDOC-972, IAEA, Vienna (1997).

[129] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low- and Intermediate-Level Solid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 223, IAEA, Vienna (1983).

[130] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Spent Ion-Exchange Resins for Storage and Disposal, Technical Reports Series No. 254, IAEA, Vienna (1985).

[131] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Alpha Bearing Wastes, Technical Reports Series No. 287, IAEA, Vienna (1988).

[132] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, IAEA, Vienna (1994).

[133] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421, IAEA, Vienna (2004).

[134] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Problematic Waste and Material Generated During the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 441, IAEA, Vienna (2006).

[135] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Innovative Waste Treatment and Conditioning Technologies at NPPs, IAEA-TECDOC-1504, IAEA, Vienna (2006).

[136] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, IAEA, Vienna (2006).

[137] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Solid Wastes, IAEA-TECDOC-655, IAEA, Vienna (1992).

[138] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Volume Reduction of Low-activity Solid Wastes, Technical Reports Series No. 106, IAEA, Vienna (1970).

[139] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Decontamination Report: A Compilation of Experiences to Date on Decontamination for the Living Environment Conducted by the Ministry of the Environment, FY2014, Ministry of the Environment, Tokyo, 2015.

[140] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Liquid Effluent from Uranium Mines and Mills, IAEA-TECDOC-1419, IAEA, Vienna (2004).

[141] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Membrane Technologies for Liquid Radioactive Waste Processing, Technical Reports Series No. 431, IAEA, Vienna (2004).

[142] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment, IAEA-TECDOC-1336, IAEA, Vienna (2003).

[143] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Organic Liquids, IAEA-TECDOC-656, IAEA, Vienna (1992).

[144] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low- and Intermediate-level Liquid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 236, IAEA, Vienna (1984).

[145] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chemical Precipitation Processes for the Treatment of Aqueous Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 337, IAEA, Vienna (1992).

[146] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Technologies for the Treatment of Low and Intermediate Level Radioactive Liquid Wastes, Technical Reports Series No. 370, IAEA, Vienna (1994).

[147] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Ion Exchange Processes for the Treatment of Radioactive Waste and Management of Spent Ion Exchangers, Technical Reports Series No. 408, IAEA, Vienna (2002).

[148] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Treatment of Radioactive Aqueous Wastes, IAEA-TECDOC-654, IAEA, Vienna (1992).

[149] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Waste Treatment and Immobilization Technologies Involving Inorganic Sorbents, IAEA-TECDOC-947, IAEA, Vienna (1997).

[150] TRIPLETT, M., Caesium Removal and Storage — Update on Fukushima Daiichi Status, Briefing for Hanford Advisory Board Tank Waste Committee (2015), http://www.hanford.gov/files.cfm/Attachment_6_Cs_Presentation_PNNL.pdf

[151] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, The Outline of the Handling of ALPS Treated Water at Fukushima Daiichi NPS (FDNPS), Presentation (2019), https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191121_current_status.pdf

[152] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Knowledge Management Library for the Three Mile Island Unit 2 Accident of 1979 (2016), https://tmi2kml.inl.gov/HTML/Page1.html

[153] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Evaluation of the Submerged Demineralizer System (SDS) Flowsheet for Decontamination of High-Activity-Level Waste at the Three Mile Island Unit 2 Nuclear Power Station, ORNL/TM-7448, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (1980).

[154] NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, Appropriate Treatment and Disposal of Disaster Waste and Waste Contaminated by Radioactive Substance (2022), http://www.nies.go.jp/shinsai/1-1-e.html

[155] MIYAMOTO, Y., "R&D on the Radioactive Waste Treatment and Disposal", International Research Institute for Nuclear Decommissioning (Proc. Ann. Symp. Tokyo 2014), IRID, Tokyo (2014), http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2014/07/Sympo_Miyamoto_E.pdf

[156] MCCONNELL, J.W., ROGERS, R.D., "Results of field testing of waste forms using lysimeters", Waste Management '90 (Proc. Int. Symp. Tucson 1990) WM Symposia, Tucson, AZ, (1990).

