

سلسلة الطاقة النووية رقم NF-T-3.3

الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية

خزن الوقود المستهلك
ريثما يُنقل لإعادة معالجته
أو التخلص منه

المبادئ
الأساسية

الأهداف

الأدلة

التقارير
التقنية



سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية

هيكل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية

بمقتضى أحكام الفقرة ألف من المادة الثالثة والفقرة جيم من المادة الثامنة من النظام الأساسي للوكالة، يُحوّل للوكالة تعزيز تبادل المعلومات العلمية والتقنية بشأن الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية. وتقدّم المنشورات الواردة في سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة معلومات حول مجالات القوى النووية، ودورة الوقود النووي، والتصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة، وحول مسائل عامة ذات صلة بجميع المجالات المشار إليها أعلاه. ويتألف هيكل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة من ثلاثة مستويات: ١- المبادئ الأساسية والأهداف؛ ٢- الأدلة؛ ٣- التقارير التقنية.

وتصف منشورات المبادئ الأساسية للطاقة النووية الأساس المنطقي والرؤية فيما يتعلق بالاستخدامات السلمية للطاقة النووية.

وتفسّر منشورات أهداف سلسلة الطاقة النووية التوقعات التي ينبغي تحقيقها في مجالات متنوعة في مختلف مراحل التنفيذ.

وتقدّم أدلة سلسلة الطاقة النووية إرشادات رفيعة المستوى بشأن كيفية تحقيق الأهداف المتعلقة بالمواضيع والمجالات المتنوعة التي تنطوي على الاستخدامات السلمية للطاقة النووية.

وتقدّم التقارير التقنية لسلسلة الطاقة النووية معلومات إضافية ومفصلة أكثر حول الأنشطة المتعلقة بالمجالات المتنوعة التي تتناولها سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة.

وتستخدم الرموز التالية في تصنيف منشورات سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة: NG – منشورات عامة؛ NP – القوى النووية؛ NF – الوقود النووي؛ NW – التصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة. وبالإضافة إلى ذلك، تُتاح المنشورات باللغة الإنكليزية على موقع الوكالة على الإنترنت:

<http://www.iaea.org/Publications/index.html>

وللحصول على مزيد من المعلومات، يُرجى الاتصال بالوكالة على العنوان التالي: PO Box 100, Vienna, Austria
International Centre, 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 تلبية احتياجات المستخدمين. ويمكن إرسال المعلومات عبر موقع الوكالة على الإنترنت، أو بالبريد العادي على العنوان المذكور أعلاه، أو بالبريد الإلكتروني على العنوان Official.Mail@iaea.org.

ﺧﺰﻥ ﺍﻟﻮﻗﻮﺩ ﺍﻟﻤﺴﺘﻬﻠﻚ ﺭﻳﺜﻤﺎ ﻳُنﻘﻞ ﻟِﺈِﻋﺎﺩﺓ ﻣﻌﺎﻟﺠﺘﻪ
ﺃﻭ ﺍﻟﺘﺨﻠﺼ ﻣﻨﻪ

الدول الأعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية

قيرغيزستان	تونس	الاتحاد الروسي
كازاخستان	جامايكا	إثيوبيا
الكاميرون	الجبل الأسود	أذربيجان
الكرسي الرسولي	الجزائر	الأرجنتين
كرواتيا	جزر البهاما	الأردن
كمبوديا	جزر مارشال	أرمينيا
كندا	جمهورية أفريقيا الوسطى	إريتريا
كوبا	الجمهورية التشيكية	إسبانيا
كوت ديفوار	الجمهورية الدومينيكية	أستراليا
كوستاريكا	الجمهورية العربية السورية	إستونيا
كولومبيا	جمهورية الكونغو الديمقراطية	إسرائيل
الكونغو	جمهورية تنزانيا المتحدة	إسواتيني
الكويت	جمهورية كوريا	أفغانستان
كينيا	جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية	إكوادور
لاتفيا	جمهورية مولدوفا	ألبانيا
لبنان	جنوب أفريقيا	ألمانيا
لختنشتاين	جورجيا	الإمارات العربية المتحدة
لكسمبرغ	جيبوتي	أنغيوا وبربودا
ليبيا	الدانمرك	إندونيسيا
ليبيريا	دومينيكا	أنغولا
ليتوانيا	رواندا	أوروغواي
ليسوتو	رومانيا	أوزبكستان
مالطة	زامبيا	أو غندا
مالي	زيمبابوي	أوكرانيا
ماليزيا	سان مارينو	إيران (جمهورية-الإسلامية)
مدغشقر	سانت فنسنت وجزر غرينادين	أيرلندا
مصر	سري لانكا	أيسلندا
المغرب	السلفادور	إيطاليا
مقدونيا الشمالية	سلوفاكيا	بابوا غينيا الجديدة
المكسيك	سلوفينيا	باراغواي
ملاوي	سنغافورة	باكستان
المملكة العربية السعودية	السنغال	بالاو
المملكة المتحدة لبريطانيا العظمى وآيرلندا الشمالية	السودان	البحرين
منغوليا	السويد	البرازيل
موريتانيا	سويسرا	بربادوس
موريشيوس	سيراليون	البرتغال
موزامبيق	سنشيل	بروني دار السلام
موناكو	شيلي	بلجيكا
ميانمار	صربيا	بلغاريا
ناميبيا	الصين	بليز
النرويج	طاجيكستان	بنغلاديش
النمسا	العراق	بنما
نيبال	عمان	بنن
النيجر	غابون	بوتسوانا
نيجيريا	غانا	بوركينافاسو
نيكاراغوا	غرينادا	بوروندي
نيوزيلندا	غواتيمالا	البوسنة والهرسك
هايتي	غيانا	بولندا
الهند	فانواتو	بوليفيا، دولة-المتعددة القوميات
هندوراس	فرنسا	بيرو
هنغاريا	الفلبيين	بيلاروس
هولندا	فنزويلا (جمهورية-البوليفارية)	تايلند
الولايات المتحدة الأمريكية	فنلندا	تركمانستان
اليابان	فيجي	تركيا
اليمن	فييت نام	ترينيداد وتوباغو
اليونان	قبرص	تشاد
	قطر	توغو

وافق المؤتمر المعني بالنظام الأساسي للوكالة الدولية للطاقة الذرية الذي عُقد في المقر الرئيسي للأمم المتحدة في نيويورك، في ٢٣ تشرين الأول/أكتوبر ١٩٥٦، على النظام الأساسي للوكالة الذي بدأ نفاذه في ٢٩ تموز/يوليه ١٩٥٧. ويقع المقر الرئيسي للوكالة في فيينا. ويتمثل هدف الوكالة الرئيسي في "تعزيز وتوسيع مساهمة الطاقة الذرية في السلام والصحة والازدهار في العالم أجمع".

سلسلة الطاقة النووية رقم NF-T-3.3 الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية

خزن الوقود المستهلك ريثما يُنقل لإعادة معالجته
أو التخلص منه

ملاحظة بشأن حقوق النشر

جميع المنشورات العلمية والتقنية الصادرة عن الوكالة محمية بموجب الاتفاقية العالمية لحقوق التأليف والنشر بصيغتها المعتمدة في عام ١٩٥٢ (برن) والمنقحة في عام ١٩٧٢ (باريس). وقد عمدت المنظمة العالمية للملكية الفكرية (جنيف) لاحقاً إلى توسيع نطاق حقوق التأليف والنشر لتشمل الملكية الفكرية الإلكترونية والفرضية. ويجب الحصول على إذن باستخدام النصوص الواردة في منشورات الوكالة بشكلها المطبوع أو الإلكتروني، استخداماً كلياً أو جزئياً؛ ويخضع هذا الإذن عادة لاتفاقات متعلقة برسوم الجعالة الأدبية. ويُرحَّب بأية اقتراحات تخص الاستنساخ والترجمة لأغراض غير تجارية، وسيُنظر فيها على أساس كل حالة على حدة. وينبغي توجيه أية استفسارات إلى قسم النشر التابع للوكالة (IAEA Publishing Section) على العنوان التالي:

Marketing and Sales Unit, Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
fax: +43 1 26007 22529
tel.: +43 1 2600 22417
email: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/books

حقوق النشر محفوظة للوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٢١

طُبِعَ من قِبَلِ الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا

شباط/فبراير ٢٠٢١

ISBN 978-92-0-628520-6
ISSN 2664-9365

توطئة

يُندرج "السعي لتسريع مساهمة الطاقة النووية في السلم والصحة والازدهار في العالم بأسره وتوسيع نطاق تلك المساهمة" في عداد الأهداف القانونية للوكالة الدولية للطاقة الذرية. ومن الوسائل التي يُنال بها هذا الهدف نشر طائفة من السلاسل التقنية. ومن بين هذه السلاسل سلسلتان تصدرهما الوكالة الدولية للطاقة الذرية، هما سلسلة القوى النووية، وسلسلة معايير الأمان.

وحسب المادة الثالثة ألف ٦ من النظام الداخلي للوكالة الدولية للطاقة الذرية "معايير أمان بقصد حماية الصحة والتقليل إلى أدنى حد من الأخطار على الحياة والممتلكات". وتشمل معايير الأمان أساسيات الأمان ومتطلبات الأمان وأدلة الأمان. وقد صيغت هذه المعايير أساساً في أسلوب تنظيمي، وهي ملزمة للوكالة الدولية للطاقة الذرية في ما يخص برامجها. والمستخدمون الرئيسيون لها هم الهيئات التنظيمية في الدول الأعضاء وسواها من السلطات الوطنية.

وتشمل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية تقارير يُبتغى منها تشجيع البحث والتطوير ومؤازرته في مضممار الاستخدامات السلمية للطاقة النووية وتطبيقها. ويتضمن ذلك أمثلة عملية يُرتجى أن يستخدمها من يملكون مرافق في الدول الأعضاء ويتولون إدارتها ومنظمات التنفيذ والأوساط الأكاديمية والمسؤولون الحكوميون، من بين جهات أخرى. وترد هذه المعلومات في أدلة وتقارير وأدلة عن حال التكنولوجيا وتطوراتها وأفضل ممارسات الاستخدامات السلمية للطاقة النووية، استناداً إلى مساهمات من خبراء دوليين. وتستكمل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية سلسلة معايير الأمان التي تصدرها هذه الوكالة.

ويثير فنور الإرادة السياسية ودعم الجمهور بالقدر الكافي تحديات جسيمة أمام تنفيذ نقطة نهاية لإدارة الوقود المستهلك — مثل إعادة المعالجة أو التخلص — فتطول فترات الخزن. وأخذاً في الحسبان معدلات استخدام القوى النووية الحالية والمتوقعة، مقرونة بتوقعات إعادة معالجة الوقود المستهلك والتخلص منه، يُتوقع أن تُمدد فترات خزن الوقود المستهلك لعدة عقود.

ولا بدّ من أن تتخذ الدول القرارات السياسية اللازمة لتحديد وتنفيذ نقطة نهاية لإدارة الوقود المستهلك لا بدّ منها لاستخدام القوى النووية الاستخدام المسؤول والمستدام. ومن شأن ذلك أن يستبعد مخاطر غير ضرورية من بينها المخاطر المقترنة بتعبئة الوقود المستهلك بلا معايير قبول لإعادة المعالجة أو التخلص، فضلاً عن التكاليف غير الضرورية الناشئة عن الإبقاء على الصوابط المؤسسية وبرامج إدارة التقادم لفترات خزن أطول.

وريثماً يتحقق ذلك، من الضروري ضمان خزن الوقود المستهلك خزناً آمناً وفعالاً في جميع الظروف المنظورة. ويتناول هذا المنشور نهجاً تسعى لتحقيق هذا الهدف في ضوء مُدد الخزن الحالية غير المعروفة. ويضع المنشور يده على مسائل وتحديات تتعلق بإعداد الخيارات والسياسات والاستراتيجيات والبرامج وتنفيذها لاستيعاب كامل طائفة التصورات المستقبلية ريثماً تُتاح القدرة الكافية لإعادة المعالجة والتخلص. ولا يُبتغى من هذا المنشور تيسير إطالة مُدد خزن الوقود المستهلك أو تشجيع ذلك.

والقصد من وراء هذا المنشور هو أن يكون مُعيناً للصناعة النووية في الإبلاغ عن أهمية استراتيجية واضحة وموثوق بها ومستدامة لإدارة الوقود المستهلك وحث متخذي القرارات على النظر في شتى النهج التي قد تكون مجدية في تبديد الشكوك التي تثيرها مدة الخزن المجهولة وعدم تحديد نقطة نهاية لإدارة الوقود المستهلك. وينطبق هذا المنشور على الدول التي تُشغّل، أو شغّلت، مفاعلات القوى والبحوث أو اختبار المواد أو إنتاج النظائر المشعّة وعلى القادمين الجدد الذين يفكرون في إدخال القوى النووية. ومن المسلم به أنّ الحلول الخاصة ستتفاوت حسب حاجة الدولة المعنية وأنّ النهج المعروضة هنا سُنكّيف وفق ذلك.

وتودُّ الوكالة الدولية للطاقة الذرية أن تعرب عن تقديرها لكل من ساهم في إعداد هذا المنشور وبصفة خاصة للسيد ب. كارلسين (الولايات المتحدة الأمريكية) الذي ترأس الاجتماعات التقنية واجتماعات المستشارين وتولى تنسيق عملية تحرير هذا المنشور واستعراضه وساهم في كليهما. وموظفاً الوكالة الدولية للطاقة الذرية المسؤولان عن هذا المنشور هما أ. بيفلاكوا وأ. غونزاليس-إسبارتيرو وهما من شعبة دورة الوقود النووي وتكنولوجيا النفايات.

ملحوظة تحريرية

حُرِّر هذا المنشور من جانب موظفي هيئة التحرير في الوكالة بقدر ما اعتُبر ذلك ضرورياً لمساعدة القارئ. وهو لا يتناول مسائل تتعلق بالمسؤولية، قانونية كانت أم غير قانونية، عن أفعال أو الامتناع عن أفعال من جانب أي شخص.

وعلى الرغم من توجُّي قدر كبير من الحرص للحفاظ على دقَّة المعلومات الواردة في هذا المنشور، لا تتحمَّل الوكالة ولا دولها الأعضاء أيَّ مسؤولية عن العواقب التي قد تنشأ عن استخدام تلك المعلومات.

والتوجيهات المقدَّمة في هذا المنشور، التي تصف الممارسات الجيدة، تمثِّل آراء الخبراء ولا تشكِّل توصيات صادرة على أساس توافق في آراء الدول الأعضاء.

واستخدام تسميات معيَّنة لبلدان أو أقاليم لا يعني ضمناً إصدار أيِّ حكم من جانب الناشر، أي الوكالة، بشأن الوضع القانوني لهذه البلدان أو الأقاليم أو سلطاتها ومؤسساتها أو تعيين حدودها.

وذكر أسماء شركاتٍ أو منتجاتٍ معيَّنة (سواء مع الإشارة إلى أنها مسجَّلة أو دون تلك الإشارة) لا يعني ضمناً وجود أيِّ نيَّة لانتهاك حقوق الملكية، كما لا ينبغي أن يُفسَّر على أنه تأييد أو توصية من جانب الوكالة.

ولا تتحمَّل الوكالة أيَّ مسؤولية عن استمرارية أو دقَّة الوصلات الإلكترونية للمواقع الشبكية الخاصة بطرف خارجي أو طرف ثالث المشار إليها في هذا الكتاب ولا تضمن أن يكون، أو أن يظلَّ، أيُّ محتوى يرد في تلك المواقع الشبكية دقيقاً أو ملائماً.

المحتويات

١	موجز	١
٢	مقدمة	١
٢	١-١ معلومات أساسية	٢
٣	٢-١ الهدف	٣
٣	٣-١ النطاق	٣
٣	٤-١ الهيكل	٣
٣	لمحة عامة	٢
٤	١-٢ تمديد خزن الوقود المستهلك خطوة خطوة	٤
٤	٢-٢ أمان خزن الوقود المستهلك	٤
٤	١-٢-٢ الاحتواء	٤
٤	٢-٢-٢ الحالة دون الحرجية	٤
٤	٣-٢-٢ إزالة حرارة الاضمحلال	٤
٥	٤-٢-٢ التدريع	٥
٥	٥-٢-٢ قابلية الاسترجاع وقابلية النقل	٥
٥	٦-٢-٢ النظم الإيجابية والسلبية	٥
٥	٣-٢ قابلية استدامة خزن الوقود المستهلك	٥
٦	برامج إدارة التقادم	٣
٦	١-٣ إدارة التقادم لخزن الوقود المستهلك	٦
٧	١-١-٣ خَطِّط	٧
٧	٢-١-٣ إفعل	٧
٧	٣-١-٣ تحقّق	٧
٨	٤-١-٣ تصرّف	٨
٨	٢-٣ سدّ الثغرات في البيانات عن تقادم المواد من أجل خزن الوقود المستهلك	٨
٩	تصميم نُظْم خزن الوقود المستهلك وتحديد مواقعها في المستقبل	٤
١٠	١-٤ أساس تصميم النُظْم	١٠
١١	١-١-٤ اعتبارات إدارة التقادم وتجديد الرخص	١١
١١	٢-١-٤ اعتبارات الضمانات والأمن	١١
١٢	٢-٤ مرافق الخزن الرطبة مقابل مرافق الخزن الجافة	١٢
١٣	٣-٤ مرافق خزن الوقود المستهلك المركزية	١٣
١٣	٤-٤ اعتبارات تحديد المواقع	١٣
١٤	أنساق خزن الوقود المستهلك	٥
١٤	١-٥ العلب والبراميل الخشبية	١٤
١٥	٢-٥ المجمعّات العارية	١٥
١٦	الاعتبارات التنظيمية	٦
١٦	١-٦ دور المنظّمين	١٦
١٦	١-١-٦ أنشطة البحوث التنظيمية	١٦
١٧	٢-١-٦ الترخيص والتفتيش والإشراف	١٧
١٧	٣-١-٦ التواصل مع الجمهور	١٧

١٨	..... الإطار التنظيمي للخرن الممتد	٢-٦
١٨	..... التنظيم القائم على الوعي بالمخاطر والأداء	٣-٦
٢٠	..... الاعتبارات المتعلقة بالسياسات	٧-
٢١	..... نقطة نهاية محددة	١-٧
٢١	..... تبني الوقود المستهلك والمساءلة عنه بشكل واضح	٢-٧
٢١	..... إدارة الوقود المستهلك المستدامة	٣-٧
٢٢	..... التهج المتعددة القوميات	٤-٧
٢٢	..... السياسات المستقرة الطويلة الأجل	٥-٧
٢٣	..... التعويل على حلول الأجل القريب	٦-٧
٢٣	..... الاعتبارات الأخرى الرئيسية	٨-
٢٣	..... إدارة الجوانب المشتركة طوال دورة الوقود	١-٨
٢٥	..... ثقة الجمهور	٢-٨
٢٥	..... معضلة ثقة الجمهور	١-٢-٨
٢٦	..... المخاطر المتصورة مقابل الفوائد المتصورة	٢-٢-٨
٢٧	..... قبول الجمهور وتمديد خزن الوقود المستهلك	٣-٢-٨
٢٧	..... الضوابط المؤسسية	٣-٨
٢٩	..... المراجع	
٣٣	..... القائمة الببليوغرافية	
٣٩	..... المساهمون في التحرير والاستعراض	
٤٠	..... هيكل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية	

موجز

إنّ تجاوز فترات خزن الوقود المستهلك المُدد المتوقعة أصلاً تجاوزاً كبيراً لحقيقة واقعة. ويقدم هذا المنشور عدة أفكار يمكن النظر فيها لمعالجة مُدد الخزن التي ما انفكت تزداد طويلاً، ابتغاءً لإنقاذ الوعي وتشجيع الحوار وتقديم أفكار عن سبل إدارة الوقود المستهلك. وتشمل الرسائل الأساسية ما يلي:

- قد تؤدي حالات التأخير في إعادة المعالجة أو التخلص إلى خزن الوقود المستهلك لمائة عام أو أكثر. ويُعنى خزن الوقود المستهلك خزناً آمناً ومأموناً وفعالاً بتدهور الوقود ويحافظ في الآن ذاته على خيارات دورة الوقود المستقبلية.
- تطبق برامج إدارة التقادم الهندسة والعمليات وتدابير الصيانة لضمان الأمان أثناء الخزن والمعالجة المستقبلية والنقل.
- من شأن اختيار الموقع والمرفق وتصميم المعدات أن يقلل بشكل ملموس من مخاطر خزن الوقود المستهلك لفترات أطول ويُخفّض تكاليفه.
- يمكن اختيار أنساق خزن الوقود المستهلك بحيث تستوعب فترات الخزن غير الأكيدة وتُيسر إدارة التقادم وتتيح المرونة اللازمة لاستيعاب عدم اليقين بشأن نقاط النهاية المستقبلية، مثل إعادة المعالجة أو التخلص.
- مع أخذ عمليات تجديد الرخص المتعددة في الحسبان، يمكن تصميم الأطر التنظيمية بشكل يكفل الخزن الآمن ريثما تتحقق نقطة نهاية مقبولة.
- يمكن ضمان الأمان بالإبقاء على التدريع والاحتواء وإزالة حرارة الاضمحلال والتحكم في الحرجية. وتبيّن أنّ تلمس الطريق بين تعقيد المعتقدات والقيم المجتمعية والنظم السياسية يمثل تحدياً أكبر في مضمار إدارة الوقود المستهلك من الحفاظ على أمانه وأمنه، أو معالجة الجوانب التقنية والاقتصادية.
- تستدعي إدارة الوقود المستهلك إدارة مستدامة سياسات واستراتيجيات ترسم توجهاً واضحاً ومتسقاً ومستقرّاً لأنّ هذه السياسات والاستراتيجيات توجه الحاجة إلى خزن الوقود المستهلك والخيارات المتاحة والتوقيت لتحديد نقطة نهاية مقبولة. وإن لم تتناول الدول إعادة معالجة الوقود المستهلك والتخلص منه على نطاق كافٍ يتيح استيعاب تفريغاتها من الوقود المستهلك، أضحت فترات أطول فأطول نقطة النهاية بحكم الواقع، وهو أمر لا يُعدّ متسقاً مع مسؤولية حماية الصحة البشرية والبيئة.

إنّ تجديد الرخص تجديداً فعالاً ودورياً قمين بأن يكفل إدارة التقادم الفعالة والرقابة المؤسسية الصارمة. ومن ثمّ، يمكن خزن الوقود المستهلك بشكل آمن ومأمون للمدة اللازمة ريثما يُنقل لإعادة معالجته أو التخلص منه. غير أنّ مخاطر خزن المخزونات المزدادة من الوقود المستهلك وتكاليفه سنظل تشتد وستغدو، في نهاية المطاف، عبئاً مجتمعياً ثقيلاً في غياب نقطة نهاية.

١ - مقدمة

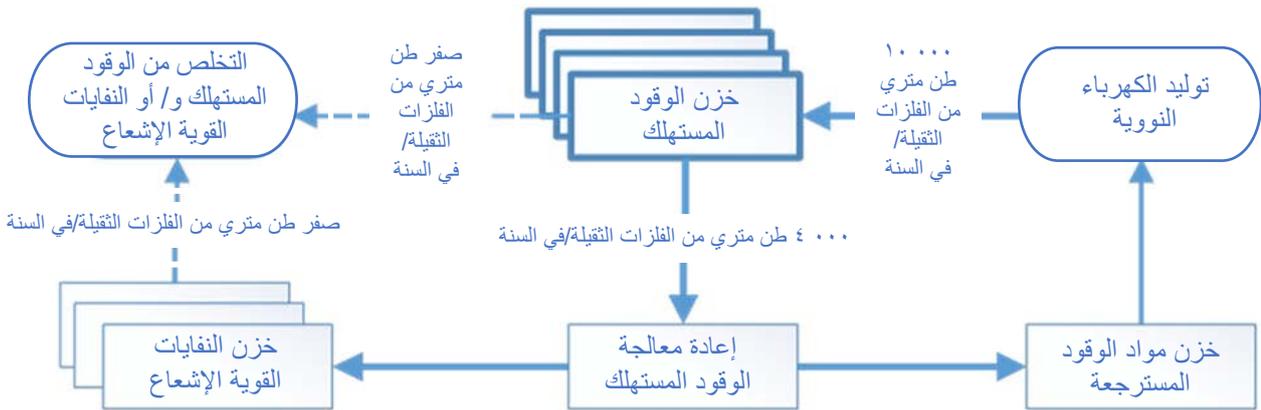
١-١ - معلومات أساسية

تتضمن دورة الوقود النووي جميع العمليات المقترنة بإنتاج الطاقة النووية، بدءاً باستكشاف اليورانيوم وتعيينه وحتى استخراجها من الأرض لمُصنِّع الوقود النووي بغية استخدامه في إنتاج الكهرباء وانتهاءً بوصول الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع الناشئة عن إعادة المعالجة إلى نقطة نهاية مناسبة (انظر المراجع [١-٤]). ونقطة النهاية المقبولة حالياً هي عندما يُوضع الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع بشكل آمن في باطن الأرض في مستودع جيولوجي مناسب. وعلى الصعيد العالمي، يُفْرَغ كل عام نحو ١٠.٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة من محطات القوى النووية في ٣٠ دولة من الدول الأعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية (انظر الشكل ١)، بينما يقوم عدد قليل من الدول الأعضاء بإعادة معالجة الوقود المستهلك بطاقة عالمية مجمعة تبلغ ٨٠٠ ٤ طن من الفلزات الثقيلة (ليست جميعها قابلة للتشغيل) [٥]. وبسبب الطلب المزاد على الطاقة النظيفة الموثوق بها، التزمت عدة دول بتوسيع قدرتها النووية، محدثة بذلك زيادة في الوقود المستهلك الذي ينبغي تخزينه ومبرزة الحاجة إلى تحديد نقطة نهاية للوقود المستهلك وتنفيذها^١ (أي إعادة المعالجة أو التخلص).

