IAEA-TECDOC-1862

سلسلة الوثائق التقنية الصادرة عن الوكالة

IAEA-TECDOC-1862

سلوك وقود مفاعلات القوى المستهلك أثناء التخزين

مقتطفات من التقارير النهائية للمشاريع البحثية المنسقة حول سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك أثناء التخزين (مشاريع بفاست: سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك أثناء التخزين (BEFAST) الأول إلى الثالث) وتقييم وبحوث أداء الوقود المستهلك (مشاريع سبار: تقييم وأداء الوقود المستهلك (SPAR) الأول إلى الثالث) — ١٩٨١-٢٠١٤

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

معايير الأمان الصادرة عن الوكالة

الوكالة مختصة، بموجب أحكام المادة الثالثة من نظامها الأساسي، بأن تضع أو تعتمد معايير أمان بقصد حماية الصحة والتقليل إلى أدنى حد من الأخطار على الأرواح والممتلكات، وأن تتخذ ترتيبات لتطبيق هذه المعايير.

وتَصدُر المنشورات التي تضع الوكالة بواسطتها هذه المعايير ضمن **سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة**. وتشمل هذه السلسلة الأمان النووي والأمان الإشعاعي وأمان النقل وأمان النفايات. وتصنَّف المنشورات الصادرة ضمن هذه السلسلة إلى فئات، وهي: **أساسيات الأمان**، و**متطلبات الأمان**، و**أدلة الأمان**.

ويعرض موقع شبكة الإنترنت الخاص بالوكالة، الوارد أدناه، معلومات عن برنامج معايير الأمان الصادرة عن الوكالة

www.iaea.org/ar/almawarid/maeayir-al-aman

ويوفر هذا الموقع نصوص معايير الأمان المنشورة ومسوداتها باللغة الانكليزية. كما تتوافر نصوص معايير الأمان الصادرة باللغات الإسبانية والروسية والصينية والعربية والفرنسية، بالإضافة إلى مسرد مصطلحات الأمان الذي وضعته الوكالة وتقرير قيد الإعداد عن حالة معايير الأمان. وللحصول على مزيد من المعلومات، يُرجى الاتصال بالوكالة على العنوان التالي:

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

والدعوة موجَّهة إلى جميع مستخدمي معايير الأمان الصادرة عن الوكالة لإبلاغها بالخبرة المستفادة من استخدامها (كأساس للوائح الوطنية واستعراضات الأمان والدورات التدريبية مثلاً)، بما يكفل أن تظل هذه المعايير قادرة على تلبية احتياجات المستخدمين. ويمكن توفير المعلومات عن طريق موقع الوكالة على شبكة الإنترنت أو بالبريد، كما هو مبيَّن أعلاه، أو بواسطة البريد الإلكتروني على العنوان التالي: Official.Mail@iaea.org.

المنشورات ذات الصلة

تتخذ الوكالة ترتيبات لتطبيق معايير الأمان، وبموجب أحكام المادة الثالثة والفقرة جيم من المادة الثامنة من نظامها الأساسي، توفر معلومات بشأن الأنشطة النووية السلمية وتيسِّر تبادلها وتقوم، لهذا الغرض، بدور الوسيط بين دولها الأعضاء.

وتَصدُر تقارير عن الأمان في مجال الأنشطة النووية بوصفها **تقارير أمان** توفر أمثلة عملية وأساليب تفصيلية يمكن استخدامها دعماً لمعايير الأمان.

وتصدر الوكالة منشورات أخرى متعلقة بالأمان مثل **منشورات التأهب والتصدي للطوارئ**، **وتقارير التقييم الإشعاعي**، و**تقارير الفريق الدولي للأمان النووي**، و**التقارير التقنية**، و**الوثائق التقنية**. كما تصدر الوكالة تقارير عن الحوادث الإشعاعية، وأدلَّة خاصة بالتدريب وأدلَّة عملية، وغير ذلك من المنشورات الخاصة المتعلقة بمجال الأمان.

وتَصدر منشورات متعلقة بالأمن ضمن **سلسلة الوكالة الخاصة بالأمن النووي**.

وتشمل **سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة** منشورات إعلامية لتشجيع ودعم أنشطة البحث والتطوير المتعلقة بالطاقة النووية وتطبيقها العملي للأغراض السلمية. وتشمل تقارير وأدلة عن حالة التكنولوجيا وأوجه التقدم المحرز فيها، وعن الخبرة المكتسبة والممارسات الجيّدة والأمثلة العملية في مجالات القوى النووية، ودورة الوقود النووي، والتصرف في النفايات المشعَّة والإخراج من الخدمة.

سلوك وقود مفاعلات الوقود المستهلك
أثناء التخزين

الدول الأعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية

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

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

وثيقة الوكالة التقنية رقم ١٨٦٢

سلوك وقود مفاعلات القوى المستهلك أثناء التخزين

مقتطفات من التقارير النهائية للمشاريع البحثية المنسقة حول سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك أثناء التخزين

(مشاريع بفاست: سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك أثناء التخزين (BEFAST) الأول إلى الثالث)

وتقييم وبحوث أداء الوقود المستهلك (مشاريع سبار: تقييم وأداء الوقود المستهلك (SPAR) الأول إلى الثالث) — ١٩٨١-٢٠١٤

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
فيينا، ٢٠٢١

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 كليًّا أو جزئيًّا؛ ويخضع هذا الإذن عادة لاتفاقات متعلقة برسوم الجعالة الأدبية. ويُرحَّب بأية اقتراحات تخصُّ الاستنساخ والترجمة لأغراض غير تجارية، وسيُنظَر 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
https://www.iaea.org/publications

للحصول على المزيد من المعلومات عن هذا المنشور، يرجى الاتصال على العنوان التالي:

Nuclear Fuel Cycle and Materials Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
Email: Official.Mail@iaea.org

حقوق النشر محفوظة للوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٢١

طُبع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
حزيران/يونيه ٢٠٢١

ISBN 978-92-0-629021-7
ISSN 2789-0643

توطئة

يتأثر الوقود النووي، أثناء استخدامه داخل المفاعل، بظواهر مثل التلف النيوتروني يمكن أن تسبّب تغيُّرات تطوُّرية في بنيته. ويمكن أن تؤثِّر هذه التغيُّرات في كيفية سلوك مجمَّعات الوقود أو حزم الوقود أثناء الخطوات اللاحقة من دورة الوقود. وحالما يُستهلك الوقود — بمعنى أنه لم يعد يدعم الانشطار الكفء داخل المفاعل — يُفرَّغ من قلب المفاعل بصفة دائمة ويُدار حتى التخلص النهائي منه، الذي يمكن أن يكون إما إعادة التدوير أو التخلص المباشر، تبعاً للسياسة المعمول بها بشأن دورة الوقود.

كان الأساس الأصلي لدورة الوقود هو إعادة معالجة الوقود المستهلك وإعادة تدويره بدعم من التخزين القصير الأمد قبل القيام بأنشطة إعادة المعالجة. ومع حالات التأخير في توافر إعادة المعالجة، أو حالات اتخاذ قرارات بعدم إعادة المعالجة وإعادة التدوير، ازدادت مدة تخزين الوقود المستهلك ازدياداً مطرداً، فأفضت إلى الحاجة إلى فهم كيفية سلوك الوقود المستهلك في بيئة التخزين المختارة؛ والحاجة إلى سعة تخزين إضافية عندما يمتلئ مرفق التخزين في المفاعل؛ والحاجة إلى فهم كيفية سلوك الوقود وسلوك النظام الجديد. ولتلبية هذه الاحتياجات، اضطلعت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (الوكالة) بمشاريع بحثية منسَّقة حول سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك أثناء التخزين (بفاست) (BEFAST) وتقييم وبحوث أداء الوقود المستهلك (سبار) (SPAR)، وأبلغت عن النتائج في سلسلة من المنشورات. وعلى الرغم من أنه تم بحث عدد من القضايا المهمة في المشاريع البحثية المنسقة فإن المشاريع قَدَّمت، في المقام الأول، وصفاً للأداء الراهن والأنشطة البحثية والسلوك المتوقع للوقود المستهلك والمواد المستهلكة أثناء التخزين الرطب والتخزين الجاف.

وفي هذا المنشور، استُخلصت الخبرات التي أُبلغ عنها في منشورات مشاريع بفاست وسبار على مدى الأعوام الثلاثين الماضية، وروجعت للتأكد من استمرار ملاءمتها، وأُدمجت معاً في مصدر واحد. ويُتوقع أن يكون المنشور مفيداً بصفة خاصة للعاملين على إعداد تقييمات الأمان.

وتُعرب الوكالة عن امتنانها للمساعدة التي قدمها كل من ب. هانسُن (الولايات المتحدة الأمريكية)، وأ. هيلير (المملكة المتحدة)، وهـ. إيسار (فرنسا)، وأ. يوسُفي (ألمانيا)، وج. كيفين (المملكة المتحدة)، وأ. ماكيلس (الولايات المتحدة الأمريكية)، ول. ماكمانيمان (المملكة المتحدة)، وف. تاكاتس (هنغاريا) في صياغة هذا المنشور ومراجعته. وكان الموظف المسؤول عن هذا المنشور في الوكالة هو ب. ستاندرينغ من شعبة دورة الوقود النووي وتكنولوجيا النفايات.

ملحوظة تحريرية

تم إعداد هذا المنشور استناداً إلى المواد الأصلية كما قدَّمها المساهمون ولم يتم تحريره من جانب موظفي هيئة التحرير التابعة للوكالة. وتظلُّ الآراء المعبَّر عنها من مسؤولية المساهمين وهي لا تُمثِّل بالضرورة آراء الوكالة أو دولها الأعضاء.

ولا تتحمَّل الوكالة ولا دولها الأعضاء أي مسؤولية عن العواقب التي قد تنشأ عن استخدام هذا المنشور. ولا يتناول هذا المنشور مسائل تتعلق بالمسؤولية، قانونية كانت أم غير قانونية، عن أفعال أو الامتناع عن أفعال من جانب أي شخص.

واستخدام تسميات معيَّنة لبلدان أو أقاليم لا يعني ضمناً إصدار أي 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 أي نية لانتهاك حقوق الملكية، كما لا ينبغي أن يُفسَّر على أنه تأييد أو توصية من جانب الوكالة.

والمؤلِّفون مسؤولون عن استصدار الإذن اللازم الذي يخوِّل الوكالة إعادة إصدار أو ترجمة أو استخدام مواد مستقاة من مصادر محميَّة بالفعل بموجب حقوق التأليف والنشر.

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

المحتويات

١- مقدِّمة ١

١-١- معلومات أساسية: لمحة عامة عن المشاريع البحثية المنسقة بشأن سلوك الوقود المستهلك أثناء التخزين الطويل الأمد ١
١-١-١- معايير الأمان المتعلقة بتخزين الوقود المستهلك ٣
١-٢- الهدف ٣
١-٣- النطاق ٤

٢- الحالة العالمية وسياق النشر ٦

٢-١- عناصر دورة الوقود ٦
٢-٢- تخزين الوقود المستهلك ٨
٢-٣- تصاميم مجمَّعات الوقود ١٠
٢-٣-١- مفاعلات الماء الخفيف ١٠
٢-٣-٢- مفاعلات كاندو ١١
٢-٣-٣- المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات ١١
٢-٣-٤- المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء ١٢
٢-٣-٥- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء ١٢
٢-٣-٦- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز ١٣

٣- لمحة عامة عن تكنولوجيات تخزين الوقود المستهلك ١٤

٣-١- تكنولوجيا التخزين الرطب ١٤
٣-٢- تكنولوجيات التخزين الجاف ١٤
٣-٢-١- الأقبية ١٦
٣-٢-٢- الصوامع أو العلب الخرسانية ١٨
٣-٢-٣- نظم البراميل (المعدنية والخرسانية) ١٩

٤- آليات تدهور الوقود المستهلك (في التخزين الرطب والتخزين الجاف) ٢٢

٤-١- مفاعلات الماء الخفيف ٢٢
٤-١-١- التخزين الرطب ٢٢
٤-١-٢- التخزين الجاف ٢٤
٤-١-٣- التحميل الصدمي على الوقود المستهلك ٤٧
٤-٢- وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز ٥٥
٤-٣- وقود مفاعلات ماغنوكس ٥٧
٤-٣-١- التخزين الرطب ٥٧
٤-٣-٢- التخزين الجاف ٥٧
٤-٤- وقود مفاعلات كاندو ٥٧
٤-٤-١- التخزين الرطب ٥٧
٤-٤-٢- التخزين الجاف ٥٧
٤-٥- المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٤٠/١٠٠٠ ..... ٥٩
٤-٥-١- التخزين الرطب ٥٩
٤-٥-٢- التخزين الجاف ٥٩

٥- سلوك الوقود في التخزين الرطب ٦١

٥-١- الأداء العام ٦١
٥-٢- وقود مفاعلات الماء الخفيف (مفاعلات الماء المغلي، مفاعلات الماء المضغوط) ٦١
٥-٣- وقود مفاعلات كاندو ٦٣
٥-٤- وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء ٦٣

٥-٥- وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز ٦٤
٥-٦- وقود مفاعلات ماغنوكس..... ٦٤

٦- سلوك الوقود في التخزين الجاف..... ٦٦

٦-١- الأداء العام..... ٦٦
٦-٢- وقود مفاعلات الماء الخفيف (مفاعلات الماء المغلي، مفاعلات الماء المضغوط) ٦٧
٦-٣- وقود مفاعلات كاندو..... ٧٠
٦-٤- وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات ٧٠
٦-٥- وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء..... ٧١
٦-٦- وقود مفاعلات ماغنوكس..... ٧١
٦-٧- وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز ٧١

٧- هياكل التخزين الرطب والجاف ٧٢

٧-١- المواد ٧٢
٧-١-١- الفولاذ المقاوم للصدأ ٧٢
٧-١-٢- سبائك الألومنيوم..... ٧٢
٧-١-٣- استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ المعالج بالبورات أو سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات والمواد المركَّبة كمواد ممتصة للنيوترونات ٧٣
٧-١-٤- الخرسانة..... ٧٣
٧-١-٥- الحديد الزهر..... ٧٤
٧-١-٦- الفولاذ الكربوني..... ٧٤
٧-١-٧- البوليمرات..... ٧٤
٧-٢- آليات التدهور ٧٥
٧-٢-١- آليات التدهور في المعادن..... ٧٥
٧-٢-٢- تدهور الخرسانة..... ٧٦
٧-٢-٣- تدهور البوليمرات..... ٧٧
٧-٣- الاستقصاءات ونتائجها..... ٧٧
٧-٣-١- الفولاذ المقاوم للصدأ ٧٨
٧-٣-٢- الفولاذ المقاوم للصدأ والمعالج بالبورات ٨٠
٧-٣-٣- سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات..... ٨١
٧-٣-٤- الخرسانة..... ٨١
٧-٣-٥- البوليمرات..... ٨٣
٧-٣-٦- السِّدادات المُحكمة المعدنية..... ٨٥

٨- الرصد (في التخزين الرطب والجاف)..... ٨٨

٨-١- أساليب تأكيد الأداء..... ٨٨
٨-١-١- تكنولوجيات تأكيد استمرار سلامة الوقود المستهلك في التخزين الرطب..... ٩٠
٨-١-٢- تكنولوجيات تأكيد سلامة الوقود المستهلك في التخزين الجاف ٩٠
٨-١-٣- تكنولوجيات تأكيد سلامة نظم التخزين ٩١

٩- سلامة الوقود (الوقود المسرِّب/المصاب بتلف) ٩٣

٩-١- تعريف ومعايير سلامة الوقود..... ٩٣
٩-٢- أمثلة على الوقود المصاب بتلف..... ٩٣
٩-٢-١- قضبان الوقود المصابة بتلف ٩٣
٩-٢-٢- الأجزاء الهيكلية المصابة بتلف ٩٣
٩-٢-٣- إعادة تشكيل الوقود المصاب بتلف ٩٥
٩-٣- إثبات سلامة الوقود المستهلك ٩٥
٩-٤- التجربة في تخزين الوقود المصاب بتلف..... ٩٦

٩-٤-١- التخزين الرطب ٩٦
٩-٤-٢- التخزين الجاف ٩٧

١٠- الاستنتاجات ٩٩

١٠-١- أداء الوقود المستهلك في التخزين الرطب والتحزين الجاف ٩٩
١٠-٢- آليات تدهور الوقود المستهلك (في التخزين الرطب والتخزين الجاف) ٩٩
١٠-٣- هياكل التخزين الرطب والتخزين الجاف ١٠٠
١٠-٤- الرصد (في التخزين الرطب والتخزين الجاف) ١٠٠
١٠-٥- سلامة الوقود (الوقود المسرّب/المصاب بتلف) ١٠٠

المراجع ١٠٣

قائمة المختصرات ١٠٨

المساهمون في الصياغة والاستعراض ١١٠

١- مقدِّمة

في عام ١٩٧٩، استهلت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (الوكالة) دراسةً استقصائيةً للتجربة العالمية بشأن الوقود المستهلك للمفاعلات المبرَّدة بالماء أثناء التخزين الرطب. ونُشرت نتائج هذه الدراسة الاستقصائية لاحقاً في منشور في سلسلة التقارير التقنية [١]. وكانت النتائج الرئيسية للدراسة الاستقصائية هي التالية:

- توجد خبرة في مجال التخزين الرطب لوقود مفاعلات الماء الخفيف ووقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط، لفترات تصل إلى ٢٠ عاماً للوقود المنخفض الحرق؛
- ليس من المتوقع وجود صعوبات كبيرة في تقدير سلوك الوقود المستهلك أثناء التخزين الرطب لفترات أطول وبمعدلات حرق أعلى؛
- مع ذلك، ينبغي مواصلة المراقبة والاستقصاء لتقييم سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك العالية الحرق خلال فترات التخزين الطويلة، ولتأكيد التجربة الحالية والإيجابية.

وأصبحت هذه النتائج أساس بدء أول مشروع بحثي منسق للوكالة بشأن سلوك الوقود المستهلك أثناء التخزين الطويل الأمد.

وعند بدء المشروع البحثي المنسق، كانت مرافق التخزين الجاف المرخصة العاملة الوحيدة الخاصة بمفاعلات القوى هي تلك الموجودة في محطة ويلفا للقوى النووية في المملكة المتحدة. وكانت مرافق التخزين الجاف هذه، الخاصة بوقود المغنيسيوم غير المؤكسِد (وقود ماغنوكس)، تتكون من ثلاثة أقبية مبرَّدة بثاني أكسيد الكربون (١٩٧١) وقبوين مبرَّدين بالهواء (١٩٧٩). ويجري حاليًّا إخراج مرافق التخزين هذه من الخدمة بعد إغلاق محطة ويلفا للقوى النووية في ٣٠ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥.

بالإضافة إلى ذلك، كان هناك اهتمام كبير بالتخزين الجاف لأنواع الوقود المكسوة بسبيكة الزركونيوم، كما يتضح من العديد من العمليات الإيضاحية النشطة وبرامج الأبحاث المختبرية النشطة التي كانت جارية في ألمانيا وكندا والنمسا والولايات المتحدة الأمريكية واليابان [٢].

لذلك كانت الجهود المبذولة في بداية المشروع تهدف في المقام الأول إلى الحفاظ على مراقبة تكنولوجية للأداء المستمر للوقود المستهلك المخزون تخزيناً رطباً (مع اتجاه نحو حرق أعلى للوقود)، واكتساب فهم أفضل لكيفية سلوك الوقود المستهلك المخزون تخزيناً جافًّا ولتطوُّر نظم التخزين الجاف [٢]. وكانت الأسئلة التقنية التي طُرحت في المشروع البحثي المنسق الأول [٣] فيما يتعلق بالتخزين الجاف هي التالية:

- ما هي وسائط التخزين المناسبة؟
- ما هي درجة الحرارة القصوى للكسوة التي دونها لن يحدث قدر كبير من أعطاب الكسوة؟
- إلى أي مدى يمكن التنبؤ بدرجة حرارة الكسوة لضمان عدم تجاوز حد درجة الحرارة؟

١-١- معلومات أساسية: لمحة عامة عن المشاريع البحثية المنسقة بشأن سلوك الوقود المستهلك أثناء التخزين الطويل الأمد

تم الحصول على المعلومات الواردة في هذا القسم من المرجعين [٢، ٤]. ويُشار في النص إلى المراجع الأخرى حسب الاقتضاء.

تنظم الوكالة منذ عام ١٩٨١ مشاريع بحثية منسقة بشأن سلوك وقود مفاعلات القوى المستهلك أثناء التخزين الطويل الأمد (أو الممتد). وسُمِّيت البرامج في البداية مشاريع بفاست (BEFAST) الأول إلى الثالث، ولاحقاً مشاريع سبار (SPAR) الأول إلى الثالث، على التوالي. وعند إنجاز كل مشروع، كان يُنشر ملخص للنتائج في منشور تقني للوكالة [٢-٧].

كانت الأهداف العامة للمشاريع البحثية المنسقة هي تطوير قاعدة معرفية تقنية حول التخزين الطويل الأمد للوقود المستهلك لمفاعلات القوى، من خلال تقييم الخبرة التشغيلية للدول الأعضاء المشاركة والبحوث التي تقوم بها، واستنباط التنبؤات بشأن سلوك الوقود المستهلك على مدى فترات طويلة من الزمن. وتضمنت أهداف البحث على وجه التحديد ما يلي:

- إجراء دراسة استقصائية في الوقت المناسب للخبرات المتراكمة حول تخزين الوقود المستهلك في الدول الأعضاء المشاركة؛
- بحث الآليات المحتملة لتدهور الوقود ومكونات التخزين في ظروف التخزين الرطب والتخزين الجاف؛
- تقييم التأثير المحتمل للتخزين المؤقت على أنشطة التصرف في الوقود المستهلك اللاحقة (مثل المناولة والنقل)؛
- تطوير القدرة على تقييم تأثير آليات التدهور المحتملة على الوقود المستهلك ومكونات التخزين على مدى فترات طويلة من الزمن؛
- تبادل النتائج المنبثقة من برامج مراقبة ورصد مرافق تخزين الوقود المستهلك؛
- إيجاد تآزر بين المشاريع البحثية التي تقوم بها الدول الأعضاء المشاركة؛
- تسهيل نقل التكنولوجيا من خلال توثيق الأسس التقنية لتخزين الوقود المستهلك.

شاركَت في المرحلة الأولى من مشروع بفاست، 'سلوك الوقود المستهلك ومكونات مرافق التخزين أثناء التخزين الطويل الأمد' (١٩٨١-١٩٨٦)، ١٢ منظمة من ١١ بلداً، هي: اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية، وتشيكوسلوفاكيا، وجمهورية ألمانيا الاتحادية، وجمهورية ألمانيا الديمقراطية، والسويد، وفنلندا، وكندا، والنمسا، وهنغاريا، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان.

وشاركت في برنامج لاحق هو بفاست الثاني، نُفِّذ خلال الأعوام ١٩٨٦-١٩٩١، ١٦ منظمة من ١٣ بلداً، هي: اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية (٢)، والأرجنتين، وإيطاليا، وجمهورية ألمانيا الاتحادية، وجمهورية ألمانيا الديمقراطية، وجمهورية كوريا، والسويد، وفنلندا، وكندا (٢)، والمملكة المتحدة (٢)، وهنغاريا، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان.

وشاركت في برنامج بفاست الثالث، الذي نُفِّذ خلال السنوات ١٩٩١-١٩٩٦، ١٥ منظمة من ١٢ بلداً، هي: الاتحاد الروسي (٢)، وإسبانيا، وألمانيا، وجمهورية كوريا، وسلوفاكيا، وفرنسا، وفنلندا، وكندا (٢)، والمملكة المتحدة (٢)، وهنغاريا، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان. وكان هناك أيضاً مراقب من السويد.

وخلال مشاريع بفاست البحثية الثلاثة، ساهمت البلدان المشاركة بنتائج البحث والتطوير الخاصة بها المتعلقة بالمسائل الأساسية لتخزين الوقود المستهلك.

وقرب نهاية مشروع بفاست الثالث، أصبح من الواضح أن مكوّن البحث والتطوير في المشروع كان يتناقص باطراد؛ وكان يتم التركيز بقدر أكبر على تشغيل وتنفيذ تكنولوجيا التخزين. وكانت تقنية التخزين (لا سيما التخزين الجاف) تشهد تطوراً سريعاً: فكانت تغييرات جديدة في تصميم الوقود والمواد آخذة في التدفق، وكان الحرق المستهدف عند التفريغ يتزايد باطراد؛ وعلاوة على ذلك، كانت مُدد التخزين المتوقعة تتزايد باطراد. ومع ازدياد الحرق، جاء ازدياد أرصدة غازات الانشطار ونواتج الانشطار، وازدياد إجهادات الغلاف (الكسوة)، وازدياد تأكسد الكسوة وتهدرُدها. وبسبب التغيرات التي برزت خلال مسار مشروع بفاست الثالث، اقتُرح مشروع لاحق لمعالجة آثار هذه المَعلَمات الجديدة على التخزين الطويل الأمد ولتحديد عواقبها على العمليات اللاحقة، لا سيما المناولة والنقل.

وشاركت في المرحلة الأولى من مشروع الوكالة البحثي المنسق المعنون 'تقييم وبحوث أداء الوقود المستهلك' (سبار) (١٩٩٧-٢٠٠٢) ١١ منظمة من ١٠ بلدان، هي: الاتحاد الروسي، وإسبانيا، وألمانيا، وجمهورية كوريا، وفرنسا، وكندا (٢)، وهنغاريا، والمملكة المتحدة، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان. وشاركت السويد في المشروع بصفة مراقب.

وشاركت في المرحلة الثانية من مشروع الوكالة البحثي المنسق سبار الثاني (٢٠٠٤-٢٠٠٨) المفوضية الأوروبية وكذلك ١١ منظمة أخرى من ١٠ بلدان، هي: الأرجنتين (انضمت لاحقاً)، وإسبانيا، وألمانيا، وجمهورية كوريا (لفترة محدودة)، وسلوفاكيا، وفرنسا، وكندا، وهنغاريا، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان (٢). وشاركت السويد والمملكة المتحدة في المشروع بصفة مراقبين نشطين.