[157] BRYAN, G.H., SIEMENS, D.H., "Development and Demonstration of a Process for Vitrification of TMI Zeolite", Transactions of the American Nuclear Society (ANS Winter Mtg, San Francisco, 1981) American Nuclear Society, La Grange Park, IL (1981).

[158] BARNER, J.O., DANIEL, J.L., MARSHALL, R.K., Zeolite Vitrification Demonstration Programme: Characterization of Radioactive Vitrified Zeolite Materials, GEND-INF-043, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 1984.

[159] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Processing Radioactive Waste from Nuclear Applications, Technical Reports Series No. 402, IAEA, Vienna (2001).

[160] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Containers for Packaging of Solid Low and Intermediate Level Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 355, IAEA, Vienna (1993).

[161] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1), IAEA, Vienna (2018).

[162] UNITED KINGDOM GOVERNMENT, NATIONAL WASTE PROGRAMME, Container Signposting Resource, Fact Sheet (2018), https://www.gov.uk/government/publications/nwp-container-signposting-resource

[163] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Guidelines for Designated Waste, Fact Sheet (2013), http://www.env.go.jp/en/focus/docs/files/20140725-87-3.pdf

[164] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Accident Investigation Report: Phase 2 Radiological Release Event at the Waste Isolation Pilot Plant, 14 February 2014, Office of Environmental Management, Washington, DC (2015).

[165] WASTE ISOLATION PILOT PLANT, What Happened at WIPP in February 2014, https://wipp.energy.gov/wipprecovery-accident-desc.asp

[166] MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS OF JAPAN, Events and Highlights on the Progress Related to Recovery Operations at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2015), https://www.mofa.go.jp/dns/inec/page22e_000222.html

[167] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handbook on the Storage of Radioactive Waste, IAEA Nuclear Energy Series, IAEA Vienna (in preparation).

[168] ROMANO, S. WELLING, S, BELL, S., "Environmentally Sound Disposal of Radioactive Materials at a RCRA Hazardous Waste Disposal Facility", Waste Management '03, (Proc. Int. Symp. Tucson 2003) WM Symposia, Tucson, AZ, (2003).

[169] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Goiânia, IAEA, Vienna (1988).

[170] DEPARTMENT OF EDUCATION, SCIENCE AND TRAINING, Rehabilitation of Former Nuclear Test Sites at Emu and Maralinga (Australia) 2003, Maralinga Rehabilitation Technical Advisory Committee, Commonwealth of Australia, Canberra (2002).

[171] MERRIL, E;GESELL, T.F., Environmental Radioactivity: From Natural, Industrial and Military Sources, Academic Press, London (1997) p. 429.

[172] LLERANDI, C.S., "Remediation after the Palomares accident: Scientific and social aspects", IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, Action Plan on Nuclear Safety Series , IAEA, Vienna (2013).

[173] الجماعة الأوروبية للطاقة الذرية، ومنظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومنظمة العمل الدولية، والمنظمة البحرية الدولية، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، وبرنامج الأمم المتحدة للبيئة، ومنظمة الصحة العالمية، مبادئ الأمان الأساسية، العدد SF1 من سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، الوكالة، فيينا (2006).

[174] THE NATIONAL ARCHIVES, Windscale Pile Incident October 1957: Report of Work Carried Out by the R&D Windscale Branch from 10 October 1957 to 5 November 1957, Ref. AB 7/6435, The National Archives, Kew (1957).

[175] UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY OFFICE, Accident at Windscale No. 1 Pile on 10th October, 1957, Nature 180 (1957) 1043.

[176] WAKEFORD, R., A double diamond anniversary — Kyshtym and Windscale: the nuclear accidents of 1957, J. Radiol. Prot. 37 (2017) E7.