وتُعَيِّن بعض الدول الوقود المستهلك لغرض التخلص منه، بينما يعيد بعضها الآخر معالجته لاسترجاع مواد الوقود. وفي بعض البلدان، أحدثت التغييرات السياسية تغييراً في هذه التصنيفات من تصنيف إلى آخر. وقبل إقرار السياسة الوطنية وتنفيذها، يتعذر أن يبدأ الوقود المستهلك في الانتقال إلى مرحلة إعادة المعالجة أو التخلص. ولأن القدرة الكافية لإعادة المعالجة أو التخلص على الصعيد العالمي لن تتحقق قبل عقود، سيظل الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع يتراكمان في مرافق الخزن فيغدو تجديد فترات الرخص لمرافق خزن الوقود المستهلك ضرورياً ربما لمرات عديدة. ورغم أن خزن النفايات القوية الإشعاع لا يندرج في نطاق هذا المنشور، فإن كثيراً من المسائل المعروضة فيه ينطبق عليها.

وتشير الخطوط المتقطعة في الشكل ١ إلى تقييدات التدفق التي تؤدي إلى زيادة المخزونات المخزونة. وبوسع الدول أن تُقَدِّر طاقة خزن الوقود المستهلك ومدته باستبدال التدفقات الشاملة الملائمة وباحتساب القدرة وتاريخ البداية المتوقع ومستوى الثقة في عمليات إعادة معالجة الوقود المستهلك والتخلص منه. ويعني عدم اليقين حيال تاريخ بداية عمليات المستودع الجيولوجي العميق أنه ينبغي حتى على الدول التي قرّرت إنهاء القوى النووية أن تدير ما لديها من مخزونات الوقود المستهلك لفترات زمنية يتعذر تحديدها يقيناً.

وتعتمد نقطة النهاية المحددة، مثل إعادة المعالجة أو التخلص، على التمويل والتشريع والترخيص في المستقبل وعلى ظروف أخرى يتعذر التنبؤ بها يقيناً. ويستكشف هذا المنشور السبل الكفيلة بمراعاة عدم اليقين هذا في التصميم والترخيص واستراتيجية الإدارة وقرارات السياسات.



الشكل ١ - خزن الوقود المستهلك.

^١ تُحدِّد نقطة النهاية بأنها حالة المواد المشعَّة في المرحلة الأخيرة من إدارتها التي تخزن فيها المادة آمنة سلبياً ولا تعتمد على الرقابة المؤسسية.

٢-١- الهدف

يَقَدِّمُ هذا المنشور معلومات لواقعي السياسات ومتخذي القرارات الرئيسيين المسؤولين عن وضع سياسات إدارة الوقود المستهلك وبرامجها ويحدد الاعتبارات التقنية وغير التقنية الضرورية عند تمديد فترة الخزن. وهو يأخذ في الحسبان عدم اليقين الذي يكتنف تحديد طول فترات خزن الوقود المستهلك ويساعد على تحديد ما يتعلق بالشكوك التقنية والتنظيمية المقترنة بذلك من خيارات ومعاوضات.

٣-١- النطاق

يتناول المنشور موضوعات شتى ذات أهمية لخزن الوقود المستهلك خزناً آمناً ومأموناً وفعالاً ويتطرق إلى المسارات الممكنة التي تتيح تفيدي المخاطر والتكاليف غير الضرورية أو تخفيف حدتها. ولئن كان هذا المنشور يركز في المقام الأول على خزن الوقود المستهلك من مفاعلات القوى النووية العاملة تجارياً، فإنَّ المبادئ المبنيَّة فيه تنطبق أيضاً على الوقود المستهلك من مفاعلات البحوث ومفاعلات اختبار المواد ومفاعلات انتاج النظائر المشعَّة. ولا يقع خزن النفايات القوية الإشعاع في نطاق هذا المنشور وإن انطبق كثير من المسائل الواردة فيه عليها. وتمثِّل الارشادات التي تبين الممارسات الحسنة المقدمة هنا رأي الخبراء ولكنها لا تشكِّل توصيات مستمدة من توافق الآراء بين الدول الأعضاء.

٤-١- الهيكل

يَقَدِّمُ القسم ٢ من هذا المنشور لمحةً عامةً عن أمان خزن الوقود المستهلك واستدامة إدارته. ويعرض القسم ٣ ملامح برامج إدارة التقادم وسد الثغرات المعرفية. ويعرض القسم ٤ الاعتبارات التي ينبغي أخذها في الحسبان في تصميم نُظُم الوقود المستهلك وتحديد مواقعها في المستقبل ويوضِّح القسم ٥ أنساق خزن الوقود المستهلك. ويستعرض القسمان ٦ و ٧ الاعتبارات التنظيمية والمتعلقة بالسياسات العامة، على التوالي، ويختتم القسم ٨ المنشور، متناولاً اعتبارات رئيسية أخرى.

٢- لمحة عامة

كانت الافتراضات السابقة بشأن القدرة المتاحة لإعادة معالجة الوقود المستهلك والتخلص منه خاطئة في كثير من الأحيان؛ فتسببت في إهدار فرص لتنفيذ السياسات والاستراتيجيات. فعلى سبيل المثال، أُعدَّت نُظُم الخزن بالبراميل الخشبية الجافة في بداية أمرها لتحرير حيزٍ في أحواض وقود المفاعلات المستهلك وإتاحة خزن الوقود المستهلك لمدة تصل إلى ٢٠ سنةً ريثما تتاح القدرة الكافية لإعادة المعالجة أو التخلص الجيولوجي العميق. وتُستخدم مئات من نُظُم الخزن بالبراميل الخشبية الجافة الآن في شتى مناطق العالم وسيظل الاعتماد عليها قائماً لفترة تتجاوز كثيراً مدة بقائها المتصورة أصلاً عند تصميمها.

وبسبب النفاس العام والسياسي الدائر بشأن الطاقة النووية وتحديد مواقع المستودعات الجيولوجية العميقة والترخيص لها، يتعدى معرفة فترات الخزن ومخزونات الوقود المستهلك المتوقعة بشكل أكيد. ويستدعي المضي قدماً رغم عدم اليقين هذا الثقة في إمكان خزن الوقود المستهلك بأمان ريثما يتاح القدر الكافي من إعادة المعالجة أو التخلص الجيولوجي العميق. ونتيجة لذلك، تُعيد دول أعضاء كثيرة النظر في ما يقترن بتمديد فترات الخزن من مسائل عامة وسياسية وتقنية وتنظيمية (انظر المراجع [٦-٨]).

ويحدث أن تعجز الجسور والسدود وسواها من الهياكل والمعدات العامة عن أداء دورها، مخلفةً تكاليف عالية في الحياة والممتلكات. ولكن مخاطرها تُقبل رغم عدم اليقين هذا. ويدرك الجمهور فوائد هذه الهياكل ويقدرها ولديه ما يكفي من الثقة في أنَّ شواغل الأمان التي تنيرها يمكن إدراكها وتداركها قبل حدوث فشل كارثي فيها. فالمعدات الأساسية تُصان وتُسحب وتُستبدل في وقت ما قبل حدوث فشل فيها. وعلى المنوال نفسه، ليس السؤال إن كان خزن الوقود المستهلك خزناً آمناً مستطاعاً وإنما هو المطلوب لتوفير الثقة الكافية في أنَّ التدهور بسبب العمر يمكن إدراكه وتداركه لتفادي عواقب الأمان غير المقبولة بغض النظر عن مدة الخزن. وينبغي ألا يعتمد أساس الأمان واستراتيجيات إدارة الوقود المستهلك على مستقبل مجهول. فالاستراتيجيات يمكن أن تُحدد وتُنشئ البنى التحتية الملائمة التي تكفل خزن الوقود المستهلك الآمن بغض النظر عن الزمن. ولا يمكن أبداً إزالة المخاطر وأوجه عدم اليقين المقترنة بتمديد خزن الوقود المستهلك إزالة تامة ولكن يمكن إدارتها على نحو

يصبح معه احتمال وقوع حدث غير متوقع منخفضاً بدرجة كافية لتتيح الحد من عواقبه بقدر كافٍ يجعل الخطر منخفضاً بشكل مقبول.

٢-١- تمديد خزن الوقود المستهلك خطوة خطوة

جرت العادة في الماضي على أن يُشار إلى خزن الوقود المستهلك باستخدام مصطلحات من قبيل الخزن القصير الأجل والخزن المؤقت والطويل الأجل والخزن الممتد أو الخزن الطويل الأجل جداً. ويستتبع كلٌّ من هذه المصطلحات افتراضاً يتعلق بفترة الخزن. ويمكن النظر في تمديد خزن الوقود المستهلك لفترة ترخيص إضافية أو محددة دون العلم مسبقاً بعدد الفترات المتتالية اللازمة إلى أن يُنقل الوقود المستهلك لإعادة معالجته أو التخلص منه.

وقد تتغير المخاطر المحتملة والتقانات المتاحة والمتطلبات المطبقة مع مرور الزمن [٩]. وبإعداد نهج تقني وتنظيمي يتيح تجديداً متتالية للوقت اللازم، يمكن تفادي ضرورة التنبؤ بنقطة نهاية لفترة الخزن أو تحديدها [٩]. ولذلك، لا يقتصر نطاق هذا المنشور على أي مدة خزن محددة بل يعالج عدم اليقين بشأن فترات الخزن بتمديد خزن الوقود المستهلك خطوة تلو الأخرى إلى أن تُتاح نقطة النهاية — أي إعادة المعالجة أو التخلص.

ومن الناحية النظرية، لا تدعو الحاجة إلى تحديد عدد عمليات تجديد الرخص طالما ثبت الامتثال للمتطلبات. أمّا من الناحية العملية، فإنّ التكاليف المترتبة للإبقاء على الامتثال (أي الصيانة والارتقاء) قد تجعل الارتقاء إلى نظم خزن جديدة مستحباً [٩].

٢-٢- أمان خزن الوقود المستهلك

ظلاًّ الوقود المستهلك يُخزّن خزناً آمناً لأكثر من ٥٠ عاماً كما أنّ مبادئ الأمان الضرورية مفهومة فهما جيداً. ويمكن تحديد التحديات الناشئة وتداركها قبل أن تصبح مسائل تتعلق بالأمان. وتقدم سلسلة الأمان رقم SSG-15 - خزن الوقود المستهلك [١٠] الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية إرشادات لضمان أمان خزن الوقود المستهلك [١٠]. وعلى نحو ما جاء في الفقرة ٣-١ من السلسلة SSG-15 [١٠] "يتحقق أمان مرفق خزن الوقود المستهلك والوقود المستهلك المخزّن فيه بما يلي: الاحتواء الملائم للنويدات المعنية وأمان الحرجية وإزالة الحرارة وتدرّج الإشعاع وقابلية الاسترجاع" خلال جميع الظروف العادية وغير العادية وظروف الحادثة المحتاط لها في التصميم، فضلاً عن معالجة ظروف الحوادث التي تتجاوز الحادثة المحتاط لها في التصميم. ولئن كان التنبؤ بالمتطلبات المستقبلية بشكل أكيد متعذراً، فإنّ وظائف أمان خزن الوقود المستهلك الأساسية التالية لن تتغير خلال فترات الخزن المزدادة. ومن ثمّ، فمن المعقول افتراض أنّها ستكون أساساً لأي تنظيم لخزن الوقود المستهلك في المستقبل [٩].

٢-٢-١- الاحتواء

يحول الاحتواء دون إطلاق المواد المشعّة في البيئة، وهو أمر يتيح نظام تصفيح الوقود وخزونه (على سبيل المثال، علبة ملحومة أو مُسمّرة أو برمّيل خشبي ملحوم أو مُسمّر). وكلّما طالّت أوقات الخزن، زاد احتمال تدهور المواد. لذا، فقد يلزم تحويل وظائف الاحتواء للمكوّنات التي يسهل تفتيشها وصيانتها.

٢-٢-٢- الحالة دون الحرجية

تحول الحالة دون الحرجية دون وقوع حدث حرج غير مخطّط له. وكثيراً ما يعتمد ضمان الحالة دون الحرجية على التحكم الهندسي. بيد أنّ الحفاظ على النسق الهندسي للوقود المستهلك خلال فترات خزن طويلة يزداد استعصاءً بسبب تدهور المواد تدهوراً يؤثر سلباً في السلامة الهيكلية للوقود المستهلك ومكوّنات نظام الخزن (مثلاً، سلة نقل الوقود وممتصات النيوترون والعلب أو البراميل الخشبية). ويمكن تحويل وظائف التحكم في الحرجية لهيكل ونظم ومكوّنات أخرى يمكن تأمينها وتفتيشها وصيانتها بسهولة أكبر. ويشمل ذلك التحكم في المحتوى الانشطاري والهندسة المقيدة وتضمين ممتصات النيوترون وإقصاء المهددات الكافية.

٢-٢-٣- إزالة حرارة الاضمحلال

تحول إزالة حرارة الاضمحلال دون فقدان النسق الهندسي، وهو أمر من شأنه أن يقلّل هوامش الأمان المتعلقة بوظائف الأمان الأخرى. وتحول حدود درجة الحرارة دون فقدان سلامة التصفيح وسواه من الهياكل والنظم والمكوّنات الأخرى المهمة للأمان. ولسلامة الكسوة أهمية في الحفاظ على النسق الهندسي لمجّعة الوقود المستهلك الذي قد يؤثر في هوامش أمان الحالة

دون الحرجية والتدريج والاحتواء. وإزالة حرارة الاضمحلال بشكل فعال أهمية، فالحرارة تُفَعَّل كثيراً من الظواهر التي تؤثر سلباً في سلامة الوقود المستهلك. وقد تكون إزالة حرارة الاضمحلال خلال الخزن الممتد أيسر لأنَّ الوقود المستهلك يصبح أبرد مع مرور الوقت. ومن ناحية أخرى، قد تثير درجات الحرارة المنخفضة صعوبة أثناء النقل بعد الخزن لمدة طويلة بسبب تقصُّف الكسوة.

٢-٢-٤ - التدريج

يضمن التدريج الذي يتيح نظام الخزن أن يظلَّ التعرض للإشعاع في حدود آمنة. وسيقلُّ الاضمحلال الإشعاعي للوقود المستهلك ومن ثمَّ الحاجة إلى التدريج كلما زادت فترة الخزن.

٢-٢-٥ - قابلية الاسترجاع وقابلية النقل

قابلية الاسترجاع ليست ضرورية للحفاظ على الأمان بالمعنى نفسه لوظائف الأمان الأربع السابقة. ورغم أنَّ الأمان يمكن أن يتحقق دون الحفاظ على قابلية الاسترجاع، فإنَّ استرجاع مجمعة الوقود المستهلك أو مكونات نظام الخزن المحتوية على الوقود المستهلك بعد الخزن قد يكون ضرورياً لتمكين المراحل اللاحقة من إدارة الوقود المستهلك. وإن استلزمت المراحل اللاحقة من إدارة الوقود المستهلك فتح العبوة ومعالجة مجمعات الوقود المستهلك، فسيؤدي ذلك إلى تحمل تكاليف إضافية إن لم يكن استرجاعها ميسوراً. ولذا، فمن المهم الحفاظ على قابلية الاسترجاع لأنها قد تقلل تكاليف خيارات إدارة الوقود المستهلك في المستقبل وتجعلها أقلَّ تعقيداً.

ولئن كانت قابلية النقل لا تُذكر عادة بحسبانها وظيفية أمان رئيسية، فإنَّه ينبغي الحفاظ عليها طوال خزن الوقود المستهلك، ضماناً لتحريكه إلى مرفق إعادة المعالجة أو التخلص — أو حتى إلى مرفق خزن جديد لديه قدرات للتفتيش وإعادة التعبئة، عند الاقتضاء. وقد يصح الحفاظ على قابلية الاسترجاع وقابلية النقل أصعب خلال فترات الخزن الممتدة لأنَّ احتمال تدهور المواد يزداد.

٢-٢-٦ - النظم الإيجابية والنظم السلبية

يمكن أداء وظائف الأمان إمَّا بالنظم الإيجابية أو السلبية. ولا تعتمد النظم السلبية في أداء وظائفها على مدخلات خارجية، مثل الإمداد بالطاقة والمشغلات الميكانيكية، رغم أنَّ قرراً من التدخل البشري قد يكون ضرورياً من حين لآخر للتحقق من استمرار عمل السمات السلبية (مثلاً، للتحقق من عدم انسداد مدخل/مخرج نظام التبريد). وكلما مُدَّت فترات خزن الوقود المستهلك، أضحَت الضوابط السلبية أكثر أهمية بفعل ازدياد موثوقيتها وانخفاض تكاليف تشغيلها وقلة الاعتماد على الإبقاء على الضوابط المؤسسية [٩].

ورغم إدراك المبادئ اللازمة لضمان خزن الوقود المستهلك الأمان حالياً لفترات ممتدة إدراكاً جيداً، فقد لا تكون نظم خزن الوقود المستهلك الحالية صُمِّمت للأطر الزمنية التي يُفكَّر فيها الآن كما أنَّ تحليلات الأمان قد لا تكون أخذت في حسابها بشكل تام الأطر الزمنية التي يُفكَّر فيها الآن. ويستكشف هذا المنشور السبل الكفيلة بالحفاظ على هذه المبادئ عند زيادة العمر التشغيلي لنظم خزن الوقود المستهلك الحالية وبجعل النظم المستقبلية أكثر فاعلية بتضمين احتمال الخزن الممتد في التصميم والأطر التنظيمية في المستقبل.

٢-٣ - قابلية استدامة خزن الوقود المستهلك

تُعرَّف السلسلة رقم SSG-15 [١٠] الخزن القصير الأجل بأنه خزن يستمر لنحو ٥٠ عاماً والخزن الطويل الأجل بما يتجاوز ٥٠ عاماً على وجه التقريب مع نقطة نهاية محددة (إعادة المعالجة أو التخلص). وتذكر السلسلة رقم SSG-15 أنَّ الأجل الطويل لا يُتوقع أن يتجاوز نحو ١٠٠ عام، وهي مدة تُعدُّ كافية لتحديد خطوات إدارة الوقود المستهلك في المستقبل. وتشير الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى ازدياد مخزونات الوقود المستهلك المخزنة وإلى أنَّ مقداراً كبيراً من الوقود المستهلك ينبغي أن يُخزَّن لفترات أطول من تلك المعتزمة في البداية، ربما لأكثر من ١٠٠ عام [١١] وذلك لأنَّ المرافق العاملة للتخلص الجيولوجي العميق من الوقود المستهلك أو النفايات القوية الإشعاع معدومة الآن. وترى الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة أنَّ الخزن لمدة ٣٠٠ سنة ملائم لتحديد آثار التقادم ومسائل إدارة التقادم المتعلقة بالخزن الممتد والنقل والتنبؤ بها [٧].

ولا يُعدُّ الاستمرار في توليد الوقود المستهلك وخزنه دون الالتزام التام بنقطة نهاية محددة تحديداً واضحاً سياسة مستدامة. وكما جاء في الفقرة ١-٦ من السلسلة SSG-15 [١٠]، "لا يمكن أن يُعدَّ الخزن الحل النهائي لإدارة الوقود المستهلك التي تقتضي نقطة نهاية محددة، مثل إعادة المعالجة أو التخلص، ضماناً للأمان". ولا يُعدُّ الخزن لفترات أطول فأطول متنساقاً مع المسؤولية عن حماية السكان والبيئة دون إلقاء أعباء غير مبررة على الأجيال المقبلة [٢، ٣]. والخزن بطبيعة حاله تدبير مؤقت يتيح احتواء الوقود المستهلك بنية استرجاعه لإعادة معالجته أو التخلص منه لاحقاً [٤، ١٠، ١٢].

ويرى البعض أنَّ التخلص الجيولوجي العميق هو نقطة النهاية الوحيدة المقبولة عموماً للوقود المستهلك أو للنفايات القوية الإشعاع الناشئة عن إعادة معالجته. ويرى آخرون أنَّ التخلص الجيولوجي العميق قد يحرم الأجيال المقبلة من القدرة على استخدام هذه المواد لأغراض نافعة. ولأنَّ فترات خزن الوقود المستهلك يتعذر تحديدها بشكل أكيد، يستلزم الحفاظ على استدامة إدارة الوقود المستهلك سياسات حول دون أن يفرض خزن الوقود المستهلك بشكل مستمر عبئاً لا مَسَوِّغ له على الأجيال المقبلة. وقد يكون ذلك مستطاعاً إن أتاحت الأجيال المنتفعة لجميع مخزونات الوقود المستهلك المخزَّنة ما يلزم للخزن الأمان والوصول إلى نقطة نهاية مقبولة من بنية تحتية مالية وتقنية وتنظيمية ومتعلقة بحسن التسيير.

٣- برامج إدارة التقادم

على نحو ما جاء في سلسلة معايير الأمان رقم SSG-48، إدارة التقادم وإعداد برنامج للتشغيل طويل الأجل لمحطات القوى النووية، الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية [١٣]، تكفل برامج إدارة التقادم الحفاظ على الأمان بالكشف في الوقت المناسب عن التدهور الناشئ عن التقادم وسواه من الظروف التي قد تعرقل المعالجة والنقل لاحقاً والتحكم في هذا التدهور. وطُبِّقَت إدارة التقادم على نطاق واسع في محطات القوى النووية وفي مرافق خزن الوقود المستهلك وهي تعالج التقادم المادي وتقدم هياكل ونظم ومكونات الأمان معاً [١٣-١٧]. ويُبتَغى من تقييمات الأمان الدورية المتفق عليها مع المنظم الحرص على أن تكون خطط إدارة تقادم محطة القوى ملائمة باستمرار والمساعدة على إرساء الأساس التقني لتجديد الرخص. وتطبق ذات المبادئ والنهج على تجديد الرخص لمرافق خزن الوقود المستهلك عندما يقترب موعد انتهاء فترة الرخصة السابقة. وسيستبعد برنامج إدارة التقادم المنفذ بشكل ملائم الظروف غير المخطط لها أو لم تخضع للتحليل التي قد تقلل هوامش الأمان أو تؤدي إلى تكاليف استصلاح غير ضرورية لفترات خزن أطول. وتشكّل المعلومات المستمدة من أنشطة إدارة التقادم قاعدة لتحديد أولويات الاحتياجات وأهداف البحث والتطوير المقترنة بها. وهي تتيح أيضاً للجمهور وواضعي السياسات سيقاً يمكنهم من فهم المخاطر النسبية فهماً سليماً. وينبغي لبرامج إدارة التقادم أن تراعي أيضاً ما يحدث في متطلبات السياسات والمتطلبات التنظيمية بشأن فترات الخزن الطويلة من تغييرات.

٣-١- إدارة التقادم لخزن الوقود المستهلك

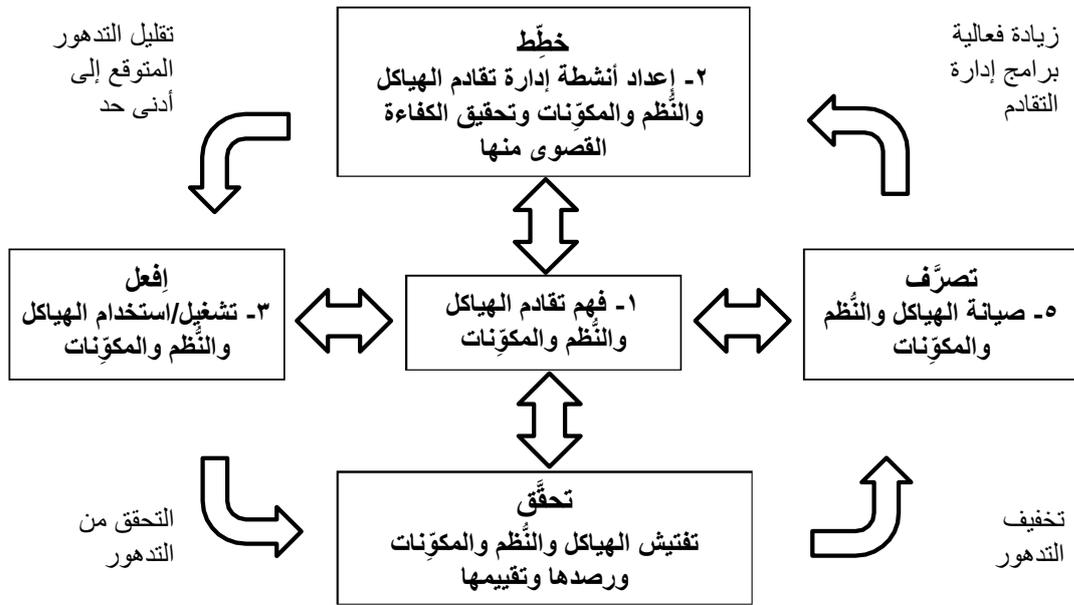
يمثّل تقييم عواقب الآثار التراكمية لكلا التقادم المادي وتقدم المعدات نشاطاً متواصلًا يتجلى في تكيّف دورة دمينغ "خطّ-إعمل-تحقّق-تصرّف" مع إدارة تقادم الهياكل والنظم والمكونات، المعدلة لمرافق خزن الوقود المستهلك (انظر الشكل (٢) [١٣]).