وشاركت في المرحلة الثالثة من مشروع الوكالة البحثي المنسق سبار الثالث (٢٠٠٩-٢٠١٤) المفوضية الأوروبية و١١ منظمة أخرى من ٩ بلدان، هي: الأرجنتين، وإسبانيا، وألمانيا، وجمهورية كوريا، وسلوفاكيا، وفرنسا، وهنغاريا، والولايات المتحدة الأمريكية (٢)، واليابان (٢). وشاركت سويسرا والمملكة المتحدة في البرنامج بصفة مراقبين نشطين.

وإجمالاً، شاركت ٢١ دولة ومنظمة دولية واحدة في واحد أو أكثر من المشاريع البحثية المنسقة.

يرد في الجدول ١ ملخص للمواضيع الرئيسية بشأن كل من التخزين الرطب والتخزين الجاف خلال جميع المشاريع البحثية المنسقة الستة. ويقدم الجدول سجلاً للتحول في التركيز بين مراحل المشروع المختلفة بين عامي ١٩٨١ و٢٠١٤.

١-١-١- معايير الأمان المتعلقة بتخزين الوقود المستهلك

تبعاً لتصنيف معايير الأمان، يبدأ التسلسل الهرمي لمعايير الأمان المتعلقة بتخزين الوقود المستهلك بمبادئ الأمان الأساسية الشاملة [٨]، ويمر عبر متطلبات الأمان العامة المنطبقة على جميع مرافق وأنشطة دورة الوقود النووي، الواردة في المنشورات المعنية بالتصرف في النفايات المشعة تمهيدا للتخلص منها [٩] ومتطلبات الأمان المحددة لأمان مرافق دورة الوقود [١٠]، وينتهي بأدلة الأمان التي تخص مواضيع محددة. وتتضمن أدلة الأمان ذات الصلة التي تخص مواضيع محددة ما يلي: التصرف في النفايات المشعة المتأتية من مرافق دورة الوقود النووي تمهيداً للتخلص منها [١١]؛ وأمان مرافق البحث والتطوير الخاصة بدورة الوقود النووي [١٢]؛ وتصميم نظم مناولة وتخزين الوقود لمحطات القوى النووية [١٣]؛ وتخزين الوقود النووي المستهلك [١٤].

علاوة على ذلك، هناك معايير أمان مرتبطة بنظم الإدارة وبالوقاية من الإشعاعات. وهي تشمل: نظام الإدارة لمعالجة النفايات المشعة ومناولتها وتخزينها [١٥]؛ والوقاية من الإشعاعات والتصرف في النفايات المشعة في تشغيل محطات القوى النووية [١٦].

١-٢- الهدف

في عام ٢٠١٣، أوصى الفريق العامل التقني المعني بخيارات دورة الوقود النووي والتصرف في الوقود المستهلك (الفريق العامل التقني) بدمج التجربة المبلغ عنها في مشاريع بفاست وسبار البحثية المنسقة في منشور واحد.

وينفذ هذا المنشور تلك التوصية، ويتضمن أيضاً التجارب المستقاة من المرحلة الثالثة من مشروع سبار، التي كانت عند تقديم التوصية في طور وضعها في صيغتها النهائية.

وقد استُعرضت المعلومات الواردة في الوثائق التقنية [٢-٧] لمشروعي بفاست وسبار، ولم يُضمَّن سوى أوثق المعلومات صلة بسياق تنفيذ هذه التكنولوجيا حاليًّا. وعند الاقتضاء، يُشار إلى الوثائق التقنية المفردة التي تحتوي على أوصاف أكثر تفصيلاً لمشاريع البحث قد تهم القارئ.

لم تتناول الوثائق التقنية لمشروعي بفاست وسبار إلا فترات التخزين في المرافق الموجودة لدى المفاعلات وفي المرافق الموجودة خارج المفاعلات. وتتضمن دورة الوقود أيضاً بعض مكونات النقل. ولا يُبلغ هنا عن سلوك الوقود في ظل ظروف

النقل، بيد أنه جرى النظر ضمن المشروعين في بعض جوانب النقل المتعلقة بالوقود المستهلك، مثل تأثير الوقود [٧] ونقل الوقود المصاب بتلف [٢].

١-٣- النطاق

يركز هذا المنشور على تخزين الوقود النووي المستهلك المتأتي من مفاعلات القوى.

ولا يتناول المنشور الوقود المستهلك المتأتي من بعض المفاعلات المفردة 'غير المألوفة'، التي تعمل في الدول الأعضاء أو كانت تعمل فيها، والوقود المستهلك المتأتي من مفاعلات البحوث، والتخزين المؤقت للبلوتونيوم المفصول واليورانيوم المعاد معالجته والنفايات المزجَّجة.

الجدول ١- مواضيع البحث في المشاريع البحثية المنسقة

السلوك في الأمد الطويل	بفاست الأول	بفاست الثاني	بفاست الثالث	سبار الأول	سبار الثاني	سبار الثالث	المراقبة	بفاست الأول	بفاست الثاني	بفاست الثالث	سبار الأول	سبار الثاني	سبار الثالث	المرافق والتشغيل	بفاست الأول	بفاست الثاني	بفاست الثالث	سبار الأول	سبار الثاني	سبار الثالث
جانب المواد (الكسوة والمكونات)	X			X	X	X	الرصد؛ التخزين الرطب + الجاف - البيئة - المكونات - مجمَّعات الوقود - معدل الجرعة للعاملين			X	X	X	X	تعزيز السعة - الأرفف العالية الكثافة - إعادة ترتيب الأرفف - الرصف المزدوج - سائل التبريد المخفَّف - دمج القضبان		X					
آليات التدهور ونماذجه	X	X		X	X	X	ظروف الوقود - التشغيل - التصنيع - التكنولوجيا - قضبان ومجمَّعات الوقود المعيبة		X	X	X	X	X	تغيير الأساليب التخزين الرطب - الجاف		X	X	X	X	X
التحقُّق		X	X	X	X	X	الأنواع المختلفة من المفاعلات		X	X	X	X	X	مناولة الوقود الشديد التلف		X	X		X	X
- التجربة - الخبرة														أداء النظام	X	X	X	X	X	X

٢- الحالة العالمية وسياق النشر

٢-١- عناصر دورة الوقود

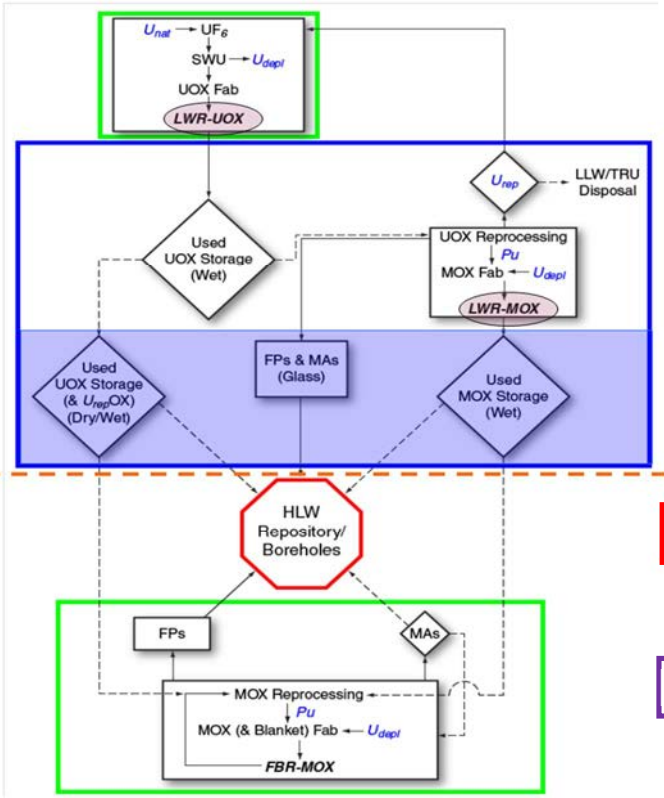
وُضع نموذج مفاهيمي لتمثيل العناصر القائمة والمتوقعة والمحتملة (المستقبلية) لدورة الوقود النووي. وتشتمل العناصر الأربعة الرئيسية على (١) مجموعة قوى المفاعلات الحرارية؛ (٢) مجموعة التصرف في الوقود المستهلك؛ (٣) مسار التخلص الجيولوجي؛ (٤) مجموعة قوى المفاعلات المتقدمة [١٧]. وهناك خيارات متعددة ضمن المجموعتين الأوليين (قوى المفاعلات الحرارية والتصرف في الوقود المستهلك) مستخدمة عالميًّا أو إقليميًّا على نطاق تجاري. ولا يوجد حاليًّا أي مستودع عامل للتخلص الجيولوجي من الوقود المستهلك أو النفايات القوية الإشعاع المعاد معالجتها، ولكن يوجد تقدم ظاهر في هذا المجال في عدد قليل من البلدان، مثل السويد وفرنسا وفنلندا[١]. وبالمثل، لا يوجد حاليًّا توليد تجاري مهم للقوى بواسطة المفاعلات المتقدمة، وإن كان الاتحاد الروسي قد نجح في تشغيل مفاعل سريع مبرَّد بالصوديوم من نوع BN-600 في بيلوياركس (الوحدة ٣) منذ عام ١٩٨٠، وبدأ مؤخراً تشغيل مفاعل سريع من نوع BN-800 في بيلوياركس أيضا (الوحدة ٤).

والعناصر الأربعة موضحة في الشكل ١ فيما يخص تكنولوجيا مفاعلات الماء الخفيف، علماً بأن أكثر من نسبة ٨٥٪ من القدرة النووية المركَّبة تتكون حاليًّا من مفاعلات ماء مضغوط ومفاعلات ماء مغلي.

مجموعة قوى مفاعلات الماء الخفيف

البنية التحتية الأمامية (تعدين اليورانيوم وطحنه وتحويله وتخصيبه وتصنيع الوقود) راسخة جيداً بالنسبة لتكنولوجيا مفاعلات الماء الخفيف. ويمكن بسهولة ملاءمة إحلال تكنولوجيات ووقود مفاعلات أخرى، مثل مفاعلات الغاز المتقدم، والمفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات، والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء، في محل مفاعلات الماء الخفيف ووقودها. وبالمثل يمكن، بحذف عملية التخصيب، تمثيل المفاعل الكَنَدي الموقد باليورانيوم ومهدَّأ بالديوتريوم (مفاعل كاندو) وتكنولوجيا 'ماغنوكس' تمثيلاً كافياً.

[١] أصدرت فنلندا رخصة تشييد في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٥.



(١) مجموعة قوى مفاعلات الماء الخفيف

(٢) تخزين موكل للغير

الوقت الراهن

(٣) مستودع جيولوجي

(٤) مجموعة قوى المفاعلات السريعة

ملحوظات:
U_{nat} = يورانيوم طبيعي؛ UF_6 = سادس فلوريد اليورانيوم؛ SWU = وحدات عمل فصل اليورانيوم؛ U_{depl} = يورانيوم مستنفد؛ UOX Fab = تصنيع أكسيد اليورانيوم؛ *LWR-UOX* = مفاعل ماء خفيف - أكسيد اليورانيوم؛ Used UOX Storage (Wet) = التخزين (الرطب) لأكسيد اليورانيوم المستعمل؛ Used UOX Storage (& U_{rep}OX) (Dry/Wet) = التخزين (الجاف/الرطب) لأكسيد اليورانيوم المستعمل (وأكسيد اليورانيوم المعاد معالجته)؛ FPs & MAs (Glass) = نواتج انشطار وأكتينيدات ثانوية (زجاج)؛ U_{rep} = يورانيوم معاد معالجته؛ LLW/TRU Disposal = التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع/ نفايات ما بعد اليورانيوم؛ UOX Reprocessing = إعادة معالجة أكسيد اليورانيوم؛ *Pu* = بلوتونيوم؛ MOX Fab = تصنيع وقود موكس؛ U_{depl} = يورانيوم مستنفد؛ *LWR-MOX* = مفاعل ماء خفيف - وقود موكس؛ Used MOX Storage (Wet) = التخزين (الرطب) لوقود موكس المستعمل؛ HLW Repository/Boreholes = مستودع/آبار النفايات القوية الإشعاع؛ FPs = نواتج انشطار؛ MAs = أكتينيدات ثانوية؛ MOX Reprocessing = إعادة معالجة وقود موكس؛ *Pu* = بلوتونيوم؛ MOX (& Blanket) Fab = تصنيع وقود موكس (والبطانة المولّدة)؛ U_{depl} = يورانيوم مستنفد؛ *FBR-MOX* = مفاعل التوليد السريع - وقود موكس.

الشكل ١ - عناصر دورة الوقود النووي الحالية (مجموعة قوى مفاعلات الماء الخفيف والتخزين الموكل للغير)، والمتوقعة (المستودعات الجيولوجية)، والمحتملة (مجموعة قوى المفاعلات السريعة) (الشكل البياني مقدم من معهد أبحاث القوى الكهربائية [١٧]).

التصرف في الوقود المستهلك والنفايات القوية الإشعاع (التخزين الموكل للغير)

يشمل التخزين الموكل للغير جميع دورات الوقود، ولا يَستبعِد أي نقطة نهاية للوقود المفرغ من مفاعلات القوى. ويُوضع وقود أكسيد اليورانيوم المفرغ من المفاعلات (أكسيد اليورانيوم 'المستعمل' أو 'المستهلك') في تخزين مؤقت أو تُعاد معالجته. وينفَّذ التخزين المؤقت لوقود أكسيد اليورانيوم المستهلك في منشآت مركزية أو في مواقع المفاعلات.

تؤدي إعادة معالجة وقود أكسيد اليورانيوم المستهلك إلى إنتاج يورانيوم معاد معالجته، وبلوتونيوم صالح للاستعمال في المفاعلات، ونفايات قوية الإشعاع. فاليورانيوم والبلوتونيوم المعاد معالجتهما يعاد تدويرهما في مفاعلات الماء الخفيف الحالية، بما يؤدي إلى وفورات مجتمعة من اليورانيوم الطبيعي تصل إلى ٢٥٪. ويوضع الوقود المفرغ والمحتوي على اليورانيوم المعاد معالجته (أكسيد اليورانيوم المعاد معالجته المستهلك) أو البلوتونيوم (وقود موكس المستهلك) في تخزين مؤقت. ومن بين تيارات النفايات المختلفة الناتجة عن عمليات إعادة المعالجة، توضع أيضاً في تخزين مؤقت النفايات القوية الإشعاع المزجَّجة، التي تحتوي على نواتج انشطار وأكتينيدات ثانوية.

ومن ثم فالنتيجة النهائية لكل من خياري إعادة المعالجة وعدم إعادة المعالجة هي التخزين المؤقت، على الرغم من اختلاف توزُّعات السُمِّية الإشعاعية في النظم المختلفة. وقد نُشر للاستخدام على نطاق تجاري كل من التكنولوجيا والمرافق اللازمة لتنفيذ التخزين المؤقت وإعادة المعالجة وإعادة تصنيع الوقود.

ويمكن بسهولة إجراء تعديلات على هذا الرسم البياني لاستيعاب تكنولوجيات المفاعلات الحرارية الأخرى (المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز، ومفاعلات ماغنوكس، ومفاعلات كاندو، والمفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات، والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء).

المستودع الجيولوجي

تتطلب جميع الخيارات وجود مستودع جيولوجي. وهناك اتفاق واسع بين الأوساط التقنية على أن التخلص الجيولوجي العميق يشكل خياراً آمناً للأحجام الصغيرة نسبيًّا من الوقود المستهلك والوقود القوي الإشعاع المتولدة عن محطات القوى النووية. والعاملان المقيِّدان للتنفيذ في معظم البلدان في هذا الصدد هما الإرادة السياسية والقبول المجتمعي.

مجموعة قوى المفاعلات المتقدمة

التصميم الرائد في هذا المجال هو المفاعل السريع المبرَّد بالصوديوم الذي يعمل على نسق مفاعل التوليد أو نسق قريب منه. وتبعاً لخطة إعادة المعالجة، يمكن النظر في فصل وتحويل بعض نواتج الانشطار الطويلة العمر والأكتينيدات الثانوية. ومن غير المحتمل أن يتم نشر تجاري كبير لهذه التقنيات لعدة عقود.

٢-٢- تخزين الوقود المستهلك

تخزين الوقود المستهلك هو خطوة مؤقتة. وترتبط مدة هذه الخطوة المؤقتة ارتباطاً كبيراً بالطرف الخلفي لسياسة دورة الوقود التي اعتمدتها الدولة العضو [١]. والواقع أنه، بالنسبة للدول الأعضاء التي تختار سياسة دورة الوقود القائمة على استخدام الوقود لمرة واحدة، لا توجد مرافق للتخلص من الوقود المستهلك متاحة حاليًّا. ومن المتوقع أن يكون أول مرفق تخلص جيولوجي جاهزاً للتشغيل قبل عام ٢٠٢٥، لكن الأمر سيستغرق عدة عقود قبل أن تصبح المستودعات الجيولوجية متاحة في جميع الدول النووية الرئيسية.

أدت التأخيرات في تنفيذ خيار إعادة معالجة الوقود في بعض البلدان، والتخلي عن هذا الخيار في وقتٍ ما في بلدان أخرى، والتأخيرات في توافر التخلص النهائي من الوقود المستهلك في جميع البلدان، إلى زيادة مطردة في فترات التخزين المؤقت للوقود المستهلك. وفي حين أن هذه الزيادة غير مرغوب فيها من أجل عدم إثقال كاهل الأجيال القادمة، فقد أصبحت تمثل عبئاً أقل، من الناحية التقنية، نتيجة لزيادة الكفاءة التي يجري تحقيقها في الطرف الأمامي للدورة. وخَفضت هذه التطورات كمية الوقود النووي المستهلك الذي يُنتج، لكنها تضع عبئاً أكبر على نظام تخزين الوقود النووي المستهلك؛ ونتيجة لذلك فالأساليب المبتكرة ضرورية لمواجهة هذا التحدي، إما من خلال التخزين الجاف أو من خلال التخزين الرطب. وعادة ما يكون الوقود الأعلى حرقاً ناتجاً عن إطالة وقت التشعيع في المفاعل. وقد تؤدي هذه الإطالة إلى زيادة تآكل الكسوة، لكنها تؤدي أيضاً إلى زيادة حرارة الاضمحلال الإشعاعي، وزيادة انبعاث غازات الانشطار، وإلى زيادة العبء الواقع على الكسوة (العيوب، الإجهاد، إلخ). كذلك تؤثر زيادة حرارة اضمحلال الوقود على عمليات إعادة المعالجة ومعايير قبول التخلص الجيولوجي. وقد يتعين، قبل التخلص الجيولوجي، تخزين الوقود لفترات طويلة من الزمن لضمان أن يبقى التحميل الحراري على المواد في نظم الحواجز المصممة هندسيًّا والطبيعية دون الحدود التصميمية. وفي ظل عدة سيناريوهات معقولة، قد يلزم تبريد الوقود لمدة ١٠٠ عام أو أكثر.

وفيما يتعلق بالوقود المكسو بسبيكة الزركونيوم، تؤدي زيادة حرق الوقود إلى زيادة التقاط الهيدروجين في بعض سبائك الكسوة. وبسبب الحرارة المتبقية الأعلى في هذه الأنواع من الوقود، يوجد احتمال بأن تقوم صفائح هيدريد الزركونيوم المتحاذية محيطيًّا بتغيير توجُّهها إلى الاتجاه المحوري أثناء التخزين الجاف (بما في ذلك العمليات المصاحبة للتخزين الجاف، مثل التجفيف) والنقل (بما في ذلك إعادة الترطيب بعد النقل). ويمكن أن تؤدي تغيُّرات الخصائص الميكانيكية للكسوة، الناتجة عن تغير توجُّه صفائح الهيدريد، لا سيما في نطاق درجات الحرارة الأدنى، إلى انخفاض المطواعية أو فقدانها عندما تتعرض قضبان الوقود لقوى تحميل قارصة. وليس بحث سلوك الهيدروجين في الوقود المستهلك المكسو بسبيكة الزركونيوم وتأثيره على الخواص الميكانيكية للكسوة سوى مجالين وحسب من مجالات البحوث التي تجرى في الدول الأعضاء لتحسين فهم العمليات التي يمكن أن تؤثر في الأداء الطويل الأمد للوقود المستهلك في ظروف التخزين الجاف.

ترد في الجدولين ٢ و٣ البيانات المتعلقة بخبرة التخزين الرطب والتخزين الجاف في الدول الأعضاء المشاركة في المشاريع البحثية المنسقة. وتستند المعلومات إلى المساهمات المقدمة في ذلك الوقت، عندما شاركت الدولة العضو المعنية في المشاريع البحثية المنسقة. وقد عُدلت البيانات باستخدام المعلومات العامة عن دورة الوقود، من أجل التوصل إلى خط أساس مشترك.

الجدول ٢- خبرة التخزين الرطب المبلغ عنها في بلدان المشاريع البحثية المنسقة

البلد	نوع المفاعل	نوع الكسوة	التعليق المبلغ عنه/المساهمات المبلغ عنها في المنشور
الأرجنتين	كاندو	Zry-4	١ و٥ و٦.
كندا	كاندو	Zry-4	١ و٢ و٣ و٤ و٥.
فنلندا	مفاعل ماء مضغوط	Zry-4	١ و٢ و٣.
	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء	Zr-1%Nb	١ و٢ و٣.
فرنسا	مفاعل ماء خفيف	Zry-4, M5™	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
			١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
ألمانيا	مفاعل ماء مضغوط	Zry-4, M5™	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء	Zr-1%Nb	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	Zry-2	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
هنغاريا	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء	Zr-1%Nb	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
اليابان	مفاعل ماء مغلي	Zry-2	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مضغوط	Zry-4, MDA™, ZIRLO™	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
			١ و٢ و٣.
	مفاعل مهدَّأ بالغاز	MagnoxAL80	
جمهورية كوريا	مفاعل ماء مضغوط	Zry-4	٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	كاندو	Zry-4	٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
الاتحاد الروسي	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء-٤٤٠	Zr-1%Nb	١(ب) و٢(ب) و٣ و٤.
	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء-١٠٠٠	Zr-1%Nb	١(ب) و٢(ب) و٣ و٤.
	مفاعل عالي القدرة مزوَّد بقنوات-١٠٠٠	Zr-1%Nb	١(ب) و٢(ب) و٣ و٤.
سلوفاكيا	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء-٤٤٠	Zr-1%Nb	١(ج) و٢(ج) و٣ و٥ و٦.
إسبانيا	مفاعل ماء مضغوط	Zry-4, ZIRLO™	٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	Zry-2	٣ و٤ و٥ و٦.
السويد	مفاعل ماء خفيف/مفاعل ماء ثقيل مضغوط	Zry-2	١ و٢ و٣ و٤ و٥.
سويسرا	مفاعل ماء خفيف	Zry-2, 4	٦.
المملكة المتحدة	ماغنوكس	MagnoxAl80	٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل متقدم مبرَّد بالغاز	20Cr:25Ni:Nb SS	
	مفاعل ماء خفيف	Zry-2, 4	
	مفاعل ماء ثقيل مولِّد للبخار	Zry-4	
الولايات المتحدة الأمريكية	مفاعل ماء مضغوط	Zry-4, ZIRLO™, M5™	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مضغوط	SS	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	Zry-2	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل حرارة عالية مبرَّد بالغاز	غير متوفر	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.

(أ) المشاريع البحثية المنسقة مرقَّمة بالتتابع، فمثلاً بفاست الثاني هو رقم ٢، وسبار الأول هو رقم ٤.
(ب) الاتحاد السوفياتي.
(ج) تشيكوسلوفاكيا.

الجدول ٣- خبرة التخزين الجاف المبلغ عنها في بلدان المشاريع البحثية المنسقة

البلد	نوع المفاعل	نوع التخزين	أول نظام نُشر	التعليق المبلغ عنه/المساهمات المبلغ عنها في المنشورات[أ]
الأرجنتين	كاندو	صوامع عمودية	١٩٩٣	٥ و٦.
كندا	كاندو	صوامع عمودية	١٩٨٥	١ و٢ و٣ و٤ و٥.
		براميل خرسانية	١٩٩٥	١ و٢ و٣ و٤ و٥.
ألمانيا	مفاعل ماء مضغوط	براميل معدنية	١٩٩٥	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء	براميل معدنية	١٩٩٩	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	براميل معدنية	٢٠٠٢	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
هنغاريا	مفاعل مبرَّد ومهدَّأ بالماء	قبو	١٩٩٧	٣ و٤ و٥ و٦.
اليابان	مفاعل ماء مغلي	براميل معدنية	١٩٩٥	١ و٣ و٤ و٥ و٦.
جمهورية كوريا	كاندو	صوامع عمودية	١٩٩٢	٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
إسبانيا	مفاعل ماء مضغوط	براميل معدنية	٢٠٠٢	٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مضغوط	براميل خرسانية	٢٠٠٩	٣ و٤ و٥ و٦.
سويسرا	مفاعل ماء مضغوط	براميل معدنية	١٩٨٣	٦.
	مفاعل ماء مغلي	براميل معدنية	٢٠٠٥	٦.
المملكة المتحدة	ماغنوكس	قبو	١٩٧٢	٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
الولايات المتحدة الأمريكية	مفاعل ماء مضغوط	براميل معدنية	١٩٨٦	٢ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مضغوط	صوامع أفقية	١٩٨٦	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مضغوط	براميل خرسانية	١٩٩٤	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	صوامع أفقية	١٩٩٩	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	براميل خرسانية	٢٠٠٠	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.
	مفاعل ماء مغلي	براميل معدنية	٢٠٠٠	١ و٢ و٣ و٤ و٥ و٦.

(أ) المشاريع البحثية المنسقة مرقَّمة بالتتابع، فمثلاً بفاست الثاني هو رقم ٢، وسبار الأول هو رقم ٤.