[177] PENNEY, W., et al., Report on the accident at Windscale No. 1 Pile on 10 October 1957, J. Radiol. Prot., 37 (2017) 780-796.

[178] STEWART, N. G., CROOKS, R.N., Long-range travel of the radioactive cloud from the accident at Windscale, Nature 182 (1958) 627-8.

[179] GARLAND, J.A., WAKEFORD, R., Atmospheric emissions from the Windscale accident of October 1957, Atmos. Environ. 41 (2007) 3904-20.

[180] RUTHERFORD, T.N., The Windscale Piles: Situation April 1961, May 1961, Ref. AB62/71, The National Archives, London (1961).

[181] UNITED KINGDOM HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, Guidance for Inspectors on the Management of Radioactive Materials and Radioactive Waste on Nuclear Licensed Sites, UK HSE, Nuclear Safety Directorate, London (2001).

[182] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 — A Technical History: 1979-1990, Report NP-6931, EPRI, Palo Alto, CA (1990).

[183] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, TMI-2 Waste Management Experience, Report TR-100640, EPRI, Palo Alto, CA (1992).

[184] NUCNET, NucNet's Updated 'Chernobyl Fact File' Now Online, News Article (2016), https://www.nucnet.org/news/nucnet-s-updated-chernobyl-fact-file-now-online

[185] KISELEV, A.N., CHERCHEROV, K.P., Model of the destruction of the reactor in the No. 4 unit of the Chernobyl NPP, Atomic Energy 91 (2001) 967-975.

[186] OSKOLKOV, B.Y., et al., Radioactive waste management in the Chernobyl exclusion zone: 25 years since the Chernobyl NPP accident, Health Phys. 101 (2011) 431-441.

[187] KASHPARVO, V.O., "The formation and dynamics of radioactive contamination of the environment during the accident at Chernobyl NPP and in the post-accident period", Chernobyl: The Exclusion Zone: Digest of Research Papers (Bariakhtar, V., Ed.) Naukova Dumka, Kiev (2001) pp. 11-46.

[188] SAMOILENKO, Y.N., GOLUBEV, V.V., "Decontamination of the 'special zone'", Chernobyl 88. Reports of the 1st All-Union Scientific-Technical Meeting on the Outcomes of Eliminating Aftermaths of the Accident at Chernobyl NPP, GNTU, PO 'Kombinat', Ministry of Atomic Energy of the USSR (1989) pp. 205-225.

[189] ILYIN, L.N., "Chemical troops", Chernobyl: Disaster. Deed, Lessons and Conclusions (Dyachenko, A.A., Ed.), Inter-Vesy, Moscow (1996) pp. 523-552.

[190] ANTROPOV, V.M., KUMSHAEV, S.B., SKVORTSOV, V.V., KHABRIKA, A.I., Clarification of data on radioactive waste placed in storage facilities of the Chernobyl Exclusion Zone, Bulletin of the ecological status of the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement, GAZO 2 (2004) 24.

[191] ANTROPOV, V.M., MELNICHENKO, V.P., TRETYAK, O.G., KHABRIKA, A.I., Analysis of the Condition of Radioactive Waste in the Trenches of PVLRO 'Neftebaza' (Antropov, et al., Ed.) KIM Publishing House, Kyiv (2012).

[192] EICHHORN, H. Industrial Complex for Solid Radwaste Management (ICSRM) at Chernobyl NPP functionality of the facilities. Factors of success, Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie 57 (2011) 105-107.

[193] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Fukushima Daiichi Accident, IAEA, Vienna (2015).

[194] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4: Fourth Mission: Preliminary Summary Report to the Government of Japan, IAEA, Vienna (2018).

[195] BATORSHIN, G., MOKROV, Y.G., "Experience in Eliminating the Consequences of the 1957 Accident at the Mayak Production Association", paper presented at Int. Expert Mtg on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA, Vienna 2013.