وكما جاء في الفقرة ٢-١-٢ من السلسلة رقم SSG-48 [١٣]:

"تشير الحلقة المغلقة من الشكل [٢] إلى استمرار إدارة التقادم وتحسينها، استناداً إلى التعقيبات بشأن تجربة التشغيل ذات الصلة والنتائج المستمدة من البحث والتطوير ونتائج التقييم الذاتي واستعراضات النظراء، للمساعدة في ضمان معالجة المسائل الناشئة عن التقادم."

ويُعدُّ فهم تقادم الهياكل والنظم والمكونات مفتاح إدارة التقادم الفعالة وهو يتضمن الخطوات التالية:

(أ) تحديد الهياكل والنظم والمكونات: مراعاة الهياكل والنظم والمكونات التي يصعب تفتيشها أو إصلاحها أو استبدالها وتحديدها تحديداً ملائماً في التصميم وعند تخطيط برامج الرصد والصيانة.



الشكل ٢ - النهج النظمي حيال إدارة تقادم الهياكل والنّظم والمكوّنات لمرفق خزن الوقود المستهلك.

- (ب) تحديد آليات التدهور المنطقية: تستدعي إدارة التقادم الفعالة فهم عمليات التدهور الكيميائية والحرارية والميكانيكية والناشئة عن الإشعاع وما ينشأ عنها مجتمعة من أثارها. وقد يستدعي الأمر البحث والتطوير والاختبار لإدراك العواقب وتحديد الطرائق الكفيلة بتفادي تدهور الهياكل والنّظم والمكوّنات أو تخفيفه أو تخفيف حدته أثناء التشغيل الممتد لمرافق خزن الوقود المستهلك.
- (ج) الأخذ في الحسبان العوامل الخارجية، مثل التقانات الحديثة والتغييرات التنظيمية ذات الصلة بخزن الوقود المستهلك.

٣-١-١- خطّط

يتضمن النشاط 'خطّط' الوارد في الشكل ٢ تنسيق البرامج الحالية وتعديلها على نحو فعال وإعداد برامج جديدة، ضماناً لإدراج منع تأثيرات تقادم الهياكل والنّظم والمكوّنات واكتشافها وتخفيف حدتها في خطط تشغيل مرفق خزن الوقود المستهلك وصيانته ورصده وتفتيشه، على سبيل المثال خطة تجفيف تجويف البرميل الخشبي وفتحات المسامير الملولة قبل تحميل الوقود المستهلك، تقليلاً للتآكل أثناء فترات الخزن الجاف الطويلة.

٣-١-٢- أفعل

يضمن النشاط 'أفعل' أن تعمل الهياكل والنّظم والمكوّنات بشكل سليم من خلال التشغيل الدقيق وفق إجراءات التشغيل والمواصفات التقنية. وتكفل العمليات وبرامج الصيانة الفعالة صيانة الهياكل والنّظم والمكوّنات المتعلقة بالأمان وإصلاحها واستبدالها، حسب الاقتضاء، تقادياً للمسّ بوظائف الأمان.

٣-١-٣- تحقّق

يشمل نشاط 'تحقّق' اكتشاف أي تدهور يصيب الهياكل والنّظم والمكوّنات أثناء الخزن الممتد وتقييمه في الوقت المناسب بالاستعانة ببرامج الرصد والتفتيش الفعالة، شريطة أن تُدار البيانات وتُحفظ بشكل ملائم. ويُجرى قياس الهياكل والنّظم والمكوّنات المستمر (الرصد) ومعاينتها دورياً وقياسها واختبارها والتدقيق فيها (التفتيش). وتُوضع معايير للرصد وفواصل التفتيش حتى يتسنى الكشف عن التدهور في وقت مبكر جداً قبل فقدان أي وظيفة من وظائف الأمان أو حالة فقداناً قد يمس بالمعالجة والنقل في المستقبل. وينبغي أن يُعاد تقييم هذه المعايير والفواصل دورياً خلال أوقات الخزن الطويلة للأخذ في الحسبان الاتجاهات السائدة سابقاً ونتائج عمليات التفتيش الماضية والدروس المستخلصة من الصناعة، من بين أمور أخرى. ويلزم أيضاً إجراء

عمليات إعادة تقييم دورية لحال نظام خزن الوقود المستهلك في ضوء تطور اللوائح والتكنولوجيا، منعاً للتقادم وضماناً للامتثال لأسس ترخيص الخزن طوال فترة الخزن. وتتألف برامج الرصد من رصد الحال والأداء معاً. ويستقصي رصد الحالة وجود آليات التقادم التي تؤثر في الهياكل والنظم والمكونات ومداها. ويشمل ذلك القياس لتحديد حالة هياكل المجمعات وصخر القاعدة والمنصات الخرسانية وسواها من الهياكل والنظم والمكونات، مثل الرفوف والكسوات الواقية والكوابل والأجهزة الأساسية. وقد تكون بعض الهياكل والنظم والمكونات متاحة للتفتيش المباشر فقط أثناء الخدمة، وقد تستدعي هياكل أخرى (مثل المكونات في حقول الإشعاع القوي) استخدام وسائل عن بعد أو وسائل أخرى للتفتيش والتقييم [١٨]. وبوجه عام، تكون معاينة مجمعات الوقود المستهلك ورفوف الخزن أيسر في الخزن الرطب منها في الخزن الجاف. ويتحقق رصد الأداء من قدرة الهياكل والنظم والمكونات على أداء الوظائف المنشودة منها، على سبيل المثال:

- (أ) التدرج: قد تشير الانحرافات في الاتجاهات بين مستويات الإشعاع الفعلية والمحسوبة إلى تدهور التدرج.
- (ب) الاحتواء: لبراميل الخزن المعدنية، يمكن أن يؤكد التحقق من التسرب من خلال رصد الضغط بين أغطية البراميل ووظيفة الاحتواء التي تؤديها الحشية المعدنية كلما طالت أوقات الخزن. وفي حالة البراميل الخرسانية، يمكن التحقق من وظيفة الاحتواء بقياس فرق الحرارة بين أعلى العلب الداخلية الملحومة وقاعها لتأكيد وجود غاز الهليوم [١٩].
- (ج) سلامة الوقود المستهلك: في الخزن الرطب، سيُتيح رصد كيمياء الماء والتحكم فيها الكشف عن إخفاق الوقود المستهلك. أمّا في الخزن الجاف، فقد يلزم اختراق داخل العلب أو البرميل الخشبي لأخذ عينة من غاز التجويف. ويقترح ماتسومارا وآخرون [٢٠] طريقة غير متلفة للكشف عن إخفاق مجمعة الوقود المستهلك بقياس أشعة غاما ^{85}Kr المنبعثة من مجمعة الوقود المستهلك المعطوبة في العلب.
- (د) الهيكل الخرساني في مرافق خزن الوقود المستهلك: يمكن تطبيق اختبار مطرقة شميدت للكشف عن أي تدهور.

٣-١-٤- تصريف

يشمل نشاط 'تصريف' تقييم التدهور المكتشف (على سبيل المثال، التفتيش المرئي واختبار التسرب وتعيين الجرعات الإشعاعية) وإعداد خطة تصحيح أو تخفيف ملائمة وتنفيذها، تقادياً لفقدان أيٍّ من وظائف الأمان. ويجوز أن تشمل التدابير ما يلي:

- الصيانة؛
- إصلاح المكونات؛
- الاستبدال؛
- تعديلات التصميم؛
- تحديثات خطط التشغيل والصيانة والرصد والتفتيش.

ويستخدم الشكل ٢ الإفادات المستمدة من تجربة التشغيل المعنية ومن نتائج التقييم الذاتي وأنشطة البحث والتطوير والدروس المستخلصة من الصناعة للثبوت من تحديد مسائل إدارة التقادم الناشئة ومعالجتها. ويوجد مثال لدارة التعقيب الكاملة المشار إليها في الشكل ٢ في الولايات المتحدة الأمريكية حيث جُمعت عمليات التقادم التي تؤثر في نظام الخزن بالبراميل الجافة جنباً إلى جنب مع تحليلات التقادم المحددة زمنياً الملائمة ليستعين بها مُصدرو التراخيص وواضعو القواعد التنظيمية في فهم المسائل والتدابير اللازمة المقترنة بتجديد رخص خزن الوقود المستهلك لفترات خزن ممتدة [٢١]. وسيظل حجم المعارف المفيدة التي تساعد على إعداد التصميمات والعمليات والأطر التنظيمية الملائمة يزداد ويتطور كلما تقادمت مرافق خزن الوقود المستهلك.

٣-٢- سدُّ الثغرات في البيانات عن تقادم المواد من أجل خزن الوقود المستهلك

ينبغي فهم تدهور المواد فهماً جيداً في كلتا حالتَي الوقود المستهلك ومكونات النظام برمته التي يُعَوَّل عليها في الاحتواء والتدريج وإزالة حرارة الاضمحلال وأمان الحرجية والحفاظ على القدرة على معالجة عبوات الوقود المستهلك واسترجاعها ونقلها بأمان. وفي حالة الخزن في أحواض أو مستودعات الخزن الجاف، يشمل ذلك مكونات من قبيل مواد بطانة الحوض وهيكل المرفق. وفي حالة تدهور الهياكل والنظم والمكونات، ينصبُّ التركيز على ضمان سلامة العلب أو البرميل الخشبي ويشمل ذلك المواد المستخدمة في جسم البرميل الخشبي ومرتكزات الدوران والأختام والتدريج النيوتروني وسلّة نقل الوقود. ويقول كالرسين وآخرون [٩] (انظر أيضاً المراجع [١٥، ٢٢-٣٧]):

"رغم وجود قاعدة معرفية واسعة عن سلوك مجمعات الوقود المستهلك ومواد مرافق خزن الوقود المستهلك، قلما توجد مراجع عن فترات أطول من بضع عقود.... فضلاً عن ذلك، قد تستدعي ظروف التشغيل والمواد المتطورة، مثل الوقود العالي الاحتراق وأنواع الوقود ومواد الكسوة الجديدة، الاختبار أيضاً لفهم التدهور بفعل التقادم في ظروف خزن الوقود المستهلك الممتد.

.....

"أجريت في الآونة الأخيرة عدة دراسات لتحديد آليات التدهور الممكنة وتحليل تأثيرها المحتمل في الأمان كلما امتدت فترات خزن الوقود المستهلك وتحديد الثغرات المعرفية بين الاحتياجات التقنية المتوقعة والبيانات التقنية الموجودة... [٢]. فضلاً عن ذلك، حدّد عدد من الدراسات الحاجة إلى مشروع استعراض تأكيدي كامل النطاق لخزن الوقود المستهلك العالي الاحتراق ونقله بحسابه جزءاً أساسياً في إعداد القاعدة التقنية".

وتُبدل في الوقت الحالي جهود وطنية ودولية عديدة لسد الثغرات المعرفية هذه من بينها ما يلي [٩]:

- مشروع البحث المنسق الذي تجريه الوكالة الدولية للطاقة الذرية لعرض أداء مكونات نظام خزن الوقود المستهلك والنظم المرتبطة به خلال الخزن الطويل الأجل جداً؛
- برنامج التعاون بشأن الخزن الممتد الذي أعده معهد بحوث الطاقة الكهربائية؛
- حملة التصرف في الوقود المستهلك التي أعدتها وزارة الطاقة في الولايات المتحدة؛
- لجنة أمان المنشآت النووية التابعة لوكالة الطاقة النووية لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي.

وسيتيح سدّ الثغرات المعرفية هذه نمذجة آثار التقادم وتحليلها بشكل أفضل، فيُتاح تصميم مرافق خزن الوقود المستهلك وإدارتها والتحكم فيها بفعالية لفترات طويلة. وربما يتحقق ذلك، يتيح الوعي بهذه الثغرات خزن الوقود المستهلك المستمر بجعل حلول التصميم الهندسية تراعي أوجه عدم اليقين المصاحبة، فطى سبيل المثال، يمكن سدّ الثغرات المعرفية في أداء مواد الكسوة باستراتيجيات أمان وتُهج تصميم تقلّل الاعتماد على سلامة الكسوة أو تقاداه [٣٨، ٣٩].

٤- تصميم نظم خزن الوقود المستهلك وتحديد مواقعها في المستقبل

من شأن اختيار الموقع وتصميم المرفق والمعدات أن يُقلّلا من مخاطر خزن الوقود المستهلك وتكاليفه خلال فترات ممتدة. وفي الوقت الحالي، يُخزّن الوقود المستهلك في: (١) أحواض مائية؛ (٢) غُلب معدنية ملحومة تُوضع في صوامع خرسانية، أو براميل خشبية أو مستودعات؛ أو (٣) براميل معدنية ملحومة الغطاء تتيح التدريع وسواه من الوظائف اللازمة لضمان الأمان، وتُستخدم كلتا تقنيتي الخزن الرطب والجاف إمّا لمرافق الخزن في موقع المفاعل أو على مبعده من موقعه ولمرافق الخزن خارج الموقع (انظر المرجع [٤٠] للاطلاع على موجز عن ذلك).

وانصبَّ جلُّ التركيز بشأن الخزن الممتد على إعداد القاعدة التقنية التي تكفل استمرار مكونات مجمعة الوقود المستهلك والتغليظ الحالية في أداء وظائف الأمان المسندة إليها أثناء الخزن الممتد. ولئن كان هذا النشاط ضرورياً لإطالة فترات الخزن للمرافق الحالية، فإنّ إدراك إمكان خزن الوقود المستهلك لفترات ترخيص عديدة وقبوله يبيحان فرصاً لإدراج متطلبات التصميم والتشغيل الأولية التي تزيد فعالية مرافق خزن الوقود المستهلك في المستقبل.

ويأتي مخزون الوقود المستهلك المخزّن حالياً نتيجة لخمسين عاماً فقط من صناعة صغيرة نسبياً وإن كانت لا تنفك تنمو. وبالنظر إلى ما للوقى النووية من دور حالي ومحتمل في المستقبل، لا يمثّل مخزون الوقود المستهلك في الوقت الراهن سوى جزء ضئيل من المخزونات في المستقبل التي ينبغي خزنها ريثما تتاح القدرة الكافية لإعادة معالجتها أو التخلص منها؛ فأغلب مرافق خزن الوقود المستهلك التي ستدعو الحاجة إليها لم تُصمّم بعد أو تُشيد.

^٢ تُرتّب أولويات الثغرات المحددة استناداً إلى المخاطر المقترنة بها [٣٣، ٣٤].

ويمكن أن يعود النظر في تصاميم تُيسّر إطالة مُدد الخزن وتتكيف مع مختلف استراتيجيات الأمان التي قد تكون لازمة بسبب الظروف واللوائح والقيم المجتمعية المتغيرة أثناء فترات الخزن الممتدة بالنفع على مرافق خزن الوقود المستهلك في المستقبل. ورغم أنّ هذه التصاميم قد تسفر عن استثمارات مسبقة، فإن تكاليف دورة الحياة قد تكون أقل من تلك التي ينبغي تحملها باتباع النهج التقليدية بشكل أكبر التي تفترض وجود ظروف ثابتة خلال عمر مرافق خزن الوقود المستهلك. ومن شأن تصميم المرافق واختيار المواقع وأنساق خزن الوقود المستهلك أن تؤثر تأثيراً ملموساً في مسائل الخزن الممتد وتكاليفه.

٤-١ - أساس تصميم النُظْم

ينبغي أن تأخذ نُظْم خزن الوقود المستهلك المصممة للخزن الممتد في الحسبان طائفة أوسع لما يمكن أن يحدث أثناء الفترة الزمنية الطويلة من تصورات. ويندرج في عداد هذه التصورات تقادم حجم التحديات واحتمال حدوثها بفعل ظواهر طبيعية مثل الفيضانات والزلازل وآثار التقادم المتراكمة والتأثيرات الناجمة عن القيم المجتمعية والسياسات المتغيرة [٩]. وحتى يتسنى للتصاميم استيعاب فترات خزن غير أكيدة للوقود المستهلك، يُستنسب مراعاة زيادة هوامش الأمان لتستوعب طائفة الظروف المحتملة الأوسع نطاقاً التي قد تطرأ أثناء فترة الخزن الطويلة. وينبغي أن تتضمن تصاميم خزن الوقود المستهلك الممتد تدابير لتخفيف حدة ضغوطات التقادم على أمان الهياكل والنُظْم والمكونات. وينبغي اختيار تقانات التعبئة والتجفيف لتقليل احتمال إخفاقات الكسوة. ويتوخى من أنساق خزن الوقود وتعبئته أن تُيسّر نظم التفقيش والرصد. وينبغي أن تؤخذ في الحسبان الظواهر من قبيل الإجهادات الميكانيكية والكيميائية والإشعاعية وغيرها من الإجهادات التي يمكن أن تتراكم أو تتغير بمرور الزمن. ويُعدُّ تصميم النُظْم البسيطة والمتينة واختيار المواد الملائمة وضوابط الجودة أمراً أساسياً لموثوقية الحواجز الإشعاعية في الأجل الطويل وسواها من النُظْم التي يُعَوَّل عليها في الأمان والأمن. وينبغي اختيار المواد الهيكلية والتحكم في الظروف البيئية، توفيراً للمقاومة الكافية للتآكل والتشقق بفعل التآكل الناتج عن الإجهاد وغير ذلك من أشكال التدهور بفعل التقادم. ومن شأن ضوابط التصميم والتشغيل التي تُقلِّل من تواتر الظواهر التشغيلية العابرة وحجمها، مثل دورات الحرارة والمعالجة الميكانيكية، أن تحدِّد مِمَّا تتعرَّض له المواد الهيكلية من إجهاد ومن تحديات أخرى. وينبغي أيضاً لتصاميم خزن الوقود المستهلك الممتد أن تراعي ما يقترن بالحفاظ على ضوابط الجودة والسجلات اللازمة لفترات الخزن الطويلة من تحديات.

وفضلاً عن إطالة عمر الهياكل والنُظْم والمكونات وتيسير الحفاظ على أمانها، ينبغي أن يراعي تصميم مرافق خزن الوقود المستهلك أيضاً أهمية الحفاظ على ثقة الجمهور. ولذلك، تكتسب الأراضيات والطلاء وسواهما من المؤشرات المرئية الدالة على أنّ المرفق يُدار بشكل ملائم أهمية أيضاً. ولأسباب مماثلة، يستصوب أن تراعي التصاميم المستقبلية سمات تُيسِّر التواصل مع الجمهور وتعود بفوائد مجتمعية أخرى.^٣

وتنظر تصاميم مرافق خزن الوقود المستهلك الطويل الأجل ومعداته في احتمال أن يتطلب الوقود المستهلك المخزّن الاستصلاح لضمان النقل الآمن والتوافق مع خطوات إدارة الوقود المستهلك في المستقبل. ولذا، ينبغي أن يكون لدى مرافق خزن الوقود المستهلك القدرة على الحفاظ على قابلية النقل وتأكيداتها، وإن اقتضى الحال استعدادتها. وتزداد الاعتبارات من قبيل تدابير تيسير قابلية الاسترجاع ومعدات المعالجة المعيارية أهمية كلما زادت مدة الخزن. فعلى سبيل المثال، قد يدعم وضع مجمّعة وقود مستهلك واحدة أو أكثر في سلة نقل معيارية قبل الخزن عدداً من الأهداف، فاستعمال هذه السلة يمكن أن:

- يتيح سمات لتوحيد المعالجة لمختلف أنواع الوقود المستهلك؛
- يتيح سمات تُيسّر الرصد والتفتيش وإدارة البيانات وحفظها بشكل سليم؛
- يتيح وسيلةً تضمن إمكانية استرجاع الوقود المستهلك لغرض التفقيش أو إعادة التعبئة دون الاعتماد على الحفاظ على أمان مجمّعة الوقود المستهلك الهيكلية؛
- تُعزِّز أمان الحرجية بإتاحة دعم هيكلية إضافي لضبط النسق الهندسي ووسيلة لإضافة سموم نيوترونية أو تحويل موقع المهدئات؛
- تُمكِّن من خزن الوقود المستهلك في أنساق شتى (مثلاً، براميل خشبية وأحواض ومستودعات) وتُيسِّر نقله من نسق إلى آخر، عند الاقتضاء.

^٣ ستضمحل النفايات القوية الإشعاع داخل مرفق هابوغ بهولندا تدريجياً حتى تقرر الأجيال القادمة والحكومات طريقة التخلص من النفايات المشعة. ويُرمز إلى عملية الاضمحلال بلون المبنى البرتقالي الذي اختاره مصمّمه، إيود فير هوف، لأنه يقع في منتصف الطريق بين اللونين الأحمر والأخضر. وسيعاد طلاء الجزء الخارجي من المبنى دورياً بظلال لونية أخف متوالية حتى يصل إلى اللون الأبيض في نحو ١٠٠ سنة، وهو الوقت الذي سيقف فيه الناتج الحراري بقيمة أسّيّة.

ومن الناحية النظرية، يمكن تصميم مرافق خزن الوقود المستهلك بمواد وقدرات التفتيش والصيانة لدعم العمليات لمدة قد تصل إلى عدة مئات من السنين. بيد أنه قد يُستحب في بعض الحالات، حين تؤخذ التكاليف المقترنة بذلك في الحسبان، تصميم مرافق الخزن لتُعمَّر لفترة أقصر والتخطيط عمداً لتجديد المرافق والمعدات بشكل ملموس وربما لإعادة تعبئة الوقود المستهلك في ذلك الوقت. وتندرج منهجية الإخراج من الخدمة المحتمل وسبله في عداد الاعتبارات الرئيسية لتصميم مرافق خزن الوقود المستهلك الجديدة وتوسيع المرافق القائمة.

٤-١-١- اعتبارات إدارة التقادم وتجديد الرخص

لا تُضمَّن نُظْمُ خزن الوقود المستهلك الجديدة التي تستوعب فترات الخزن غير الأكيدة الدروس المستخلصة من إدارة التقادم في أسسها التصميمية فحسب، بل وتأخذ في الحسبان أيضاً مواصفات التصميم التي تُيسِّر خطط إدارة التقادم المستقبلية. وقد تشمل هذه المواصفات التهيئة لنظم الرصد والتفتيش، فضلاً عن وسائل إصلاح المكونات الرئيسية أو استبدالها. وتشمل الأمثلة على ما قد تستلزمه فترات الخزن الطويلة من تجديد إصلاح الهياكل الخرسانية (الأحواض والبراميل) وإعادة تعبئة الوقود المستهلك في عُلب خزن جديدة أو استبدال ألواح امتصاص النيوترون في أحواض الوقود المستهلك. وتدعم نظم الرصد والتفتيش الخزن الممتد بشكل أفضل بمراعاة تقنيات الرقابة والفحص غير المتلف المتطورة لرصد ظروف الخزن ودعم إدارة التقادم من خلال الصيانة الوقائية والتنبؤية معاً التي تهيئ لما يلي:

- إتاحة النفاذ إلى المكونات الرئيسية للرقابة الدورية؛
- سجلات التفتيش الأساسي وأثناء الخدمة الدقيقة وتضمن نماذج اختبار المواد وسواها من الخواص التي تبيِّن التفسير غير الملتبس لنتائج التفتيش؛
- الكشف عن ظروف التشغيل التي قد تعرقل أداء المواد أو تعجل بالتدهور؛
- الاكتشاف المبكر للتدهور الذي يؤثر في أمان الهياكل والنظم والمكونات وتحليله بدقة.

وفي ضوء الأطر الزمنية المحتملة للخزن الممتد، يستصوب أن تنظر مرافق خزن الوقود المستهلك في إنشاء بُنى تحتية إضافية مثل الخلايا الحارة والأحواض ومعدات المعالجة عن بعد لإتاحة صيانة المكونات الرئيسية وإصلاحها وتجديدها أو استبدالها، عند الاقتضاء وقد تشمل القدرات الوسائل التي تحقق ما يلي:

- استصلاح مكونات الوقود المستهلك أو التعبئة التي تدهورت أثناء الخزن أو يتعذر التحقق من استيفائها المتطلبات السارية أو إعادة تعبئتها أو تهجيرها؛
- استرجاع قابلية النقل إن تعذر إثبات استيفاء عبوة الوقود المستهلك المتطلبات إثر خزن ممتد (أي أنّ ظروف عبوة الوقود المستهلك أو متطلبات النقل قد تتغير)؛
- إدارة مجاري النفايات المشعة.