٢-٣- تصاميم مجمَّعات الوقود

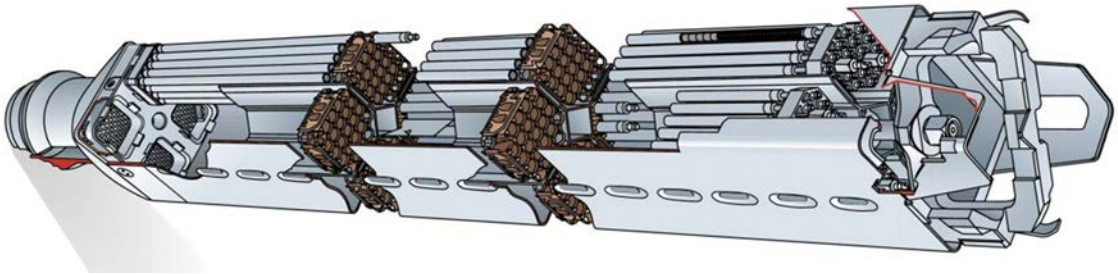
يقدم القسم التالي لمحة عامة عن تصاميم الوقود التجاري التي كانت موضوع الإبلاغ في مشاريع بفاست وسبار:

- وقود مفاعلات الماء الخفيف المصنوع من وقود مفاعلات الماء المضغوط ووقود مفاعلات الماء المغلي؛
- وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء، الروسي المنشأ؛
- وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط كاندو؛
- وقود مفاعلات الغاز ماغنوكس والمفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز.

٢-٣-١- مفاعلات الماء الخفيف [٢، ٤]

تتكون مجمَّعات وقود مفاعلات الماء الخفيف من قضبان الوقود والعديد من المكونات الهيكلية.

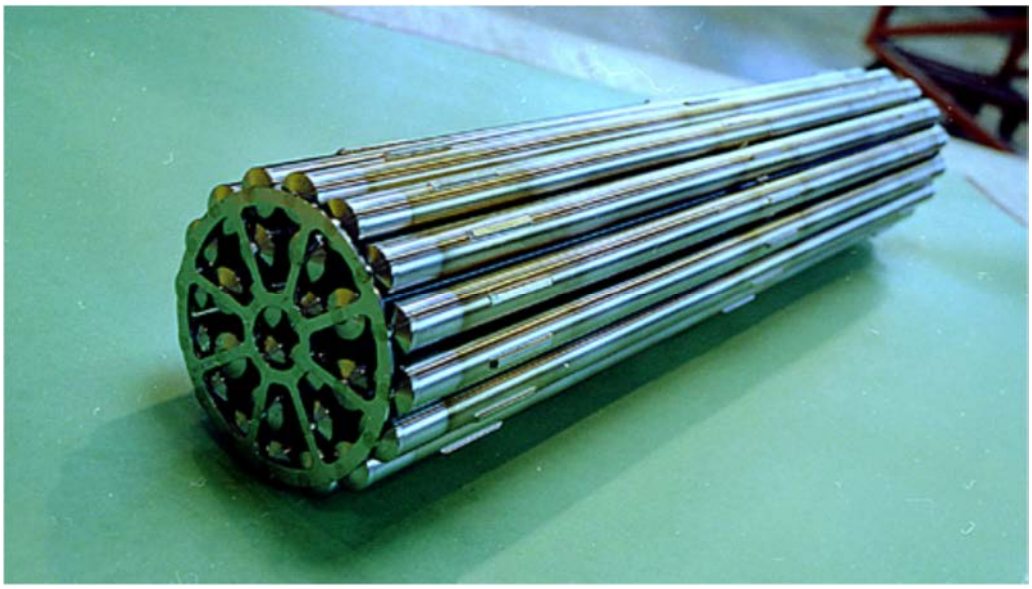
وتحتوي جميع مجمَّعات/حزم وقود مفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء المغلي على قضبان وقود متساوية التباعد عن بعضها البعض. وتُدخَل كريات أكسيد اليورانيوم الأسطوانية في أنابيب مصنوعة من سبائك الزركونيوم. وتختلف تصميمات وقود مفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء المغلي من حيث ما يلي: قطر قضيب الوقود وعدد قضبان الوقود؛ إن مجمَّعات وقود مفاعلات الماء المغلي تحتوي على غلاف خارجي من مادة الزركالوي يوجِّه ماء التبريد عبر مجموعة الوقود؛ إن لمجمَّعات وقود مفاعلات الماء المغلي مستويات متعددة لإثراء الوقود. وتتكون التصميمات الحديثة لمجمَّعات وقود مفاعلات الماء المضغوط من قضبان وقود محزومة معاً في المدى ١٤ × ١٤ إلى ١٨ × ١٨ في مصفوفة مربَّعة. وتتكون تصميمات مفاعلات الماء المغلي من قضبان وقود محزومة معاً في المدى ٧ × ٧ إلى ١٠ × ١٠؛ انظر مثلاً الشكل ٢. والمكونات الهيكلية المختلفة لمجمَّعة الوقود، مثل المباعِدات، وأنابيب التوجيه، وفوهات الطرف العلوي والسفلي، وألواح الربط، ومرشِّحات الحطام، وأنابيب المياه، وقنوات المياه أو الوقود، تُصنع أساساً من سبائك الزركونيوم، والفولاذ المقاوم للصدأ، ومادة الإنكونيل.



الشكل ٢- رسم تخطيطي لمجمَّعة وقود مفاعل ماء مغلي (الشكل مقدم من الشركة السويدية للتصرف في الوقود النووي والنفايات (SKB)).

٢-٣-٢- مفاعلات كاندو [٢، ٤]

تتكون حزم الوقود المستخدمة في مفاعلات كاندو الحديثة إما من ٢٨ أو٣٧ قضيب وقود، مثبتة معاً في مصفوفة أسطوانية بواسطة لحامات تربط الأغطية الطرفية لكل قضيب وقود بصفيحتين نهائيتين من الزركالوي (الشكل ٣). ويتكون كل قضيب وقود من أنبوب مصنوع من الزركالوي طراز Zry-4 يحتوي على رزمة من كريَّات ثاني أكسيد اليورانيوم. ويبلغ الطول الإجمالي لحزم الوقود حوالي ٥٠ سم. وتبعاً لموقع قضبان الوقود داخل حزمة المجمَّعة، تُلحم المباعِدات أو وسادات التحميل مع السطح الخارجي للكسوة. والمباعِدات مصمَّمة للحفاظ على تدفق سائل التبريد حول القضبان، بينما تحمي وسادات التحميل الكسوة من البِلى الذي ينجم عن الاحتكاك بأنبوب الضغط أثناء تشغيل المفاعل. وتُستخدم أيضاً لحامات من الزركونيوم Zr-5Be لربط المباعِدات ووسادات التحميل المصنوعة من الزركالوي بغلاف الوقود المصنوع من الزركالوي.



الشكل ٣- حزمة وقود كاندو؛ طولها ~٥٠ سم (الصورة مقدمة من شركة أونتاريو لتوليد الطاقة).

٢-٣-٢- المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات

المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات هي مفاعلات ماء مغلي روسية التصميم من النوع ذي القنوات ومهدَّأة بالغرافيت. وتعمل هذه المفاعلات الآن في الاتحاد الروسي حصريًّا في ثلاثة من مواقع محطات القوى النووية. وهناك ١١ وحدة عاملة قدرة كل منها ١ ٠٠٠ ميغاواط كهربائي.

يبلغ طول مجمَّعة الوقود حوالي ١٠ أمتار، وتتألف من أنبوب توجيه مركزي، وحزمتين من الوقود (متباعدتين تحسُّباً للتمدد الحراري للقضبان بين الحزمتين أثناء التشعيع)، وقضيب امتداد. وتتكون كل حزمة من ١٨ قضيب وقود مثبتة في بنية

هيكلية بواسطة تسع شبكات مباعَدَة وأنبوب مركزي. والوقود هو ثاني أكسيد اليورانيوم بإثراء يصل إلى ٢,٨٪ يورانيوم^{٢٣٥}، وتحتوي جميع قضبان الوقود على مادة الإربيوم الممتصة للنيوترونات، بنسبة محتوى ٠,٦٪ [٢].

يرد في الجدول ٤ ملخص للخصائص الرئيسية لمجمَّعات الوقود. وعند تفريغ المفاعل، تبرَّد مجمَّعات الوقود في البداية قبل تصغير حجمها بتقسيمها إلى حزم وقود مفردة؛ ويحال قضيب التمديد إلى النفايات.

٢-٣-٤- المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء

المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء هي مفاعلات من النوع المبرَّد بالماء المضغوط وذات تصميم روسي. ومجمَّعات الوقود سداسية الشكل، إما بكساء معدني خارجي لتوجيه تدفق المياه أو من دونه. وتُصمَّم مجمَّعات وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء الحديثة بفوهات علوية قابلة للإزالة، لتسهيل استبدال قضبان الوقود. والاختلافات الرئيسية بين تصاميم وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠ والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٠٠ هي التالية:

- مجمَّعات وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠ بها ٣١٢ قضيب وقود، مقابل ١٢٦ قضيباً في تصميم المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٠٠؛
- مجمَّعات وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠ أكبر بكثير من نظيراتها الخاصة بالمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٠٠، لكونها أطول وأوسع على السواء؛
- مجمَّعات وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٠٠ لها كساء خارجي سداسي الشكل أو قناة مائية مصنوعة من سبيكة زركونيوم ونيوبيوم Zr-2.5%Nb، في حين أن كل مجمَّعات وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠ تقريباً لا تحتوي على أي من هذين.

ويرد في الجدول ٤ ملخص للخصائص الرئيسية لهذه المفاعلات.

الجدول ٤- الخصائص الرئيسية لمجمَّعات الوقود ذات المنشأ الروسي

الخاصية	المفاعل		
	المبرَّد والمهدَّأ بالماء-٤٠٠	المبرَّد والمهدَّأ بالماء-١٠٠٠	العالي القدرة المزوَّد بقنوات
القطر الخارجي لقضيب الوقود، مم	٩,١	٩,١	١٣,٦
سمك كسوة قضيب الوقود، مم	٠,٦٥	٠,٦٧	٠,٩٠
مادة الكسوة	Zr-1%Nb	Zr-1%Nb	Zr-1%Nb
الطول الإجمالي لمجمَّعة الوقود، مم	٣ ٢٠٠	٤ ٥٧٠	١٠ ٠١٤
قطر مجمَّعة الوقود، مم	١٤٥	٢٣٥	٨٠
مادة شبكة المباعدة[أ]	Zr-1%Nb	Zr-1%Nb	Zr-2.5%Nb
المادة البنيوية	Zr-1%Nb	Zr-1%Nb	Zr-2.5%Nb
(الأنابيب في مركز مجمَّعة الوقود أو في زاويتها) الحرق			
- الحالي	٤٠-٤٣	٤٥-٤٩	٢٤
- المخطط له	٤٥-٥٠	٥٥	٣٥

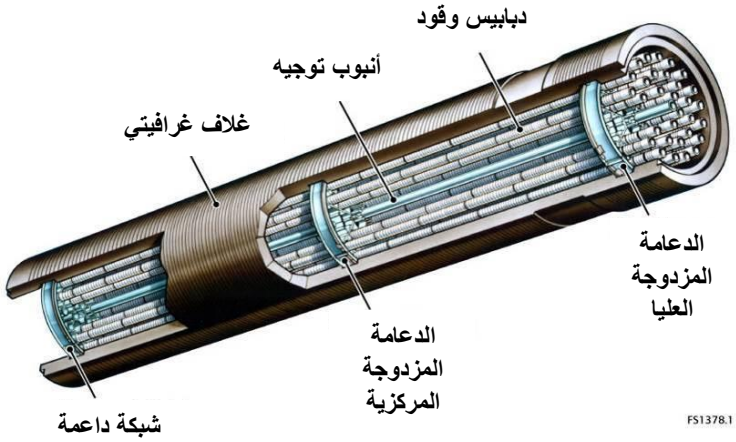
(أ) كانت شبكات المباعدة تُصنع أصلاً من الفولاذ المقاوم للصدأ.

٢-٣-٥- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز

تشتمل مجمَّعات وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز (انظر الشكل ٤) على ما يلي: غلاف غرافيتي؛ لوحة الشبكة السفلية؛ أنبوب توجيه؛ دعامتين مزدوجتين؛ ٣٦ دبوس وقود. وتثبَّت دبابيس الوقود وأنبوب التوجيه على الشبكة السفلية. وباستثناء الغلاف الغرافيتي الخارجي، تُصنع جميع المكونات الأخرى من الفولاذ المقاوم للصدأ وعالي التسبيك. وفي المفاعل، يُربط ما يصل إلى ثماني من مجمَّعات وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز معاً بواسطة قضيب ربط من الفولاذ المقاوم للصدأ يمرَّر عبر أنبوب التوجيه المركزي لكل مجمَّعة وقود، لتشكيل عمود وقود [٢، ٤]. ويتكون العمود من قسم

مزوَّد بالوقود طوله ~٨ أمتار وقضيب ربط طوله ~١٥ متراً (باستثناء النوع Dungeness B الذي يبلغ الجزء المزوَّد بالوقود فيه ٧ أمتار).

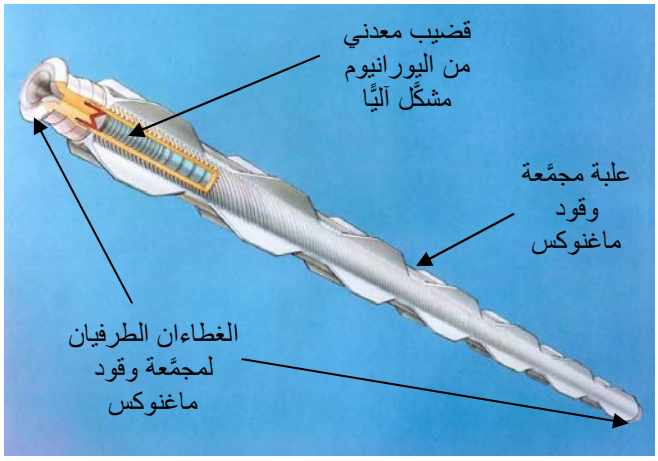
وعند تفريغ أعمدة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز من المفاعل، تبرَّد في البداية في ثاني أكسيد الكربون قبل تفكيكها في الخلية الساخنة لوحدة المفاعل إلى مجمَّعات وقود مفردة، ثم تخزن هذه المجمَّعات المفردة تخزيناً رطباً.



الشكل ٤- مجمَّعة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز (الشكل مقدم من شركة Sellafield المحدودة).

٢-٣-٦- مفاعلات ماغنوكس [٢، ٤]

اكتمل تصنيع وقود ماغنوكس التجاري في عام ٢٠٠٨. وعلى الرغم من تشابه تصاميم عناصر وقود ماغنوكس فقد صُمِّمت لتناسب كل مفاعل على حدة. ويتألف كل عنصر أساساً من قضيب يورانيوم طبيعي داخلي مُشكَّل آليًّا بأخاديد لكي يناسب موقعه في قلب المفاعل، مع واحدة من نوعين من العُلب الخارجية المبثوقة جوفاء والمُشكَّلة آليًّا المصنوعة من سبائك المغنيسيوم (متعددة الأضلاع أو "سُنبلية" الشكل)؛ ويكتمل العنصر بتركيبة طرفية مخروطية وأقراص عازلة خزفية وغطاء طرفي مشكَّل آليًّا (كما هو موضح في الشكل ٥). ويُشحن الحيّز البيني بكمية صغيرة من الهيليوم قبل استخدام ضغط خارجي لتثبيت العلبة الخارجية في الأخاديد الموجودة في قضيب اليورانيوم. وفي المفاعل، توضع العناصر فوق بعضها البعض لتشكيل أعمدة داخل قناة الغرافيت. والغرض من التشكيل الآلي للأخاديد في قضبان اليورانيوم الطبيعي وتثبيت العلب الخارجية فيها هو تقليل الإجهاد الموضعي للكسوة أثناء التشعيع. والسدادة الطرفية هي المكوّن الهيكلي الوحيد لوقود ماغنوكس.



الشكل ٥- مجمَّعة وقود ماغنوكس (الشكل مقدم من شركة Sellafield المحدودة).

٣- لمحة عامة عن تكنولوجيات تخزين الوقود المستهلك

هناك تكنولوجيتان أساسيتان لتخزين الوقود المستهلك، هما التخزين الرطب والتخزين الجاف. وأهداف التصميم واحدة للتكنولوجيتين كلتيهما، ويرد ملخص لها أدناه [١]:

- يجب الحفاظ على حالة دون الحرجية للوقود المستهلك، في الظروف العادية وظروف الحوادث؛
- ينبغي إزالة الحرارة المتبقية للوقود المستهلك إزالة فعالة؛
- ينبغي أن يحمي التدريع الإشعاعي للوقود المستهلك مشغِّلي المحطة والجمهور والبيئة من تلقِّي جرعات إشعاعية تتجاوز الحدود الرقابية؛
- ينبغي الحفاظ على سلامة كسوة الوقود أثناء مناولتها وأثناء تعرضها لآثار التآكل الناجمة عن بيئة التخزين؛
- ينبغي منع تدهور الوقود أثناء التخزين، من خلال توفير التبريد الكافي لكي لا يحدث تجاوز لحدود درجة حرارة الوقود؛
- ينبغي ضمان حماية البيئة بتقليل إطلاق النظائر المشعة إلى أدنى حد؛
- ينبغي أن تكون إمكانية استرجاع الوقود متاحة دائماً.

ويتوفر مزيد من الإرشادات في دليل الأمان الخاص بتخزين الوقود المستهلك [١٤].

٣-١- تكنولوجيا التخزين الرطب

التخزين الرطب هو أكثر التقنيات شيوعاً، ويرتبط عادةً بالمخزونات التي توجد لدى المفاعلات وبالتخزين الانتقالي لكميات كبيرة لصالح مرافق إعادة المعالجة. ويوفر الماء تبريداً وتدريعاً كفؤين بعد تفريغ الوقود من المفاعل. وفي سياق هذا المنشور، تشير عبارة "لدى المفاعل" إلى تخزين الوقود المستهلك تخزيناً يرتبط ارتباطاً ماديًّا بمفاعل القوى أو يوجد في نفس المبنى معه.

عند بداية المشروع، كان التخزين الرطب يعتبر تكنولوجيا ناضجة نسبيًّا ولها حوالي ٢٠ عاماً من الخبرة التشغيلية. وعلى مدار أكثر من ثلاثين عاماً مضت، حدثت بعض التحسينات التكنولوجية من حيث الأجهزة، والمناولة عن بعد، والتحسينات في كثافة التخزين، وما إلى ذلك، لكن التكنولوجيا الأساسية ظلت في غالبها كما هي. ولا يُعتزم تناول تكنولوجيا التخزين الرطب بمزيد من المناقشة في هذا المنشور. ولإعطاء لمحة عن تجربة التخزين الرطب في البلدان المشاركة، يرد في الجدول ٥ ملخص للتخزين الرطب خارج المفاعل، وذلك إما في موقع المفاعل أو في موقع خارجي. ويعرض الجدول هذه اللمحة من حيث عدد المرافق، والسعات التصميمية الإجمالية، والتشغيل الأول، والمخزون التقريبي في عام ٢٠١٣. ويمكن الاطلاع في الوثيقتين التقنيتين التاليتين على مزيد من المعلومات عن تكنولوجيا التخزين الرطب والدروس المستفادة في هذا الصدد:

- خيارات تخزين الوقود المستهلك [١٨]؛
- تخزين الوقود المستهلك - الدروس المستفادة [١٩].

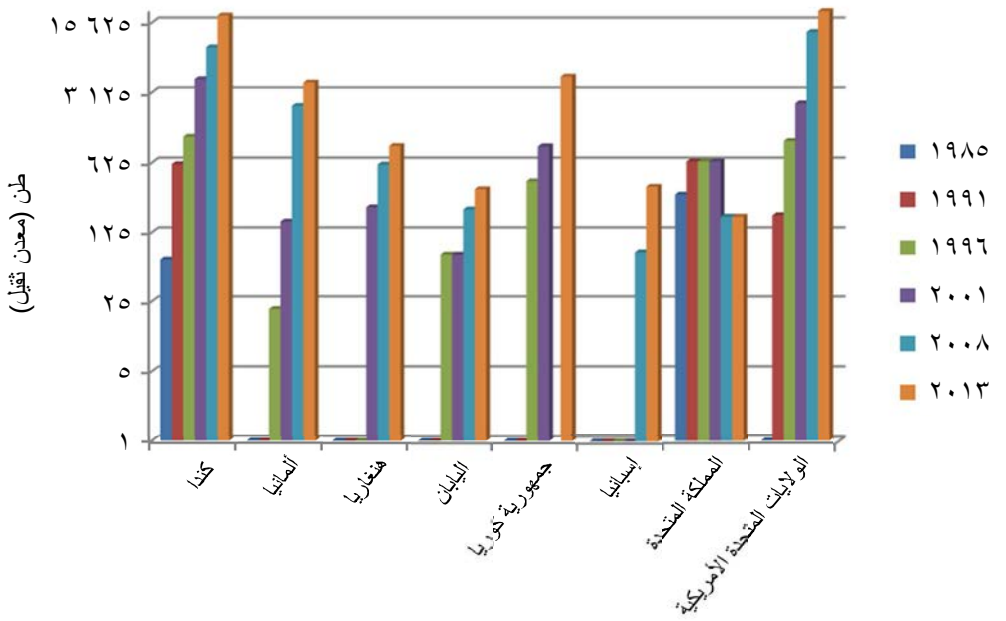
٣-٢- تكنولوجيات التخزين الجاف

على خلاف تكنولوجيات التخزين الرطب، كانت تكنولوجيات التخزين الجاف قبل أكثر من ٣٠ عاماً في مهدها، مع اقتصار استخدامها على تخزين بعض أنواع وقود مفاعلات البحوث وبعض وقود مفاعلات القوى المبرَّدة بالغاز. وخلال تلك الفترة، كان هناك نمو في استخدام التخزين الجاف (انظر الشكل ٦) وتطوير تكنولوجيات التخزين الجاف. فمثلاً، كان التخزين الرطب في عام ١٩٨٥ هو التكنولوجيا الوحيدة المرخصة في الولايات المتحدة الأمريكية، وبحلول عام ٢٠١٤ كانت هناك ٦٦ منشأة عاملة مستقلة للتخزين الجاف للوقود المستهلك، تستوعب ~٢٨٪ من إجمالي مخزون الوقود المستهلك في الولايات المتحدة.

الجدول ٥- ملخص للتخزين الرطب للوقود المستهلك خارج المفاعلات في البلدان المشاركة

الدولة العضو	الأحواض العاملة الموجودة خارج المفاعلات			
	عدد المرافق	السعة التصميمية الإجمالية، طن (معدن ثقيل)	المخزون التقريبي في عام ٢٠١٣، طن (معدن ثقيل)	التشغيل الأول (الثاني خارج المفاعلات، الثالث خارج المفاعلات...)
الأرجنتين	١	٢٠٠٠	١ ٨٥٠	١٩٨٨
فنلندا	٢	١ ٨٩٠	١ ٦٧٣	١٩٨٠ (١٩٨٧)
فرنسا	٤	١٧ ٦٠٠	٩ ٧٩٩	١٩٨١ (١٩٨٤، ١٩٨٦، ١٩٨٨)
ألمانيا	١	٢٨٦	١٠٠	١٩٩٩
اليابان	٢	٤ ٣٠٠	٣ ٩٥١	١٩٩٧ (١٩٩٩)
الاتحاد الروسي	٦	٢٢ ٥٠٠	١٧ ٣٠٠	١٩٧٧ (١٩٨٤، ١٩٨٥، ١٩٨٦، ١٩٨٦، ١٩٩٦)
سلوفاكيا	١	١ ٦٩٤	١ ٦٣١	١٩٨٧
السويد	١	٨ ٠٠٠	٥ ٧٤٠	١٩٨٥
سويسرا	١	٤٢٥	١٩٥[(أ)]	٢٠٠٨
المملكة المتحدة	٤	١٠ ٢٠٠	٤ ٦٠٨	١٩٦٤ (١٩٨١، ١٩٨٦، ١٩٨٨)
الولايات المتحدة الأمريكية	١	٦٧٥	٦٧٥	١٩٨٤

(أ) المخزون المبلغ عنه يشمل المخزون لدى المفاعل والمخزون خارج المفاعل (في موقع المفاعل) في محطة غوسغين للقوى النووية.



الشكل ٦- نمو التخزين الجاف للوقود المستهلك في البلدان المشاركة.

في البداية، كانت تكنولوجيات التخزين الجاف نظماً أحادية الغرض. ولم توفِّر سوى التخزين خارج المفاعل (في موقع المفاعل) (باستثناء واحد)، دون القدرة على النقل خارج الموقع في نهاية المطاف أو الإذن بذلك النقل (دون إعادة مناولة الوقود وإعادة تحميله في براميل النقل) [٤]. ومن الأمثلة على النظم الأحادية الغرض: الأقبية، والصوامع، والبراميل غير القابلة للنقل.

ومع التطوير المستمر لتكنولوجيا التخزين الجاف، أُدرك أن البراميل والحاويات الخاصة بتغليف الوقود يمكن أن تؤدي وظائف متعددة. وطُوِّرت براميل ثنائية الغرض (مثلاً، برميل CASTOR® في ألمانيا، أو NAC-STC في الولايات المتحدة الأمريكية)، بما سمح بالتخزين والنقل من وإلى مرفق التخزين دون إعادة مناولة مجمَّعات الوقود. ويمكن استخدام حاويات

الوقود الخاصة ببعض نظم التخزين للنقل و/أو للتخلص النهائي. وكثيراً ما يشار إلى هذه النظم بأنها نظم ثنائية الغرض أو متعددة الأغراض، على التوالي [١].

يقدم الجدول ٦ لمحة عامة عن عدد المرافق التي أُقيمت، والسعة التخزينية التصميمية الإجمالية، وبياناً للمخزون في عام ٢٠١٣، لدى البلدان المشاركة.