[196] MERKUSHKIN, A.O., "Karachay lake is the storage of the radioactive wastes under open sky", presented at Int. Youth Nucl. Congress 2000: Youth, Future, Nuclear Proceedings and Multimedia Presentation, YDRNS Information Technology Services, Russian Federation, 2001.

[197] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Chernobyl Accident 1986, Fact Sheet (2020), https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx

[198] IRANZO, E., ESPONOSA, A., IRANZO, C.E., "Evaluation of remedial actions taken in an agricultural area contaminated by transuranides", Radioecology: The Impact of Nuclear Origin Accidents on Environment (Proc. IV Int. Symp. Cadarache, 1988), CEA Centre d'Etudes Nucleaires, Cadarache (1988).

[199] MOLINA, G., "Lessons learned during the recovery operations in the Ciudad Juarez accident", Recovery Operations in the Event of A Nuclear Accident or Radiological Emergency, Proceedings Series, IAEA, Vienna (1990).

[200] LEHTO, J., PAAJANEN, A.A., Review of cleanup of large radioactive-contaminated areas, Cleanup of Large Radioactive Contaminated Areas and Disposal of Generated Waste (Lehto, J., Ed.), vol. 1994/567, TemaNord (1994) pp. 3-21.

[201] AMARAL, E., "Remediation following the Goiânia accident", paper presented at Int. Expert Mtg on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA, Vienna 2013.

[202] PONTEDEIRO, E.M., HEILBRON, P.F., PEREZ-GERRERO, J. et al., Reassessment of the Goiânia radioactive waste repository in Brazil using HYDRUS-1D, J. Hydrol. Hydromech. 66 2018

[203] ARNAL, J.M., et al., Management of Radioactive Ashes after a ^{137}Cs Source Fusion Incident (2004), http://irpa11.irpa.net/pdfs/7e5.pdf

[204] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Nuclear Decommissioning Authority: Strategy (2016), https://www.gov.uk/government/consultations-nuclear-decommissioning-authority-draft-strategy

[205] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Radioactive Wastes in the UK: A Summary of the 2016 Inventory, Nuclear Decommissioning Authority, Moor Row (2017).

[206] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, Land Quality Management. Preferred Option (Gate B), Ref: SMS/TS/A3-LQM/001/B, Nuclear Decommissioning Authority, Moor Row, 2011.

[207] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, UK Strategy for the Management of Solid Low Level Radioactive Waste from the Nuclear Industry, Report (2010), https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457083/UK_Strategy_for_the_Management_of_Solid_Low_Level_Radioactive_Waste_from_the_Nuclear_Industry_August_2010.pdf

[208] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE, UK Strategy for the Management of Solid Low Level Waste from the Nuclear Industry, URN 15D/472, Department of Energy and Climate Change, Kew, 2016.

[209] NUCLEAR INDUSTRY SAFETY DIRECTORS FORUM, Clearance and Radiological Sentencing: Principles, Processes and Practices, A Nuclear Industry Guide, Guide (2017), https://www.nuclearinst.com/write/MediaUploads/SDF20%documents/CEWG/Clearance_and_Exemption_GPG_2.01.pdf

[210] HAWKINS, A.R., Hanford Regulatory Experience Regulation at Hanford — A Case Study, US Department of Energy, US Department of Energy, DOE-0333-FPNA, Richland, WA (2007).

[211] WILLIAMS, G. Remediation of Contaminated Lands: the Maralinga lessons, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), Presentation (2013), https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/IEM4/31Jan/Williams.pdf

[212] SOLENTE, N., "VLLW disposal and management of large volume of slightly contaminated materials: The French experience", paper presented at IAEA Technical Meeting on the Disposal of Large Volume of Radioactive Waste, IAEA, Vienna (2013).