ويمكن تخفيض التكاليف والمخاطر المقترنة بخزن الوقود المستهلك الممتد بدرجة ملموسة بإعداد وتضمين خواص تصميمية تيسِّر إدارة التقادم وإجراء بحوث أداء المواد وأنشطة إعادة الترخيص اللازمة لكفالة الأمان المستمر.

٤-١-٢- اعتبارات الضمانات والأمن

ينبغي أن تستوفي مرافق خزن الوقود المستهلك الممتد المتطلبات الحالية والمستقبلية التي تنص عليها الاتفاقيات والمعاهدات ذات الصلة بشأن الضمانات والحماية المادية. ومن منظور الضمانات، من المهم جداً التمتع بالقدرة على التحقق من المواد النووية المخزّنة وكفالة استمرار المعرفة بالمواد النووية. ومن المهم أيضاً وجود ضمانات منقذة بمقتضى التصميم [٤١، ٤٢] والامتثال للوائح الوطنية. وينبغي تطبيق تدابير مناسبة للحؤول دون النفاذ غير المأذون به إلى المواد المشعة أو إزالتها. ومن ثم، ينبغي أن تكون اعتبارات الأمان والأمن جزءاً أصيلاً في تصميم المرافق وتحديد مواقعها.

وينطبق كثير من الاعتبارات التقنية ذات الأهمية للأمان أيضاً على الضمانات والأمن. وتُعدُّ تقانات خزن الوقود المستهلك للحفاظ على وظائف الأمان فيها أثناء الأحداث الطبيعية الشديدة الوطأة. وتوفّر هذه الخواص أيضاً مستويات حماية مشابهة من عمليات تحويل المسار أو الهجمات الافتراضية. غير أنّ الحواجز ونظم الرصد الإضافية قد تكون ضرورية لاستيفاء متطلبات الضمانات والأمن في حالة الخزن الممتد بسبب تناقص حقول الإشعاع بفعل تقادم الوقود المستهلك. ويُعدُّ

هذا الإشعاع عاملاً مهماً في تحديد السمات الأمنية للحماية من السرقة وتحويل المسار. ولئن كان مجال الإشعاع المنخفض يقلل مخاطر الأمان، فهو يقلص أيضاً خاصية الحماية الذاتية للوقود المستهلك، مما قد يستدعي مزيداً من الحواجز المادية ومتطلبات الرصد والعاملين لحماية الوقود.

وإضافة إلى فقدان خاصية الحماية الذاتية المحتمل، يمكن أن تتغير متطلبات الأمان بدرجة ملموسة مع مرور الوقت. ويستند الأمان المطلوب لحماية الوقود المستهلك جزئياً إلى التهديد المنظور الذي قد يتغير تغيراً ملموساً بسبب أحداث خارجية. ومن ثم، يكون إعداد تصورات منطقية وواقعية للتهديدات واستعراضها دورياً بمثابة وسيلة لتقييم تدابير الأمان، توفيراً للحماية الملائمة للوقود المستهلك أثناء الخزن الممتد.

٤-٢- مرافق الخزن الرطبة مقابل مرافق الخزن الجافة

في أعقاب التفريغ من المفاعل، عادة ما يُخزّن الوقود المستهلك في برك تبريد لمدة لا تقل عن ٣-٥ سنوات. ولإفساح حيز للوقود المستهلك المفرغ منذ وقت قريب أو في حالة إخراج مرافق المفاعل من الخدمة، يُزال هذا الوقود في نهاية المطاف من بركة التبريد ويُحوّل إلى أحواض أو مستودعات الخزن الجاف أو نظام الخزن بالبراميل الخشبية الجافة. وأثبتت الأحواض المملوءة ماءً لخرن الوقود المستهلك قدرتها على العمل بشكل موثوق وآمن لعدة عقود. وبزيل الماء حرارة الاضمحلال حيث تتحول إلى ماء تبريد من خلال تبادلات الحرارة أو إلى الهواء المحيط. وبالتحكم في درجة حرارة الماء وكيميائه، يبقى احتمال التدهور وما يعقبه من إطلاق المخزون المشع منخفضاً. وفضلاً عن ذلك، يتيح القصور الذاتي الحراري لأحجام برك المياه الكبيرة مهلاً زمنيةً لا بأس بها لاتخاذ تدابير علاجية في حالة ظروف المحطة غير العادية أو الحوادث. وتشمل مثالب أحواض الوقود المستهلك المحتملة الاعتماد المتزايد على ضوابط الأمان الإيجابية (مثل الحفاظ على مستويات الماء، وكيمياء الماء ونظم التبريد والنظم المتممة والكشف عن التسرب) وآليات التدهور الإضافية الممكنة الناشئة عن الوجود في بيئة رطبة. ويستلزم الخزن الرطب للوقود المستهلك عدداً أكبر بكثير من عمليات إدارة النفايات المشعة (مثل معالجة النفايات السائلة) ويولد تيار نفايات يستدعي معالجة إضافية للنفايات.

وتشمل نظم الخزن الجاف للوقود المستهلك نظم الخزن بالبراميل الخشبية الجافة لعلبة وحيدة أو برميل خشبي وحيد ومستودعات كبيرة مصممة لخرن عدة مجمعات وقود مستهلك. وعادة ما تُصمّم نظم الخزن الجاف للوقود المستهلك لتعتمد على خواص الأمان السلبية. وتُحوّل حرارة الاضمحلال إلى سطح نظام احتواء الخزن من خلال التوصيل والإشعاع حيث تتحول إلى هواء محيط بفعل الحمل الحراري الطبيعي. وثبت أيضاً أنّ مرافق الخزن الجاف للوقود المستهلك تعمل بشكل موثوق به لعدة عقود. وتشمل المثالب المحتملة لنظم الخزن الجاف للوقود المستهلك ما يلي:

- درجات أعلى من حرارة الوقود وما يقترن بها من قيود الحمل الحراري؛
- معدات أكثر تعقيداً وتدابير الحماية من الإشعاع عند معالجة مجمعات الوقود العارية في بيئة جافة؛
- عدم النفاذ المباشر للوقود المستهلك بغرض التفريغ.

وعادة ما تُخزّن أحواض الخزن الرطب وأغلب مرافق مستودعات الخزن الجاف للوقود المستهلك في شكل مجمعات عارية. أمّا في حالة نظم الخزن بالبراميل الخشبية الجافة، فعادة ما يُوضع الوقود المستهلك في علب أو برميل خشبية محكمة السد قبل الخزن (انظر القسم ٥). ويمكن استخدام نظم الخزن بالبراميل الخشبية الجافة بسرعة عندما تبلغ أحواض خزن المفاعل طاقتها وتُضاف طاقة جديدة حسب الاقتضاء. ومن شأن هذا النهج المسمى 'الدفع حسب الحاجة' أن يقلل الاستثمارات الرأسمالية الأولية اللازمة لخرن الوقود المستهلك. وبسبب التعويل المتزايد على سمات الأمان والأمن السلبية، فقد تكون تكاليف التشغيل أقل أيضاً شأنها في ذلك شأن تكاليف النقل نظراً لانتفاء الحاجة إلى معالجة الوقود المستهلك العاري في مرافق الشحن أو الاستقبال. وبصدد تصاميم نظام الخزن بالبراميل الخشبية الجافة، يستدعي تشييد حوض الوقود المستهلك أو مرافق مستودعات الخزن الجاف التزاماً رأسمالياً أكبر وقد يسفر أيضاً عن زيادة نفقات التشغيل المرتبطة بالنظم الإيجابية، مثل نظم معالجة المياه أو التسخين والتهوية وتكييف الهواء. غير أنّ هذه النفقات الإضافية يمكن تعويضها بطاقة مرافق الأحواض والمستودعات الجافة الأكبر التي تعوّل على اقتصادات الحجم.

^٤ يفيد الفريق الدولي بشأن المواد الانشطارية أنّ [٤٣]: "لنحو المائة عام الأولى، بيعت وقود مفاعلات الماء الخفيف إشعاع غاما بمعدل جرعة تفوق ١ سيفرت في الساعة، وهو أمر سيكون مهلكاً لنحو ٥٠٪ من الكبار (LD 50) في غضون ثلاثة إلى أربعة ساعات. وفي مثل هذا التعرض، تُعدّ الوكالة الدولية للطاقة الذرية الوقود المستهلك المشعّ مشعاً بدرجة كافية بحيث لا يمكن تحريكه أو معالجته إلا بمعدات ومرافق متخصصة، تتجاوز قدرات المجموعات دون الوطنية ومن ثمّ 'الحماية الذاتية'."

٤-٣- مرافق خزن الوقود المستهلك المركزية

عادة ما تقام مرافق خزن الوقود المستهلك الحالية داخل مواقع المفاعلات، وهو أمر قد يستدعي إبقاء مرافق خزن الوقود المستهلك الموقعية (في موقع المفاعل أو على مبعده منه) لمدة طويلة بعد خروج المفاعل المقترن بها من الخدمة إن لم تُنجز عملية إعادة معالجة الوقود المستهلك أو التخلص منه قبل انتهاء مدة خدمة المفاعل المرخص لها. وقد تشمل النتائج المترتبة عن ذلك إما زيادة المخاطر بسبب التخفيضات في البنية التحتية التشغيلية في الموقع أو ازدياد تكاليف الخزن التشغيلية بدرجة تُبقى فيها هذه البنية التحتية حصراً لدعم الاستمرار في خزن الوقود المستهلك. وفضلاً عن ذلك، قد يقلل ذلك من الدافع إلى إخراج المفاعل من الخدمة بشكل مناسب لأن مرفق خزن الوقود المستهلك لا يزال قائماً في الموقع، مما يثير تحديات أكبر ومخاطر أعلى جنباً إلى جنب مع التحديات الإضافية التي يثيرها امسالك السجلات والحفاظ على المعرفة. زد على ذلك، أن المجتمعات المحلية المتضررة قد لا تكون على الأرجح نظرت في أن تصبح مواقع المفاعل هذه مرافق لخزن الوقود المستهلك في الأجل الطويل أو وافقت على ذلك.

ويعود خزن الوقود المستهلك في مرفق إقليمي أو أكثر لخزن الوقود المستهلك بعدة فوائد. ففضلاً عن تمكين مواقع المفاعل من استبعاد مخاطر إشعاعية ملموسة والإخراج من الخدمة بشكل كامل عند انتهاء عمر المفاعل، قد تقلل مرافق خزن الوقود المستهلك المركزية بدرجة كبيرة أيضاً تكاليف العمليات والصيانة والأمن بتفادي الحاجة إلى تكرار هذه التكاليف نفسها في مواقع عديدة. فعلى سبيل المثال، يُخفّف خزن الوقود المستهلك مركزياً عبء الترخيص بإتاحة تجميع المعلومات والدراسة والمعدات وسواها من البنى التحتية من أجل ما يلي:

- نظم إدارة المعلومات وغيرها من الضوابط المؤسسية؛
- تفتيش الوقود المستهلك ومكونه للتعبئة ورسدهما وتحليلهما؛
- اصلاح النظم والهيكل والمكونات المتعلقة بالأمان وغيرها من النظم والهيكل والمكونات الرئيسية أو تجديدها أو استبدالها؛
- إعادة التعبئة أو أي معدات أخرى لازمة للتصدي لحالات الطوارئ والأحداث الأخرى؛
- أي استعدادات أو خطوات تمهيدية لازمة قبل التخلص أو إعادة المعالجة.

وتقل أيضاً المخاطر المقترنة بتقادم المعدات بتوحيد المعدات وصيانتها في مرافق موحدة لخزن الوقود المستهلك. وخلص كارلسين وآخرون [٩] إلى القول "بوجه أخص، إن كان ينبغي إعادة النظر بشأن عيوب الوقود المخزن لأن البنية التحتية لاستعادة القابلية للنقل (أي التفتيش وإعادة التعبئة والتعبئة الزائدة) قد تكون باهظة التكلفة بشكل شديد إن تكررت في مواقع متعددة". وفضلاً عن ذلك، ستتيح اقتصادات الحجم النظر في الأحوال والمستودعات وسواها من بدائل الخزن التي قد لا تكون فعالة من حيث التكاليف المرافق المتعدد الأصغر حجماً. وعلى المنوال نفسه، يمكن تخفيض تكاليف النقل والمعالجة في المستقبل وجعلها أقل تعقيداً بمقدار كبير بتوحيد المعدات وطرائق المعالجة في المرافق المركزية.

ومن العقبات المحتملة أمام خزن الوقود المستهلك مركزياً صعوبة إيجاد موقع يستوفي المعايير التقنية والمجتمعية والسياسية. وقد يستعصي بوجه خاص الحصول على موافقة عامة من مجتمع محلي مضيف إن لم يتلق هذا المجتمع فوائد من عمليات المفاعل الذي يولد الوقود المستهلك، أو كانت لديه مخاوف من أن يصبح الموقع مستودعاً بحكم الواقع [٩]. وتشمل العقبات الأخرى ما يلي: (١) العواقب الكبيرة المحتمل نشوؤها من الأحداث الشديدة الوطأة التي قد تؤثر في كامل الوقود المخزن؛ (٢) التكاليف والمخاطر الإضافية (وإن كانت قليلة) الناشئة عن النقل إلى المرفق؛ (٣) تكاليف الاستثمار الأولية للخزن المركزي التي قد تفوق تكاليف الخزن الإضافية في المواقع القائمة لفترات زمنية قصيرة ولكن يُرجح أن تعوّضها اقتصادات الحجم عند مقارنة تكاليف دورة الحياة الكلية وتضمن حالات الطوارئ المتعلقة بمخاطر إعادة التعبئة.

٤-٤-٤ اعتبارات تحديد المواقع

لم تُصمّم بعد أغلب المرافق اللازمة لخزن الوقود المستهلك ريثما تُتاح القدرة الكافية لإعادة المعالجة أو التخلص أو يُرخص لها أو تُشيد. ويتيح ذلك فرصة لتقليل كثير من عوامل المخاطرة والتكاليف المقترنة بتديد خزن الوقود المستهلك تخفيضاً ملموساً بتوخي الدقة في اختيار موقع مرافق خزن الوقود المستهلك الجديدة:

- يمكن تقليل التآكل وسواه من التحديات التي تواجه أداء المواد بدرجة كبيرة بتشييد المرفق في مناخ جاف معتدل؛
- يمكن الحد بدرجة كبيرة من المخاطر الطبيعية باختيار موقع تتخفّض فيه قابلية التعرض للظواهر الشديدة الوطأة (الفيضانات والزلازل، مثلاً).

- يمكن الحدُّ بدرجة كبيرة من المخاطر التي يتسبَّب فيها الإنسان باختيار المواقع في مناطق معزولة عن المخاطر الصناعية والمخاطر الأخرى المحتملة ويمكن حمايتها بسهولة من الأفعال العدوانية.
- يمكن تقليل التأثيرات البيئية والمتعلقة بالأمان المحتملة الناشئة عن حدث غير منظور بمقدار كبير بتشبيد المرفق في مكان تكون فيه العواقب منخفضة (عدد قليل من السكان واستخدام المياه والأرض المحدود أو المقيد قبلاً، مثلاً).
- لأنَّ كلا المرافق الرطبة والجافة ينقل حرارة الاضمحلال إلى البيئة، ينبغي مراعاة مدى توافر مياه التبريد ودرجات الحرارة المحيطة.
- تكون إدارة طرق النقل وتوافق المعدات بين مرافق خزن الوقود المستهلك وإعادة معالجته والتخلص منه أسهل في حالة المرافق القائمة في موقع مشترك وتنتفي الحاجة إلى النقل إن أُقيمت تلك المرافق في موقع مشترك مع مرفق تخلص.

وتتضمَّن سلسلة معايير الأمان رقم (NS-R-3 (rev.1) - تقييم المواقع للمرافق النووية [٤٤]، الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية معايير وطرائق يمكن استخدامها في إطار نهج متدرج لتحديد مواقع مرافق خزن الوقود المستهلك.

٥- أنساق خزن الوقود المستهلك

لأنساق خزن الوقود المستهلك القدرة على استيعاب فترات الخزن غير الأكيدة، تيسيراً لإدارة التقادم وإتاحةً للمرونة لاتخاذ الخطوات المقبلة لتحقيق نقطة نهاية مقبولة. وتتعلق القرارات الرئيسية لاختيار نسق خزن الوقود المستهلك لتلبية الاحتياجات الحالية والمستقبلية بكيفية خزن الوقود المستهلك وإن كان هذا الوقود سُبُعياً لنقله أو التخلص منه قبل الخزن أو بعده وما هي المكوّنات التي يمكن التعويل عليها في أداء وظائف الأمان الرئيسية وكيفية اثبات أداء الأمان بدرجة كافية من اليقين تستوفي المتطلبات التنظيمية. ويؤثر كل قرار في خيارات المستقبل. وتُقيّم البدائل المتاحة لاختيار استراتيجية قابلة للاستدامة طوال فترات الخزن الممتد مع الحفاظ على المرونة وقابلية التكيف لاستيعاب طائفة التصورات المستقبلية المقبولة برمتها. وتستدعي المستودعات الجيولوجية وضع الوقود المستهلك في حاويات مناسبة قابلة للتخلص منها قبل وضعه في باطن الأرض. وفي حالة كثير من الدول الباحثة عن مستودعات، لم يُحسم بعد تصميم حاوية التخلص (مثلاً، طاقة الاستيعاب ومواصفات المواد) ومعايير قبول شكل النفايات المحتواة، وهو أمر له تبعات ملموسة على خزن الوقود المستهلك من حيث كيفية وضعه في حاويات وتوقيته.

٥-١- العلب والبراميل الخشبية

يعود وضع الوقود المستهلك في علب أو براميل خشبية مئينة قبل خزنه بفوائد عديدة. وفي كثير من الأحيان، يصعب تفتيش مواد كسوة الوقود المستهلك التي يُعوّل عليها في احتواء المواد الإشعاعية والحفاظ على الشكل الهندسي اللازم للتدريج وأمان الحرجية ولا يمكن إصلاح هذه المواد أو استبدالها. وتشكّل العلب أو البرميل الخشبي حاجزاً إضافياً "لأنّها تضمن احتواء النويدات المشعّة وتعزّز أمان الحرجية باستبعاد اقتحام مهدئ وتحافظ على بيئة خاملة تستبعد الأوكسجين والهواء الرطب والماء وهي عوامل قد تبتدئ عمليات التدهور أو تسارعها" [٩]. وتتيح علبه الوقود المستهلك أو برميله الخشبي أيضاً وسيلةً لقابلية الاستعادة والمعالجة في حالة المساس بسلامة الوقود الهيكلية. وباختصار، يمكن أن تشكّل العلب أو البرميل الخشبي مكوّناً قابلاً للتفتيش والإصلاح و/أو الاستبدال بوسعه أن يؤدي وظائف الأمان الرئيسية، مُقللاً بذلك الحاجة إلى الاعتماد على سلامة الوقود المستهلك وكسوته لضمان الأمان طوال فترات الخزن الممتدة [٩]. وتمثّل الاعتبارات الأخرى التي تحيّد خزن الوقود المستهلك في علب أو براميل خشبية في أنّ الوقود المستهلك يكون في نسق يمكن تغيير موضعه بشكل أسهل كما أنّ العلبه تتيح أيضاً مزيداً من المتانة في ظروف حادثة شديدة الوطأة.

غير أنّ القدرة على رصد الوقود المستهلك المحكم السد في علب أو براميل خشبية لخزنه تكون محدودة ولا يتاح التفتيش المباشر للوقود المستهلك أو أجزاء العلبه الداخلية. وتمثّل معرفة حال الوقود المستهلك وسلامته الهيكلية وتعبئته جزءاً أساسياً من قاعدة الأمان الحالية للخزن والمعالجة ولإثبات الامتثال أيضاً لمتطلبات ما بعد الخزن من أجل النقل والقبول لإعادة المعالجة أو التخلص. ويستدعي النفاذ المحدود لأعراض التفتيش تكاليف إضافية تتعلق بإعداد تصميم وقاعدة ترخيص يستوعبان عدم اليقين الإضافي الناشئ عن حالة تقادم الوقود المستهلك وتعبئته. وقد يؤدي عدم إتاحة الوصول إلى الوقود

المستهلك والأجزاء الداخلية من العلبة أو البرميل الخشبي لأغراض التفتيش المنتظم أيضاً إلى إضاعة فرص لاكتشاف آليات التدهور غير المنظور وتخفيف حدتها في وقت مبكر.

وحين ينتفي إمكان التفتيش المباشر، تدعو الحاجة إلى قدرة تنبؤية أشمل بشأن آليات التدهور. وقد يؤدي ذلك إلى زيادة في العمل المتعلق بالبحث والتطوير والاثبات لوضع الأساس التقني والتنظيمي لإثبات أن الوقود المستهلك وتعبئته سيستوفيان متطلبات الخزن والنقل بعد الخزن السارية. فضلاً عن ذلك، قد يحد حجم مواد التعبئة الإضافية ووزنها من خيارات النقل والمعالجة. وقد تضع معايير قبول مرافق إعادة المعالجة والتخلص في المستقبل قيوداً أيضاً على شكل المواد وتكوينها. ولهذه الأسباب، قد يكون فتح الوقود المستهلك المعبأ قبل الخزن وإعادة تعبئته ضرورياً. وتستدعي الاستراتيجية الناجحة التي تنتفي بها الحاجة إلى إعادة التعبئة لاحقاً علبة مناسبة أو برميلاً خشبياً مناسباً لمدة الخزن والنقل اللاحق والتخلص المحتمل (إن كانت تلك نقطة النهاية). ويستفيد هذا النهج بما يلي:

- برامج إدارة التقادم الناجحة؛
- اختيار خصائص العلبة أو البرميل الخشبي (أي الأنساق الهندسية، الحمل الحراري، تدابير أمان الحرجية والمواد) المتوافقة مع معايير قبول المستودع المنظورة؛
- استقرار السياسات واللوائح السارية؛
- انجاز إعادة المعالجة أو التخلص قبل أن تصبح إعادة التعبئة ضرورية.

وإن أعيدت تعبئة الوقود المستهلك قبل الخزن، يمكن أن تتمثل استراتيجية أمثل في افتراض أن إعادة التعبئة ستكون ضرورية في نهاية المطاف وإعداد استراتيجيات التصميم والتشغيل لتيسير إعادة التعبئة. ومن شأن اتباع نهج يخطط لإعادة التعبئة دورياً أن يحقق ما يلي:

- إتاحة أساس لتخطيط التكاليف؛
- التمكين من إجراء التفتيش الدوري لتأكيد الامتثال لمتطلبات الأداء والحصول على بيانات لدعم احتياجات البحث والتطوير وتعزيز قدرة التنبؤ بأداء الوقود المستهلك؛
- إتاحة تجديد مكونات مجمعة الوقود المستهلك ومعدات الرصد وتحديثها للاستفادة من التقانات الجديدة واستيفاء المتطلبات الجديدة أو المُغيّرة.

بيد أن إعادة المعالجة تضيف مخاطر وتكاليف وتزيد تعرّض العاملين وتولّد نفايات مشعة أيضاً. وتعتمد تقديرات تكاليف إعادة المعالجة في المستقبل اعتماداً كبيراً على معدلات الخصم وسواها من الافتراضات المستخدمة في التحليل الاقتصادي. وأظهرت بعض التقديرات أن إعادة التعبئة دورياً قد تزيد التكاليف بقيمة أسببية أو أكثر. ويقدر مكتب حكومة الولايات المتحدة الأمريكية للمساءلة، في معرض إفادته عن إنهاء برنامج مستودع جبل يوكا، أن تكاليف نظام الخزن بالبراميل الخشبية الجافة قد تزداد من ٣٠-٦٠ مليون دولار أمريكي إلى ١٨٠-٥٠٠ مليون دولار أمريكي لكل مفاعل بناءً على افتراض لعمليات إعادة التعبئة في كل ١٠٠ سنة تقريباً [٤٥].

ولئن كان تقليل تكاليف إعادة التعبئة وآثاره مستطاعاً بزيادة تعبئة العبوات الموجودة فحسب، فإنّ على متخذي القرارات توخي الحذر حيال نهج إعادة التعبئة التي تكفي بوضع العبوة في عبوات شاملة متتالية. وأظهرت التجربة أنّ ذلك يزيد العمليات المستقبلية تعقيداً وعدم يقين. ويجعل كل مكون تعبئة إضافي عمليات التفتيش أكثر صعوبة ويزيد حجم العبوة ووزنها ويقلّل انتقال الحرارة. ويمكن أن تؤثر هذه التغييرات سلباً في أداء العبوات لحالات التشغيل وظروف الحوادث.