الجدول ٦- حالة التخزين الجاف للوقود المستهلك لمفاعلات القوى في البلدان المشاركة

الدولة العضو	نظم التخزين الجاف العاملة			
	عدد المرافق	تاريخ التشغيل الأول	السعة التصميمية، في عام ٢٠١٣، بالطن (معدن ثقيل)	المخزون التقريبي، بالطن (معدن ثقيل) في عام ٢٠١٣
الأرجنتين	١	١٩٩٣	٢ ٤٦٠	١ ٩٥٠
كندا	٧[أ]	١٩٨٤[ب]	٢٧ ٧٠٠	١٨ ٤٢٧
ألمانيا	١٥	١٩٩٢	٢٢ ٣٧٠	٣ ٩٢٤
هنغاريا	١	١٩٩٧	١ ٠٨٠	٨٣٧
اليابان	٢	١٩٩٥	٧٦٠	٣٤٠
جمهورية كوريا	١	١٩٩٢	٦ ٢٣٧	٤ ٩٠٣
الاتحاد الروسي	٣	٢٠١٢	٩ ٥٠٠	١ ٠٠٠
إسبانيا	٣	٢٠٠٢	١ ٢٣٦	٣٦٠
سويسرا	٢	٢٠٠١	٣ ٨٠٠	٤١٠
المملكة المتحدة	١	١٩٧١	٢٥٨	١٨٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٦٠	١٩٨٦	٤٣ ٠٠٠	٢٠ ٢٠٠

(أ) باستبعاد المرافق الكائنة في مركزي البحوث تشوك ريفر ووايتشيل.
(ب) التاريخ المبين هو للتخزين التجريبي لوقود مفاعل القوى كاندو. وقد نُشرت أول نظم التخزين الجاف في مختبر تشوك ريفر في عام ١٩٩٧ لوقود مفاعلات القوى المبكرة الخاصة بالتطوير/البحوث.

تقدم الأقسام التالية لمحة عامة عن تكنولوجيات التخزين الجاف التي نُشرت في البلدان المشاركة وأُبلغ عنها أثناء المشاريع البحثية المنسقة.

٣-٢-١- الأقبية

كانت الأقبية هي أول نظم تخزين جاف تُستخدم لوقود مفاعلات القوى المستهلك التجاري. واستُخدمت هذه التكنولوجيا في البداية لتخزين وقود المفاعلات المبرَّدة بالغاز لدى المفاعل، وهي تكنولوجيا التخزين الجاف الوحيدة التي استُخدمت لهذا الغرض على الإطلاق.

وأساس تصميم هذه التكنولوجيا هو تخزين مجمَّعات الوقود المستهلك في مصفوفة من قنوات التخزين يُحتفظ بها داخل مبنى من الخرسانة المسلحة. ويُوفَّر التدريع بواسطة الهيكل الخارجي، وتحقَّق إزالة الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطبيعي للهواء خارج كل قناة تخزين. وتُستنفد حرارة الاضمحلال الإشعاعي مباشرة إلى الجو الخارجي أو تبدَّد عبر نظام ثانوي لإزالة الحرارة [١]. ويمكن أيضاً توفير التبريد عن طريق التبريد بالهواء المدفوع. ويُخزن الوقود المستهلك في شكل وحدات مفردة أو متعددة. وعلى الرغم من أن التكنولوجيا الأصلية كانت تخزن الوقود غير معبأ في حاويات في كل قناة تخزين فإن التصميمات الأحدث تستند إلى تخزين الوقود في حاويات. وتحتوي النظم الحديثة على قنوات تستخدم صناديق احتواء معدنية محكمة الإغلاق بسدادات حلقية وتُشحن بجو خامل. وتُستخدم في الحاويات أيضاً صناديق احتواء ملحومة ذات جو خامل. وعلى عكس تقنيات التخزين الجاف الأخرى، يمكن رصد الجو داخل قنوات التخزين.

أُنشئت مرافق أقبية في فرنسا والمملكة المتحدة وهنغاريا والولايات المتحدة الأمريكية. وعلى الرغم من عدم توفر هذه المرافق في الاتحاد الروسي في وقت مشاركته في المشاريع البحثية المنسقة فقد أنشأ منذ ذلك الحين مجمَّع أقبية في المجمَّع التعديني الكيميائي في جيليزنوغورسك، للوقود المستهلك المتأتي من المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠[٢]. وتعتزم إسبانيا أيضاً أن تبني في المستقبل مرفقاً مركزيًّا للتخزين الجاف يستند إلى تقنية الأقبية.

يعرض الشكل ٧ مناظر لمخزن الأقبية النمائطي الجاف (MVDS) في محطة باكس للقوى النووية (هنغاريا)؛ وهو أول نظام يُنشأ لتخزين الوقود التجاري للمفاعلات المبرَّدة بالماء. ويقدم الجدول ٧ ملخصاً لمرافق الأقبية في الدول المشاركة. ويتوفر في المرجع [١٨] مزيد من المعلومات عن مخازن الأقبية.

الشكل ٧- مخزن الأقبية النمائطي الجاف في محطة باكس للقوى النووية، المشغِّل هو الشركة العامة للتصرف في النفايات المشعَّة (PURAM)، هنغاريا. مناظر للسطح العلوي لأنابيب التخزين وقاعة الشحن (الصورتان مقدمتان من PURAM).

[٢] أُبلغ عن خطط بناء هذا المرفق [٢]. وكان المخطط أصلاً أن يكون المرفق جاهزاً للتشغيل في عام ٢٠٠٧ بسعة تخزين إجمالية قدرها ٣٣ ٠٠٠ طن (معدن ثقيل).

الجدول ٧- ملخص للتخزين الجاف في مرافق الأقبية في البلدان المشاركة

البلد/المرفق	عدد المرافق	السعة التصميمية بالطن (معدن ثقيل) في عام ٢٠١٣	المخزون التقريبي بالطن (معدن ثقيل) في عام ٢٠١٣	التشغيل الأول
فرنسا(أ)	١	١٨٠	١٨٠	١٩٩٠
هنغاريا	١	١ ٠٨٠	٨٣٧	١٩٩٧
الاتحاد الروسي	١	٨ ٢٠٠	٣٣٠	٢٠١٢
المملكة المتحدة	١	٣ × ٨٦	١٨٠	١٩٧١
الولايات الأمريكية المتحدة(أ)	١	١٤,٧	١٤,٧	١٩٩١

(أ) الأقبية الموجودة في فرنسا والولايات الأمريكية المتحدة تخزن الوقود المتأتي من أنواع فريدة من مفاعلات القوى.

٣-٢-٢- الصوامع أو العلب الخرسانية

تقنية التخزين الجاف للوقود المستهلك في الصوامع أو في العلب الخرسانية طورتها لأول مرة شركة كندا للطاقة الذرية المحدودة في مختبرات وايتشيل التابعة لها في سبعينات القرن العشرين من خلال نظام أوَّلي نُشر في عام ١٩٧٥. ويعتمد التصميم الأصلي على الحمل الحراري الطبيعي من التدريع الخرساني، ولذلك يؤدي إلى تقييد حد التحميل الحراري، مع الحاجة إلى تخزين الوقود لفترة طويلة قبل تحميله. وتشتمل نظم الصوامع اللاحقة (NUHOMS وMACSTOR) على فتحات للمساعدة على تبديد الحرارة كما هو موضح في الشكل ٨.

تتألف التكنولوجيا من هيكل ثابت أحادي أو نمائطي من الخرسانة المسلحة. وتوفر الخرسانة التدريع بينما يوفَّر الاحتواء إما بواسطة بطانة معدنية داخلية متكاملة، يمكن غلقها بإحكام بعد تحميل الوقود، مع إغلاق الوقود بإحكام في سلَّة، أو يوفَّر بواسطة علبة معدنية منفصلة محكمة السد. وتكون الصوامع إما رأسية (مفاعلات كاندو) أو أفقية (مفاعلات الماء الخفيف).ويحمَّل الوقود في الصوامع دائماً في موقع التخزين، باستخدام برميل خاص بنقل المعادن [١].

يرد مزيد من المعلومات عن الصوامع في المرجع [١٨]. ويلخص الجدول ٨ استخدام مرافق الصوامع والعلب الخرسانية في البلدان المشاركة.

الشكل ٨- نظام NUHOMS® في كالفيرت كليفز (الصورة مقدمة من ملف صور هيئة الرقابة النووية بالولايات المتحدة).

الجدول ٨- ملخص مرافق الصوامع وعلب الخرسانة في البلدان المشاركة

البلد	عدد المرافق	السعة التصميمية الإجمالية، في عام ٢٠١٣، طن (معدن ثقيل)	المخزون التقريبي طن (معدن ثقيل) في عام ٢٠١٣	التشغيل الأول
الأرجنتين	١	٢ ٢١٠	١ ٩٥٠	١٩٩٣
كندا[أ]	٤	٥ ٠٤٧	٣ ٩٤٢	١٩٨٤
جمهورية كوريا	١	٦ ٢٥٠	٤ ٩٠٠	٢٠١٢
الولايات المتحدة[ب]	٢٦	٨ ٥٠٠	٧٧ ٨٠٠	١٩٨٦

(أ) يستبعد مرفقي البحوث الكائنين في وايتشيل وتشوك ريفر.

(ب) تحتوي بعض المواقع على مزيج من نظم البراميل ونظم الصوامع، ولذلك يوجد بعض الازدواجية في الحساب فيما يتعلق بالسعة التصميمية. وقد أُخذت السعات التصميمية من نظام المعلومات عن دورة الوقود النووي التابع للوكالة، حيثما كانت متوافرة فيه.

أبلغ عن التخزين في الصوامع أو العلب الخرسانية أثناء المشاريع البحثية المنسقة كل من الأرجنتين وجمهورية كوريا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية.

٣-٢-٣- نظم البراميل (المعدنية والخرسانية)

البراميل المعدنية والخرسانية هي أنواع مختلفة من الحاويات. والحاوية، وفقاً لمسرد الوكالة لمصطلحات الوقود المستهلك [١، ٢٠]، هي وعاء للاحتفاظ بالوقود المستهلك بغية تسهيل حركته وتخزينه أو التخلص النهائي منه. والحاوية هي إما حاوية سميكة الجدران، أو حاوية رقيقة الجدران تستخدِم غلافاً خارجيًّا منفصلاً لأغراض التدريع. ويمكن أن تكون المواد الإنشائية للبراميل المعدنية هي الفولاذ المطروق، أو الحديد الزهر المطواع، أو الفولاذ/الرصاص، أو تكون هيكلاً شطيريًّا أجوفاً مصنوعاً من الصلب/الراتنج/الصلب المطروق [١]. والبراميل الخرسانية هي هياكل شطيرية مصنوعة من الصلب/الخرسانة/الصلب، أو علب فولاذية رقيقة الجدران توضع بعد ذلك داخل غلاف خارجي (عادة ما يكون من الخرسانة المسلحة).

صُمِّمت أنواع كثيرة من نظم الحاويات، وهي موصوفة في المرجع [١٨].

وأُنشئت مرافق تخزين جاف في البراميل في الاتحاد الروسي وألمانيا وسويسرا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية واليابان؛ ويلخص الجدول ٩ استخدام التخزين الجاف في البراميل في البلدان المشاركة.

الجدول ٩- ملخص التخزين الجاف في البراميل في البلدان المشاركة

البلد	عدد المرافق	السعة التصميمية، في عام ٢٠١٣، طن (معدن ثقيل)	المخزون، في عام ٢٠١٣، طن (معدن ثقيل)	التشغيل الأول
كندا	٣	٢٢ ٦٤٥	١٤ ٥٠٣	١٩٩٦
ألمانيا	١٥	٢٢ ٣٧٠	٣ ٩٢٤	١٩٩٢
اليابان	٢	٩٠٠	٢٥٠	١٩٩٥
الاتحاد الروسي	٢	١ ٣٠٠	٦٥٦	٢٠١٢
إسبانيا	٣	١ ٢٣٦	٣٦٠	٢٠٠٢
سويسرا	٢	٣ ٨٠٠	٤٣٨	٢٠٠١
الولايات المتحدة[أ]	٤٢	٣٣ ٧٥٠	١٥ ١٤٩	١٩٨٦

(أ) تحتوي ثلاثة مواقع على خليط من البراميل والصوامع، ولذلك تحتوي الأرقام على بعض الازدواجية في الحساب.

٣-٢-٣-١- *البراميل المعدنية*

بُحثت جدوى استخدام برميل معدني لكل من التخزين والنقل اللاحق للوقود المستهلك لأول مرة في ألمانيا في عام ١٩٧٧. وبعد فترة تم فيها إثبات صلاحية المفهوم وإجراء تجارب توضيحية، نُشرت النظم التجارية الأولى في محطة سري للقوى النووية في الولايات المتحدة الأمريكية في ١٩٨٦.

وعادة ما تُنقل البراميل المعدنية مباشرة من منطقة تحميل الوقود إلى موقع التخزين. وبعض البراميل المعدنية مرخَّصة لكل من التخزين والنقل خارج الموقع على الطرق العامة. ويحمَّل الوقود عموديًّا في البراميل، التي تُخزن عادةً في وضع عمودي [١].

أُبلِغ عن التخزين في البراميل المعدنية عدد من البلدان، مثل إسبانيا وألمانيا وسويسرا والولايات المتحدة الأمريكية واليابان، في مراحل مختلفة من المشاريع البحثية المنسقة [١]. وتُعرض بعض الأمثلة في الشكلين ٩ و١٠.

الشكل ٩- براميل تخزين من نوع TN-32 في محطة سُري للقوى النووية بالولايات المتحدة الأمريكية (الصورة مقدَّمة من ملف صور NRC بالولايات المتحدة الأمريكية).

الشكل ١٠- براميل من نوع CASTOR في مدينتي آهاوس وغورليبين في ألمانيا (الصورتان مقدمتان من شركة GNS).

٣-٢-٣-٢- *البراميل الخرسانية*

كانت شركة أونتاريو هايدرو (كندا) أول من بحث مفهوم استخدام برميل خرساني لنقل الوقود المستهلك وتخزينه والتخلص المحتمل منه. وأُنشئ في عام ١٩٨٨ برنامج إيضاحي؛ ونُشر لاحقاً في عام ١٩٩٦ أول نظام تجاري يستخدم هذه التقنية، وهو برميل التخزين الجاف الموضح في الشكل ١١.

الشكل ١١- براميل تخزين جاف لوقود مفاعلات كاندو (الصورة مقدمة من شركة أونتاريو لتوليد القوى الكهربائية).

في الوقت نفسه تقريباً، كان اتحاد شركات في الولايات المتحدة الأمريكية يُجري أبحاثا بشأن نظام برميل خرساني بديل باستخدام ما أصبح يُعرف لاحقاً باسم برميل سيبرا ذي التهوية لتخزين الوقود النووي. ويختلف هذا النظام عن نظام أونتاريو هيدرو في أن الوقود يحمَّل في علبة معدنية تُنقل بعد ذلك إلى برميل تخزين خرساني (مبطَّن بالمعدن من الداخل فقط) باستخدام برميل معدني للتحويل. وكانت المزية الرئيسية لهذا النظام على برميل التخزين الجاف هي أنه يمكن أن يستوعب وقوداً أقصر تبريداً/عالي الحرق. ومنذ ذلك الحين حُسِّنت حدود التحميل الحراري لبرميل التخزين الجاف باستخدام نظم خرسانية عالية الأداء.

وطُوِّر لاحقاً مزيد من البراميل الخرسانية العمودية، مثل النمائط ذات التهوية HI-STORM من شركة HOLTEC، والنظم العامة المتعددة الأغراض (Universal Multipurpose Systems (UMS)) من شركة NAC، وCONSTOR من شركة GNB. ويرد في المرجع [١٨] مزيد من المعلومات عن البراميل الخرسانية.

وأبلغت عن التخزين في البراميل الخرسانية أثناء المشاريع البحثية المنسقة إسبانيا وكندا والولايات المتحدة الأمريكية.

٤- آليات تدهور الوقود المستهلك (في التخزين الرطب والتخزين الجاف)

تم الحصول على المعلومات الواردة في هذا الفصل من المرجعين [٢، ٤]؛ وسيتم التنبيه بشأن الأقسام التي لم يكن الأمر فيها كذلك. والمراجع الأخرى مذكورة في النص حسب الاقتضاء.

من المهم الحفاظ على السلامة البنيوية لكسوة المجمَّعات والوقود. فالكسوة السليمة تعمل كحاجز احتواء أوَّلي لكريات الوقود ومنتجات الانشطار على السواء خلال فترة التخزين وأثناء عمليات مناولة الوقود اللاحقة. وهذا صحيح لجميع أنواع الوقود المستهلك لمفاعلات القوى قيد النظر: مفاعلات الماء الخفيف، والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء، والمفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات، والمفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز، ومفاعلات ماغنوكس، ومفاعلات كاندو. وبالنسبة إلى تصميمات وقود مفاعلات كاندو وبعض مفاعلات الماء المغلي، قد تكون سلامة الكسوة مهمة أيضاً لسلامة مجمَّعات الوقود (الحِزَم)، لأن بعض قضبان (دبابيس) الوقود تعمل أيضاً كعناصر هيكلية.

٤-١- مفاعلات الماء الخفيف

باستثناء عدد محدود من تصميمات الوقود المبكِّرة، تُصنع جميع كسوات قضبان وقود مفاعلات الماء الخفيف الحالية من سبائك الزركونيوم. وفي مفاعلات الماء المغلي، تُستخدم السبيكة Zry-2، بينما المادتان المفضلتان في حالة مفاعلات الماء المضغوط هما السبيكة Zry-4 والسبيكة Zr-Nb.

٤-١-١- التخزين الرطب

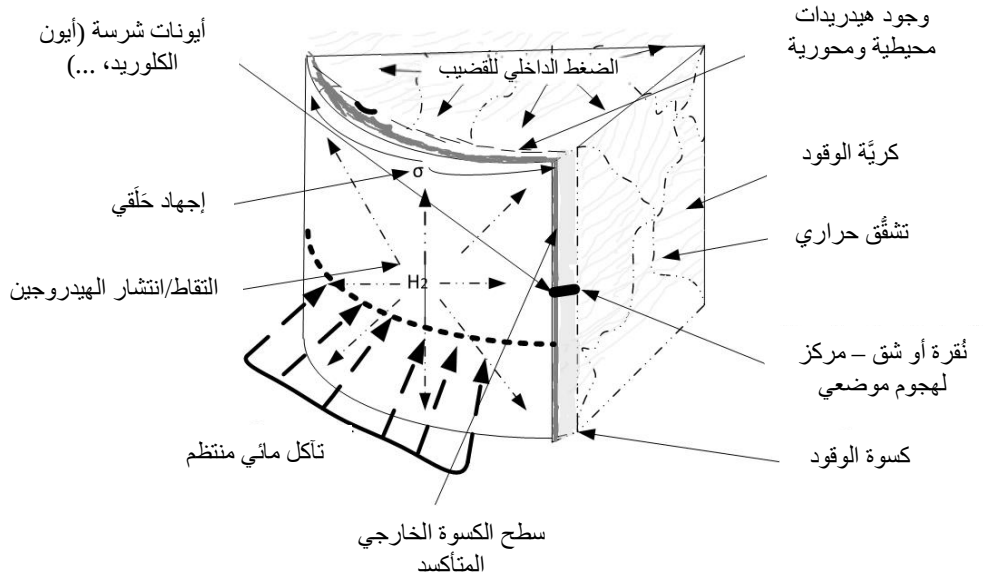
آليات التدهور التي قد تؤثر على سلامة الكسوة أثناء التخزين الرطب هي كما يلي:

(١) التآكل المنتظم (المائي)؛

(٢) التآكل الموضعي (التنقُّري، والغلفاني، والميكروبي)؛

(٣) التهدرد.

ويوضح الشكل ١٢ آليات التدهور التي قد تؤثر على سلامة كسوة الوقود أثناء التخزين الرطب.



الشكل ١٢- رسم توضيحي تخطيطي للظواهر التي قد تؤثر على أداء كسوة الوقود المستهلك أثناء التخزين الرطب.

٤-١-١-١- *التآكل المنتظم*

السلوك التآكلي لسبائك الزركونيوم في الماء المضغوط وبخار الماء معروف جيداً لدرجات الحرارة الأعلى من ٢٠٠ درجة مئوية. وبما أن معدل التآكل يتبع قانون أرهينيوس في نظام التآكل الخطي اللاحق للتحول، فإن معدلات التآكل في مياه الحوض عند ٣٠ إلى ٤٥ درجة مئوية تكون أقل[٣] بعامل ~١٠١٠ من تلك الموجودة في ظروف المفاعل التشغيلية. ومن ثم فسبائك الزركونيوم محصَّنة عمليًّا من التآكل المنتظم أثناء التخزين الرطب، على الأقل في ظل ظروف كيمياء المياه المحكومة.

وفي عام ٢٠١٢، أُبلغ لمشروع سبار الثالث عن إجراء اختبارات غمر على عينات من الكسوة المصنوعة من السبيكة Zry-4 والمشعَّعة، عند ٥٠ درجة مئوية وفي مجموعة متنوعة من كيميائيات التخزين المحتملة [٧]. فقد غُمرت عينات مصقولة وذات طبقة أكسيدية سليمة في هيدروكسيد الصوديوم (الرقم الهيدروجيني ١١,٤) ونترات الصوديوم (حتى ٥٠ جزءاً في المليون) وماء منزوع المعادن. وتم صنع محاليل هيدروكسيد الصوديوم ونترات الصوديوم بمياه منزوعة المعادن. وكانت مدة الاختبارات تصل إلى عام واحد. وأُزيلت العينات على فترات زمنية محددة بناءً على النتائج السابقة، وحُللت حسب فقدان الوزن وحسب البنية المعدنية، باستخدام المسح بالمجهر الإلكتروني.

وكانت نتائج الدراسة كما يلي:

- كانت معدلات التآكل أدنى من حد الكشف. لذلك اعتُبر حد الاستبانة الافتراضي للمسح بالمجهر الإلكتروني عند ٥٠ نانومتراً أسوأ حالة لمعدل التآكل لجميع الظروف الكيميائية؛ أي ٥٠ نانومتراً/سنة$^{-١}$؛
- لم يلاحَظ تشظي طبقة ثاني أكسيد الزركونيوم الأصلية أو تآكل موضعي؛
- لا يمكن استنتاج أي آثار على سمك التصاق طبقة الأكسيد أو مورفولوجيا طبقة الأكسيد ناتجة عن أي من الظروف الكيميائية.

وإلى جانب المواد الزركونية، تشمل المواد الأخرى المستخدمة في هياكل/حِزَم مجمَّعات الوقود الفولاذ المقاوم للصدأ (304L) والإنكونيل (٦٢٥، و٧١٨، و٧٥٠-X). وفي حين أن معدلات التآكل المنتظم في الماء لهاتين المادتين أعلى من مثيلاتها للمواد الزركونية فإن المادتين كلتيهما تُظهران، على الرغم من ذلك، متانة ممتازة في بيئات التخزين الرطب (<١ مكرومتر/سنة$^{-١}$).

٤-١-١-٢- *التآكل الموضعي (الغلفاني، والتنقُّري، والميكروبي)*

التآكل الغلفاني، في التخزين الرطب، حيث تعمل مياه الحوض كإلكتروليت، هو الهجوم التفضيلي الذي يصيب أحد معدنين غير متشابهين كهربائيًّا يكونان على اتصال كهربائي. والتآكل الغلفاني هو مجال محتمل للقلق بالنسبة إلى مواد مجمَّعات الوقود التي تتلامس مع رفوف التخزين والحاويات وما إليها.

يشيع استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ في رفوف وحاويات التخزين لأنه، مثل سبائك الزركونيوم، يقع عند الطرف القريب من النبيل من السلسلة الغلفانية، ولذلك لا يحدث له أي هجوم كهروكيميائي. وتؤيد الأدلة الموجودة حتى الآن أن هذا هو الحال. والمادة الأخرى التي تُستخدم في التخزين هي الألومنيوم. ومن شأن سبائك الألومنيوم، التي تقع قريبة من النهاية النشطة للسلسلة، أن تولِّد، إذا كانت على اتصال كهروكيميائي بسبائك الزركونيوم، جهداً كهربائيًّا كافياً لأكسدة الألومنيوم وهدردة الزركونيوم. ولا يحدث هذا في الواقع لأن المادتين كلتيهما تشكلان بسهولة طبقات أكسيدية تخميلية تعمل كحاجز يمنع المواد من الاتصال الكهربائي المباشر ببعضها البعض.

وسبائك الزركونيوم والمواد القائمة على الفولاذ المقاوم للصدأ ليست عرضة للتآكل التنقُّري في ظل ظروف كيمياء المياه العادية السائدة في أحواض الوقود المستهلك. أما التآكل الميكروبي فهو نتيجة للنشاط الأيضي لبعض أنواع البكتيريا؛ لا سيما

[٣] لوضع ذلك في سياقه الملائم، فإن التآكل الناتج عن يوم من التشغيل بالقدرة الكاملة يعادل التآكل الذي من شأنه أن يحدث على مدى عدة ملايين من السنين في حالة التخزين الرطب.

البكتيريا التي تختزل الكبريتات في المياه الراكدة. وبينما كانت هناك بعض الأدلة على التآكل الميكروبي في هياكل التبريد فإن التآكل الميكروبي لسبائك الزركونيوم ولمعدات التخزين لم يلاحظ في الأحواض. ويمكن القيام كإجراء وقائي بأخذ العينات دوريًّا للكشف عن وجود الأنواع الأحيائية الضارة، لا سيما بالنسبة لمرافق التخزين الخارجية.

٤-١-١-٣- *التهدرد*

الحد الأقصى لمتوسط تدرُّج تركُّزات الهيدروجين في كسوات سبائك الزركونيوم عند نهاية التشغيل داخل المفاعل يكون عادةً بين ٥٠ جزءاً و٦٠٠ جزء في المليون؛ تبعاً للمواد وارتفاع قضيب الوقود ودورة تشغيل الوقود داخل المفاعل. وعندما يبرَّد الوقود إلى درجة حرارة حوض التخزين، يترسب الهيدروجين الموجود في المحلول الجامد في السبيكة في شكل صفائح هيدريد، ربما باستثناء الهيدروجين المرتبط بالعيوب الناجمة عن التشعيع، من قبيل حلقات انخلاع الشواغر (أو الهيدروجين المحاصر في تلك العيوب). وبسبب خصائص نقل الحرارة التي يتسم بها الماء، يمكن استبعاد إمكانية إعادة توزُّع الهيدروجين عن طريق الانتشار الحراري وتشكيل ما يسمى "النُّقَر" بواسطة عملية إنضاج 'أوستفالد' أثناء التخزين الرطب الطويل الأمد في درجات حرارة الحوض ذات الأهمية العملية.