المساهمون في الصياغة والاستعراض

Ashida, T.	Japan Atomic Energy Agency, Japan
Barboa, J.	United States of America
Beckman, D.	Beckman and Associates, United States of America
Bondarkov, M.	State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management, Ukraine
Brennecke, P.	Germany
Chapman, N.	Ireland
Clifford, J.	Sellafield Ltd, UK
Drace, Z.	International Atomic Energy Agency
Dragolici, F.	International Atomic Energy Agency
Durham, L.A.	Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, USA
Dutzer, M.	ANDRA, France
Garamszeghy, M.	Nuclear Waste Management Organization, Canada
Green, T.	Nuvia Limited, UK
Grogan, H.	Cascade Scientific, Inc., United States of America
Inoue, T.	Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan
Kuchynskyi, V.	SSE Chornobyl NPP, Ukraine
Kumalo, Y.	International Atomic Energy Agency
Marra, J.	Savannah River National Laboratory, US Department of Energy, USA
Masaki, K.	Tokyo Electric Power Company Holdings
Mayer, S.J.	International Atomic Energy Agency
Miller, B.	AMEC, UK
Ojovan, M.I.	International Atomic Energy Agency
Ormai, P.	International Atomic Energy Agency
Phathanapirom, U.	International Atomic Energy Agency
Pillette-Cousin, L.	ANDRA, France
Poisson, R.	ANDRA, France
Prevost, T.	AREVA, France
Robbins, R.A.	International Atomic Energy Agency
Romano, S.	American Ecology Group, USA

Samanta, S.K.	International Atomic Energy Agency
Schultheisz, D.	US Environmental Protection Agency, United States of America
Shimba-Yamada, M.	International Atomic Energy Agency
Sizov, A.	Institute for Safety Problems of NPP, National Academy of Sciences, Ukraine
Skrypov, M.	Special State Enterprise Chornobyl NPP, Ukraine
Solente, N.	ANDRA, France
Tokarevsky, V.	Institute for Chornobyl Problems, Ukraine
Tsurikov, N.	Calytrix Consulting Pty Ltd, Australia
Walsch, C.	Sellafield Ltd
Yagi, M.	International Atomic Energy Agency
Yamada, K.	National Institute for Environmental Studies, Japan

الاجتماعات التقنية والاستشارية

فيينا، النمسا: 14–17 أيار/مايو 2013، 18-21 تشرين الثاني/نوفمبر 2013،
25–28 تشرين الثاني/نوفمبر 2013، 23-27 حزيران/يونيه 2014، 9-13 آذار/مارس 2015،
24-28 آب/أغسطس 2015، 18-21 تموز/يوليه 2017، 27-31 أيار/مايو 2019،
واشنطن العاصمة: 2–6 آذار/مارس 2015

طلب شراء المنشورات محليّاً

يمكن شراء المنشورات المسعَّرة الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية من الموزِّع الرئيسي الخاص بنا أو من المكتبات المحلية الكبرى. أمَّا المنشورات غير المسَّعرة فينبغي توجيه طلبات شرائها إلى الوكالة مباشرة.

طلبات شراء المنشورات المسعَّرة

يرجى الاتصال بالمورِّد المحلي المفضَّل لديكم، أو بالموزِّع الرئيسي الخاص بنا:

Eurospan
1 Bedford Row
London WC1R 4BU
United Kingdom

الطلبات التجارية والاستفسارات:
رقم الهاتف: 465576 1235 (0) 44+
البريد الإلكتروني: trade.orders@marston.co.uk

الطلبات الفردية:
رقم الهاتف: 4655777 1235 (0) 44+
البريد الإلكتروني: direct.orders@marston.co.uk
www.eurospanbookstore.com/iaea

للحصول على مزيد من المعلومات:
رقم الهاتف: 0856 240 207 (0) 44+
البريد الإلكتروني: info@eurospan.co.uk
www.eurospan.co.uk

ويمكن توجيه طلبات شراء المنشورات، سواء المسعَّرة أو غير المسعَّرة، مباشرة إلى العنوان التالي:

قسم النشر
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
رقم الهاتف: 22529 2600 1 43+ أو 22530
البريد الإلكتروني: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/publications

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
فيينا