٥-٢- المجمعّات العارية

يتمثل البديل لتعبئة الوقود المستهلك قبل خزنه في شكل مجمعّات عارية. ويمكن خزن الوقود العاري في أحواض أو مستودعات جافة تنتج التدرّج وسواها من خواص الأمان الضرورية. ومن مزايا خزن الوقود المستهلك العاري غير المعبأ زيادة إمكانية الوصول إليه بغرض الرصد والتفتيش طوال فترة الخزن. ومن ثمّ، يُكتشف أيّ تدهور قد يحدث خلال الخزن الممتد بشكل أسرع. ويساعد ذلك إلى حدّ كبير في إثبات الامتثال لمتطلبات الضمانات أثناء الخزن ولمتطلبات النقل بعد فترات خزن طويلة. وهو يتيح معلومات إضافية لدعم تصميم معدات المعالجة والنقل ويقلّل درجة عدم اليقين وما يقترن به من حاجة لتوسيع هوامش التصميم والأمان. وإضافة إلى ذلك ولأنّ توليد الحرارة والإشعاع

ينخفضان أثناء الخزن، تقلُّ الحاجة إلى التدريع وإزالة الحرارة مع مرور الوقت، مما قد يتيح تخفيض حجم التعبئة ووزنها وتكاليفها في المستقبل.

وثمة مزية أخرى لتأجيل التعبئة إلى ما بعد فترة الخزن تتمثل في أنَّ عدم اليقين بشأن متطلبات النقل ومعايير القبول لإعادة المعالجة أو التخلص سيكون أقلَّ كثيراً، فيقلُّ احتمال أن تكون إعادة المعالجة ضرورية. وسيتيح تأجيل التعبئة أيضاً لتصاميم التعبئة في المستقبل أن تعوّل على التقانات والمواد المستقبلية وتقديم عبوة 'طازجة' للنقل والمعالجة بعد الخزن. ومن شأن ذلك أن يُضيق بشكل ملموس الثغرات التقنية وما يقترن بها من بحث وتطوير لازم للتنبؤ بحالة الوقود المستهلك المخزّن في حاويات محكمة السدّ. وعلى هذا النحو، قد يُخفف نهج هندسي يعتمد على العلب أو العلبات الفردية عوضاً عن سلامة كسوة الوقود المستهلك العبء الواقع على مصممي البراميل الخشبية والمنظّمين لإجراء بحوث مستفيضة عن خواص كسوة الوقود المستهلك [٣٩]. وأخيراً، يتيح خزن الوقود المستهلك الذي يمكن تعبئته للنقل والتخلص بعد الخزن الاستمرار في تصميم المستودعات واختيارها دون عراقيل أو تأثير من قرارات تتعلق بتعبئة الوقود المستهلك.

ولأنَّ التعبير المحتمل في حالة الوقود المستهلك ومكوّنات تعبئته على حدّ سواء وفي المتطلبات التنظيمية يزداد بمرور الوقت، فمن المعقول أيضاً الربط الإيجابي بين احتمال الحاجة إلى إعادة التعبئة أو اتخاذ تدابير تخفيف أخرى وبين الفترة الفاصلة بين الوقت الذي عُيِّن فيه الوقود المستهلك لآخر مرة والوقت الذي نُقل فيه. وبذلك، يتحقق الامتثال للمتطلبات المستقبلية بشكل أسهل بالأخذ باستراتيجيات تؤجل التعبئة أو تتضمن وسيلة جاهزة لتفتيش الوقود المستهلك ومكوّنات التعبئة والاستصلاح أو إعادة التعبئة، عند الاقتضاء.

٦- الاعتبارات التنظيمية

بمراعاة احتمال تجديد الرخص مرات متعددة، يمكن تصميم الأطر التنظيمية لتضمن الأمان طوال ما قد يلزم من فترات الخزن حتى تتحقق نقطة نهاية مقبولة.

٦-١- دور المنظّمين

يضطلع المنظّم بالإشراف على أنشطة إدارة الوقود المستهلك إلى أن تتحقق نقطة نهاية مقبولة. ويمثّل الاستعراض والإشراف التنظيميين عروةً في كفالة الأمان والحفاظ على الضوابط الفاعلة من خلال ما يلي [٩]:

- (أ) استعراض مرافق الخزن وما يقترن بها من برامج إدارة التّقدم، أو إعادة تقييم قاعدة الأمان، دورياً؛
- (ب) الموافقة على التقانات الجديدة؛
- (ج) تعزيز الأطر التنظيمية الحالية بتهج جديدة (الإرشادات الواعية بالمخاطر، على سبيل المثال) لتناول أوجه عدم اليقين مع الحفاظ على الأمان أثناء الخزن الممتد؛
- (د) الحرص على التوافق الملائم والتكامل مع أطر إعادة المعالجة والتخلص التنظيمية (الحالية والمستقبلية).

ويمكن أن تشمل الأدوار التنظيمية الرئيسية (على سبيل المثال لا الحصر) ما يلي [٩]: (١) أنشطة البحوث للاسترشاد بها في الأطر التنظيمية وإعداد قاعدة للترخيص ودعم القرارات؛ (٢) تعزيز أنشطة الترخيص والتفتيش والإشراف وتنفيذها؛ (٣) التوعية العامة والتواصل. ومن المسلّم به أنَّ مسؤوليات المنظّم قد لا تشمل، حسب الدولة، كلاً من هذه البنود. فعلى سبيل المثال، قد لا تكون لبعض السلطات التنظيمية مسؤولية بحثية مستقلة وقد تكون، عوضاً عن ذلك، مسؤولةً عن اتخاذ قرارات مستنيرة استناداً إلى البحوث المتاحة. وحسب المشروع، قد تُسند إلى المنظّم أيضاً مسؤوليات إضافية تتعلق بزيادة فترات خزن الوقود المستهلك.

٦-١-١- أنشطة البحوث التنظيمية

ينبغي أن ينظر المنظّمون والصناعة ومؤسسات البحوث في مفاهيم إدارة التّقدم والخزن نظرةً شاملةً. ويمكن أن تشمل أنشطة البحوث التنظيمية التجارب والدراسات التقنية والتحليلات، تحقيقاً لما يلي:

- تقييم مغزى المسائل التقنية المحتملة من حيث الأمان؛
- وضع أساس الترخيص في الأجل الطويل؛
- تحسين قدرة نُظم خزن الوقود المستهلك على التحمل في الأجل الطويل.

وينبغي تصميم البحوث لتقييم النهج الجديدة لإدارة التقادم والتصميم وتقييم برامج إدارة التقادم والتحقق منها (على سبيل المثال، إعادة تقييم المرافق دورياً). ويشمل ذلك البحوث اللازمة لتنفيذ تحليلات التقادم المحددة زمنياً والتحقق منها (انظر القسم ٣-١) فضلاً عن أنشطة الرصد والصيانة والتخفيف لكفالة الأمان أثناء فترة الترخيص. ولتحديد احتياجات البحوث، يُجري المنظمون والصناعة ومؤسسات البحوث دراسات للشعرات التنظيمية لتحديد الأولويات. ومن المهم تحديد بنود البحوث الرئيسية الطويلة التي قد تستلزم تخطيطاً مبكراً وتنفيذها لسدِّ الاحتياجات لسنوات عديدة في المستقبل.

٦-١-٢- الترخيص والتفتيش والإشراف

يتمثل دور المنظمين في التحقق من أن تكون اللوائح والارشادات وبرامج التفتيش ملائمة لتوجيه إعداد برامج إدارة التقادم التي تكفل الأمان وتحافظ على القدرة على الخزن والنقل في كلِّ من فترات الترخيص المتعاقبة وتقييم تنفيذ تلك البرامج. ويحرص المنظمون أيضاً على جمع تجارب التشغيل أثناء الخزن وتحديث القواعد لمعالجة المسائل الناشئة.

وسيكون مجال التركيز الأول لاستعراض تجديد الرخص، أو إعادة التقييم الدورية، هو صلاحية تحليل التقادم المحدد زمنياً وملاءمة برنامج إدارة التقادم المقترح لكل تصميم معيّن للخزن (يعني ذلك تضمين الوتيرة التي ينبغي أن تُفتش بها مكونات البرميل الخشبي الرئيسية أو تُجدد). وسيكون التحقق من التنفيذ الفعلي لكلِّ من برامج إدارة التقادم وتدابير التصحيح الملائمة التي ينبغي أن يتخذها المرخص له من العناصر الرئيسية في برنامج التفتيش التنظيمي. وفضلاً عن ذلك، قد يرى المنظمون وضع برامج للخبرة التشغيلية يُبتغى منها تحديد المسائل التقنية الجامعة واتجاهات التقادم وغير ذلك من البرامج أو المتطلبات لضمان الحفاظ على السجلات وإدارة المعرفة وسوى ذلك من البنى التحتية من أجل الخزن الآمن المستمر وإثبات الامتثال لمعايير النقل أو إعادة المعالجة أو التخلص في المستقبل. ومن المناسب أيضاً أن يعيد المنظمون النظر في احتمال وقوع الحادث المحتاط له في التصميم وشدة ظروفه، مستندين في ذلك إلى إمكان التجديدات المتعددة الكفيلة بزيادة فترات الخزن بدرجة ملموسة [٩].

وفي إطار تجديد الرخص، يتحقق المنظمون من أن تظلَّ الموارد المالية الملائمة متاحة للوفاء بالالتزامات المالية. وتشمل تكاليف خزن الوقود المستهلك العمليات والعاملين في مجال الأمن والرصد وصيانة المعدات والمرافق واستبدالها والتفتيش الممكن وعمليات إعادة التعبئة الممكنة والإخراج من الخدمة في نهاية المطاف. وستزداد تكاليف التشغيل الجارية هذه كلما نمت مخزونات الوقود المستهلك وتقدمت معدات خزن الوقود المستهلك ومرافقه. وتبعاً لذلك، قد تزداد المسؤولية المالية وما يقترن بها من حاجة إلى ضمانات مالية زيادة كبيرة كلما امتدت فترات الخزن. وسيكون لكل دولة قوانين وهاكل مالية مختلفة لتوفير الضمان المالي. ونظراً لعدم اليقين الذي يكتنف أطر الخزن الزمنية، يجدر بالمنظمين أن ينظروا في تصورات معقولة شتى وأن يعيدوا تقييم التصورات ويكيفوها دورياً، عند الاقتضاء، حرصاً على أن تظلَّ الموارد المالية متاحة للوفاء بهذه الالتزامات طوال مدة خزن الوقود المستهلك.

٦-١-٣- التواصل مع الجمهور

تمثِّل ثقة الجمهور عاملاً رئيسياً في كفالة إدارة الوقود المستهلك إدارة مستدامة ومن ثمَّ القوى النووية المستدامة. وسيكون التواصل مع الجمهور في سياق تنظيمي عنصراً أساسياً لخزن الوقود المستهلك لفترات غير معروفة قد تكون لازمة ريثما تتحقق نقطة نهاية. ومن خلال التواصل المسبق، تستطيع الصناعة مخاطبة الأطراف المهتمة لشرح أنشطة الخزن الممتد والأساس الذي يقوم عليه أمان الناس والبيئة وأمنها وحمايتها. وبوسع المنظم أن يصبَّ اهتمامه على زيادة فهم المخاطر والتأثيرات الفعلية الناشئة عن أنشطة الخزن وزيادة الثقة في دوره في تعزيز الأمان. ويؤثر المنظم أيضاً في قبول الجمهور بالإبلاغ الفعال عن الأنشطة الجارية والسعي للحصول على التعقيبات (حسبما هو ملائم بموجب القانون) على ما يحدث من تغييرات في السياسات واللوائح التي تؤثر في الخزن الممتد.

٦-٢- الإطار التنظيمي للرخن الممتد

يتألف الإطار التنظيمي من السياسات والقواعد والإرشادات والمعايير التقنية الوطنية المنشأة ضماناً لأمان خزن الوقود المستهلك وأمنه وحماية البيئة. ويعيد واضعو السياسات والمنظمون بانتظام التقييم للتأكد من أن الإطار التنظيمي يعبر على النحو الملائم عن التطورات التكنولوجية والقيم المجتمعية والاحتياجات المتطورة واحتياجات الصناعة وسوى ذلك من المسائل الناشئة.

ولأن عمليات تفريغ الوقود المستهلك ستفوق طاقة التخلص وإعادة المعالجة في المستقبل المنظور، ستكون الوسائل التي تتيح تمديد فترة خزن الوقود المستهلك بأمان جزءاً مستتبناً من برنامج إدارة الوقود المستهلك الفعالة. وتتيح الزيادات المنظورة في مخزونات الوقود المستهلك مقرونة بعدم اليقين الذي يكتنف فترات خزن الوقود المستهلك وقتاً مناسباً لإعادة النظر في النهج والافتراضات التي تقوم عليها عمليات ترخيص خزن الوقود المستهلك. ويرى كارلسين وآخرون [٩]:

"قد تشمل اعتبارات الترخيص الرئيسية وتيرة إعادة الترخيص والمهل الزمنية للشروع في إعادة الترخيص وطول الوقت الملائم الذي ينبغي افتراضه لإجراء تحليل أداء الترخيص وتيرة التدابير الرئيسية لإدارة الترخيص."

ولا يضع انتهاء مدة الرخصة حداً على المدة التي يمكن فيها خزن الوقود خزناً آمناً. وعادة ما تُحدد فترات الرخص في ضوء اعتبارات تنظيمية وذات صلة بالسياسات، وهي عادة ما تمثل فترة فاصلة تُعدُّ طويلة بما يكفي لتغطية الفترة المتوقعة لخزن الوقود المستهلك. ويبيّن الشكل ٣ كيفية تصميم إطار تنظيمي يتضمن تجديد الرخص دورياً لمعالجة الوضع الراهن (أي فترات خزن غير معروفة) مع كفاءة الخزن الآمن ريثما تُقر سياسة وطنية بشأن الحالة النهائية للوقود المستهلك وتنفذ. وتمثل الحلقات العليا في الشكل عملية تجديد الرخصة. ويرى كارلسين وآخرون [٩] أن:

"يعتمد نجاح هذا النهج على عملية لتجديد الترخيص يمكن أن تُحدد بشكل موثوق فيه أي هشاشة قد تعرقل خزن الوقود المستهلك بنجاح طوال مدة فترة الترخيص المقبلة وعلى قدرة المرخص له على اتخاذ تدابير تصحيح فعالة عند الاقتضاء حتى يصبح أهلاً لتمديد الرخصة. وينبغي أن تُقدم طلبات الترخيص في وقت مبكر جداً قبل انتهاء مدة الرخصة لإتاحة ما يكفي من الوقت لاتخاذ أي تدابير تصحيحية ضرورية. ويمكن أن تتراوح التدابير التصحيحية بين تعزيز برامج الرصد أو التفتيش واستصلاح حاويات الوقود المستهلك أو مرافقه المتدهورة وإعادة تعبئة مجمعات الوقود المستهلك بل وحتى تغيير الموقع إلى مرفق جديد."

وإن نُفذ النهج المبيّن في الشكل ٣ بفعالية، فلن يكون الحد من عدد مرات تجديد الرخص ضرورياً لأن الامتثال للمتطلبات سيُقيم ويُؤكد في كل خطوة محدودة في وقت واحد (أي فترة الترخيص).

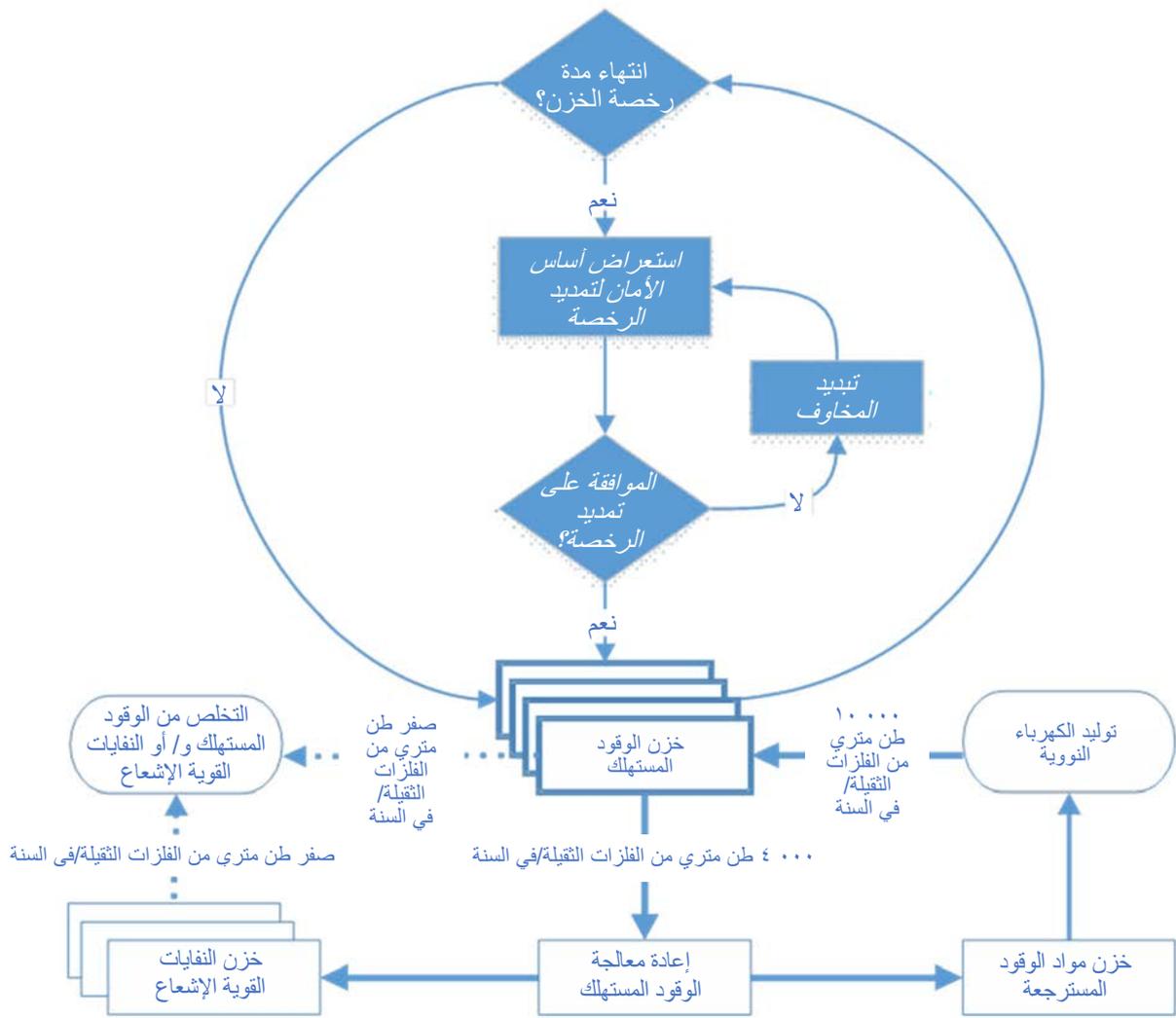
٦-٣- التنظيم القائم على الوعي بالمخاطر والأداء

حري بالمنظمين أن ينظروا في مزايا النهج القائمة على الوعي بالمخاطر والأداء لمعالجة عدم اليقين التقني الذي يكتنف الخزن الطويل الأجل [٩]. وتقوم بعض الأطر التنظيمية حالياً على نهج حتمية يجب فيها تحقيق أهداف الأداء (حدود الجرعات مثلاً) واستيفاء متطلبات التصميم الفرعية لمجموعة محددة من الحالات التشغيلية وظروف الحوادث. وعادة ما تكون برامج إدارة الترخيص حتمية أو تقريرية المنحى وتستند إلى حكم هندسي محافظ.

واستناداً إلى تعريف صادر عن اللجنة التنظيمية النووية [٤٦]:

"يمثل اتباع النهج القائم على الوعي بالمخاطر حيال اتخاذ القرارات التنظيمية فلسفة يُنظر في إطارها في الإفادات المتعلقة بالمخاطر جنباً إلى جنب مع عوامل أخرى لوضع متطلبات تركز بشكل أفضل اهتمام المرخص له والتنظيم على مسائل التصميم والتشغيل على نحو يتناسب مع أهميتها للصحة والأمان."

وتتضمن لائحة الولايات المتحدة رقم 10 CFR 63، التخلص من النفايات المشعة القوية الإشعاع في مستودع جبل بوكا الجيولوجي، بنيفادا [٤٧]، كثيراً من هذه المبادئ (مثلاً، رُبطت حدود الجرعات للظروف غير العادية وظروف الحوادث أثناء العمليات السابقة للإغلاق باحتمال هذا التصور). ويمكن تطبيق مبادئ مشابهة لذلك لتنظيم المخاطر المقترنة بتمديد فترات خزن الوقود المستهلك.



الشكل ٣ - تجديد الرخص ريثما تُنجز إعادة المعالجة أو التخلص.

ومن شأن النهج القائمة على الوعي بالمخاطر أن تعزز أيضاً إدارة التقادم التقليدية ومتطلبات التصميم بإتاحة الأخذ في الحسبان بشكل صريح مجموعة أوسع من تحديات الأمان المحتملة ووسائل منطقية لتحديد أولويات التحديات، استناداً إلى أهمية المخاطر والخبرة التشغيلية والتقدير الهندسي. ويساعد إعداد التحليلات القائمة على الوعي بالمخاطر أيضاً في فهم مستوى الحماية الذي تحققه النهج الحتمية التقليدية فهماً أفضل.

ويتيح تحليل المخاطر فهماً أفضل لاحتمال إخفاقات التدهور المحددة الناشئة عن التقادم وعواقبها فهماً أفضل، مما يتيح استنبصارات ونهج بديلة لكفالة الأمان. فعلى سبيل المثال، كثيراً ما تستند بعض وظائف أمان الوقود المستهلك إلى كسوة هذا الوقود، وهو أمر يساعد في احتواء المواد الإشعاعية والحفاظ على النسق الهندسي لمجمعة الوقود المستهلك. ويصعب تفتيش سلامة الكسوة وليس من المجدي إصلاحها أو استبدالها. ولفترات الخزن الطويلة، فقد يكون من باب الحذر النظر في استراتيجيات أمان تحوّل وظائف الأمان لمكونات تعبئة الوقود المستهلك أو لسمات مرفق خزن الوقود المستهلك التي يمكن رصدها وتفتيشها وإصلاحها أو استبدالها بشكل أسهل، عند الاقتضاء. ويشبه ذلك ممارسة 'التعليب' الحالية لإتاحة حاجز إضافي ووسيلة لمعالجة مجمعات الوقود المستهلك المشتبه فيها. وتشمل الحلول الأخرى لتقليل المخاطر المقترنة بالاعتماد على سلامة الكسوة استخدام تكنولوجيات التعبئة والتجفيف للوقاية من إخفاقات الكسوة والتصاميم في المستقبل لتيسير نظم التفتيش والرصد بغية تقييم بيئة خزن الوقود المستهلك الداخلية وظروف كسوة الوقود تقيماً دورياً.

وتضع النهج القائمة على الأداء متطلبات تستند إلى استيفاء معايير أداء محددة دون أن تحيّد صراحةً الطرائق الكفيلة باستيفاء هذه المعايير. ونظراً لعدم اليقين الذي يكتنف تمديدات رخص خزن الوقود المستهلك المتعددة المحتملة، فإن النهج القائمة على الوعي بالمخاطر والأداء قد تشجع على استحداث تقانات جديدة وابتداع نهج أكثر فعالية لكفالة الأمان في الأجل الطويل [٩].

وفي بعض الأحيان، تشمل الأطر التنظيمية والتشغيلية افتراضات ضمنية بشأن: مدة الخزن؛ وحالة الوقود؛ وتقانات التعبئة والمعدات المستخدمة وقت النقل أو المراحل اللاحقة من إدارة مجمعة الوقود المستهلك. وقد تؤثر هذه الافتراضات الضمنية في الحلول المحتملة أو تحد منها بلا داع.

ولا يرتبط النهج القائم على الأداء أيضاً بالافتراضات بشأن ما قد يحدث في المستقبل. وهو يركز على افتراض الظروف الآمنة، تاركاً للمرخص له المرونة من حيث وسائل استيفاء معايير الأمانة القائمة. ومن ثم، يمكن أن يتيح التنظيم القائم على الأداء المرونة لاستيعاب التقانات والسياسات المتطورة. وبتاحة هذه المرونة، يُحثُّ المنظم أيضاً على مراعاة حاجة المرخص له لمتطلبات موضوعية ومحددة بوضوح.

ويصعبُ تعزيز الأطر التنظيمية للخزن والنقل والتخلص بنهج الوعي بالمخاطر والأداء معاً الاهتمام على أهم الأنشطة ويضع معايير موضوعية تقوم على معلومات المخاطر لتقييم الأداء. وتشمل التحديات الرئيسية التي تعترض تنفيذ نهج جديدة للخزن والنقل بهذه الطريقة ما يلي: (١) تحديد المستوى المقبول من المخاطر المتعلقة بخزن الوقود المستهلك؛ (٢) توفير استثمار أولي لموارد ما يلزم لتقييم المخاطر من جمع البيانات وتحليلها؛ (٣) وضع مقاييس ملائمة للمخاطر ومتطلبات الأداء تُزوّد المرخص لهم بإرشادات واضحة وموضوعية؛ (٤) الحفاظ على مستوى ملائم من الدفاع المعقّد. وتشمل التحديات الإضافية تضمين أطر الوعي بالمخاطر في المرحلة الختامية من دورة الوقود برمتها.