٤-١-٢- التخزين الجاف

آليات التحلل المحتملة التي قد تؤثر على سلامة كسوة وقود مفاعلات الماء الخفيف أثناء التخزين الجاف وعمليات المناولة والنقل اللاحقة هي التالية:

(١) التأكسد بالهواء؛

(٢) الزحفان الحراري؛

(٣) التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي؛

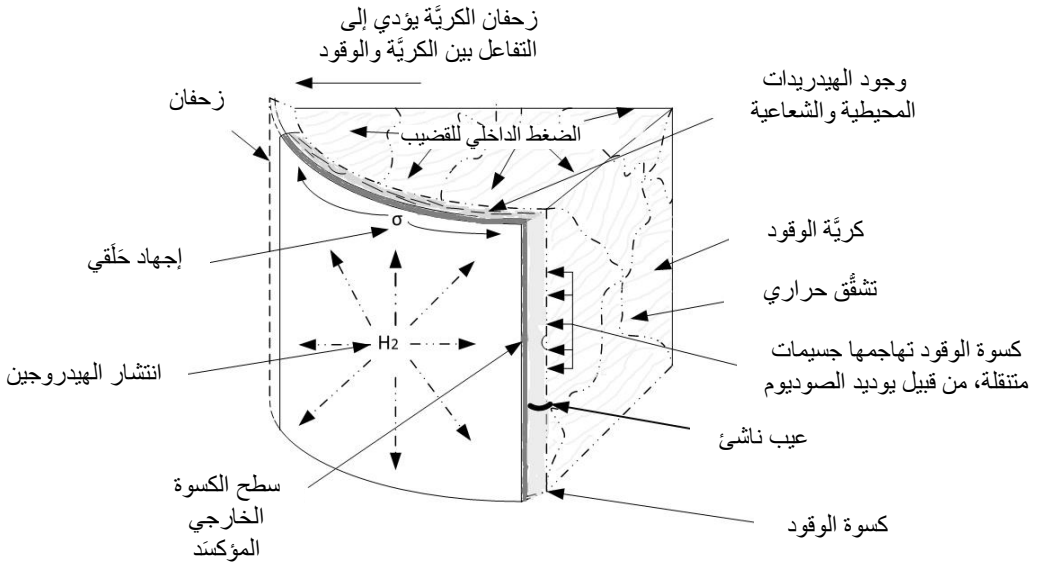
(٤) التشقق الهيدريدي المتأخر؛

(٥) إعادة توجُّه الهيدريدات؛

(٦) انتقال الهيدروجين وإعادة توزُّعه.

والآلية الأولى ذات أهمية خاصة عند النظر في فقدان حالة الخمول عند حلول الهواء محل الغاز الخامل (في العادة الهيليوم). ولدى الآليات الثلاث التالية القدرة على إحداث عيوب مخترقة للجدار في الكسوة أثناء التخزين. ومن غير المحتمل أن تؤدي الآليتان الأخيرتان إلى تعطُّب قضيب الوقود أثناء التخزين؛ وبدلاً من ذلك، يحتمل أن تؤدي إلى إضعاف قدرة الكسوة على الصمود الفعال أمام التحديات الميكانيكية التي يمكن أن تكون ضارة الناتجة عن حوادث المناولة أو النقل.

يوضح الشكل ١٣ ظروف نهاية التشعيع التي توجد في مقطع من دبوس وقود مفاعل ماء خفيف والتي يمكن أن تؤثر على سلامة كسوة الوقود (المصنوعة من الزركونيوم) في التخزين الجاف.



الشكل ١٣ - الخصائص المضفاة التي يمكن أن تؤثر في أداء كسوة الوقود المستهلك (القائم على الزركونيوم) أثناء التخزين الجاف.

تكون الظروف المحتملة المتعلقة بالنظام بأكمله وتؤدي إلى فقدان سلامة الكسوة إما محظورة بموجب اللوائح أو تُعتبر تعقيدات غير مرغوب فيها، لا سيما الظروف الناتجة عن تمزُّق الكسوة الجسيم. وعموماً لا يُعتبر التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي والتشقق الهيدريدي المتأخر آليتين نشطتين بالنسبة لعناصر الوقود ذات الكسوة الرقيقة الجدران، نظراً لأن قيم عامل شدة الإجهاد فيهما أقل بكثير من قيم عتبة بدء الشقوق و/أو انتشارها. بيد أن التشقق الهيدريدي المتأخر يُعتبر آلية تدهور محدودة لحزم وقود كاندو. وقد أُجري الكثير من أعمال التجارب للحصول على فهم أفضل للظروف التي يمكن أن تحدث فيها إعادة توجُّه الهيدريدات، من أجل الحصول على فهم أفضل للتدهور المحتمل في الخواص الميكانيكية للكسوة وتأثيرها المحتمل على عمليات مناولة ونقل الوقود المستهلك. وتبيَّن أن انتقال الهيدروجين بسبب التوزُّع المحوري لدرجات الحرارة محدود العواقب.

٤-١-٢-١- التأكسُد بواسطة الهواء

تمنع ظروف البيئة الخاملة أثناء التخزين الجاف، التي تسبقها عمليات التجفيف والتخميل المناسبة، وجود كميات كبيرة من الهواء تلامس للوقود المستهلك المخزون. ولا تؤدي الظروف العادية إلى تأكسد يتجاوز ذلك الذي يحدث أثناء تشغيل المفاعل. ومن ثم فالتأكسد ليس آلية تدهور نشطة في ظل ظروف التخزين العادية في بيئة خاملة. والتأكسد بواسطة الهواء ممكن في الظروف غير العادية أو الحوادث التي من شأنها أن تؤدي إلى تعطُّب سدادات نظام التخزين. ويمكن النظر في سيناريوهين: (١) قضبان الوقود الخالية من العيوب المخترقة للجدران؛ و (٢) قضبان الوقود التي بها عيوب مخترقة للجدران.

تأكسُد الكسوة

نظراً لأن معدلات تأكسُد الكسوة الزركونية عن طريق الهواء منخفضة نسبيًّا في درجات الحرارة النمطية لظروف التخزين الجاف[٤] فإن الخسائر في سمك جدار الكسوة تقتصر على نسبة مئوية صغيرة، حتى في حالة التعرض للهواء لفترة طويلة. لذلك تظل الكسوة حاجز احتواء فعالاً يحمي كريَات الوقود من التعرض للهواء بالنسبة لقضبان الوقود التي لا تحتوي على عيوب مخترقة للجدار.

[٤] باستخدام المعادلة التي طُوِّرت في المنشور المعنون *The Corrosion of Zircaloy Clad Fuel Assemblies in a Geological Repository Environment* [Hillner E., Franklin, D.G., and Smee, J.D., WAPD-T3173 (1998)]، يُتوقع أن يُفقد ٢٠ ميكرومتراً فقط من المزيد من الكسوة بالنسبة إلى الوقود المحتفظ به عند درجة حرارة ٤٠٠ مئوية لمدة ١٠٠ يوم. وكانت معادلة Hillner وآخرين قد طُوِّرت بشأن التآكل الناتج عن البخار، لكن معدلات التآكل في البخار وفي الهواء متشابهة.

تأكسُد الوقود

بالنسبة للكسوة التي توجد بها عيوب مخترقة للجدار، سيتلامس الهواء مع الوقود الموجود داخل القضيب. وتظل معدلات تأكسد ثاني أكسيد اليورانيوم منخفضة للغاية عندما تكون درجة الحرارة أقل من ~٢٥٠ درجة مئوية. فإذا تجاوزت درجة الحرارة ٢٥٠ درجة مئوية، يصبح تحول ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) إلى ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8) ممكناً. وعملية تأكسد الوقود المستهلك في الهواء هي عملية من خطوتين تتخذ الشكل التالي (المعادلة (١)):

$$UO_2 \rightarrow U_4O_9 \rightarrow U_3O_8 \qquad (١)$$

وفي تجارب تأكسد الوقود المستهلك [٢١]، تقترب نسب الأكسجين إلى المعدن أولاً من مستوى مستقر قريب من النسبة ٢,٤ (بدلاً من النسبة ٢,٢٥ الخاصة بتاسع أكسيد رباعي اليورانيوم (U_4O_9)). ولا تؤدي عملية التأكسد حسب التفاعل الوارد في المعادلة (٢) إلى تغيرات ملموسة في كثافة كريَّات الوقود.

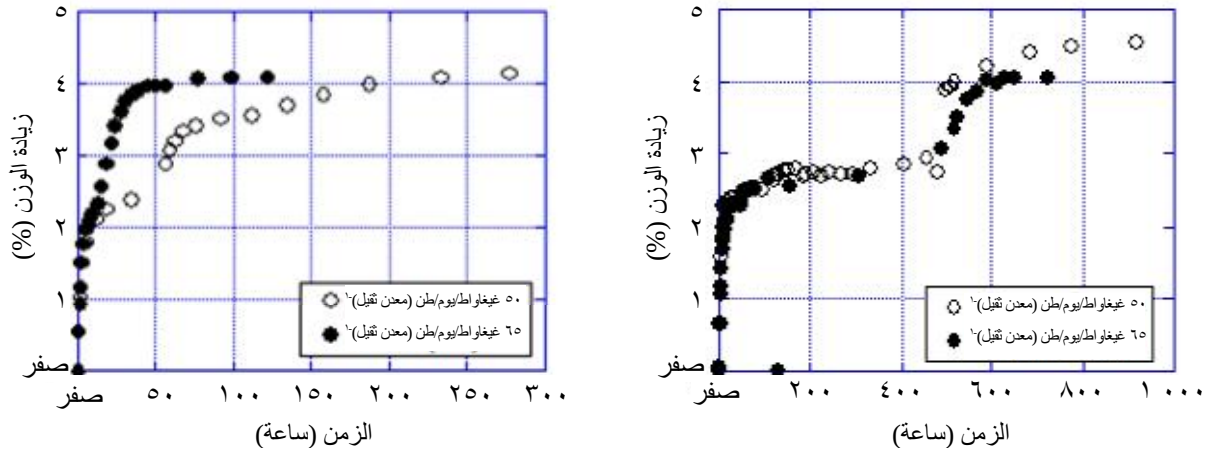
$$UO_2 \rightarrow UO_{2.4} \qquad (٢)$$

وحالما يتأكسد الوقود المستهلك إلى $UO_{2.4}$، يبدو أن الوقود 'يقاوم' حدوث المزيد من التأكسد للتحول إلى أكاسيد أعلى. وبعد هذا المستوى المستقر، قد يُستأنف التأكسد ويستمر حتى الوصول إلى مرحلة ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8) (المعادلة (٣)).

$$UO_{2.4} \rightarrow U_3O_8 \qquad (٣)$$

وهذا التفاعل، الوارد في المعادلة (٣)، يعتمد بقوة على كل من درجة حرارة الوقود وحرق الوقود، وينتج عن هذا التحول تمدد في الحجم بنسبة أكبر من ٣٦٪. وتؤدي الزيادة في الحجم، عند تأكسد الوقود إلى ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم، إلى مستويات إجهاد عالية للكسوة؛ وقد ينتج عن ذلك تمزق جسيم، أو 'انفتاح'، للكسوة.

وكانت الاستقصاءات حول تأثير مستوى الحرق العالي على سلوك التأكسد قد أُجريت على وقود ثاني أكسيد اليورانيوم المشعَّع بمعدلي حرق ٥٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ و٦٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ [٢٢]. وعُرّضت عينات الوقود للهواء الجاف عند درجات حرارة تتراوح بين ٣٠٠ و٤٠٠ درجة مئوية. ويوضح الشكل ١٤ منحنيات زيادة الوزن عند ٣٠٠ درجة مئوية (الرسم الأيمن) و٣٥٠ درجة مئوية (الرسم الأيسر)؛ وتُناظر زيادة الوزن بنسبة ٤٪ تكوُّن ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم من ثاني أكسيد اليورانيوم بنسبة ١٠٠٪. وعند ٣٠٠ درجة مئوية، لا يوجد فرق كبير في سلوك التأكسد بين مستوى الحرق ٥٠ ومستوى الحرق ٦٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. ومن الناحية الأخرى، عند ٣٥٠ درجة مئوية، يكون معدل تأكسد العينة عند مستوى الحرق ٦٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ أعلى من معدل تأكسد العينة عند مستوى الحرق ٥٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ عند تجاوز نسبة الأكسجين إلى المعدن البالغة ٢,٤. وقد خُمِّن أن البنية المكروية للكريَّة تؤثر على سلوك التأكسد عند ٣٥٠ درجة مئوية.



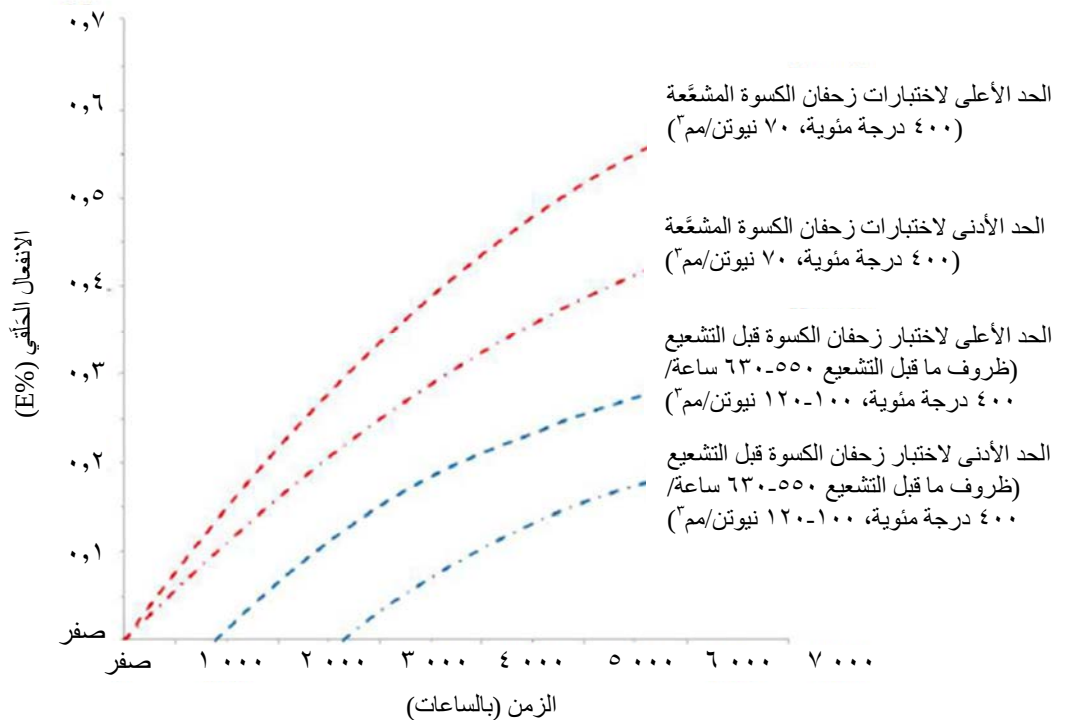
الشكل ١٤- اعتماد سلوك التأكسد على مستوى الحرق ودرجة الحرارة (الأرقام مقدمة من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية [٤]).

٤-١-٢-٢- *الزحفان الحراري*

من المرجح للغاية أن يؤدي تمزق الكسوة الناتج عن التشوه الزحفاني المفرط إلى تمزق من نوع 'الثقب الدقيق' (أو الشق الضيق)، نظراً لفقدان القوة الدافعة (أي الضغط الداخلي للقضيب) عند إزالة الضغط، إلى جانب الطاقة الميكانيكية (أي الضغط مضروباً في الحجم) المنخفضة جدًّا المخزونة في قضيب الوقود. وقد وُضعت في البداية معايير متحفظة للغاية لمقدار الإجهاد الزحفاني الذي يمكن أن يتكوَّن خلال فترة التخزين المرخص بها، وذلك للحماية من إمكانية التمزق الزحفاني أثناء التخزين الجاف. واقترح سبيلكر وآخرون لأول مرة نسبة ١٪ للإجهاد الزحفاني عند نهاية التخزين [٢٣] باعتبارها حدًّا متحفظاً بدرجة كافية من شأنه أن يكون مقبولاً لدى السلطات الرقابية الألمانية. وأُبلغ خلال الأعوام العشرين الماضية عن تقدم كبير في الحالة التقنية لتطور سلوك الوقود المستهلك. ونتيجة لذلك، يوجد حاليًّا تباين واسع في الإرشادات الرقابية المتعلقة بالزحفان الحراري. ويشمل هذا التباين النطاق الممتد من الالتزام بحد الإجهاد الزحفاني ١٪، الذي اقترحه سبيلكر، إلى عدم فرض حد زحفاني صريح، كما هو موجود حاليًّا في النظام الرقابي للولايات المتحدة.

وأدى التنفيذ المبكر لنهج يحدُّه الزحفان في ألمانيا إلى منهجية تعتمد على الاعتبارات التالية:

التطبيق المتحفظ لعلاقات الارتباط التي تم الحصول عليها بشأن الكسوة غير المشعَّعة من أجل التنبؤ المتحفظ بسلوك الزحفان الحراري بعد التشعيع للكسوة المشعَّعة. ويمكن الحصول على درجة التحفظ اللازمة من خلال مقارنة بيانات الزحفان الخاصة بالسبائك غير المشعَّعة والسبائك المشعَّعة (الشكل ١٥)؛

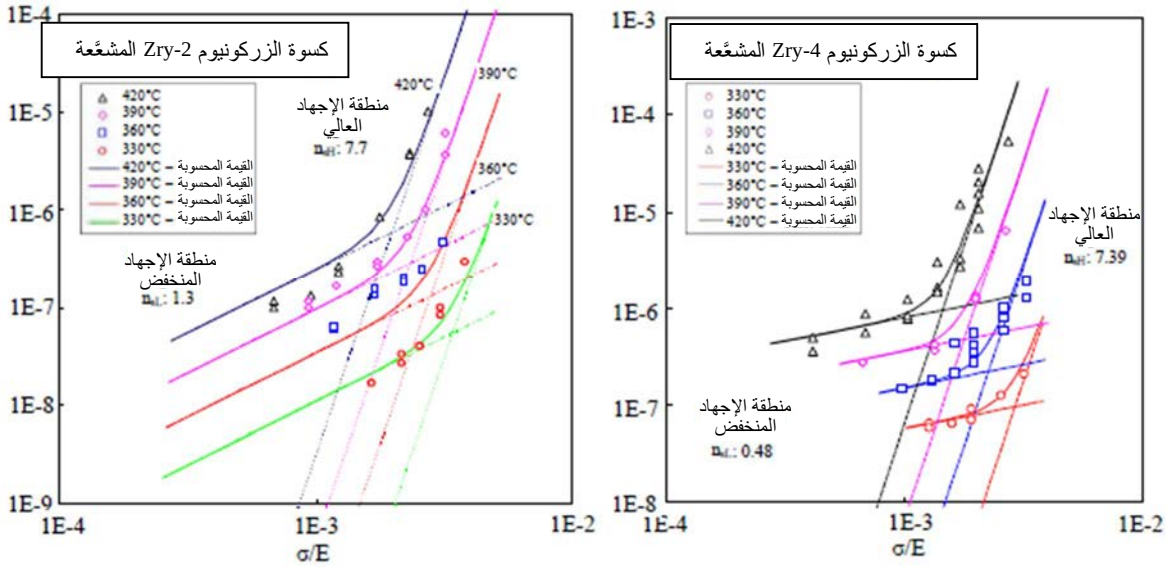


الشكل ١٥- مقارنة بين الإجهاد الزحفاني لكسوة السبيكة Zry-4 المشعَّعة وغير المشعَّعة، مقتبسة من المرجع [٤].

جمع قاعدة بيانات لإجمالي إمكانية الإجهاد الزحفاني لكسوة قضبان الوقود في ظل ظروف محاكاة التخزين الجاف. وبالنسبة للحرق الأقل من ٤٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$، تشير البيانات المستمدة من اختبار تمزق الكسوة بعد التشغيل في المفاعل إلى أن الكسوة تصل إلى إجهاد منتظم بنسبة ١٪ قبل التمزق. ونظراً لأن إمكانية إجهاد التمزق لأنبوب الكسوة تتناقص مع ازدياد معدل الدَّفق، يستعاض عن النهج المحافظ المتمثل في استخدام اختبار التمزق، بما ينطوي عليه من معدلات إجهاد عالية جدًّا، باختبار الزحفان المعجَّل، الذي ينطوي على معدلات إجهاد أقل. وقد نُفِّذ هذا البرنامج الاختباري باستخدام الوقود المستهلك بمعدل حرق يصل إلى ٦٤ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ [٢٣]. ووفَّر البرنامج الأساس للترخيص الألماني الحالي لتخزين مجمَّعات وقود ثاني أكسيد اليورانيوم ووقود الأكسيد المختلط المستهلك بمتوسط حرق للدفعات يصل إلى ~٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$.

وعلى الرغم من أن التخزين الجاف للوقود النووي التجاري المستهلك ليس خياراً متصوراً حاليًّا في البرنامج الفرنسي، فقد أُنجز الكثير من العمل، تجريبيًّا وتحليليًّا على السواء، في سياق مشروع PRECCI ('برنامج البحوث حول التطور الطويل الأمد لحزم الوقود المشعَّع') من أجل تحسين فهم التطور طويل الأمد للوقود المستهلك في ظل الظروف البيئية ذات الصلة بالتخزين الجاف والتخلص الجيولوجي. وعلى وجه الخصوص، تم جمع البيانات التجريبية، واشتقاق معايير التمزق الزحفاني، ووضع المعادلات التأسيسية، لزحفان الكسوة. وجرى هذا العمل في إطار القوانين الفرنسية للتصرف في النفايات النووية [٢٤].

وفي اليابان، يُعتبر السلوك الزحفاني لكسوة الوقود أحد أهم قضايا سلامة الوقود أثناء التخزين الجاف الطويل الأمد للوقود المستهلك. وقد استُقصيت خصائص الزحفان في ظل ظروف مختلفة من الإجهاد الحَلَقي ودرجة الحرارة والتشعيع في نظامين ضابطين مختلفين للتشوه الزحفاني، تم تحديدهما، على التوالي، بأنهما انزلاق حدود الحُبيبات وتسلُّق الانخلاع. ويوضح الشكل ١٦ الانتقال من تسلُّق الانخلاع (عند القيم الأعلى لنسبة S/E، حيث S هي الإجهاد الحَلَقي وE هي معامل يونغ) إلى انزلاق حدود الحُبيبات (عند القيم المنخفضة للنسبة S/E).



الشكل ١٦ - تبعية معدل الزحفان الثانوي للإجهاد (الشكلان مقدمان من المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية [٤]).

واشتُقَّت معادلات الإجهاد الزحفاني، المعبَّر عنها كمجموع الإجهادات الزحفانية التقليدية الأولية والثانوية، فيما يتعلق بالكسوات المشعَّعة وغير المشعَّعة لمفاعلات الماء المغلي (السبيكة Zry-2 المشعَّعة حتى ٥٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$) ومفاعلات الماء المضغوط (السبيكة Zry-4 المشعَّعة حتى ٤٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$). والمعادلات موثقة في المرجع [٤].

كان معدل الزحفان الثانوي ومعدل الإجهاد الزحفاني للكسوة المشعَّعة، بالنسبة لجميع ظروف درجات الحرارة ومناطق الإجهاد، أقل من المعدَّلين الخاصين بالكسوة غير المشعَّعة. وتؤكد هذه النتائج، ضمن نطاق ظروف الاختبار، أن الإجهادات الزحفانية تكون أقل بسبب التشعيع النيوتروني. وكان التأثير أقل عند درجات الحرارة الأقل والإجهاد الأقل. وبافتراض أن آليات الزحفان هي تسلُّق الانخلاع وانزلاق حدود الحُبيبات في مناطق الإجهاد المرتفع والإجهاد المنخفض، على التوالي، فإن عيوب التشعيع، مثل مجموعات العيوب النُّقطية، والحلقات الخِلالية وحلقات الانخلاع، وما إليها، تُعرقل حركة الانخلاع. نتيجة لذلك، يصبح قمع الزحفان أكثر وضوحاً في مناطق الإجهاد العالي حيث يكون الزحفان الناتج عن تسلق الانخلاع هو السائد. ومن الناحية الأخرى، فنظراً لأن عيوب التشعيع لا تعتبر شديدة الفعالية في قمع الزحفان الناجم عن انزلاق حدود الحُبيبات، تكون التأثيرات القمعية في مناطق الإجهاد المنخفض صغيرة نسبيًّا.

وبالنسبة للاختبارات التي أجريت على الكسوة غير المشععة، كانت آثار الهيدروجين على سلوك زحفان الكسوة في نطاق درجات الحرارة والإجهاد الحَلَقي الذي تم بحثه كما يلي:

- المحتوى الهيدروجيني دون حد الذوبان: بالنسبة للكسوة المصنوعة من السبيكة Zry-2 لمفاعلات الماء المغلي، أظهر الزحفان تسارعاً طفيفاً بفعل الهيدروجين المشحون، بينما لم تُلاحَظ أي اتجاهات مهمة بالنسبة للكسوة المصنوعة من السبيكة Zry-4 والخاصة بمفاعلات الماء المضغوط؛
- المحتوى الهيدروجيني فوق حد الذوبان: ازدادت التأثيرات التي تقمع الزحفان مع ازدياد المحتوى الهيدروجيني في كسوة مفاعلات الماء المضغوط، أما بالنسبة لكسوة مفاعلات الماء المغلي فقد لوحظ تأثير تعجيلي طفيف في منطقة الإجهاد المنخفض ولوحظت تأثيرات قمعية في منطقة الإجهاد العالي؛
- لم تُلاحَظ أي تأثيرات على معدل الزحفان بسبب إعادة توجُّه الهيدريدات في الاتجاه الشعاعي.