٧- الاعتبارات المتعلقة بالسياسات

تقتضي إدارة الوقود المستهلك إدارة مستدامة سياسات واستراتيجيات تُخطّ اتجاههاً واضحاً ومتسقاً ومستقرّاً لأنها توجه الحاجة إلى الوقود المستهلك والخيارات المتاحة وتوقيت الوصول إلى نقطة نهاية مقبولة من قبيل إعادة المعالجة أو التخلص. وسيظل الخزن لفترات ما تنفك تزداد طويلاً ضرورياً إلى أن تعالج الدول إعادة المعالجة والتخلص على نطاق كافٍ يستوعب تفرغاتها من الوقود المستهلك. ولا يُعدُّ ذلك متسقاً مع مسؤولية حماية الصحة البشرية والبيئة دون إلقاء أعباء غير مبررة على كاهل الأجيال المقبلة [٢، ٣].

وتتسم عملية إعداد سياسات إدارة الوقود المستهلك بالتعقيد، وهي تتضمن السياسات والاقتصاديات وحفظ الموارد وحماية البيئة ورؤية الجمهور التي أضحت عاملاً بارزاً في كثير من الدول [٤٨]. وتؤثر القرارات في مضمون السياسات تأثيراً بالغاً في مسار الطاقة النووية وتحدد السياق الذي تُدار فيه دورة الوقود النووي برمتها.

وفي إطار ازدياد الطلب العالمي على الطاقة، تتفاوت توقعات الطلب على الطاقة النووية تفاوتاً شديداً يُعزى جُلّه إلى متغيرات السياسات. وتؤثر استراتيجيات الطاقة وسياساتها الوطنية في الأفضليات والإعانات والولايات التي تؤثر بدورها في المشهد الاقتصادي لقرارات الطاقة. ويُتوقع بوجه عام أن يكون الطلب على الطاقة النووية أعلى كثيراً في النماذج التي تحبذ فيها السياسات تخفيض انبعاثات الكربون أو لا تقضل فئات بعينها من الطاقة [٤٩].

ومع مراعاة التباينات والتأثيرات الناشئة عمّا حدث من تغييرات في السياسات في أعقاب أحداث فوكوشيما، يُقدّر أن تنمو طاقة التوليد النووية بنسبة ٣٥-١٠٠٪ بحلول عام ٢٠٣٠ — من ٣٧٠ جيجاواط (ك) في عام ٢٠١٠ إلى ٥٠٠-٧٥٠ جيجاواط (ك) [١١]. وفضلاً عن ذلك، يمثل الضغط البيئي والمجتمعي الداعي إلى تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة والأسواق المحتملة للقوى النووية (على سبيل المثال، إنتاج الهيدروجين وتطهير المياه) طلبات لا يستهان بها في المستقبل.

وبما أنّ الوقود المستهلك المفرغ سيزداد على نحو يتناسب مع إنتاج القوى النووية، تكتسي السياسات السليمة التي تشجع قرارات إدارة الوقود المستهلك الفعالة أهميةً بالغةً. وتؤثر قرارات السياسات تأثيراً مباشراً في كمية الوقود المستهلك وفي الأوقات التي سيكون الخزن فيها مطلوباً. ولهذه القرارات تأثيرها أيضاً في الاعتبارات التقنية، مثل تقانات الخزن ونهج التصميم، ولها تأثير ملموس في الثقة العامة في دورة الوقود النووي. ومن المهم الاعتراف بالترابط بين مسائل إدارة الوقود المستهلك والنظر إليها في سياقها بشكل جامع عند إعداد السياسات التي تؤثر في إدارة الوقود المستهلك.

° بوسع الجيل المقبل من محطات التوليد النووي التي تحركها مفاعلات سريعة أن يقلّل الوقود المستهلك المفرغ لكل وحدة من الطاقة المنتجة بعوامل تقارب ١٠٠ وتحقق في الوقت نفسه فوائد أمان وأمن مستبنة. غير أنّ إعداد هذه التقانات وتنفيذها على نطاق تجاري سيستغرق عدة عقود. وسيكون من اللازم وضع سياسات واضحة وموثوق بها لإعداد واستخدام تقانات المفاعل هذه لاجتذاب الاستثمارات والالتزام المستدام بإعداد دورات الوقود النووي المتطورة وترخيصها وتنفيذها.

١-٧ - نقطة نهاية محددة

تحديد السياسة الوطنية نقطة النهاية للوقود المستهلك — سواء أكانت تلك النقطة إعادة المعالجة أو التخلص. وبالمثل، تُعدّ القرارات الرئيسية، مثل مرافق خزن الوقود المستهلك في الموقع أو خارج الموقع أو على أساس مركزي أو إقليمي، أمراً تختص به السياسة الوطنية في المقام الأول. ولذا، لا غنى لأمان إدارة الوقود المستهلك واستدامتها ولتخصيص الموارد المالية والبشرية في أطر زمنية تمتد إلى أجيال كثيرة عن سياسات وأهداف واستراتيجيات واضحة [٥٠].

وثمة حاجة إلى نقطة نهاية واضحة وموثوق بها للوقود المستهلك تتيح اتخاذ القرارات والتخطيط بفعالية. ورغم أنّ خزن الوقود المستهلك يخدم عدة أغراض مفيدة في المرحلة الختامية من دورة الوقود (مثلاً، تخفيض الإشعاعية والحرارة والوقت اللازم لتطوير التقانات)، فإنّ هذه الفوائد لن تتحقق كاملة إلا بوجود نقطة نهاية محدّدة بشكل جيد واستراتيجية لتحقيقها. وبلا نقطة نهاية محدّدة كهدف منشود، لن يتبقى سوى نهج الانتظار وروية النتائج أو نهج الاكتشاف والإصلاح حيال إدارة الوقود المستهلك. وقد يتضح أنّ أيّاً من هذين النهجين باهظ التكلفة إن أصبحت التغييرات في أنساق المرافق ضرورية، على سبيل المثال نتيجة لحدوث تدهور غير منظور في الوقود المستهلك أو مكوّنات التعبئة أو تغييرات في سياسات الوقود المستهلك أو متطلباته.

٢-٧ - تبني الوقود المستهلك والمساءلة عنه بشكل واضح

تحديد السياسات الوطنية التبني والمساءلة والمسؤولية للكيانات المسؤولة عن كل جزء من دورة الوقود النووي ولكل نشاط يقع في نطاق إدارة الوقود المستهلك. وكثيراً ما تكون كيانات مختلفة مسؤولة عن قرارات تؤثر في خواص الوقود المستهلك وفي نسق خزنه وظروفه. ويشمل ذلك تصميم الوقود (على سبيل المثال، اختيار مواد الوقود والكسوة وتقنيات التصنيع) وعمليات المفاعل (الحرق، مثلاً) وإدارة الوقود المستهلك (على سبيل المثال، شكل العبوة وظروف الخزن).

ويميل كل كيان إلى اتخاذ قرارات تحقق الأداء الأمثل في نطاق مسؤولياته. ولذا، يُرجّح أن يسعى مصممو الوقود ومشغلو المفاعلات إلى أن تحقق تصاميم الوقود والبارامترات التشغيلية إنتاج الطاقة الأنجع. وقد تحدّ هذه النزعة نحو تحقيق المستوى الأمثل موضعياً من خيارات الخزن والتخلص أو تزيد التكاليف والتعقيد بلا مبرر.

وتؤثر السياسات التي تحدد إسناد التبني والمساءلة والمسؤولية في الأفق الزمني لإدارة الوقود المستهلك وفي الاعتبارات المتعلقة بقرارات هذه الإدارة. وعلى نحو ما جاء في القسم ٥، قد تؤثر قرارات إدارة الوقود المستهلك المتعلقة بكيفية تعبئة هذا الوقود تأثيراً شديداً في تكاليف الخزن والنقل والتخلص وخياراتها في المستقبل. وثمة استراتيجيات عديدة متاحة تعتمد تكاليف كل منها وفوائدها على طول مدة خزن الوقود المستهلك وعلى الجهة التي تدفع ثمنه وتلك التي تؤدي ثمن التعبئة، وإن اقتضى الأمر أي إعادة تعبئة، ومن يدفع ثمن التخلص. وفضلاً عن ذلك، توجد خيارات مختلفة للخزن والتعبئة في الحالة التي يكون فيها الخزن المركزي ممكناً. ويتعلق كلّ من هذه الاعتبارات بالسياسات في المقام الأول.

وحسب النقاش الوارد في القسم ٨-١، من المهم تصميم وتنفيذ سياسات للوقود المستهلك تشجع جميع المشاركين في دورة الوقود النووي على اتباع نهج شامل واتخاذ قرارات تراعي كما ينبغي الأجزاء الأخرى من دورة الوقود والتأثير في الوصول بفعالية إلى نقطة نهاية. وبما أنّ الحكومة ستسك في نهاية المطاف بزم القيادة في الأجل الطويل، فينبغي أن تأخذ السياسات في الحسبان الفائدة المرجوة من إنشاء البنية التحتية، تيسيراً للإدارة المركزية والإشراف في المرحلة الملائمة من إدارة الوقود المستهلك.

٣-٧ - إدارة الوقود المستهلك المستدامة

كما ورد في القسم ٢-٢، ينبغي ألا يُنظر إلى تمديد خزن الوقود المستهلك بحسابه عملية تؤدي إلى تحميل الأجيال المقبلة عبئاً غير مستحق إن نُقلت إلى هذه الأجيال أيضاً وسائل تحقق نقطة النهاية. وتشمل تلك الوسائل الموارد المالية اللازمة وحسن التسيير والبنية الأساسية التنظيمية والقدرات التقنية والسجلات والمعلومات، بين أمور أخرى [١٠].

وقد يكون هذا النهج جذاباً بل وضرورياً في حالة الدول التي لديها برامج نووية صغيرة قد تقتضي عدة عقود من إنتاج الكهرباء النووية لجمع رأس المال اللازم لتنفيذ نقطة النهاية. فعلى سبيل المثال، صمّمت هولندا وشيّدت مرفقاً لخزن النفايات القوية الإشعاع لمدة لا تقل عن ١٠٠ عام — بغية إتمام أعمال التطوير وامتلاك الوسائل أثناء ١٠٠ عام على الأقل لتمكين الجيل المقبل من أن يقرر إما تنفيذ نقطة النهاية أو الاستمرار في الخزن (المقترن بالتجديد وإعادة الترخيص على النحو الملائم) أو النظر في بدائل أخرى قد تغدو متاحة حينئذ.

وقد يُرى أنّ هذا النهج فيه تمكين للأجيال المقبلة من اتخاذ قراراتها بنفسها بشأن استمرار الخزن أو إعادة الاستعمال المفيدة أو تنفيذ نقطة نهاية في سياق المخاطر والاحتياجات والقيم المجتمعية المنظورة والتقانات المتاحة في المستقبل. بيد أنّ إتاحة الاختيار للأجيال المقبلة لا يخلو من بعض المخاطر؛ فتوفير البنية التحتية الملائمة والاحتياطات المالية الكافية يضمن الاستدامة فقط في بيئة اقتصادية وسياسية مستقرة. وقد تسيء الدول تقدير الموارد اللازمة أو قدرتها على الحفاظ عليها. وقد تفقد الأجيال المقبلة الموارد أو تسيء استخدامها، حارمةً بذلك أجيالاً مقبلةً أخرى من الفرصة نفسها. وهذه المخاوف في محلها وينبغي لوضعي السياسات موازنتها. أمّا إن نُظر إلى الوقود المستهلك بحسابه مورداً قيماً، فإنّ احتمال أن يصبح خزن الوقود المستهلك عبئاً على الأجيال القادمة يكون ضعيفاً.

٧-٤ - النهج المتعددة القوميات

اقترن توحيد خزن الوقود المستهلك في مرفق إقليمي واحد أو أكثر بمزايا عديدة (انظر القسم ٤-٣). ومن شأن مرافق خزن الوقود المستهلك المتعددة القوميات التي تقبل الوقود من عدة بلدان أن تحقق فوائد مشابهة لذلك على نُطاق أوسع. وقد تكون اقتصاديات مرفق خزن الوقود المتعدد القوميات مجدية على نحو خاص للبلدان المتاخمة لبعضها أو تلك التي لديها برامج نووية صغيرة نسبياً. غير أنّ مرفقاً من هذا القبيل قد يثير تحديات إضافية في معالجة القيم الفريدة لبلدان عديدة وتلمس الطريق بين تحديات سياسية وقانونية ومالية أكثر تعقيداً.

٧-٥ - السياسات المستقرة الطويلة الأجل

ثبت أنّ تحديد موقع المرافق النووية وتصميمها وترخيصها عملية تستغرق عدة عقود ويقترن نجاحها بقدر عالٍ نسبياً من الشك. ويعزى ذلك في جله إلى التحديات المتعلقة بقبول الجمهور وإلى ما يحدث من تغييرات في الدعم السياسي أثناء هذه الأطر الزمنية. وأثبتت التجربة أنّ السياسات القائمة على محاولات التنبؤ بالحصائل في المستقبل أو سنّ التشريعات بشأنها لم يحالفها النجاح كثيراً.

وفي كثير من الدول، تعدّ تحقيق سياسة مستقرة لإدارة الوقود المستهلك. وتطورت التصورات المجتمعية للقوى النووية من التفاؤل الجامح في الخمسينات من القرن الماضي إلى الخوف المتوهم في الثمانينات من ذلك القرن ثم إلى التفاؤل الحذر. وتباينت الدورات شيئاً ما من بلد إلى آخر وتأثرت بالحوادث النووية مثل تلك التي وقعت في تري مايل أيلند وتشيرنوبيل وفوكوشيما وبتكلفة أنواع الطاقة الأخرى ومدى وفرتها. وتطلّ المواقف حيال القوى النووية شديدة بالرأي العام وبموامل أخرى غير مواتية لاستقرار السياسة النووية في الأجل الطويل. ولذلك، تُصمم سياسات إدارة الوقود المستهلك الفعالة بحيث تكون في مأمن من ردود الفعل السياسية القصيرة الأجل أو التي تملّحها الأحداث أو التحولات في الرأي العام مع بقائها مستجيبة لما يحدث من تغييرات في القيم المجتمعية الأساسية في الأجل الطويل.^٦

وانبثقت التوقعات الأخيرة لنمو القوى النووية إلى حدٍ كبير من ازدياد الطلب على الطاقة بسبب التوافق بشكل متزايد على ضرورة تقليص الكربون وسواه من انبعاثات غازات الدفيئة الذي يقترن بإدراك حدود توافر الوقود الأحفوري وتكاليف الطاقات المتجددة وقابليتها للتوسع. وتتيح الموازنة بين مخاطر القوى النووية في الأجل الطويل ومخاطر مستقبل خالٍ منها في الأجل الطويل منظوراً مواتياً للنمو في إنتاج الطاقة النووية. ومن المهم تعهد المنظور الطويل الأجل هذا وتضمينه في سياسات إدارة الوقود المستهلك.

واقترضت المحاولات السابقة مستقبلاً منظوراً لإدارة الوقود المستهلك ومنتجاته الفرعية. بيد أنّ تكاليف كبيرة وتأخيرات طويلة برزت بسبب العجز عن مراعاة التأثيرات الناشئة عن أحداث غير متوقعة وعن التغييرات في السياسات. وتسعى دول كثيرة لإعداد استراتيجيات مرحلية قابلة للتكيف تمضي قدماً صوب نقطة نهاية بخطوات بطيئة ومحسوبة، آخذة في الحسبان السياسات المستقبلية التي لا يمكن التنبؤ بها. ويتيح هذا النهج للجمهور ولواضعي السياسات الوقت للإحاطة بالمسائل والتقانات والتكاليف والفوائد وإعداد اتفاقات مقبولة من بعضها البعض قبل الدخول في التزام. ولعل أفضل السبل لتحقيق سياسات طويلة الأجل ومستقرة يتمثل في السعي الحصيف لتضمينها أحكاماً تختلط مساراً يُمكن من التطور والتكيف ببطء كلما تكشفت سترُ المستقبل.

^٦ على سبيل المثال، بسبب ازدياد المخاوف من الهجمات الإرهابية والحادثة التي وقعت في محطة فوكوشيما داييشي للقوى النووية، افترض واضعو السياسات في بعض البلدان أنّ الخزن الرطب بنطوي على مستوى أعلى من المخاطر واستحدثوا سياسات قد تكون حدّت دون داع من خيارات الخزن أو أدّت إلى تكاليف إضافية وإلى تعرّض العاملين دون تحقيق فوائد متناسبة من حيث الأمان.

وإدارة الوقود المستهلك عملية طويلة الأجل. وقد تتغير الظروف والمعلومات والموارد المتاحة والتقانات والسياسات والقيم المجتمعية بمرور الزمن. لذا، فمن الضروري إجراء عمليات تقييم دورية للسياسات ولتأثيرها في إدارة الوقود المستهلك، تثبتاً من أنها تشجع اتباع نهج موضوعي محكم وجامع حيال إدارة الوقود المستهلك وتحققاً من إحراز تقدم مرضٍ صوب نقطة نهاية. وتتنظر عمليات التقييم الفعالة في الأطر الزمنية والتصورات الواقعية لتنفيذ إعادة معالجة الوقود المستهلك والتخلص منه، مقرّنين بالمخاطر والمعاضات البيئية والمالية والمجتمعية. وتزود عمليات التقييم هذه المجتمع بالثقة في مراعاة ما يننابه من شواغل وفي معالجته بشكل ملائم.

٦-٧ - التعويل على حلول الأجل القريب

يستدعي إيجاد قدرة كافية لإعادة معالجة الوقود المستهلك أو التخلص منه لتحقيق نقطة نهاية لهذا الوقود استثمارات رأسمالية كبيرة على مدى عدة عقود. أضف إلى ذلك أنّ تحديد مواقع المستودعات والترخيص لها يثيران تحديات تقنية لا يُستهان بها ويواجهان عقبات اجتماعية وسياسية كثيرة. ومن جهة أخرى، أثبتت تقانات خزن الوقود المستهلك أنها آمنة واقتصادية نسبياً. ونتيجة لذلك، صُعب استقطاب الإرادة السياسية للالتزام برأس المال المالي والسياسي اللازم لتحقيق نقطة نهاية مقبولة. ورغم ذلك، سنظل التكاليف والمخاطر المقترنة بالإبقاء على خزن الوقود المستهلك تزداد كلما زادت مخزونات الوقود المستهلك واستطالت فترات خزنه وستصبح في نهاية المطاف عبئاً مجتمعياً ثقيلاً إن لم تُعالج.

ويمكن النظر إلى تراكم خزن الوقود المستهلك بحسبانه عرضاً لمسألة أمامها مساران متاحان هما: حل قصير الأجل وحل أساسي. أمّا الحل الأساسي، فيتمثل في توفير قدرة كافية لإعادة المعالجة والتخلص، وهو كثيف رأس المال ويستلزم التزاماً مطرداً طويل الأجل قبل أن يوتي أكله. ولذلك، يبدو الحل القصير الأجل المتمثل في الاكتفاء بإضافة طاقة خزن وتمديد فترات الخزن شديد الجاذبية. ولئن كان هذا الحل العرضي يتيح انفراجاً مباشراً، فإنّه قد يزيد الإرادة السياسية ضعفاً ويقوّل بمرور الزمن الموارد المجتمعية اللازمة لتحقيق الحل الأساسي.

وفي الديناميات النظامية، يُشار بشكل شائع إلى هذا النمط المعروف جداً بتعبير 'تحويل العبء'.^٧ ورغم التسليم بأنّ الحلول العرضية تكون ضرورية أحياناً كحل مؤقت لكي يستقر النظام أو للتأجيل ريثما يغدو تنفيذ الحل الأساسي ممكناً، فإنّ من الأهمية بمكان إدراك كنه هذا النمط من السلوك وإدارته؛ إذ إنّه قد يؤدي إلى تكرار تطبيق حل عرضي غير مستدام يوهن في الوقت ذاته القدرة على الوصول إلى حل دائم.

وفي حالة إدارة الوقود المستهلك، ثمة التزام مهني وأخلاقي بضمان خزن الوقود الفعال والأمن للمدة اللازمة. بيد أنّ تطوير القدرة على تمديد فترات الخزن ينبغي ألا يُتخذ ذريعة لتأخير تنفيذ العمليات اللازمة لتحقيق نقطة نهاية مقبولة. فتأخير الحل الأساسي سيؤدي إلى تصاعد مخزونات الوقود المستهلك وتكاليفها فتزداد إدارتها صعوبة شيئاً فشيئاً. وحسب تصور الجمهور لما يقترن بالمستودع الجيولوجي العميق من مخاطر مقارنة بمخاطر خزن الوقود المستهلك المستمر، قد تؤثر التأخيرات في الوصول إلى نقطة نهاية وازدياد مخزونات الوقود المستهلك أيضاً سلباً في ثقة الجمهور اللازمة للمضي قدماً صوب حل دائم. ولذلك، يُحذّر بشدة من أنّ السياسات التي تعتمد على خزن الوقود المستهلك المستمر، وإن كانت ضرورية حالياً، ينبغي أن تُدار على نحو يكفل الالتزام بتحقيق سياسة لإدارة الوقود المستهلك إدارة مستدامة.

٨ - الاعتبارات الرئيسية الأخرى

٨-١ - إدارة الجوانب المشتركة طوال دورة الوقود

تتألف دورة الوقود النووي من ثلاث مراحل رئيسية هي: المرحلة الأمامية وعمليات المفاعل والمرحلة الختامية. وتنقسم هذه المراحل إلى مراحل مميزة شديدة الترابط (على سبيل المثال، الخزن والنقل وإعادة المعالجة أو التخلص للمرحلة الختامية). ولا تخضع القرارات والاعتبارات والخيارات المتاحة في كل مرحلة للقيود الناشئة عمّا يُتخذ منها في مراحل سابقة فحسب، بل قد تؤثر أيضاً في نظيرتها في المراحل اللاحقة. وإدراكاً لذلك، تنص المادة ٥ من توجيه

^٧ انظر www.systems-thinkin.org/theWay/ssb/sb/htm.

المجلس 2011/70/Euratom بتاريخ ١٩ تموز/يوليه ٢٠١١ الذي ينشئ إطاراً مجتمعياً لإدارة الوقود المستهلك والنفايات المشعة إدارة آمنة ومسؤولة [٥٢] على:

"١- أن تضع الدول الأعضاء إطاراً تشريعياً وتنظيمياً ومؤسسياً وطنياً ("إطار وطني") لإدارة الوقود المستهلك والنفايات المشعة يسند المسؤوليات ويهيئ للتنسيق بين الهيئات المختصة وتحافظ عليه."

وتنص المادة ٤ (٣) [٥٢] على أن "تقوم السياسات الوطنية على المبادئ التالية: ... (ب) ينبغي مراعاة علاقات الاعتماد المتبادل بين جميع الخطوات في توليد الوقود المستهلك والنفايات المشعة وإدارتهما". وقد تثير بعض الأطر التنظيمية أو نهج الأمان المختلفة أو الممارسات المتبعة في خزن الوقود المستهلك ونقله وإعادة معالجته أو التخلص منه مسائل تتعلق بالتوافق تزيد التكاليف أو المخاطر عندما تطول مدد خزن الوقود المستهلك. فعلى سبيل المثال، قد لا تنتظر قرارات التصميم والقرارات التشغيلية والتنظيمية بالضرورة في التصورات التي يُخزن فيها الوقود المستهلك لفترات ممتدة في علب محكمة السد. وقد يؤدي ذلك إلى ضرورة تفتيش التعبئة ومجمعات الوقود المستهلك وربما إلى إعادة التعبئة لاستيفاء متطلبات الخزن والنقل أو التخلص الإضافية.

ومن التحديات الرئيسية التي تواجه تنفيذ القرارات الصائبة في إدارة الوقود المستهلك إدارة آمنة ومأمونة وفعالة ومستدامة الحاجة إلى الوضوح بشأن المسؤولية والمساءلة والتبني في جميع المراحل ومن بينها إعادة معالجة الوقود المستهلك أو التخلص منه. ويعزز تقسيم هذه المسؤولية بين مختلف مراحل دورة الوقود دون التفاعل الكافي بين الأطراف المعنية القرارات الموضوعية التي قد تحد من الخيارات في المستقبل وتزيد تكاليف دورة الحياة. ويزداد النهج الجامع لإدارة دورة الوقود برمتها أهمية كلما مُدِّدت فترات خزن الوقود المستهلك، فهو يشجع القرارات التي تراعي دورة الوقود بأسرها وينتبط تحقيق المستوى الأمثل موضعياً على حساب الأداء العام للنظام.