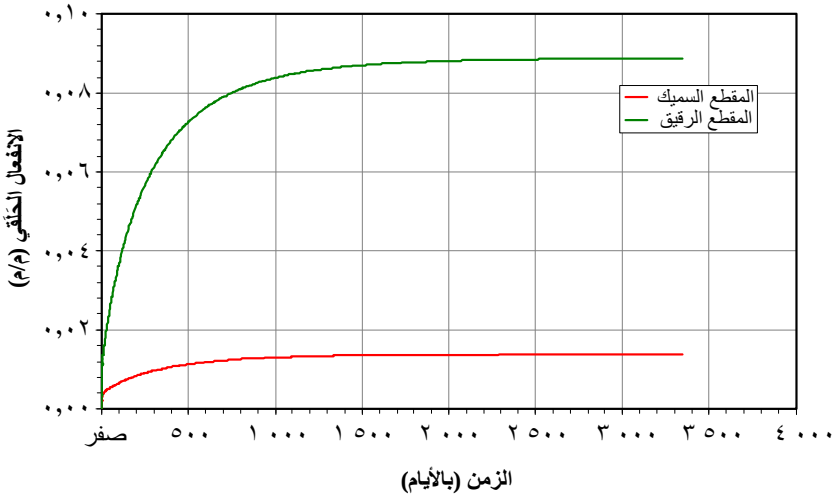
ونجحت المنظمات الإسبانية التالية: مجلس الأمان النووي (CSN) والشركة الوطنية للنفايات المشعة (ENRESA) وشركة إينوسا (ENUSA)، في تنفيذ برنامج لتوليد بيانات الزحفان الحراري بشأن المادة ZIRLO™ العالية الحرق (٦٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$) المشعَّعة في محطة فانديليوس الإسبانية للقوى النووية [٢٥]. وكانت نتائج الزحفان متوافقة مع السلوك الزحفاني المتوقع للمادة CWSR Zry-4 المستخدمة كمادة مرجعية. وأثناء أحد الاختبارات، سَرَّبت عينة عند إجهاد هندسي بنسبة ١٧٪ لقطاع الأنبوب؛ ومن الجدير بالملاحظة أن الشق انسد بسبب إزالة الضغط، الأمر الذي يدل على أن المادة احتفظت بمطواعية كبيرة.

ودعماً للتفاعلات بين صناعة المرافق العامة للولايات المتحدة والهيئة الرقابية النووية للولايات المتحدة، طوَّر معهد بحوث القوى الكهربائية منهجية قائمة على الزحفان للوقود عالي الحرق المودع في التخزين الجاف [٢٦-٢٧]. وتضمنت النظم السلوكية التي بُحثت آثار التعافي من التلف الإشعاعي والمحتوى الهيدروجيني على معدلات زحفان الكسوة. كما بُحثت آثار تآكل السطح الخارجي، بما في ذلك تشظي الأكسيد، على تموضع إجهاد الكسوة وتأثيره اللاحق على التشوهات الزحفانية وكذلك تبعية الإجهاد لدرجة الحرارة، بسبب التبريد المتصاعد أثناء التخزين الجاف. وأظهرت اختبارات التمزق الزحفاني أن التمزق الزحفاني هو عدم استقرار لدائني ناجم عن الإجهاد كحالة نهائية للمرتبة الثالثة من الزحفان، ومن غير المرجح للغاية أن يحدث أثناء التخزين الجاف لوقود مفاعلات الماء الخفيف المستهلك. والسبب في ذلك هو أن التشوهات الزحفانية للكسوة في ظل ظروف التخزين الجاف محدودة ذاتيًّا، وتتسم بمعدل إجهاد متناقص باستمرار بسبب التناقص المستمر لإجهاد الكسوة بالتناسب مع تمدد الحجم الناجم عن الزحفان وتناقص درجة الحرارة. ونتيجة لذلك، ثبت أنه، أثناء التخزين الجاف، من غير المرجح أن يتجاوز الإجهاد الزحفاني المدى الإجهادي الحرج مؤدياً إلى عدم الاستقرار اللدائني.

في الوقت نفسه، أظهرت التجارب التي أجراها مختبر أرغون الوطني الإمكانية الزحفانية للكسوة المصنوعة من السبيكة Zry-4 المستمدة من وقود سُري (Surry) المستهلك (~٣٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$) ووقود هـ. ب. روبنسون المستهلك (~٦٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$). وقيست إجهادات زحفانية قُطرية تصل إلى ٨,٥٪ (سُري) و٥,٥٪ (هـ. ب. روبنسون) دون وجود دلالة على انخفاضات موضعية في سُمك الكسوة.

ويرد في الشكل ١٧ مثال على المحاكاة التحليلية للتخزين الجاف لقضيب وقود عالي الحرق بسُمك أكسيد ١٢٠ ميكرومتراً، وعدسة هيدريدية بعمق يساوي ٥٠٪ من السمك الأصلي للجدار. واختيرت درجة حرارة أولية وضغط داخلي قدرهما ٤٠٠ درجة مئوية و١٩,١ ميغاباسكال. وفضلا عن ذلك، افتُرضت درجة حرارة قدرها ٤٤٠ درجة مئوية خلال دورة تجفيف مدتها ٢٤ ساعة، تشمل فترة تسخين وفترة تبريد يبلغ كل منهما ٨ ساعات. ويوضح الشكل ١٧ الانفعال الحَلَقي في رباط العدسة الهيدريدية (المقطع الرقيق) وبعيداً عن العدسة (المقطع السميك) مع معاملة سُمك

الأكسيد على أنه خسارة معدنية مكافئة. ويوضح هذا الشكل سلوك التحديد الذاتي لزحفان الكسوة (حتى في منطقة العدسة الهيدريدية الموضعية).

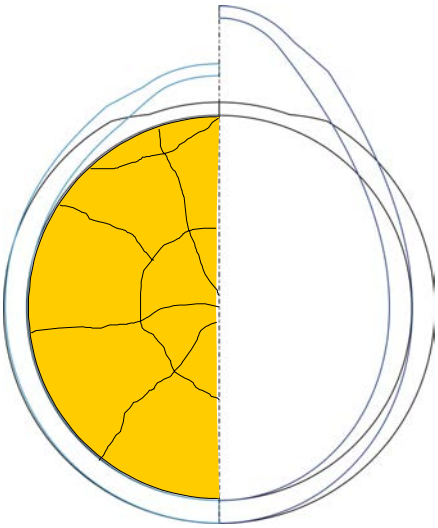


الشكل ١٧ - مسيرة انفعال قضيب وقود في برميل جاف أُخضع لدورة تجفيف مدتها ٢٤ ساعة مع ذروة درجة حرارة قدرها ٤٤٠ درجة مئوية (الشكل مقدم من معهد بحوث القوى الكهربائية [٤]).

من الخصائص السلوكية المهمة التي لم تتم محاكاتها في اختبارات الزحفان في الأنابيب المضغوطة تأثير كريَّات الوقود على تقييد التشوهات الزحفانية لقضبان الوقود العالية الحرق المحتوية على هيدريدات موضعية. ويوضح الشكل ١٨ التشوه الناتج عن الزحفان في مقطع من كسوة قضيب مزوَّد بالوقود (الجانب الأيسر) مقارنة بمقطع من الكسوة أزيل منه الوقود (الجانب الأيمن) في وجود عدسة هيدريدية تقلل من السمك الفعال لجدار للكسوة بعامل اثنين. ونتيجة لذلك، ليست التشوهات الزحفانية منتظمة. فبالنسبة للعينة المزال منها الوقود، تميل التشوهات إلى التموضع في رباط العدسة الهيدريدية. ويؤدي ذلك إلى سحب الكسوة إلى الداخل عند موضع يقع عند ٩٠ درجة بعيداً عن منطقة العدسة، بما يزيد من التشوهات في الرباط المرقَّق. وتمنع كريات الوقود هذا السلوك من التطور، وتحصر التشوهات في منطقة العدسة الهيدريدية. والفرق بين طريقتي سلوك التشوه الزحفاني كبير جدًّا.

وأسفرت نتيجة هذه الاستقصاءات عن صدور قرار من هيئة الرقابة النووية بالولايات المتحدة ملخص على النحو التالي:

> *"بصفة عامة، تدعم هذه البيانات والتحليلات الاستنتاجات التالية: (١) أن التشوه الناتج عن الزحفان سيسير ببطء بمرور الزمن وسيقلل من ضغط القضيب؛ (٢) أن درجة الحرارة المتناقصة للكسوة تقلل أيضاً من الإجهاد الحَلَقي، وهذا أيضاً سيبطئ معدل الزحفان بحيث يصبح التشوه الزحفاني الإضافي خلال المراحل اللاحقة من التخزين الجاف قليلاً للغاية؛ (٣) في الحالة غير المرجَّحة لحدوث خرق للكسوة بسبب الزحفان، يُعتقد أن هذا لن يؤدي إلى تمزق جسيم. وبناءً على هذه الاستنتاجات، يشعر موظفو هيئة الرقابة النووية باطمئنان معقول إلى أن الزحفان في ظل ظروف التخزين العادية لن يتسبب في تمزق جسيم للكسوة، وأنه سيتم الحفاظ على التشكيل الجيومتري للوقود المستهلك، بشرط ألا تتجاوز درجة الحرارة القصوى للكسوة ٤٠٠ درجة مئوية (٧٥٢ درجة فهرنهايت)"* [٢٨].



الشكل ١٨ - مقارنة الاستجابة الزحفانية لقضيب وقود مزوَّد بالوقود (الجانب الأيسر) بمحاكاة اختبار زحفان الأنبوب الفارغ (الجانب الأيمن)، توضِّح التأثير التقييدي لكريات الوقود على التشوهات الزحفانية الموضعية (الشكل مقدم من معهد بحوث القوى الكهربائية [٤]).

٤-١-٢-٣- *التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي*

لا يحدُث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي المستحث باليود إلا في نطاق محدَّد من درجات الحرارة العالية، في وجود اليود النشط كيميائيًّا والضغوط الكافية. ويمكن أن يتسم سلوك نواتج الانشطار بالاستقرار العالي إزاء إطلاق هذه النواتج. فوقود ثاني أكسيد اليورانيوم يتبلور في بنية من نوع بنية فلوريد الكالسيوم، ويحتوي على عدد كبير من الشواغر، بما يساعد على الاحتفاظ بنواتج الانشطار المتأتية من تشغيل المفاعل. كما تترك كل ذرة يورانيوم منشطرة مكاناً شاغراً إضافيًّا في البنية. ونتيجة لذلك فحتى في أنواع الوقود العالية الحرق لا تُشغَل جميع الشواغر، وتمتلك بلُّورة ثاني أكسيد اليورانيوم قدرة كافية على الاحتفاظ بنواتج الانشطار. وتتوفر مناقشة كاملة لهذا الموضوع في المنشور Peehs وآخرين [٢٩]. ونواتج الانشطار التي تتولد في وقود ثاني أكسيد اليورانيوم في ظل ظروف الخدمة غير متحركة عمليًّا في بنية وقود ثاني أكسيد اليورانيوم في نطاقات درجات الحرارة النمطية للتخزين الجاف، ولا يوجد اليود في شكل يمكن أن يؤدي إلى حدوث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي.

ونظراً لأن مزيج عوامل التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي وظروف الإجهاد المطلوبة لانتشار الشقوق تكون غائبة في العادة، يمكن بالتالي استنتاج أنه من غير المتوقع حدوث عطب في الكسوة عبر هذه الآلية. ومن ثم فإن جميع آليات العيوب التي تدفعها نواتج الانشطار، مثل التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي، والتشقق المنتظم الداخلي لكسوة قضيب الوقود بفعل نواتج الانشطار، والتآكل الموضعي الداخلي لكسوة قضيب الوقود بفعل نواتج الانشطار، لا تكون نشطة.

٤-١-٢-٤- *التشقق الهيدريدي المتأخر*

هناك طرائق عديدة يمكن أن يحدث بها التشقق المستحث بالهيدروجين لسبائك الزركونيوم. والتشقق الهيدريدي المتأخر هو عملية ميكانيكية محدَّدة للغاية تتطلب إجهاداً ثلاثي المحاور للزركونيوم لتوسيع بنية البلُّورة. فالإجهادات الثلاثية المحاور توسِّع المواقع الرباعية السطوح لبنية الزركونيوم، وهي المواقع التي تشغَلها ذرات الهيدروجين في المحلول الجامد. ويسمح ذلك لذرات الهيدروجين بأن تنتشر إلى الأعلى في تدرُّج الإجهاد وتترسَّب في منطقة ذروة الإجهاد. وعلى الرغم من أن التشقق الهيدريدي المتأخر لوحظ في عينات من سبيكة الزركالوي ذات السُّمك الكافي فإنه لا يُتوقع أن يكون هذا التشقق آلية تدهور نشطة في أنابيب الكسوة، نظراً لأنه لا يبدو أن لجدار هذه الأنابيب سُمك كافٍ لتوليد قدر كبير من الضغط الثلاثي المحاور.

وتُظهر الفحوص المختبرية للعينات المحزَّزة والمشقَّقة مسبقاً أن عملية التشقق الهيدريدي المتأخر تتطور على مرحلتين. تشتمل المرحلة الأولى على بدء الشقوق متبوعاً بزيادة سريعة في سرعة التشقُّق إلى أن تتحول إلى نظام مستقر لنمو التشقق،

أي المرحلة الثانية. وخلال المرحلة الثانية، وفي ظل ظروف درجة حرارة ثابتة، ينتشر الهيدروجين في المحلول الجامد إلى منطقة الإجهاد العالي المحيطة بطرف الشق. ومع الانتشار المستمر للهيدروجين في منطقة طرف الشق، يرتفع التركُّز الموضعي للهيدروجين حتى يتجاوز حد الذوبان وتبدأ الهيدريدات في الترسُّب أمام طرف الشق في شكل صفائح صغيرة متوجهة عموديًّا بالنسبة لاتجاه الإجهاد. وعندما يصل الهيدريد إلى حجم حرج، يمكن أن ينكسر، بما يسمح للشق بالتقدم إلى أن يتم إيقافه في مادة الزركالوي الأكثر صلابة التي تلي الهيدريد، حيث يتشكل طرف شق جديد شديد الإجهاد، وتتكرر العملية. ويستمر الشق في الانتشار بهذه الطريقة المتقطعة إلى أن يحدث العطب بسبب عدم الاستقرار اللدائني للرباط المتبقي. وهذه العملية موضحة في الشكل ١٩ الذي تظهر فيه سرعة الشق مبيَّنة كدالة لعامل شدة الإجهاد K_I (المعادلة ٤):

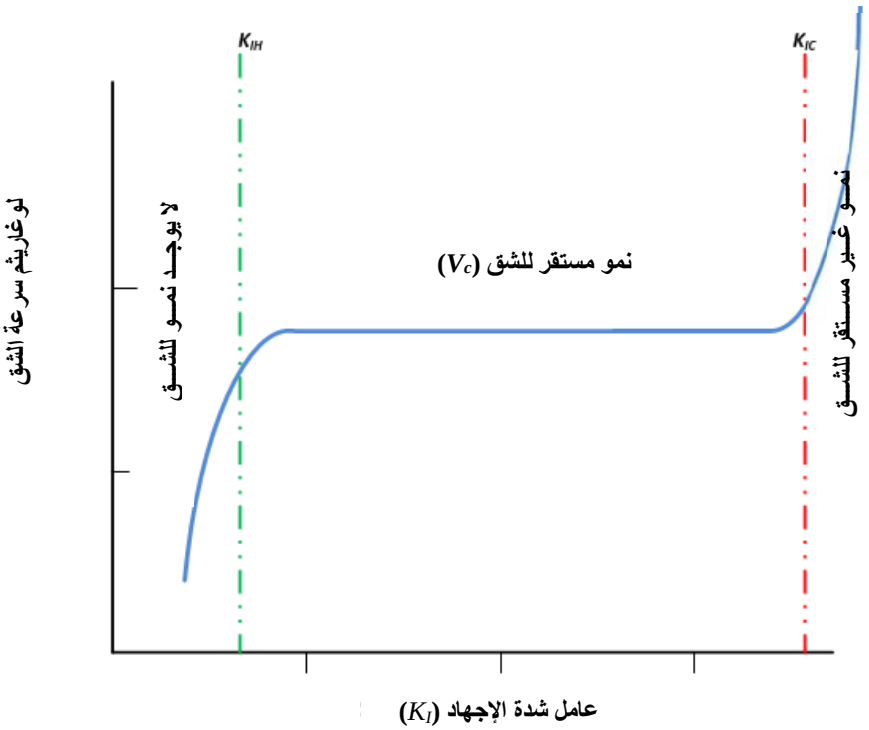
$$K_I = f\sigma\sqrt{\pi a} \qquad (٤)$$

حيث:

σ هي الإجهاد الحَلَقي

a هي طول عيب الكسوة (الشق)

f هي عامل عددي يعتمد على شكل عيب الكسوة (= ١,٠٤ إلى ١,٢٦)



الشكل ١٩- تمثيل تخطيطي لتبعية سرعة الشق كدالة لعامل شدة الإجهاد K_I. وK_{IH} هي قيمة K_I عند الانتقال بين المرحلة الأولى والمرحلة الثانية. وK_{IC} هي قيمة K_I في نهاية المرحلة الثانية، وترتبط بالنمو غير المستقر للشقوق.

ويقدم المنشور Rashid وآخرون [٢٧] تحليلاً يحدد خمسة شروط ينبغي أن توجد ليكون التشقق الهيدريدي المتأخر آلية نشطة في وقود مفاعلات الماء الخفيف أثناء التخزين الجاف. ويخلص التحليل إلى أن التشقق الهيدريدي المتأخر ليس آلية فاعلة في التخزين الجاف، ويوضح أن عوامل شدة الإجهاد (K_I) في كسوة وقود مفاعلات الماء الخفيف تكون عادةً أقل بكثير من عوامل شدة الإجهاد الحرجة (K_{IH}) اللازمة لبدء الشقوق أو لاستمرار نمو الشقوق. غير أن التشقق الهيدريدي المتأخر يُعتبر الآلية الأكثر حرجاً التي يمكن أن تؤثر على سلامة حزم وقود مفاعلات كاندو أثناء التخزين الجاف (انظر القسم اللاحق).

٤-١-٢-٥- *إعادة توجُّه الهيدريدات*

لا يستخدم هذا القسم الفرعي إلا المراجع المذكورة فيه.

من القضايا المهمة في تقييم أمان الوقود المستهلك أثناء التخزين والنقل تأثير الهيدريدات على مقاومة الكسوة للتعطُّب [٤]. والمسألة التي ينطوي عليها الأمر هي العواقب الأمانية والتشغيلية للأحمال الصدمية التي قد تحدث أثناء مناولة الوقود المستهلك ونقله. وتعتمد الدرجة التي يمكن أن تحافظ بها كسوة الوقود المستهلك على القوة والمطواعية الكافية، بعد عدة سنوات في التخزين الجاف، على عدة عوامل، من بينها التوزيع المكاني للهيدريدات وتوجُّهها. ففي نهاية دورة الوقود النشط في مفاعلات الماء المضغوط، يمكن أن يصل المحتوى الهيدروجيني الكلِّي في كسوة السبيكة Zry-4 إلى ٥٠٠-٦٠٠ جزء في المليون. وتولِّد عملية تصنيع أنابيب الكسوة بنية في الكسوة تتسبب في ترسُّب الهيدريدات على شكل صفائح صغيرة في اتجاه مماسي (أو محيطي) بصفة غالبة. وتتطور هذه المورفولوجيا الهيدريدية ببطء شديد أثناء تشغيل المفاعل، نتيجة لالتقاط الهيدروجين أثناء عملية التآكل البطيء للجانب الملامس للماء، بما يسبب تغيرات كبيرة، ولكن يمكن تحُّملها من الناحية التشغيلية، في الخواص الميكانيكية للكسوة [٢، ٤]. وتترسب هيدريدات إضافية ذات توجُّه محيطي أثناء إيقاف تشغيل المفاعل، بسبب انخفاض قابلية الهيدروجين للذوبان لدى انخفاض درجة الحرارة.

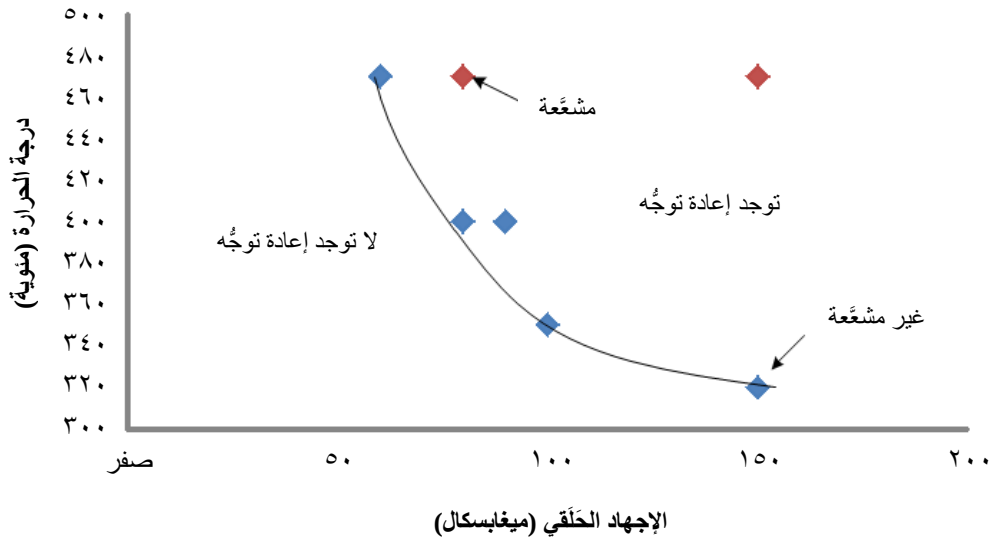
يمكن أن تحدث إعادة توجُّه الهيدريدات نتيجة لتسلسل الأحداث التالي. بعد التخزين الرطب في الأحواض عند درجات الحرارة السائدة البالغة بين ~٣٠-٤٠ درجة مئوية، يُنقل الوقود المستهلك إلى التخزين الجاف، أو يُنقل إلى مرفق تخزين مركزي أو مرفق إعادة معالجة مركزي. وقد يسبِّب التخزين الجاف و/أو عمليات النقل زيادات كبيرة في درجة حرارة الكسوة: وتوضع في الاعتبار بصفة عامة ذروة لدرجات حرارة الكسوة تصل إلى ٤٠٠ درجة مئوية (التخزين الجاف) أو حتى ٤٢٠ درجة مئوية (النقل). وتؤدي زيادة درجة الحرارة عند الانتقال من ظروف الحوض إلى ظروف التخزين الجاف/النقل إلى ذوبان الهيدريد وإلى زيادة مقابلة في الهيدروجين في المحلول الجامد في بنية سبيكة الزركونيوم إلى أن يتم الوصول إلى حد قابلية الهيدروجين للذوبان. وتؤدي زيادة درجة الحرارة أيضاً إلى زيادة في الضغط الداخلي للقضيب. ويؤدي التبريد اللاحق أثناء التخزين الجاف أو إعادة الترطيب بعد النقل إلى جعل الهيدروجين الموجود في المحلول الجامد في مواد الكسوة يترسب مجدداً، ولكن من المحتمل أن يكون مصطفًّا في الاتجاهين الشعاعي والمحوري (أو "الشعاعي" فقط) بسبب تأثير الإجهاد الحَلَقي الشدِّي في الكسوة الناتج عن الضغط الداخلي للقضيب، الذي لم يعد يعوَّض عنه بوسائل خارجية مثل ضغط سائل التبريد في المفاعل. ويمكن أن تنتج عن ذلك تركيبة هيدريدية مختلطة، محيطية وشعاعية، تبعاً لدرجة الحرارة ومسيرة الإجهاد الحَلَقي للكسوة. ويمكن أن يكون لهذه التركيبة الهيدريدية تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للكسوة وحدود تعطُّبها، لا سيما في النطاق الأدنى من درجات الحرارة (<٢٠٠ درجة مئوية) [٤].

والعاملان الرئيسيان اللذان يحركان إعادة توجُّه الهيدريدات هما درجة حرارة الكسوة والإجهاد الحَلَقي [٤]. والنتائج التي تم الحصول عليها في العديد من الاستقصاءات التي أجريت في فرنسا على السبيكة Zry-4 موضحة في الشكل ٢٠، الذي يبين الحد بين المجال الذي لم تلاحظ فيه إعادة توجُّه الهيدريدات (الجانب الأيسر) والمجال الذي لوحظت فيه إعادة توجُّه الهيدريدات (الجانب الأيمن). ويزداد مقدار إعادة توجُّه الهيدريدات على يمين الحد لأن ظروف درجة الحرارة والإجهاد الحَلَقي أكثر حدة، أي مع ازدياد درجة الحرارة والإجهاد.

وقد استَخدمت المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية نهجاً بديلاً لتحديد ظروف درجة الحرارة والإجهاد التي لا يمكن فيها ملاحظة أي تأثير على الخواص الميكانيكية بسبب توجُّه الهيدريد [٣١]. وفي هذه الحالة، استُنبط الحد بإجراء اختبار ضغط حَلَقي لمطواعية الكسوة بعد تطبيق معالجة حرارية شعاعية (RHT)° حُدِّدت من خلال درجة الحرارة الأولية والإجهاد الحَلَقي الأوَّلي للكسوة. بيد أن هذا النهج الأخير يُسفر عن نتائج يمكن أن تعتمد بشدة على معلَمَات أخرى للمعالجة الحرارية الشعاعية، وعلى الأخص معدل التبريد، لا سيما بالنسبة لكسوة السبيكة Zry-2 المبطَّنة بالزركونيوم والمستخدمة لمفاعلات الماء المغلي، على النحو الذي سيتم تناوله في قسم لاحق. وتوفِّر نتائج استقصاء المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية، الموضحة في الجدولين ١٠ (كسوة مفاعلات الماء المضغوط) و١١ (كسوة مفاعلات الماء المغلي)، أقصى قيم درجة

° يشار إليها أيضا بالمختصر HRT.

الحرارة والإجهاد الحَلَقي للمعالَجات الحرارية الشعاعية التي لم يلاحَظ عندها أي تدهور في المطواعية عن طريق اختبار الضغط الحَلَقي في درجة حرارة الغرفة.



الشكل ٢٠- مجالات إعادة توجُّه الهيدريدات مقابل الإجهاد/درجة الحرارة، مقتبس من المرجع [٢٤].

الجدول ١٠- ملخص عتبات المعالجة الحرارية الشعاعية لكسوة مفاعلات الماء المضغوط دون حدوث تدهور في مطواعيه الكسوة من جرَّاء إعادة توجُّه الهيدريدات [٧]

نوع الكسوة		عتبة عدم حدوث تدهور في المطواعية بسبب إعادة توجُّه الهيدريدات	
		درجة الحرارة (مئوية)	الإجهاد الحَلَقي (ميغاباسكال)
مفاعلات الماء المضغوط	٣٩ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)[١]- للسبيكة Zry-4 (مشغولة على البارد ومزالة الإجهاد)	≥٢٧٥	≥١٠٠
	٤٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)[١]- للسبيكة Zry-4 (مشغولة على البارد ومزالة الإجهاد)	≥٢٧٥	≥١٠٠
	٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)[١]- للسبيكة MDA™	≥٢٥٠	≥٩٠
	٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)[١]- للسبيكة ZIRLO™	≥٢٥٠	≥٩٠

الجدول ١١- ملخص عتبات المعالجة الحرارية الشعاعية لكسوة مفاعلات الماء المغلي دون حدوث تدهور في مطواعيه الكسوة من جرَّاء إعادة توجُّه الهيدريدات [٧]

نوع الكسوة		عتبة عدم حدوث تدهور في المطواعية بسبب إعادة توجَّه الهيدريدات	
		درجة الحرارة (مئوية)	الإجهاد الحَلَقي (ميغاباسكال)
مفاعلات الماء المغلي السبيكة Zry-2 (ملدَّنة ومعادة التبلور)	٤٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ دون بطانة	≥٢٠٠	≥٧٠
	٥٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ ببطانة	≥٣٠٠	≥٧٠
	٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ ببطانة	≥٣٠٠	≥٧٠

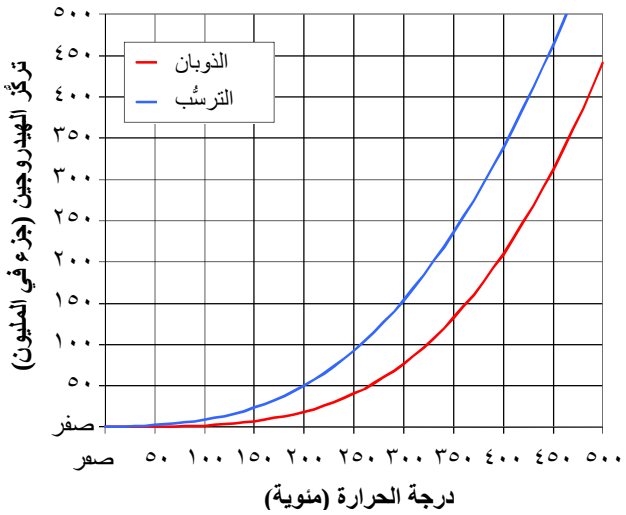
تأثير درجة الحرارة على إعادة توجُّه الهيدريدات

الهيدريدات المحيطية التي تذوب بسبب ازدياد درجة حرارة الكسوة عند الانتقال من بيئة رطبة إلى بيئة جافة ثم تترسب مجدَّداً في وقت لاحق أثناء التبريد هي وحدها التي يمكن أن تعيد توجُّهها [٤]. ومن ثم فدرجة الحرارة القصوى للكسوة تحدِّد مقدار الهيدروجين الذي يعود إلى المحلول الجامد في بنية سبيكة الزركونيوم.

تُظهر الهيدريدات في العادة تخلُّفية كبيرة بين الترسُّب والذوبان تتسم بفجوات في درجة الحرارة بين منحنيي الذوبان. وهذا يعني أنه أثناء التبريد تبدأ الهيدريدات في الترسُّب عند درجة حرارة معينة (هي درجة حرارة الذوبانية النهائية للمادة الصلبة عند الترسُّب)، وأنه أثناء التسخين ينتهي ذوبان الهيدريد عند درجة حرارة مختلفة تماماً (هي درجة حرارة الذوبانية النهائية للمادة الصلبة عند الذوبان) [٤]. وقد لاحظ McMinn وآخرون [٣٢] وKammenzind وآخرون [٣٣] فجوات درجة الحرارة الناتجة عن التخلُّفية في سبيكتي الزركونيوم Zry-2 وZry-4 بالنسبة للمحتويات الهيدروجينية المخفَّفة (≤٨٠ جزءاً في المليون) والمحتويات الهيدروجينية العالية (<٥٠٠ جزء في المليون)، على التوالي، في السبيكة Zry-4. وكانت المواد التي اختُبرت في هاتين الدراستين كلتيهما في حالة خالية من الإجهاد. وبالنسبة لسبائك الزركونيوم الخالية من الإجهاد، تبلغ فجوة التخلُّفية حوالي ٥٥±١٠ درجات مئوية بين الذوبان وبدء ترسُّب الهيدريدات المحيطية.

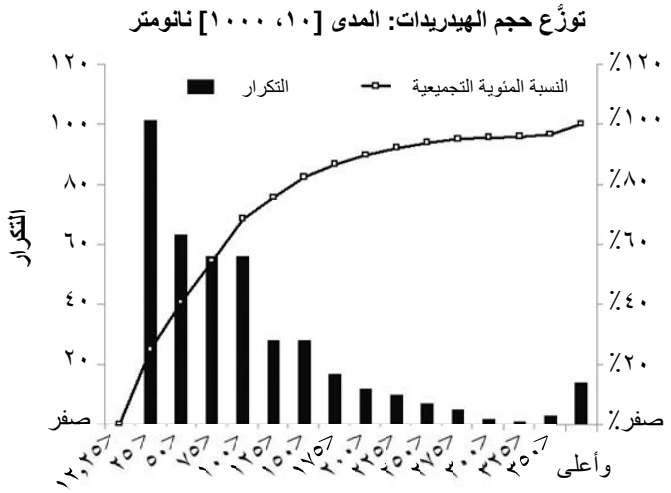
ولغرض التوضيح، يرد في الشكل ٢١ منحنيا الذوبان (درجة حرارة الذوبان النهائي للمادة الصلبة عند الترسُّب، ودرجة حرارة الذوبان النهائي للمادة الصلبة عند الذوبان) اللذان حُدِّدا لسبيكة الزركونيوم Zry-4 ألفا غير المشعَّعة الملدَّنة. وينتج عن التسخين من درجة حرارة الحوض إلى ٤٠٠ درجة مئوية ذوبان ما يصل إلى ~٢١٠ أجزاء في المليون من الهيدروجين في بنية السبيكة. ويؤدي التسخين إلى ٣٠٠ درجة مئوية إلى ذوبان ما يصل إلى ٧٧ جزءاً في المليون فقط. وعند التبريد من ٤٠٠ درجة مئوية، تبدأ إعادة ترسُّب الهيدروجين على شكل هيدريدات عند ~٣٣٥ درجة مئوية، بناءً على المنحنيين الموضحين في الشكل ٢١. وهذا هو السلوك المتوقع عندما تحتوي المادة على الهيدروجين عند حد الذوبان البالغ ٢١٠ أجزاء في المليون أو بالقرب منه.

وعندما تحتوي السبيكة على ٥٠٠ جزء في المليون من الهيدروجين، يوجد ~٢١٠ أجزاء في المليون من الهيدروجين في المحلول الجامد عند التسخين إلى ٤٠٠ درجة مئوية، كما هو مذكور في المثال السابق، مع عدم تأثر بقية الهيدروجين (~٢٩٠ جزءاً في المليون) وبقائها كهيدريدات. وعند التبريد، وجد K. Colas [٣٤]، باستخدام حيود الأشعة السينية في الموضع، فيما يتعلق بكسوة السبيكة Zry-4 الملدَّنة غير المشعَّعة المشغولة على البارد والمخفَّفة الإجهاد، أن بعض إعادة ترسُّب الهيدريد قد تحدث دون تخلُّفية أو بتخلُّفية قليلة عند وجود هيدريد متبقٍّ عند بدء التبريد. وفي ظل هذه الظروف، كان الإجهاد الحَلَقي العَتَبي لإعادة توجُّه الهيدريدات يتراوح بين ١٥٠ و٢٠٠ ميغاباسكال، وهذا أعلى بكثير من الإجهاد العَتَبي الملاحظ للعينات التي لا يوجد بها هيدريد عند ٤٠٠ درجة مئوية.



الشكل ٢١- منحنيات الذوبانية للسبيكة Zry-4 ألفا الملدَّنة (مقتبس بتصرف من المرجع [٣٣]).

وتضطلع الهيئة الوطنية للطاقة الذرية بالأرجنتين بمشروع بحثي للاستقصاء التجريبي لظواهر ذوبان الهيدريد وترسُّبه. وتحدَّد توزُّعات حجم الهيدريدات من صور المجال البصري وصور مجال المجهرية الإلكترونية النافذة. والرسمان التكراريان مبيَّنان في الشكل ٢٢. وفي هذا التحليل، اعتُبر الطول ١ ميكرومتر هو الحد الفاصل بين المجال البصري ومجال المجهرية الإلكترونية النافذة. وتلخيصاً لنتائج التحليل الإحصائي، يمكن القول بأن كمية غير ضئيلة من الهيدريدات دون المجهرية، بنسبة أعلى من ١٣٪، موجودة ولكنها غير مرئية في النطاق البصري. وبالنظر إلى أنه في النطاق البصري تكون نسبة ٢٥٪ من الهيدريدات أقل طولاً من ٥ ميكرومترات، فإنه يوجد توزُّع واسع لحجم الهيدريدات، يمتد على مدى أربع رتب حجمية، من ١٠ نانومترات إلى ١٠٠ ميكرومتر، ومتحيزة إلى الأحجام الأقصر طولاً من ٥ ميكرومترات. وترد تفاصيل إضافية في المرجع. [٧].



الشكل ٢٢- رسم تكراري لنطاق المجهرية الإلكترونية النافذة، يوضِّح توزُّع حجم الهيدريدات منحازاً للأحجام الصغيرة. ويلاحظ التكرار الأقصى عند ٢٠-٣٠ نانومتراً (الشكل مقدم من الهيئة الوطنية للطاقة الذرية [٧]).

تأثير الإجهاد على إعادة توجُّه الهيدريدات

كما هو مبين في الشكل ٢٠، يؤثر كل من إجهاد الكسوة ودرجة الحرارة على درجة إعادة التوجُّه. والضغط الداخلي للقضيب في نهاية العمر هو المحرّك الأساسي للتغيرات التطورية التي تحدث أثناء التخزين الجاف الطويل الأمد. وعند درجة الحرارة القصوى

التي يتم بلوغها إما أثناء التجفيف الفراغي أو أثناء التخزين الجاف، تُحدِّد الضغوط الداخلية للقضبان في نهاية العمر حالة الإجهاد القصوى في كسوة قضيب الوقود، التي بدورها تُحدِّد الظروف الأولية لعدة تغيرات في الكسوة تعتمد على الوقت وتحدث مع خضوع الكسوة للتبريد البطيء في البيئة الخاملة لبرميل التخزين. وفي نهاية المطاف، تصل درجات الحرارة الموضعية للكسوة إلى مستويات يبدأ فيها الهيدروجين الموجود في المحلول الجامد في إعادة الترسُّب، على النحو الذي وردت مناقشته في القسم السابق، وذلك هو الوقت الذي تكون فيه حالة إجهاد الكسوة على أقصى أهميتها لتقييم إمكانية إعادة توجُّه الهيدريد.

ويجب عند حساب قيم الضغط الداخلي للقضيب في نهاية العمر إيلاء الاعتبار لتوزُّع درجات الحرارة وتوزُّع حجم الفراغ، اللذين يوجدان في قضيب الوقود أثناء عمليات التجفيف الفراغي والتخزين الجاف. وأثناء عملية التبريد البطيئة للغاية، ينخفض الضغط الداخلي للقضيب ببطء (تأثير درجة الحرارة). وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أيضاً أن ينخفض الضغط الداخلي للقضيب بسبب زحفان الكسوة، الذي يسبِّب زيادة حجم الفراغ في قضيب الوقود (تأثير الحجم). وعند حساب إجهادات الكسوة، يوجد عدم يقين إضافي بسبب وجود طبقات تفاعل بين الكسوة والوقود (أي الترابط بين الكسوة والوقود) عند التعامل مع الوقود المستهلك عالي الحرق. وقد يكون الترابط بين الكسوة والوقود قويًّا بما يكفي لإعاقة الزحفان الحراري، لكنه قد ينقل جزءاً من الحمل من الكسوة إلى الوقود نتيجة لتشكُّل هيكل مركَّب يتألف من شظايا كريَّات متشابكة ملتصقة بجدار الكسوة. وفي هذه الحالة، من المحتمل أن تكون إجهادات الكسوة أقل بكثير من الإجهادات التي تُحسب عندما يُفترض وجود فجوة بين الوقود والكسوة.

وقد أجرى مختبر أرغون الوطني، باستخدام طريقة الأنبوب المضغوط والسماح للإجهاد بالانخفاض مع ازدياد درجة الحرارة، تقييماً لما للإجهاد الأوَّلي عند درجة الحرارة القصوى من آثار على درجة إعادة توجُّه الهيدريدات، باستخدام عامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية كمقياس لإعادة التوجُّه [٣٥]. وكما يتضح من الجدول ١٢، فكلما زاد الإجهاد الأوَّلي المطبَّق كلما زادت إعادة التوجُّه.

الجدول ١٢- ظروف المعالجة الحرارية الشعاعية ونتائج تحديد الخصائص بعد المعالجة الحرارية الشعاعية للسبيكة ZIRLO™ عند ٧٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ والسبيكة ZRY-4 عند ٦٧ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$

المادة	σ_θ عند درجة حرارة ٤٠٠ مئوية ميغاباسكال	هيدروجين مشحون جزء في المليون	عامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية %	عامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية نقاط البيانات
ZIRLO™	١٤٠	١٩٠± ٦٥٠	١٧ ± ٦٥	١٦
	١١٠	٦٣ ± ٤٢٥	١٠ ± ٢٧	٨
	١١٠	٨٠ ± ٣٥٠	١٤ ± ٣٣	٣٣
Zry-4	١٤٠	٨٢ ± ٦١٥	٤ ± ١٦	١٢
	١١٠	٩٠ ± ٥٢٠	٥ ± ٩	١١

ويرد في الأشكال ٢٣-٢٥ مزيد من التوضيح لتأثير الإجهاد. ففي الشكل ٢٣، يظهر العاملان $F_n(40)$[٦] و$F_l(45)$[٧] مبيَّنين مقابل الإجهاد الحَلَقي لكسوة السبيكة Zry-2 ذات بطانة الزركونيوم لمفاعلات الماء المغلي. وبالنسبة للعينات التي خضعت لمعالجة حرارية شعاعية عند ٣٠٠ درجة مئوية، لوحظت زيادة طفيفة في العاملين $F_n(40)$ و$F_l(45)$ عند إجهادات حَلَقية قدرها ٤٠ و٧٠ ميغاباسكال، وتظهر بسهولة درجة معيَّنة من إعادة توجُّه الهيدريدات عند إجهاد حَلَقي قدره ١٠٠ ميغاباسكال؛ ويبدو أن العاملَين، $F_n(40)$ و$F_l(45)$ كليهما، يتزايدان خطيًّا مع تزايد الإجهاد عند ٣٠٠ درجة مئوية؛ وعند ١٠٠ ميغاباسكال تكون درجة إعادة التوجُّه ما زالت أقل من ٤٠٪. وفي العينات التي خضعت لمعالجة حرارية شعاعية عند ٤٠٠ درجة مئوية، يزداد العاملان $F_n(40)$ و$F_l(45)$ كلاهما مع ازدياد الإجهاد الحَلَقي ضمن نطاق الإجهاد الحَلَقي الذي أُجري عليه الاختبار.

[٦] $F_n(40)$ هي (مجموع عدد الهيدريدات في الاتجاه الشعاعي ±٤٠ درجة) / (مجموع عدد جميع الهيدريدات).
[٧] $F_1(45)$ هي (مجموع أطوال الهيدريدات في الاتجاه الشعاعي ±٤٥ درجة) / (مجموع أطوال جميع الهيدريدات).

ويمكن تطبيع العامل F_n من خلال إيلاء الاعتبار للمحتوى الهيدروجيني في المحلول الجامد عند درجة حرارة المعالجة الحرارية الشعاعية، كما هو موضح في المعادلة (٥):

$$F_{ne}(40) = \frac{C_{H_t} \cdot F_n(40) - (C_{H_t} - C_{H_d}) \cdot F_n(40)_0}{C_{H_d}} \quad (٥)$$

حيث:

C_{H_t} هي إجمالي المحتوى الهيدروجيني في العينة؛

C_{H_d} هي المحتوى الهيدروجيني المذاب عند درجة حرارة المعالجة الحرارية الشعاعية؛

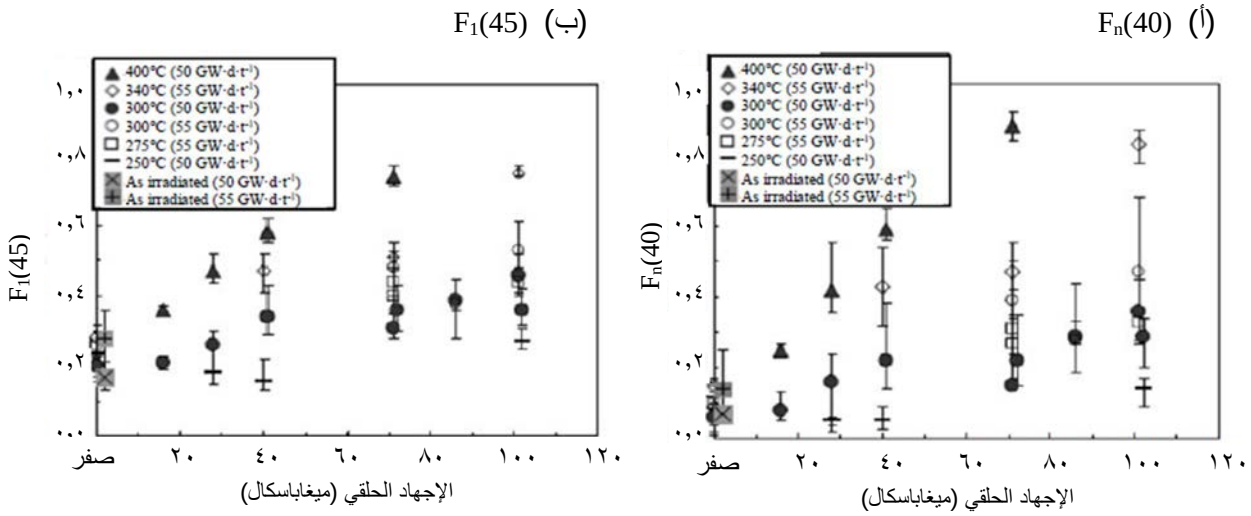
C_{H_d} تساوي 'ذوبانية الجسم الصلب النهائية لأغراض الذوبان' للكسوة، إذا كانت C_{H_t} أكثر من C_{H_d}؛

C_{H_d} تساوي C_{H_t}، و$F_{ne}(40)$ تساوي $F_n(40)$، إذا كانت C_{H_t} أقل من C_{H_d}؛

$F_n(40)_0$ تساوي $F_n(40)$ الخاصة بالعينة المشعَّعة غير المعالجة.

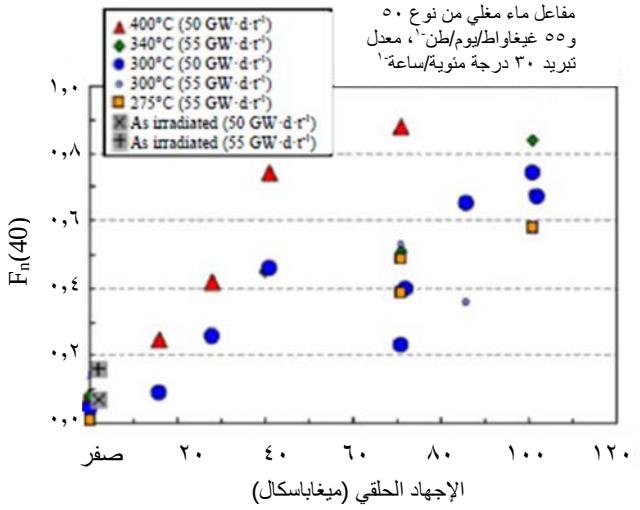
وتظهر في الشكل ٢٤ القيمة المطبَّعة، F_{ne}، المحسوبة باستخدام البيانات الواردة في الشكل ٢٣ (أ)، فيما يخص كسوة السبيكة Zry-2 المشعَّعة ذات بطانة الزركونيوم الداخلية والخاصة بمفاعلات الماء المغلي.

وقد قُيّمت النتائج المستمدة من اختبارات إعادة توجُّه الهيدريدات التي أُجريت على كسوة سبيكة الزركونيوم Zry-4 المشعَّعة بمعدل حرق قدره ٤٨ غيغاواط/يوم/طن (يورانيوم)$^{-1}$ لمفاعلات الماء المضغوط بنفس طريقة تقييم كسوة مفاعلات الماء المغلي؛ والنتائج موضحة في الشكل ٢٥. وزادت نسبة الهيدريدات الشعاعية للعينات بعد معالجة حرارية شعاعية عند ١١٥ ميغاباسكال ودرجة حرارة ٣٠٠ مئوية ومعدل تبريد ٣٠ درجة مئوية ساعة$^{-1}$ مقارنة بالعينات المشعَّعة غير المعالجة، كما هو موضح في الشكل ٢٧ [٤].



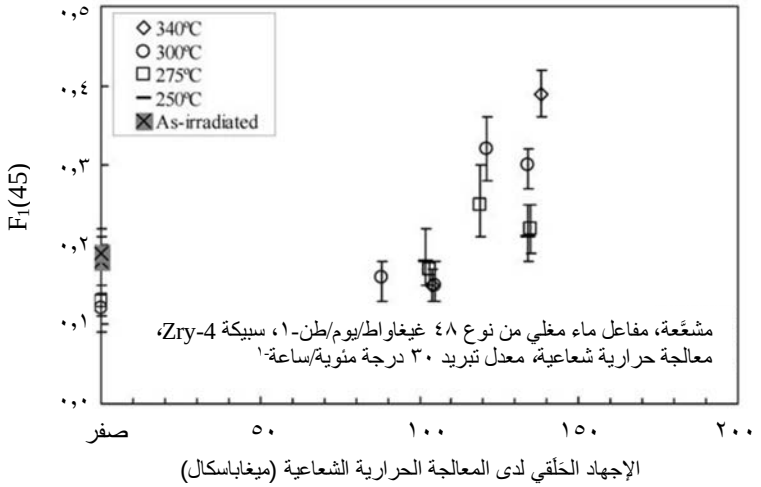
ملحوظات: As irradiated = مشعَّعة غير معالجة؛ °C = درجة مئوية؛ $GW \cdot d \cdot t^{-1}$ = غيغاواط/يوم/طن$^{-1}$.

الشكل٢٣- الترابط بين درجة إعادة التوجُّه، $F_n(40)$ و$F_1(45)$، وظروف المعالجة الحرارية الشعاعية لكسوة السبيكة Zry-2 المشعَّعة ذات بطانة الزركونيوم والخاصة بمفاعلات الماء المغلي (معدَّل التبريد: ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$) (الشكل مستنسخ بإذن من المرجع [٣١]، حقوق الطبع والنشر محفوظة للجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428)).



ملحوظات: As irradiated = مشعَّعة غير معالجة؛ ^{o}C = درجة مئوية؛ $GW{\cdot}d{\cdot}t^{-1}$ = غيغاواط/يوم/طن-١.

الشكل٢٤ - العلاقة بين درجة إعادة التوجُّه المطبَّعة، $F_{ne}(40)$، وظروف المعالجة الحرارية الشعاعية لكسوة السبيكة Zry-2 المشعَّعة ذات بطانة الزركونيوم والخاصة بمفاعلات الماء المغلي (معدَّل التبريد: ٣٠ درجة مئوية/ساعة-١) (الشكل مستنسخ بإذن من المرجع [٣١]، حقوق الطبع والنشر محفوظة للجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428)).



ملحوظات: As irradiated = مشعَّعة غير معالجة؛ ^{o}C = درجة مئوية.

الشكل ٢٥ - الارتباط بين درجة إعادة التوجُّه وظروف المعالجة الحرارية الشعاعية لكسوة سبيكة Zry-4 المشعَّعة والخاصة بمفاعلات الماء المضغوط (الشكل مستنسخ بإذن من المرجع [٣١]، حقوق الطبع والنشر محفوظة للجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428)).

تأثير ظروف المعالجة الحرارية الشعاعية على مطواعية الكسوة

استخدم مختبر أرغون الوطني وعدة جهات باحثة أخرى الإزاحة الحيودية المُقاسة في اختبار الانضغاط الحَلَقي لتحديد درجة مطواعية الكسوة بعد معالجات إعادة توجُّه الهيدريدات.

وتشير نتائج اختبارات الانضغاط الحَلَقي التي أجريت في مختبر أرغون الوطني إلى وجود اختلاف كبير في مدى تكوُّن الهيدريدات الشعاعية (في شكل عامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية[٨]) وفي درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى الهشاشة لقضبان سبيكة ZIRLO™ العالية الحرق مقارنة بقضبان سبيكة Zry-4 العالية الحرق. واختُبرت القضبان باتباع نفس مسيرة درجات الحرارة والإجهاد التي اختيرت لمحاكاة ظروف التجفيف والتخزين [٣٥]. وأُخذت عدة عوامل في الاعتبار عند تقييم هذه النتائج:

- التوزُّع الشعاعي للهيدريدات قبل الاختبار؛
- القوام؛
- الإجهادات المتبقية؛
- تركيبة السبيكة.