ويتيح التكامل بين جوانب إدارة دورة الوقود التصميمية والتشغيلية والتنظيمية والمتعلقة بالسياسات اتخاذ قرارات تضمن التوافق بين المواد والعمليات والمعدات والتعبئة وشكل النفايات وبين خطوات إدارة الوقود المستهلك في المستقبل، مخفضاً بذلك درجة المخاطر وتكاليف دورة الحياة. فعلى سبيل المثال، ستؤثر القرارات ذات الصلة بمتطلبات التوقيت والقبول المتوقعة لمستودع جيولوجي في ما لأنساق الخزن المختلفة من مزايا ومثالب نسبية. وتؤثر قرارات تكنولوجيا الخزن هذه بدورها أيضاً في التكاليف وفي التأثيرات الناشئة عن تمديد الخزن. وقد تؤثر قرارات تكنولوجيا الخزن أيضاً في معايير التصميم والخيارات وتكاليف تصميم المستودع وتحديد موقعه في المستقبل. وينطبق هذا الاعتماد المتبادل في دورة الوقود النووي على جميع مراحل دورة الوقود النووي. وتشمل أمثلة التأثيرات في مراحل دورة الوقود ما يلي:

(أ) تصنيع الوقود وإدارة المفاعل وعملياته الأساسية: تدير المرافق تكاليف التشغيل وتحرص في الوقت ذاته على معايير الموثوقية والأمان العالية. وتحبذ اعتبارات التكاليف في الأجل القصير تصاميم الوقود وبارامترات التشغيل التي تتيح درجة أعلى من الإحراق وتقلل إخفاقات الوقود إلى أدنى حد. ويشجع ذلك المثابرة على إعداد تصاميم جديدة ومواد متطورة للوقود والكسوة وهياكل المجمعات فضلاً عن كيميائ مبرّد المفاعل. ومن شأن التغييرات في هذه البارامترات أن تؤثر في الخصائص الهيكلية وخصائص تآكل الوقود المستهلك وفي مواد الكسوة ومن ثم في الخيارات المتاحة وتكاليف الخزن الممتد والنقل اللاحق.

(ب) خزن الوقود المستهلك: يؤثر الترابط بين الخزن والنقل اللاحق لأغراض إعادة المعالجة أو التخلص تأثيراً شديداً في القرارات المتعلقة بكيفية وضع الوقود في عبوات وتوقيتته. فعلى سبيل المثال، يوجد نهجان مختلفان اختلافاً جذرياً حيال تصميم مرفق التخلص الجيولوجي وتحديد موقعه. فأحد هذين النهجين يسعى لإيجاد نظام التخلص الأمثل غير المقيد بأي تعبئة موجودة، بينما يبحث النهج الثاني عن نظام تخلص يستوعب عبوات الوقود المستهلك الموجودة. ومن الواضح أن الكيان المسؤول عن المستودع سيفضل النهج الأول، بينما سيحبذ الكيان المسؤول عن الخزن النهج الثاني (أي السماح بتعبئة الوقود بالطريقة المثلى لأهداف الخزن). ومن ثم إذا كان كيان (المرفق، مثلاً) مسؤولاً عن قرارات خزن الوقود المستهلك بينما الكيان الآخر (الحكومة مثلاً) مسؤولاً عن النقل أو التخلص، فمن غير المرجح أن تراعي قرارات إدارة الوقود المستهلك أثناء الخزن تأثيراتها التي تتجاوز خزن الوقود المستهلك مراعاة تامة وقد تحد من تكاليف النقل أو التخلص في المستقبل أو تؤثر فيها تأثيراً شديداً.

(ج) نقل الوقود المستهلك: قد تنقضي مدة رخص النقل والوقود مخزون أو قد لا تكون متطلبات رخص الخزن والنقل متوافقة التوافق التام. لذا، يلزم الإبقاء على كلا رخص نقل الوقود المستهلك المخزون وخزونه، وهو مطلب معمول به في بعض الدول. ففي اليابان مثلاً، وُضِع نهج جامع مقروناً برخصة للخزن والنقل لمدة ٥٠ عاماً. ويمكن أن يطبق المبدأ نفسه كلما مُدِّدت فترات الخزن.

(د) إعادة معالجة الوقود المستهلك: عادة ما تُستخدم عمليات إعادة المعالجة للوقود غير المتلف لتقليل التلوث عند تفرغ عبوات النقل. وفي حالة استقبال وقود مستهلك تدهور أثناء الخزن، قد يلزم إدخال تعديلات تصميمية وتشغيلية على مرفق إعادة المعالجة لإدارة التلوث المحتمل. وفضلاً عن ذلك، قد يؤثر التدهور الشديد أثناء الخزن في إعادة المعالجة إن أصبح توصيف الوقود المستهلك بدقة صعباً أو باهظ التكلفة.

(هـ) التخلص من الوقود المستهلك: عادة ما تُستخدم التصاميم الحالية للمستودع الجيولوجي المنجمي العميق عبوات تخلص ذات قدرات حرارية ووزن ومواد انشطارية أصغر من كثير من البراميل الخشبية المزدوجة الغرض المستعملة، وإن كان الاتجاه السائد يميل إلى البراميل الخشبية التي تقل تكاليف التصنيع والتشغيل من خلال الحمولة القصوى (أي زيادة الحجم والحدود الانشطارية والحرارية). وفضلاً عن ذلك، لم تُحدّد بعد المتطلبات المادية والهيكلية اللازمة لاستيفاء معايير قبول المستودع. ولذلك، قد تقتضي الحاجة إعادة تعبئة الوقود المخزن حالياً قبل التخلص منه^٨. ويحتمل أن تضع الحاجة إلى قبول العلب الحالية أو إعادة تعبئتها أو التخلص من تصاميم العلب الموجودة قيوداً إضافية شديدة على مشغل المستودع الجيولوجي العميق في المستقبل من حيث تحديد الموقع والتصميم.

٢-٨-٢ ثقة الجمهور

تمثل ثقة الجمهور في إدارة الوقود المستهلك عاملاً رئيسياً في تحديد مواقع مرافق الخزن والتخلص وإصدار الرخص لها. وخضعت العوامل التي تؤثر في ثقة الجمهور إلى دراسات مستفيضة، وهناك موارد عديدة يمكن أن يُستعان بها لفهم هذا الموضوع ومعالجته (انظر المرجع [٥٣]). بيد أن تحقيق القبول المجتمعي وما يصاحبه من تذبذب سياسي أثبت أنه يمثل تحدياً أكبر من الحفاظ على الأمان والأمن. ويرى سيبورن [٥٤]:

"تنبثق مخاوف الجمهور وتضايقه بشأن نفايات الوقود النووي والقوى النووية بوجه عام ...، من بين أمور أخرى:

- من الاقتران بالأسلحة النووية والكوارث الماضية مثل تشيرنوبيل؛
- من اللغز الذي يكتنف الانشطار النووي وطول مدة الإشعاع لدى أغلب الناس؛
- من خشية العواقب الكارثية إن 'حدث ما لا يسر'، بغض النظر عما إن كان 'لا يسر' المعني غير مرجح إحصائياً؛
- من التخوف من نظام إدارة النفايات الذي لا يتصور رصد ما يحدث في مستودع للتخلص ومحيطه الأرضي رسداً غير محدود؛
- من انعدام الثقة في قدرة العلميين على التنبؤ بما قد يحدث بعد عشرة آلاف سنة من الآن؛
- من الصعوبات التي تكتنف تحديد أفضل السبل لحماية مصالح الأجيال المقبلة عندما نتخذ الآن قرارات بشأن النفايات النووية التي ولدناها؛
- من الإحساس بوجود طريقة أفضل وأقل خطورة لإنتاج الطاقة الكهربائية التي نحتاجها.

"يمكن دحض بعض هذا التخوف والتشاؤم في مستوى واحد بحجج علمية. ولكن المخاوف تظل قائمةً وحقيقيةً. وبنبغي إيلاؤها عنايةً جديّةً عند إعداد السياسة العامة في نظام ديمقراطي."

١-٢-٨-٨ معضلة ثقة الجمهور

تتأثر ثقة الجمهور في إدارة الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع تأثراً شديداً بالمخاطر المتصورة وبانعدام الثقة في إدارة الوقود المستهلك أو عدم فهمها. وقد بُذلت جهود حثيثة لتقاسم المعلومات وضمان الأمان وإثباته، سعياً لتبديد هذه المخاوف بشكل مباشر، فتحقق نجاح محدود في بناء ثقة الجمهور.

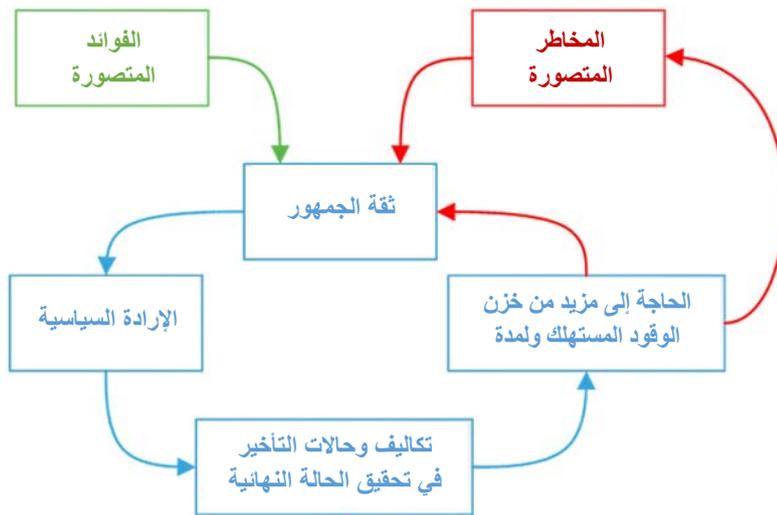
^٨ أوجي بأنّ التعبئة في علب أو براميل خشبية صغيرة قد يزيد احتمال التوافق مع أنساق الخزن والنقل والتخلص في المستقبل. ويتيح استخدام العبوات الصغيرة مزيداً من المرونة ولكنه يضيف أيضاً تكاليف ويزيد التأثيرات التشغيلية دون ضمان بأن يفي هذا الاستثمار الحاجة إلى إعادة التعبئة في المستقبل.

وما برح الإخفاق في الحصول على دعم كافٍ من الجمهور مصدراً مطرداً للمصاعب والتأخيرات والتحديات في الحفاظ على [الإرادة] السياسية اللازمة لتحديد موقع مستودع جيولوجي عميق للتخلص من الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع والترخيص له بنجاح. وتعزز الالتزامات غير الموفى بها والصعوبة المستمرة في إحراز تقدم ملموس التصورات عن المخاطر وتزيد ثقة الجمهور ضعفاً في إمكان إدارة الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع إدارة مستدامة، فتزداد كمية الوقود المستهلك ومدة خزنه وتتضاعف التحديات المقترنة بتحديد موقع مرافق خزن الوقود المستهلك والترخيص لها. ويبين الشكل ٤ هذا التأثير الدائري. ومما يدعو إلى السخرية أنَّ انعدام ثقة الجمهور والإرادة السياسية لمعالجة إدارة الوقود المستهلك يمكن أن يدور دورة كاملة ويفاقم الوضع في نهاية المطاف، معيقاً التوصل إلى حل دائم. بيد أنَّ ثقة الجمهور لا تتأثر فقط بالمخاطر المتصورة بل وبالفوائد المتصورة أيضاً، مما يشي بأنَّ كلا المجالين يتيح فرصاً لتعزيز ثقة الجمهور.

٨-٢-٢- المخاطر المتصورة مقابل الفوائد المتصورة

من الملاحظات الرئيسية المستمدة من الشكل ٤ أنَّ ثقة الجمهور تشكل في حقيقة أمرها جزءاً من توازن يراعي المخاطر والمكافآت معاً. ولذلك، فإنَّ تقليل المخاطر وتصورات المخاطر لن يكون على الأرجح كافياً لعكس الدورة، وإن كان أداء الأمان الملائم ضرورياً. ويستلزم ذلك الاعتراف أيضاً بالفوائد ومنحها قيمتها.^٩ ويستدعي بناء ثقة الجمهور أن يدرك الفرصة المتاحة لتحقيق فائدة حقيقية، أو تقادي تكلفة فعلية، في ما يتعلق بهذه القيم. وبدون هذا الحافز، ينتفي لديه الدافع لاتخاذ موقف. ولئن كانت ثقة الجمهور قد استعصت نسبياً على الجهود الماضية للدفاع عن سجل الأمان النووي أو تحسين صورته، فإنَّها أباقت أيضاً تقبلها فوائد القوى النووية مع ازدياد دعم الجمهور لها في بلدان كثيرة.^{١٠} ويصدق ذلك حتى بعد النظر في آثار التسونامي والضرر اللاحق بمحطة القوى النووية في فوكوشيما دايبيشي. ويُعزى جُلُّ ما حدث من تغييرات في تصور الجمهور للطاقة النووية إلى إدراك فوائد القوى النووية مقارنةً بالتقانات الأخرى لإنتاج الطاقة على نطاق واسع (مثلاً، انبعاثات منخفضة جداً من الكربون خلال دورة الحياة ومزيد من أمن الطاقة).

وإدارة الوقود المستهلك بأمان أمر ممكن وواجب. بيد أنَّ ثقة الجمهور لا تُحددها المخاطر المتصورة فحسب بل والفوائد المتصورة أيضاً. وأباقت التجربة أنَّ سجل الأمان الممتاز لا يكفي لكسب ثقة الجمهور. وينبغي أيضاً إدراك الفوائد المتناسبة مع المخاطر المتصورة. ولبناء ثقة الجمهور اللازمة لتحديد مواقع مرافق خزن الوقود المستهلك وتشغيلها بفعالية، ينبغي أن يدرك المجتمع فوائد القوى النووية وقيمتها أيضاً. وينبغي أن تستفيد المجتمعات المحلية التي تقدم الخدمات الضرورية تبعاً لذلك. وتعوّل عمليات تحديد الموقع الناجحة على الفوائد التي تجعل المجتمعات المحلية المختارة لاستضافة مرافق إدارة الوقود المستهلك ترى نفسها كاسبية لا خاسرة.



الشكل ٤ - ثقة الجمهور وتعقيباته.

^٩ تتأثر المخاطر والفوائد المتصورة بعوامل كثيرة. فمثلاً، يتأثر تصور المخاطر بمستوى فهم الظواهر النووية وبالثقة في السلطات النووية وسجل الأمان النووي، من بين أمور أخرى. ويتأثر تصور فوائد الطاقة النووية بالاحتياجات من الطاقة وتكاليفها.

^{١٠} انظر www.foratom.org/publications/#topical_publications.

وتشمل فوائد القوى النووية الموثوقة وانبعثات الكربون المنخفضة وامتدادات الوقود المستقرة في الأجل الطويل والمرونة الجغرافية وسجلاً بيئياً وسجل أمان ممتازين. وتتضمن فوائد خزن الوقود المستهلك التي تجنّبها المجتمعات المحلية المضيفة ويمكن أن تستمر لوقت طويل بعد ذلك المنفعة الاقتصادية الناشئة عن زيادة العمالة والبنية التحتية وسواها من الحوافز المقترنة باستضافة المرفق. غير أنّ تحقيق هذه الفوائد وكسب الثقة اللازمة للتقدم يستدعيان بذل جهود مستمرة لفهم المسائل المعنية فهماً أفضل والتواصل بشأنها بمزيد من الفعالية وتنمية الفوائد المستقرة والمقاومة للظروف الاقتصادية والسياسية غير الأكيدة والإرادة السياسية لتنفيذ الاستثمارات والالتزامات الطويلة الأجل اللازمة للمضي قدماً.

٨-٢-٣- قبول الجمهور وتمديد خزن الوقود المستهلك

يمتثل قرار توليد القوى النووية واستخدامها التزاماً من قِبَل المجتمع حيال حُسن إدارة الوقود المستهلك المولّد (أي الخزن الآمن وإعادة المعالجة أو التخلص). وحتى في الدول التي اختارت إنهاء القوى النووية، يوجد وقود مستهلك ونفايات قوية الإشعاع من الاستخدام السابق ولا تزال كميات كبيرة من الوقود المستهلك تولّد في جميع أنحاء العالم. ويُعدّ خزن الوقود المستهلك جزءاً أساسياً من دورة الوقود النووي. ويمكن أن يعود تمديد خزن الوقود المستهلك بعدة فوائد على إدارة الوقود المستهلك الشاملة. وسيُخفّض وقت التبريد الإضافي الحرارة والإشعاع وقيود الأمان والتصميم المصاحبة. وللخزن أيضاً فائدة في إعداد سياسات إدارة الوقود المستهلك وتنفيذها وفي التقانات المقترنة بذلك. ورغم هذه الفوائد المحتملة، يمكن أن يُنظر إلى خزن الوقود المستهلك بحسبانه خطوة أولى في مسار يفضي إلى تأجيل القرارات بشكل مستمر فيصبح مرفق الخزن موقِعاً للتخلص بحكم الواقع. وليس من السهل على المسؤولين العاميين دحض وجهة النظر هذه عندما تتعدم الخطط الموثوق بها لمستودع جيولوجي عميق أو حين يكون البلد المعني قد أخلف وعوده السابقة بإزالة الوقود المستهلك. وتثير العوامل نفسها التي تستلزم الاستمرار في الخزن (أي انعدام نقطة نهاية واضحة أو التأخيرات في تحقيقها) تحديات أيضاً في التوصل إلى قبول الجمهور لموضع مرافق خزن الوقود المستهلك الجديدة وتمديد رخص مرافق خزن الوقود القائمة. وإن لم يُدرّ الوقود المستهلك بطريقة استباقية تفضي إلى نقطة نهاية واضحة وموثوق بها مثل إعادة المعالجة أو التخلص، فيُرجح أن يُنظر إلى الاستمرار في خزن الوقود المستهلك بحسبانه نتيجةً لسياسة غير ملائمة أو فاشلة. ولا يرجح القبول بضرورة تمديد خزن الوقود المستهلك وفوائده إن نُظر إلى التمديد كخطوة مؤقتة غير مرغوب فيها ولكنها ضرورية مردّها إلى تأجيل القرارات أو انعدام البدائل. ورغم أنّ دولاً كثيرةً تسعى جاهدةً لتحديد موقع مستودعات جيولوجية عميقة، فثمة قواسم مشتركة بين الدول التي نجحت في تحقيق قدر أعلى من دعم الجمهور والدعم السياسي. ويمكن أن تنطبق هذه الدروس أيضاً على تحديد مواقع مرافق خزن الوقود المستهلك وإعادة ترخيص ما هو قائم منها. ومن السمات المشتركة بين الدول الماضية قدماً بنجاح أنّ عملية تحديد الموقع لم تُدفع إلى الجمهور عنوةً أو تُفرض عليه بل جرى اختيارها من خلال حوار مفتوح تناول المخاطر والفوائد معاً (انظر المرجع [٥٥]). وتشمل العوامل الأخرى ما يلي:

- (أ) التواصل المبكر والأمين والمستمر من قبل المنظّمات المسؤولة عن إدارة الوقود المستهلك والمنظّمين لتناول شواغل الجمهور وارتياحه.
- (ب) التنفيذ المتدرج الذي يتيح للجمهور المحلي معرفة المخاطر والإحاطة بها وإدراك الفوائد والشروع في استخلاصها قبل الالتزام التام.

التركيز على المجتمعات المحلية التي سبق أن استضافت مرافق نووية؛ فهي أكثر عرضة ومعرفة بالقوى النووية وما يقترن بها من مخاطر. وأثبتت التجربة في شتى أنحاء العالم أنّ تحديد المواقع يتقدم بسرعة بين هذه المجتمعات المحلية. وبعد استعراض مستفيض لبرامج إعداد المستودعات الدولية، فإنّ لجنة بلو ريبون في الولايات المتحدة "توصي بعملية تحديد للمواقع تقوم على القبول والشفافية والتدرج والتكيف وتستند إلى المعايير والعلوم وتحكمها اتفاقات ملزمة قانوناً بين الحكومة الاتحادية والولايات القانونية المضيفة" [٨].

٨-٣- الضوابط المؤسسية

خلافاً للمستودع، سيظلّ خزن الوقود المستهلك بحكم تعريفه خاضعاً للضوابط المؤسسية إلى أن تتحقق نقطة نهاية. وتشمل الضوابط المؤسسية المنطبقة طائفة المتطلبات التنظيمية التي ورد ذكرها في القسم ٦ كاملة. وعلى نحو ما جاء في

القسم ٦-٢، لا يلزم أن يفترض الإطار التنظيمي القائم على التجديد الدوري طول فترة الخزن. ويؤكد كل تجديد بشكل مستقل استيفاء المتطلبات المؤسسية والتقنية والمادية اللازمة لضمان الأمان طوال فترة الترخيص. ويشبه ذلك نوعاً ما طريقة الترخيص للطائرات والمركبات، فهي لا تُخرج من الخدمة عنوة استناداً إلى عمرها بل يسمح لها أن تظل عاملة طالما استوفت المتطلبات السارية. زد على ذلك أن الاستعراض الدوري يتيح للضوابط المؤسسية الفرصة لتتطور بتطور الاحتياجات والقيم المجتمعية ولمراعاة ما قد يتاح من تقانات وخيارات جديدة.

ويتمثل التخوف المحتمل من التعويل على عمليات إعادة تجديد الرخص الدوري لتقييم استمرار خزن الوقود المستهلك في استيفاء المتطلبات السارية وتأكيد في أن تعليق رخصة الخزن في حالة عدم استيفاء المتطلبات لن يُبعد المخاطر. وإن عجز المرخص له، لأي سبب، عن الحفاظ على الرخصة بشكل مرضٍ، وقعت مسؤولية أعمال المتطلبات وضمان الأمان على عاتق الحكومة في نهاية المطاف. ولذا، تزداد أهمية الحاجة إلى تحديد المسؤوليات والتبعات وما يقترن بها من ضمان مالي تحديداً بيناً. وهناك عدد من النظائر المجتمعية استمرت فيها الرقابة المؤسسية طوال قرون عديدة. فقد ظلت السجون والتعليم والصحة والرعاية والفنون والأديان والتقاليد الثقافية قائمة خلال أجيال عديدة.^{١١} ويهتم المجتمع بالمسائل التي تُعد مهمة. ولذلك، يُتوقع أن يظل الوقود المستهلك خاضعاً للرقابة المؤسسية ما ظل هذا الوقود يُعدُّ مخاطرة. وسيظل الوقود المستهلك ينطوي على مخاطر لقرون عديدة. ولذا، تصبح مسألة الرقابة المؤسسية إلى حدٍ كبير مسألة تطبيق مبادئ الأخلاق والاستدامة تطبيقاً ملائماً، لا سيما التحقق من ألا يُنقل العبء إلى الأجيال المقبلة. وفي مضمير تمديد خزن الوقود المستهلك، تُعدُّ مراعاة الرقابة المؤسسية على النحو الواجب إلى حدٍ كبير مسألة تتمثل في ضمان الموارد المالية والبشرية والتقنية اللازمة لخزن الوقود المستهلك والتخلص منه أو إعادة معالجته والتخلص من أي نفايات مقترنة به بشكل فعال وآمن. ولذلك، ينبغي أن يُعاد دورياً، أثناء عملية إعادة الترخيص لتمديد فترات خزن الوقود المستهلك، تقييم الحال والبنية الأساسية للحفاظ على كفاية هذه الموارد.

وبسبب طول مدة المخاطر ومدة الخزن المجهولة وعدم اليقين بشأن مراحل إدارة الوقود المستهلك اللاحقة، يكتسي الحفاظ على السجلات والمعرفة والذاكرة أهمية خاصة. واستهلت وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي نشاطاً متعدد التخصصات يُبتغى منه زيادة التعاون وتحديد أفضل الممارسات في إعداد خطط الحفاظ على السجلات والمعرفة والذاكرة وتنفيذها.^{١٢} ورغم أن هذا النشاط يصبُّ اهتمامه على عمليات إعداد مستودع جيولوجي وإدارته، فإن كثيراً من المبادئ والدروس المستخلصة منه يمكن تطبيقها على خزن الوقود المستهلك الممتد.

^{١١} من الأمثلة على ذلك: شركة Hudson Bay Company التي أنشئت في عام ١٦٧٠ (كندا)؛ والإدارة المستمرة للمحاجر الواقعة تحت الأرض من أجل الأمان في باريس منذ القرن الرابع عشر (فرنسا)؛ و Shikinen Sengu في مزار Ise Jingu الذي أُعيد بناؤه كل ٢٠ سنة منذ القرن السابع (اليابان).

^{١٢} انظر www.oecd-nea.org/rwm/rkm.

المراجع

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Fuel Cycle Objectives, IAEA [١]
Nuclear Energy Series No. NF-O, IAEA, Vienna (2013).
- الاتحاد الأوروبي 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، سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، العدد SF-1، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٧).
- OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, The Roles of Storage in the Management of Long-lived [٣]
Radioactive Waste: Practices and Potentialities in OECD Countries, OECD, Paris (2006).
- الوكالة الدولية للطاقة الذرية، مسرد مصطلحات الأمان الصادر عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية، المصطلحات المستخدمة في مجالي الأمان النووي والوقاية من الإشعاعات، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٧).
- الوكالة الدولية للطاقة الذرية، استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٥، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠١٥).
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Nuclear Sector Roadmaps: Used Fuel and High- [٦]
Level Waste Management, EPRI, Palo Alto, CA (2013).
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Plan for the Long-term Update to the Waste [٧]
Confidence Rule and Integration with the Extended Storage and Transportation Initiative, Rep. SECY-11-0029, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011).
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, Strategy for the Management and Disposal [٨]
of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, USDOE, Washington, DC (2013).
- CARLSEN, B., et al., “Challenges Associated with Extending Spent Fuel Storage until [٩]
Reprocessing or Disposal”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 43–60.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA [١٠]
Safety Standards Series No. SSG-15, IAEA, Vienna (2012).
- حالة القوى النووية وأفاقها على الصعيد الدولي لعام ٢٠٢١، تقرير من المدير العام، -GOV/INF/2012/12، GC(56)/INF/6، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠١٢).
- الاتفاقية المشتركة بشأن أمان التصرف في الوقود المستهلك وأمان التصرف في النفايات المشعة، INFCIRC/546، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (١٩٩٨).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Development of [١٣]
a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-48, IAEA, Vienna (2018).
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Review of License [١٤]
Renewal Applications for Nuclear Power Plants, Rep. NUREG-1800, Rev. 2, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC (2010).
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, [١٥]
Rep. NUREG-1801, Rev. 2, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC (2010).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Plant Life Management for Long Term [١٦]
Operation of Light Water Reactors: Principles and Guidelines, Technical Reports Series No. 448, IAEA, Vienna (2006).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Plant Life Management Models for Long [١٧]
Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.18, IAEA, Vienna (2015).

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Understanding and Managing Ageing of Material in Spent Fuel Storage Facilities, Technical Reports Series No. 443, IAEA, Vienna (2006). [18]
- TAKEDA, H., WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., Development of the detecting method of helium gas leak from canister, Nucl. Eng. Des. **238** (2008) 1220–1226. [19]
- MATSUMURA, T., SASAHARA, A., NAUCHI, Y., SAEGUSA, T., Development of monitoring technique for the confirmation of spent fuel integrity during storage, Nucl. Eng. Des. **238** (2008) 1260–1263. [20]
- ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-term Storage and Transportation of Used Fuel, Rev. 0, ANL (2012). [21]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Guide for Evaluation of Materials Used in Extended Service of Interim Spent Nuclear Fuel Dry Storage Systems, ASTM C1562-10(2018), ASTM, West Conshohocken, PA (2010). [22]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Practice for Evaluation of the Long-Term Behavior of Materials Used in Engineered Barrier Systems (EBS) for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, ASTM C1174-17, ASTM, West Conshohocken, PA (2017). [23]
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Standard Review Plan for Renewal of Spent Fuel Dry Cask Storage System Licenses and Certificates of Compliance, Rep. NUREG-1927, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011). [24]
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Dry Cask Storage Characterization Project — Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination, Rep. NUREG/CR-6745, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2001). [25]
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Examination of Spent PWR Fuel Rods after 15 Years in Dry Storage, Rep. NUREG/CR-6831, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC (2003). [26]
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Dry Cask Storage Characterization Project, Rep. 1002882, EPRI, Palo Alto, CA (2002). [27]
- HANSON, B., et al., Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel, Rev. 0 (2012). [28]
- UNITED STATES NUCLEAR WASTE TECHNICAL REVIEW BOARD, Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, NWTRB, Arlington, VA (2010). [29]
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Materials Aging Issues and Aging Management for Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, Rep. NUREG/CR-7116, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2011). [30]
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Extended Storage Collaboration Program (ESCP): Progress Report and Review of Gap Analyses, Technical Report 1022914, EPRI, Palo Alto, CA (2011). [31]
- ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Extended Storage Collaboration Program: International Subcommittee Report — International Perspectives on Technical Data Gaps Associated with Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, Technical Report 1026481, EPRI, Palo Alto, CA (2012). [32]

- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Identification and Prioritization of the Technical Information Needs Affecting Potential Regulation of Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel, NRC, Washington, DC (2012). [٣٣]
- STOCKMAN, C.T., HANSON, B.D., ALSAED, A.A., “Used nuclear fuel storage and transportation data gap prioritization”, Integrating Storage, Transportation, and Disposal (Proc. 14th Int. High-level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2013), Vol. 1, Curran Associates, Red Hook, NY (2013) 503–508. [٣٤]
- BLUE RIBBON COMMISSION ON AMERICA’S NUCLEAR FUTURE, Report to the Secretary of Energy, United States Department of Energy, Washington, DC (2012). [٣٥]
- XIHUA HE, et al., Development and Evaluation of Cask Demonstration Programs (2011). [٣٦]
- NICHOL, M., et al., “Concept plan for a high burn-up fuel storage and transportation confirmatory data project”, Integrating Storage, Transportation, and Disposal (Proc. 14th Int. High-level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2013), Vol. 1, Curran Associates, Red Hook, NY (2013) 94–103. [٣٧]
- WEAVER, D., “Future licensing strategies for the storage and transportation of spent fuel”, presentation at the 27th Spent Fuel Management Sem. Arlington, 2012. [٣٨]
- EASTON, E.P., BAJWA, C.S., ZHIAN LI, GORDON, M., “Licensing strategies for the future transportation of high burnup spent nuclear fuel”, presentation at the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Division Conf. Toronto, 2012. [٣٩]
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage, IAEA-TECDOC-1100, IAEA, Vienna (1999). [٤٠]
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Facility Design and Plant Operations Features that Facilitate the Implementation of IAEA Safeguards, STR-360, IAEA, Vienna (2009). [٤١]
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Safeguards in Nuclear Facility Design and Construction, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.8, IAEA, Vienna (2013). [٤٢]
- INTERNATIONAL PANEL ON FISSILE MATERIALS, Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World, IPFM (2011). [٤٣]
- الوكالة الدولية للطاقة الذرية، تقييم مواقع المنشآت النووية، سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية، العدد NS-R-3 (الصيغة المنقحة Rev.1)، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠١٦). [٤٤]
- UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, Commercial Nuclear Waste: Effects of a Termination of the Yucca Mountain Repository Program and Lessons Learned, GAO-11-229, GAO, Washington, DC (2011). [٤٥]
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, White Paper on Risk-informed and Performance-based Regulation, SECY-98-144, NRC, Washington, DC (1999). [٤٦]
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR 63. [٤٧]
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing, IAEA-TECDOC-1467, IAEA, Vienna (2005). [٤٨]
- SON H. KIM, WADA, K., KUROSAWA, A., ROBERTS, M., Nuclear energy response in the EMF27 study, Clim. Change **123** (2014) 443–460. [٤٩]
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009). [٥٠]

- “Risks and benefits of accelerated fuel transfer examined”, Nucl. News **55** (2012) 38–41. [٥١]
- Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste, Official Journal of the European Union No. L 199, Publications Office of the European Union, Luxembourg (2011). [٥٢]
- OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management: An Annotated Glossary of Key Terms, OECD, Paris (2013). [٥٣]
- SEABORN, B., “Criteria for public support for a waste management concept: The Environmental Assessment Panel’s recommendations”, Public Confidence in the Management of Radioactive Waste: The Canadian Context (Workshop Proc. Ottawa, 2002), OECD, Paris (2003) 71–74. [٥٤]
- OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY SECRETARIAT, “International perspective”, Ibid., [٥٥]
pp. 31–33.

القائمة الببليوغرافية

برامج إدارة التقادم

BENDERESKAYA, O.S., et al., “Corrosion of research reactor Al-clad spent fuel in water, reduced enrichment for research and test reactors” (Proc. Int. Mtg San Carlos de Bariloche, 2002).

BERNSTEIN, R., GILLEN K.T., Fluorosilicone and Silicone O-ring Aging Study, Sandia Report SAND2007-6781, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM (2007).

BILLINGTON, D.S., CRAWFORD, J.H., Radiation Damage in Solids, Princeton University Press, Princeton, NJ (1961).

BOLTON, G., “Innovative technologies for condition monitoring of waste containers”, paper presented at Nuclear Interim Storage 2011, London, 2011.

CALVERT CLIFFS NUCLEAR POWER PLANT, Calvert Cliffs Independent Spent Fuel Storage Installation Lead and Supplemental Canister Inspection Report, CCNPP (2012).

معهد بحوث الطاقة الكهربائية (بالو آلتو، كندا)

Class I Structures License Renewal Industry Report, Rev. 1, TR-103842 (1994).

Technical Basis for Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, Rep. 1003416 (2002).

Effects of Marine Environments on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels, Rep. 1011820 (2005).

Climatic Corrosion Considerations for Independent Spent Fuel Storage Installations in Marine Environments, Rep. 1013524 (2006).

ERHARD, A., VÖLZKE, H., WOLFF, D., “Ageing management”, paper presented at IAEA Tech. Mtg on Very Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, Vienna, 2011.

هيئة التصرف في النفايات النووية (ESK) (بون)

ESK Recommendations for Guides to the Performance of Periodic Safety Reviews for Interim Storage Facilities for Spent Fuel and Heat-generating Radioactive Waste (PSÜ-ZL) (2010).

Recommendation of the Nuclear Waste Management Commission (ESK): Guidelines for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-generating Waste (2013).

GILBERT, E., et al., Advances in technology for storing light water reactor spent fuel, Nucl. Technol. 89 (1990) 141–161.

HOFFMAN, E.N., SKIDMORE, T.E., DAUGHERTY, W.L., DUNN, K.A., Long Term Aging and Surveillance of 9975 Package Components, SRNL-STI-2009-00733, Savannah River National Laboratory, Aiken, SC (2009).

الوكالة الدولية للطاقة الذرية (فيينا)

Storage of Water Reactor Spent Fuel in Water Pools: Survey of World Experience, Technical Reports Series No. 218 (1982).

Impact of Extended Burnup on the Nuclear Fuel Cycle, IAEA-TECDOC-699 (1993).

Spent Fuel Performance Assessment and Research, IAEA-TECDOC-1343 (2003).

Optimization Strategies for Cask Design and Container Loading in Long Term Spent Fuel Storage, IAEA-TECDOC-1523 (2006).

JOHNSON, A.B., Jr., BURKE, S.P., K Basin Corrosion Program Report, Rep. WHC-EP-0877, Westinghouse Hanford, Richland, WA (1995).

KESSLER, J., “Used fuel extended storage: What the US industry wants from DOE”, paper presented at the NEI Used Fuel Management Conf. Baltimore, 2011.

KOIZUMI, S., SHIRAI, K., “Demonstration program of long-term storage (FY2004–2008): SCC of MPC under the condition of sea salt deposition”, presentation to the Nuclear Regulatory Commission, 2004.

KOJIMA, S., “The new approach to regulating long-term storage of spent fuel”, paper presented at the NRC Regulatory Information Conf. 2011.

KOWALEWSKY, H., et al., “Safety assessment of leak tightness criteria for radioactive materials transport packages” (Proc. 12th Int. Conf. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 1998).

KUMAR MEHTA, P., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (1986).

KUSTAS, F.M., et al., Investigation of the Condition of Spent Fuel Pool Components, Rep. PNL-3513, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA (1981).

الهيئة الرقابية النووية (واشنطن، الولايات المتحدة الأمريكية)

Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities, NUREG-1567 (2000).

Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Nuclear Fuel, NUREG-1617 (2000).

Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility: Final Report, NUREG-1536, Revision 1 (2010).

PALMQUIST, C.A., 105-C Reactor Interim Safe Storage Project Final Report, Rep. BHI-01231, Bechtel Hanford, Richland, WA (1998).

PESCATORE, C., COWGILL, M., Temperature Limit Determination for the Inert Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, EPRI TR-103949, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (1994).

PROBST, U., et al., Investigation of seal effects according to axial compression variation of metal seals for transport and storage casks, Packag. Transp. Storage Secur. Radioact. Mater. 19 (2008) 47–52.

SASSOULAS, et al., Ageing of metallic gaskets for spent fuel casks: Century-long life forecast from 25 000-h-long experiments, Nucl. Eng. Des. **236** (2006) 2411–2417.

SELWYN, H., FINLAY, R., BULL, P., IRWIN, A., “Storage, inspection and sip testing of spent nuclear fuel from the HIFAR materials test reactor”, ENS RRFM 2002 (Trans. Int. Top. Mtg on Research Reactor Fuel Management, Ghent), European Nuclear Society, Berne (2002) 114–118.

SHIRAI, K., WATARU, M., SAEGUSA, T., ITO, C., “Long-term containment performance test of metal cask” (Proc. 13th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conf. Albuquerque, 2011).

SKIDMORE, E., Performance Evaluation of O-ring Seals in the SAFKEG 3940A Package in KAMS (U), Rep. WSRC-TR-2003-00198, Rev. 0, Savannah River Technology Center, Aiken, SC (2003).

STEELE, L.E., et al., “Neutron irradiation embrittlement of several higher strength steels”, Effects of Radiation on Structural Materials (Proc. Symp. ASTM STP-426, Atlantic City, 1966), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1967) 346–368.

VIVEKANAND KAIN, AGARWAL, K., DE, P.K., SEETHARAMAIIH, P., Environmental degradation of materials during wet storage of spent nuclear fuels, J. Mater. Eng. Perfor. **9** (2000) 317–323.

VÖLZKE, H., PROBST, U., WOLFF, D., NAGELSCHMIDT, S., SCHULZ, S., “Investigations on the long-term behavior of metal seals for spent fuel storage casks” (Proc. 52nd INMM Annual Mtg, 2011).

— “Seal and closure performance in long term storage” (Proc. PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki, 2012).

VON DER EHE, K., JAUNICH, M., WOLFF, D., BÖHNING, M., GOERING, H., “Radiation induced structural changes of (U)HMW polyethylene with regard to its application for radiation shielding” (Proc. PATRAM 2010: 16th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, London, 2010).

WATARU, M., SHIRAI, K., SAEGUSA, T., ITO, C., “Long-term containment test using two full-scale lid models of DPC with metal gaskets for interim storage”, paper presented at 3rd East Asia Forum on Radwaste Management: 2010EAFORM, 2010.

WOLFF, D., VON DER EHE, K., JAUNICH, M., BÖHNING, M., “Performance of neutron radiation shielding material (U)HMW-PE influenced by gamma radiation” (Proc. PSAM11 & ESREL 2012, Helsinki, 2012).

تصميم واختيار مواقع الأنظمة المستقبلية لخرن الوقود المستهلك

BLUE RIBBON COMMISSION ON AMERICA’S NUCLEAR FUTURE, Transportation and Storage Subcommittee Report to the Full Commission: Updated Report, BRC, Washington, DC (2012).

CODÉE, H., “Long-term storage in the Netherlands”, paper presented at IAEA Tech. Mtg on Very Long Term Storage of Used Nuclear Fuel, IAEA, Vienna, 2011.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Industry Spent Fuel Storage Handbook, Rep. 1021048, EPRI, Palo Alto, CA (2010).

REACTOR SAFETY COMMISSION RSK, Recommendation of the Reactor Safety Commission (RSK): Safety Guidelines for Dry Interim Storage of Irradiated Fuel Assemblies in Storage Casks, RSK, Bonn (2001).

WASINGER, K., HUMMELSHEIM, K., GMAL, B., SPANN, H., FABER, W., “Present status and trends of spent fuel management in Germany”, paper presented at IAEA Tech. Working Group on Nuclear Fuel Cycle Options Mtg, Vienna, 2007.

أنساق خزن الوقود المستهلك

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Damaged Spent Nuclear Fuel, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.6, IAEA, Vienna (2009).

KESSLER, J., WALDROP, K., “Extended used fuel storage: EPRI perspective and collaboration initiatives”, Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013), OECD, Paris (2013) 63–82.

LEVIN, A., “Technical and regulatory paths forward for accelerating implementation of the Blue Ribbon Commission recommendations”, paper presented at American Nuclear Society Summer Mtg, Chicago, 2012.

NICHOL, M., "Operational challenges of extended dry storage of spent nuclear fuel" (Proc. WM2012 Conf. Phoenix, 2012).

الاعتبارات الرقابية

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Costing of Spent Nuclear Fuel Storage, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.5, IAEA, Vienna (2009).

ROJAS DE DIEGO, J., Economics of spent-fuel storage: A description of the methodology developed by IAEA for analysing costs, Int. At. Energy Agency Bull. 3 (1990) 34–38.

الاعتبارات المتعلقة بالسياسات

APARICIO, L. (Ed.), Making Nuclear Waste Governable: Deep Underground Disposal and the Challenge of Reversibility, Andra, Chatenay-Malabry (2010).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability, IAEA, Vienna (2003).

LATOURRETTE, T., LIGHT, T., KNOPMAN, D., BARTIS, J.T., Managing Spent Nuclear Fuel: Strategy Alternatives and Policy Implications, RAND Corporation, Santa Monica, CA (2010).

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, Disposition of High-level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Academy Press, Washington, DC (2001).

وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي (باريس، فرنسا)

Geological Disposal of Radioactive Waste: Review of the Development in the Last Decade (1999).

Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management: Experience, Issues and Guiding Principles (2004).

اعتبارات رئيسية أخرى

الوكالة الدولية للطاقة الذرية (فيينا، النمسا)

Technical, Economic and Institutional Aspects of Regional Spent Fuel Storage Facilities, IAEA-TECDOC-1482 (2005).

Risk Management of Knowledge Loss in Nuclear Industry Organizations (2006).

مقدمة في استخدام منهجية المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود الابتكارية (إنبرو) في تقييم نظم الطاقة النووية، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، سلسلة الوكالة الخاصة بالطاقة النووية، رقم NP-T-1.12، فيينا (٢٠١١).

Comparative Analysis of Methods and Tools for Nuclear Knowledge Preservation, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-6.7 (2011).

IZURU, H., "Interface issues arising between storage and transport for storage facilities using storage/transport dual purpose dry metal casks", Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors (Proc. Int. Conf. Vienna, 2010), IAEA, Vienna (2015) CD-ROM.

NATIONAL RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AGENCY, 2009 Sustainable Development Report, Andra, Chatenay-Malabry (2010).

PESCATORE, C., “Preserving records, knowledge and memory over decades and more, lessons from the NEA RK&M Project”, *Safety of Long-term Interim Storage Facilities (Proc. Workshop, Munich, 2013)*, OECD, Paris (2013) 285–297.

VERHEUL, I., *Networking for Digital Preservation: Current Practice in 15 National Libraries*, K.G. Saur, Munich (2006).

المساهمون في الصياغة والاستعراض

الوكالة الدولية للطاقة الذرية	Bevilacqua, A.
مختبر أيداهو الوطني، الولايات المتحدة الأمريكية	Carlsen, B.
مجموعة شركات AREVA، فرنسا	Chiguer, M.
الوكالة الدولية للطاقة الذرية	González-Espartero, A.
Svensk Kärnbränslehantering AB، السويد	Grahn, P.
المعهد المركزي لبحوث صناعة القوى الكهربائية، اليابان	Saegusa, T.
اللجنة الرقابية النووية، الولايات المتحدة الأمريكية	Sampson, M.
الوكالة الاتحادية للطاقة الذرية (روزاتوم)، الاتحاد الروسي	Seelev, I.
مجموعة شركات AREVA، ألمانيا	Wasinger, K.
اللجنة الرقابية النووية، الولايات المتحدة الأمريكية	Waters, M.
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung، ألمانيا	Wolff, D.

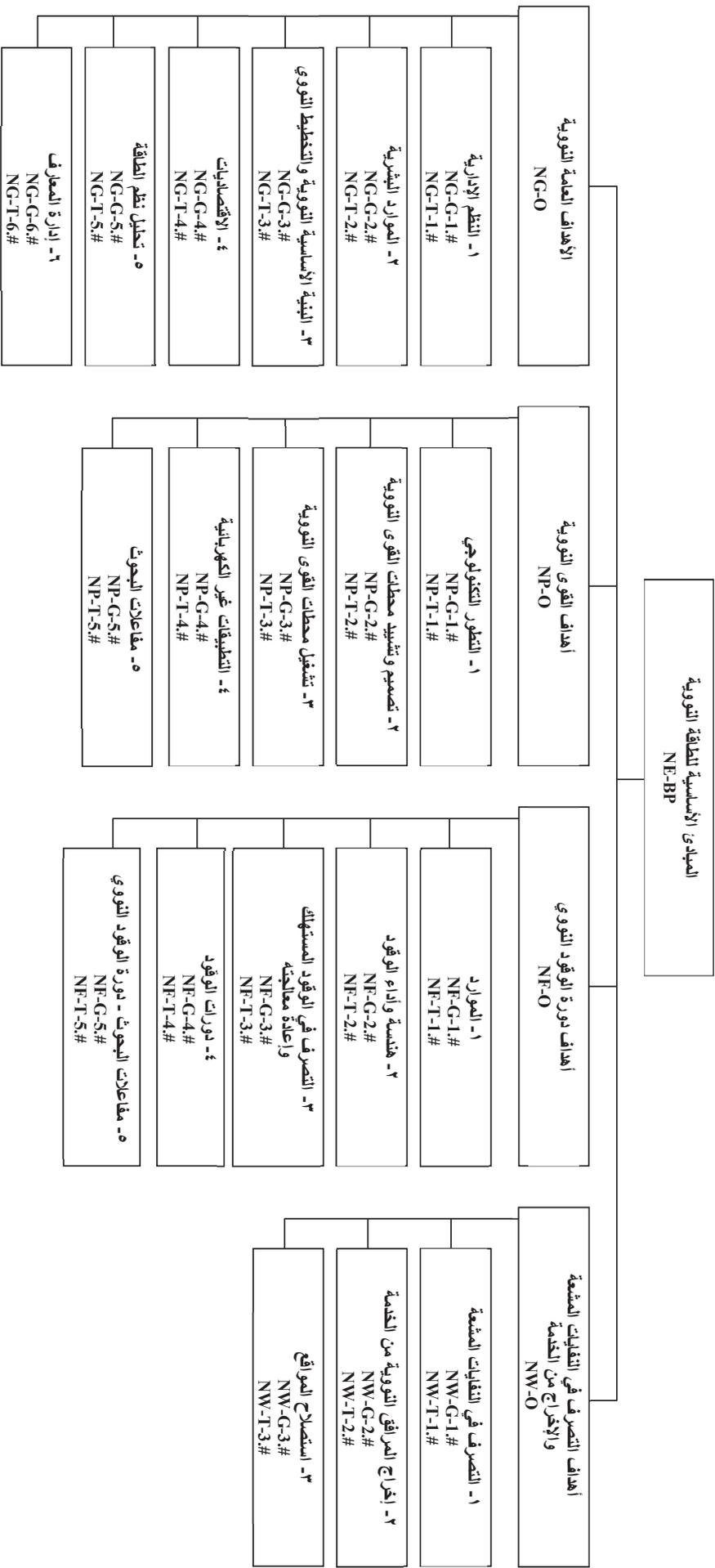
اجتماعات تقنية

فيينا، النمسا: ٢٦-٢٨ نيسان/أبريل ٢٠١١، ٢٢-٢٤ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢

اجتماعات للاستشاريين

فيينا، النمسا: ١١-١٣ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٠؛ ٢٦-٢٩ نيسان/أبريل ٢٠١١
١٦-١٩ تموز/يوليه ٢٠١٢، ٢٢-٢٥ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٢، ٢٧-٢٩ أيار/مايو ٢٠١٣

هيكل سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة



متشورات عامة نووية (NG)، والأداة والبنية الأساسية النووية والتخطيط النووي (الموضوع ٣)، 1#
القوى النووية (NP)، والتقارير (T)، ومخلفات البحوث (الموضوع ٥)، 4#
الوقود النووي (NF)، والتقارير (T)، والتصريف في الوقود المستهلك وإعادة معالجته (الموضوع ٣)، 6#
التصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة (NW)، والأداة
النفايات المشعة (الموضوع ١)، 1#

المبادئ

NG-G-3.1
NP-T-5.4
NF-T-3.6
NW-G-1.1

دليل

المبادئ الأساسية
BP
الأهداف
O
الأداة
G
التقارير التقنية
T
التسميات الموضوعية
Nos 1-6
رقم الدليل أو التقرير (١ و ٢ و ٣ و ٤ الخ)
#



طلب شراء المنشورات محلياً

يمكن شراء المنشورات المسعّرة الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية من المصادر المذكورة في القائمة أدناه أو من المكتبات المحلية الكبرى.

أمّا المنشورات غير المسعّرة فينبغي توجيه طلبات شرائها إلى الوكالة مباشرة. وترد تفاصيل الاتصال في آخر هذه القائمة.

أمريكا الشمالية

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, USA

Telephone: +1 800 462 6420 • Fax: +1 800 338 4550

Email: orders@rowman.com • Web site: www.rowman.com/bernan

سائر بلدان العالم

برجاء الاتصال بالموثّد المحلي المفضّل لديكم، أو بالموثّع الرئيسي الخاص بنا:

Eurospan Group

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

London EC1R 5DB

United Kingdom

الطلبات التجارية والاستفسارات:

Telephone: +44 (0)176 760 4972 • Fax: +44 (0)176 760 1640

Email: eurospan@turpin-distribution.com

الطلبات الفردية:

www.eurospanbookstore.com/iaea

للحصول على مزيد من المعلومات:

Telephone: +44 (0)207 240 0856 • Fax: +44 (0)207 379 0609

Email: info@eurospangroup.com • Web site: www.eurospangroup.com

ويمكن توجيه طلبات شراء المنشورات، المسعّرة وغير المسعّرة على السواء، مباشرة إلى العنوان التالي:

Marketing and Sales Unit

International Atomic Energy Agency

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

Telephone: +43 1 2600 22529 or 22530 • Fax: +43 1 26007 22529

Email: sales.publications@iaea.org • Web site: www.iaea.org/publications