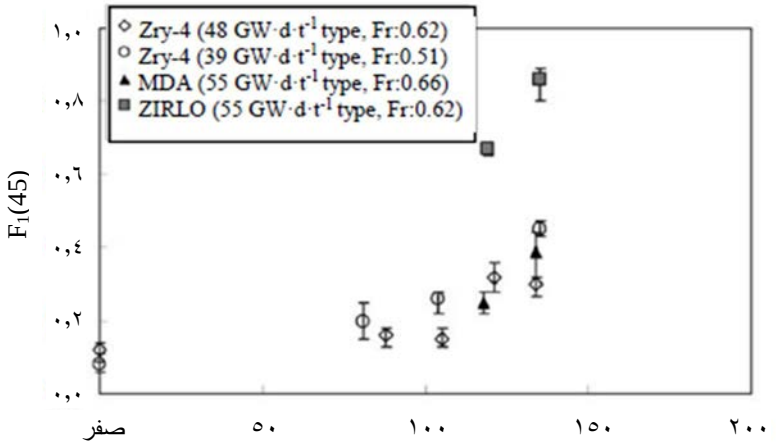
وبناءً على الفحص المعدني للعينات المماثلة قبل الاختبار، كانت حافة الهيدريدات أكثر كثافة وتموضعاً فيما يخص كسوة السبيكة ZIRLO™ العالية الحرق مقارنةً بكسوة السبيكة Zry-4 العالية الحرق. ومن المهم أنه يبدو أن متوسط المحتوى الهيدروجيني أسفل حافة الهيدريدات كان أعلى في السبيكة Zry-4 منه في السبيكة ZIRLO™. وبناءً على الصور المجهرية البصرية، قُدِّر أن متوسط المحتوى الهيدروجيني في الثلاثين الداخليين من مقاطع السبيكة Zry-4 كان <٢٠٠ جزء في المليون، في حين أن متوسط المحتوى الهيدروجيني في الثلاثين الداخليين من مقاطع السبيكة ZIRLO™ كان <١٥٠ جزءاً في المليون. ويمكن أن يكون للاختلافات في المحتوى الهيدروجيني قبل الاختبار تأثير كبير على عامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية [٣٥]. ويشير عدم وجود هيدريدات قبل وبعد المعالجة الحرارية الشعاعية على السطح الداخلي للسبيكة Zry-4 إلى أن الاختلاف الرئيسي بين النتائج الخاصة بالسبيكتين ZIRLO™ وZry-4 العاليتي الحرق لم يكن بسبب الاختلافات في التوزُّع الشعاعي للهيدريدات قبل الاختبار. وتشير النتائج إلى أن السبيكة ZIRLO™ العالية الحرق قد تكون أكثر قابلية من السبيكة Zry-4 العالية الحرق للترسُّب الهيدريدي الشعاعي على السطح الداخلي للكسوة أثناء إيقاف تشغيل المفاعل؛ وكذلك أثناء ظروف التجفيف والتخزين المحاكاة.

وثبت أن للبنية تأثير كبير على قابلية مواد الكسوة للترسُّب الهيدريدي الشعاعي أثناء التبريد في ظل الإجهاد الحَلَقي الشَّدِّي. وسبيكتا ZIRLO™ وZry 4 اللتان استُخدمتا في برنامج اختبارات مختبر أرغون الوطني مصنوعتان كلتاهما من مواد مشغولة على البارد ومزالة الإجهاد وملدَّنة. وقد قُدمت إلى مختبر أرغون الوطني تفاصيل تصنيع سبيكة Zry-4 لهذه الكسوة التي صنِّعت في عام ١٩٧٧، وتُستخدَم هذه التفاصيل لتصنيع قضبان وقود محطة هـ. ب. روبنسون لتوليد القوى النووية. إلا أنه لم يُقدَّم مثل هذه التفاصيل بشأن كسوة سبيكة ZIRLO™ التي استُخدمت لتصنيع قضبان وقود محطة نورث آنا لتوليد القوى النووية، التي بدأ فيها التشعيع في عام ١٩٨٧. ومن الممكن، ولكن من غير المرجح، وجود اختلافات في البنية بين هاتين المادتين من مواد الكسوة يمكن أن تكون قد ساهمت في الاختلافات في النتائج.

ومن حيث تركيبة السبيكة، تختلف سبيكة ZIRLO™ عن سبيكة Zry-4 المستخدمة في محطة هـ. ب. روبنسون لتوليد القوى النووية من حيث المحتوى القصديري (حوالي ١ من الوزن ٪ مقابل ١,٤ من الوزن ٪) والمحتوى النيوبيومي (حوالي ١ من الوزن ٪ مقابل صفر من الوزن ٪). وسبيكة الزركونيوم الأخرى المحتوية على النيوبيوم والمستخدمة ككسوة هي السبيكة M5™ RXA (Zr-1%Nb). وفي اليابان، اختُبرت أيضاً الكسوتان MDA™ وZIRLO™ المجهزتان من قضبان الوقود المستهلك الخاص بمفاعلات الماء المضغوط [٣١]. وكما هو مبين في الشكل ٢٦، وعند معدل حرق ٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$، كان العامل $F_I(45)$ للكسوة ZIRLO™ كبيراً نسبيًّا مقارنة بمواد الكسوة الأخرى لمفاعلات الماء المضغوط التي اختُبرت في هذه الدراسة [٢]. وأظهرت الكسوة MDA™، التي تحتوي على ٠,٥٪ نيوبيوم، نفس مستوى العامل $F_I(45)$ الذي أظهرته الكسوة Zry-4 عند معدل حرق ٤٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. ومن ثم فمن غير المحتمل أن يكون وجود النيوبيوم في الكسوة ZIRLO™ هو السبب الرئيسي لزيادة القابلية لترسُّب الهيدريد الشعاعي التي لوحظت في الكسوة ZIRLO™ العالية الحرق المختبرة في استقصاءات مختبر أرغون الوطني والمنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية.

---

[٨] عامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية (RHCF) يشبه عامل استمرارية الهيدريدات (HCC) الذي عرَّفه الباحثون الكنديون. ويُحدَّد هذا العامل الأخير عن طريق إسقاط الهيدريدات الشعاعية ضمن شريط محيطي قدره ٠,١١ مم على نصف القطر عبر الجدار المعدني. ويُطبَّع الطول الصافي لهذه الهيدريدات المُسقَطة حسب سمك الجدار المعدني لتحديد عامل استمرارية الهيدريدات. ويتَّبع بالنسبة لعامل استمرارية الهيدريدات الشعاعية إجراء مشابه على شريط جدار تكسية بسمك١٥٠ ميكرون.



الإجهاد الحَلَقي لدى المعالجة الحرارية الشعاعية (ميغاباسكال)

ملحوظات: Zry-4 (48 GW·d·t^{-1} type, Fr:0.62) = Zry-4 (من نوع ٤٨ غيغاواط/يوم/طن$^{-1}$، عامل كيرنز: ٠,٦٢)؛ Zry-4 (39 GW·d·t^{-1} type, Fr:0.51) = Zry-4 (من نوع ٣٩ غيغاواط/يوم/طن$^{-1}$، عامل كيرنز: ٠,٥١)؛ MDA (55 GW·d·t^{-1} type, Fr:0.66) = MDA (من نوع ٥٥ غيغاواط/يوم/طن$^{-1}$، عامل كيرنز: ٠,٦٦)؛ ZIRLO (55 GW·d·t^{-1} type, Fr:0.62) = ZIRLO (من نوع ٥٥ غيغاواط/يوم/طن$^{-1}$، عامل كيرنز: ٠,٦٢).

الشكل ٢٦- مقارنة سلوك إعادة التوجُّه بين مواد كسوة مفاعلات الماء المضغوط المشعَّعة (المعالجة الحرارية الشعاعية بدرجة حرارة ٣٠٠ مئوية، معدل التبريد ٣٠ درجة حرارة مئوية/ساعة$^{-1}$ (الشكل مستنسخ بإذن من المرجع [٣١]، حقوق الطبع والنشر محفوظة للجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428)).

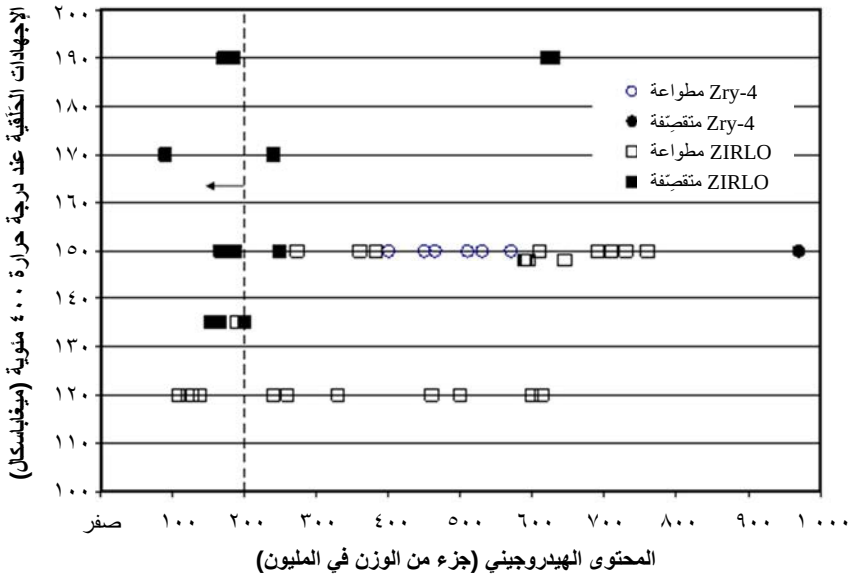
وكشف الاستقصاء الذي أجرته المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية أيضاً عن اختلاف سلوك إعادة التوجُّه بين مواد الكسوة. ويُعزى الاختلاف في سلوك إعادة التوجُّه بين مواد الكسوة Zry-2 (ملدَّنة ومعادة التبلور) ومواد كسوة مفعلات الماء المضغوط (مشغولة على البارد ومزالة الإجهاد وملدَّنة)، مثل الكسوتين Zry-4 وZIRLO™، إلى تأثير المعالجة الحرارية، التي تؤثر على خصائص المواد، من قبيل البنية الحُبيبية، بما في ذلك حجم الحُبيبات وتوجُّه حدود الحُبيبات والإجهاد/الانفعال الداخلي وما إلى ذلك. وبالنسبة للاختلاف في سلوك إعادة التوجُّه بين مواد كسوة مفاعلات الماء المضغوط (مشغولة على البارد ومزالة الإجهاد وملدنة)، يُقترَح أن العامل الذي تسبب في جعل إعادة التوجُّه أكبر للكسوة ZIRLO™ لم يكن البنية، لأن قيم عامل كيرنز (Fr) للكسوة ZIRLO™ كانت هي نفس القيم للكسوة Zry-4 ذات مستوى الحرق ٤٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. ويبدو أن تأثير عنصر السبك ليس هو العامل المهيمن، لأن الكسوتين Zry-4 وMDA™ أظهرتا سلوكاً متشابهاً نسبيًّا. وكانت درجة حرارة التلدين في عملية إنتاج الأنابيب للكسوة ZIRLO™ أقل من درجة حرارة التلدين هذه للكسوة Zry-4 [٣٦]. ومن ثم فإن الخصائص التي تتأثر بدرجة حرارة التلدين، ومنها مثلاً حجم الحُبيبات، قد تكون عوامل محتملة في هذا الصدد.

تأثير التشعيع في مفاعلات القوى على المطواعية

تثير التكاليف المرتفعة المرتبطة بالعمل بالمواد المشعَّعة (العينات المقطوعة من مكونات مجمَّعات الوقود المستهلك) التساؤل عما إن كانت العينات المشحونة بالهيدروجين غير المشعَّعة بديلاً جيداً للعينات المشعَّعة عند دراسة إمكانية إعادة توجُّه الهيدريدات وآثار ذلك التوجه.

وكانت نتائج اختبارات الانضغاط الحَلَقي لعينات الكسوة المُهَدرَدة مسبقاً وعينات الكسوة غير المشعَّعة الخاضعة للمعالجة الحرارية الشعاعية قد قُيّمت في البداية في مختبر أرغون الوطني على أساس النجاح أو الفشل، بمعنى أن معيار النجاح كان الصمود إزاء إزاحة قدرها ١,٧ مم في اختبار الانضغاط الحَلَقي مع حدوث شقوق جدارية تنفُذ إلى ≤٥٠٪ من سمك الجدار. ويوضح الشكل ٢٧ نتائج اختبارات الانضغاط الحَلَقي القائمة على أساس النجاح أو الفشل التي أُجريت عند ١٥٠ درجة مئوية، حيث تمثل الرموز المجوَّفة الحلقات التي صمدت إزاء إزاحة قدرها ١,٧ مم مع حدوث شقوق جدارية نفذت إلى ≤٥٠٪ من سمك الجدار. وتمثل الرموز الصمَّاء العينات التي حدثت بها شقوق نفذت إلى >٥٠٪ من سمك الجدار. ولوحظ التقصُّف على أساس النجاح أو الفشل عند انخفاض المحتوى الهيدروجيني إلى ما دون مستوى حرج قدره: ٢٧٥±٢٥ جزءاً في المليون للإجهاد الحَلَقي ١٥٠ ميغاباسكال

عند ٤٠٠ درجة مئوية؛ و٢٠٠±٢٠ جزءاً في المليون للإجهاد الحَلَقي ١٣٥ ميغاباسكال عند ٤٠٠ درجة مئوية؛ و<١٠٠ جزء في المليون للإجهاد الحَلَقي ١٢٠ ميغاباسكال عند ٤٠٠ درجة مئوية.



الشكل ٢٧ - بيانات اختبار الانضغاط الحَلَقي عند درجة حرارة ١٥٠ مئوية للسبيكتين المهدرتين مسبقاً Zry-4 و ZIRLO™ بعد المعالجة الحرارية الشعاعية (الشكل مقدم من هيئة الرقابة النووية بالولايات المتحدة [٧]).

واختُبرت حلقات قضبان مُهدرَدة مسبقاً ذات محتويات هيدروجينية (٣٥٠-٦٥٠ جزءاً في المليون)، تمثِّل مواد كسوة العالية الحرق، بإجهاد حَلَقي قدره ١٥٠ ميغاباسكال عند درجة حرارة ٤٠٠ مئوية. وأظهرت الحلقات مطواعية عالية (حيود >١٠٪) عند درجة حرارة ١٥٠ مئوية، حيث صمدت جميع الحلقات، باستثناء واحدة، إزاء اختبار الانضغاط الحَلَقي، دون أي دلالة على حدوث تصدُّع. بيد أن عينات المصفوفة العالية المطواعية، ذات التوزُّعات المنتظمة للهيدروجين عبر نصف القطر، ثبت أنها بدائل سيئة للغاية للكسوة العالية الحرق. وكان سلوك قضيب السبيكة ZIRLO™ العالي الحرق (٦٥٠ جزءاً في المليون من الهيدروجين) الذي عُرِّض لنفس الدورة الحرارية مع إجهاد أقل قليلاً (١٤٠ ميغاباسكال عند درجة حرارة ٤٠٠ مئوية) تقصُّفيًّا للغاية عند درجة حرارة ١٥٠ مئوية. وكان الاختلاف الرئيسي بين مواد الاختبار هو التوزُّع الشعاعي للهيدروجين قبل الاختبار؛ الذي كان منتظماً للكسوة المُهدرَدة مسبقاً وعلى قدر كبير من عدم الانتظام للكسوة العالية الحرق.

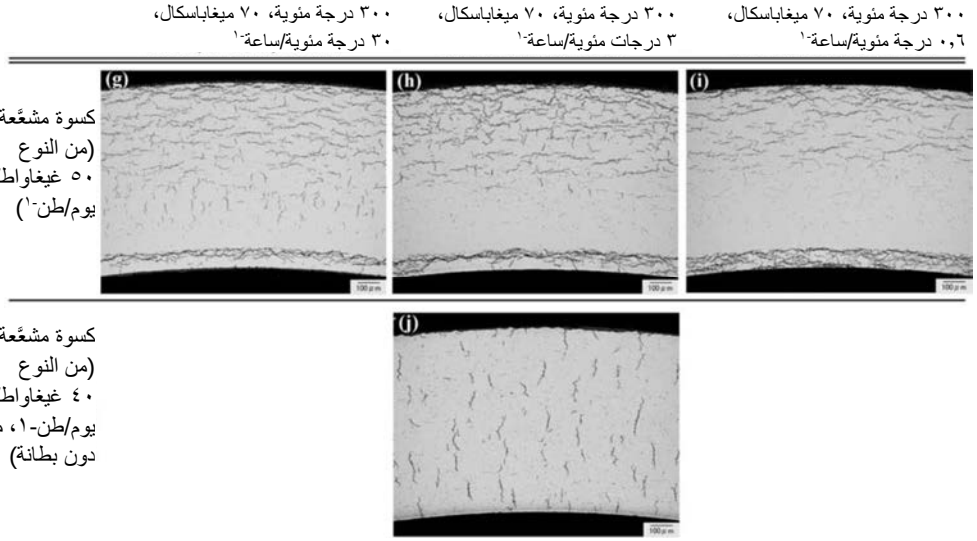
وعلى الرغم من أنه يبدو أن الكسوة غير المشعَّعة المُهدرَدة مسبقاً قد لا تكون بديلاً جيداً للكسوة عالية الحرق، فقد أثبتت الخبرة المكتسبة من إجراء الاختبارات باستخدام الكسوة المُهدرَدة مسبقاً أن تلك الكسوة مفيدة في وضع مقياس لتحديد مدى تكوُّن الهيدريد الشعاعي، وفي العرض البصري لانقطاع الشقوق على الاتجاه المحوري (بما يدل على انقطاع صُفيحات الهيدريد الشعاعية)، وفي تحديد ما للمحتوى الهيدروجيني المنخفض من آثار على ترسُّب الهيدريد الشعاعي والتقصُّف الناجم عن الهيدريد الشعاعي. وقد تُصبح العينات غير المشعَّعة المُهدرَدة مسبقاً أكثر فائدة عندما يتسنى جعل تشكيل الهيدريدات مشابهاً أكثر لتشكيل الهيدريدات في الكسوة المشعَّعة ذات نفس المحتوى الهيدروجيني.

تأثير معدل التبريد

يمكن أن يكون هناك اختلاف واضح بين ما لتغيير معدل التبريد من آثار على كسوة مفاعلات الماء المغلي Zry 2 ذات البطانة الداخلية مقارنة بما لذلك التغيير من آثار على كسوة مفاعلات الماء المضغوط Zry-4. فبالنظر إلى أن قابلية الهيدروجين للذوبان أقل في الزركونيوم النقي أو الزركونيوم الضعيف السبك مقارنةً بالسبيكة Zry-2 القياسية فإن البطانة المصنوعة من الزركونيوم تعمل كبالوعة للهيدروجين. ونتيجة للحفاظ على درجات حرارة أعلى للكسوة لفترات زمنية

أطول عن طريق خفض معدل التبريد، توجد كمية أقل من الهيدروجين المتبقي في السبيكة Zry-2، ويكون ذلك الهيدروجين متاحاً لإعادة التوجُّه.

في الصور الثلاث الأولى من الشكل ٢٨، يُلاحظ ازدياد حجم المنطقة المنزوعة الهيدروجين المجاورة للبطانة كدالة لمعدل التبريد في عينة لكسوة مفاعلات الماء المغلي Zry-2 مقطوعة من قضيب ذي معدل حرق ٥٠ غيغاواط/يوم/طن$^{-1}$. ونتيجة لذلك، لا تتكبد كسوة السبيكة Zry-2 المبطنة بالزركونيوم خسارة في المطواعية عند معدل تبريد منخفض بدرجة كافية.



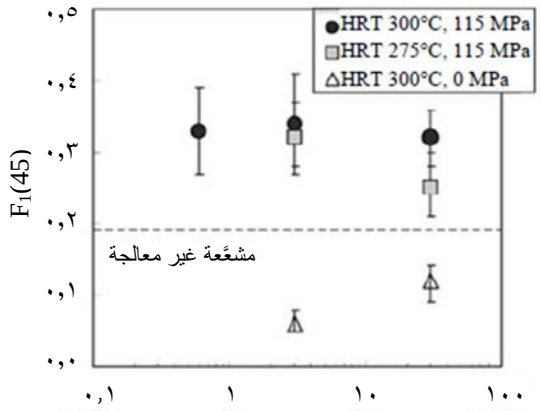
الشكل ٢٨ - مقاطع معدنية لعينات لكسوة مفاعلات الماء المغلي Zry-2 في اختبارات إعادة توجُّه الهيدريدات (الصور مقدمة من المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية [٤]).

وتُظهر الصورة السفلية في الشكل ٢٨ نفس الكسوة Zry-2 من دون بطانة زركونيوم. ويُلاحَظ وجود درجة كبيرة نسبيًّا من إعادة توجُّه الهيدريدات، بما يختلف اختلافاً ملحوظاً عن السلوك الذي تُظهره الكسوة المبطنة بالزركونيوم [٤].

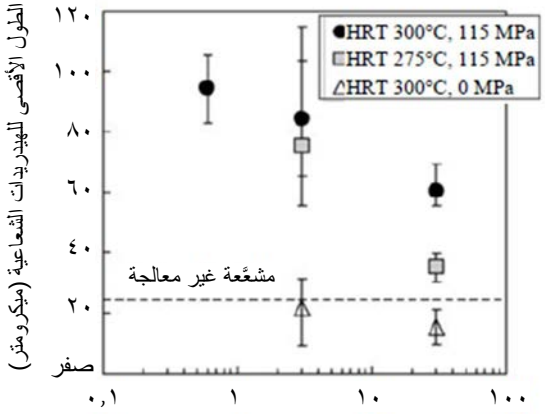
بالنسبة لكسوة مفاعلات الماء المضغوط، يظهر في الشكل ٢٩ تأثير معدَّل التبريد على مورفولوجيا الهيدريدات. ويبدو أن العامل $F_I(45)$ في العينات المبرَّدة بمعدل ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$ أكبر من ذلك العامل في العينات المبرَّدة بمعدل ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$؛ بينما كان هو نفسه تقريباً في العينات المبرَّدة بمعدل ٠,٦ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$ (الشكل ٢٩ (أ)). وزاد طول الهيدريدات الشعاعية عند تخفيض معدل التبريد من ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$ إلى ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$؛ وكان التأثير أقل وضوحا عند التخفيض من ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$ إلى ٠,٦ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$.

ويظهر في الشكل ٣٠ ما لمعدل التبريد في المعالجة الحرارية الشعاعية من تأثير على المطواعية في التشوُّه الناجم عن الانضغاط الحَلَقي. فنسبة الإزاحة التقاطعية في العينات المبرَّدة بمعدل ٠,٦ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$ مماثلة لتلك النسبة في العينات المبرَّدة بمعدل ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$؛ ومقارنة بذلك، كان هناك انخفاض بين العينات المبرَّدة بمعدَّل ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$ وتلك المبرَّدة بمعدَّل ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$. وكما هو مبين في الشكل ٢٩، لوحظت زيادة في درجة إعادة التوجُّه ($F_I(45)$) وفي طول الهيدريدات في العينات المبرَّدة بمعدَّل ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$ مقارنة بتلك المبرَّدة بمعدَّل ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$، بينما أعطت العينات المبرَّدة بمعدَّل ٠,٦ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$ نتائج مماثلة لنتائج العينات المبرَّدة بمعدَّل ٣ درجات مئوية/ساعة$^{-1}$. ويُستنتج من ذلك أن تأثير معدل التبريد على المطواعية يتوافق مع التغيُّر في مورفولوجيا الهيدريدات كما هو موضح في الشكل ٢٩ [٤].

(أ) التأثير على التوجُّه

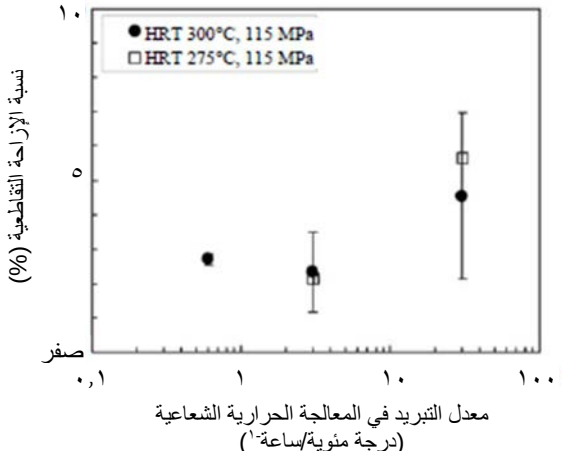


(ب) التأثير على الطول



ملحوظات: HRT = المعالجة الحرارية الشعاعية؛ °C = درجة مئوية؛ MPa = ميغاباسكال.

الشكل ٢٩- تأثير التبريد أثناء المعالجة الحرارية الشعاعية على مورفولوجيا الهيدريدات في كسوة مفاعلات الماء المضغوط Zry 4 المشعَّعة التي خضعت للحرق بمعدل ٤٨ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)-١ (تعريف المحور الرأسي في (ب) هو "القيمة القصوى بين قيم طول الهيدريدات في الاتجاه الشعاعي ± ٤٥°") (الشكل مستنسخ بإذن من المرجع [٣١]، حقوق الطبع والنشر محفوظة للجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428)).



ملحوظات: HRT = المعالجة الحرارية الشعاعية؛ °C = درجة مئوية؛ MPa = ميغاباسكال.

الشكل ٣٠- تأثير معدل التبريد أثناء المعالجة الحرارية الشعاعية على التشوه الناتج عن الانضغاط الحَلَقي لكسوة مفاعلات الماء المضغوط Zry-4 المشعَّعة (الشكل مستنسخ بإذن من المرجع [٣١]، حقوق الطبع والنشر محفوظة للجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428)).

درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى التقصُّف

أُجريت اختبارات انضغاط حَلَقي في مختبر أرغون الوطني بدرجات حرارة متزايدة، لاكتشاف التحولات بين السلوك التقصُّفي والسلوك المطواعي. ويُشار إلى درجة الحرارة التي يُلاحظ فيها التغير باسم درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى التقصُّف الملاحظة بواسطة اختبار الانضغاط الحَلَقي، أو ببساطة درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى التقصُّف، وهي دالة لمواد الكسوة، والإجهاد عند أقصى درجة حرارة تخزين تجفيفي، والتوزع الشعاعي للهيدروجين قبل التجفيف.

كانت قيمتا درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى التقصُّف بالنسبة للسبيكة Zry-4 العالية الحرق بعد المعالجة الحرارية الشعاعية عند ١١٠ ميغاباسكال و١٤٠ ميغاباسكال، بعد التجفيف المحاكَى عند ٤٠٠ درجة مئوية هما <٢٠ درجة مئوية وحوالي ٥٥ درجة مئوية، على التوالي [٧]. وكانت معظم الهيدريدات الشعاعية قصيرة نسبيًّا وقريبة من منتصف جدار الكسوة، حيث كانت إجهادات الانحناء الطَّوقي في اختبار الانضغاط الحَلَقي منخفضة للغاية. وقد شاركت هذه الهيدريدات في انتشار الشقوق، ولكن ليس في بدء الشقوق.

بالنسبة لكسوة ZIRLO™ العالية الحرق، وُجد أن الهيدريدات الشعاعية طويلة نسبيًّا وتمتد من سطح الكسوة الداخلي، الذي يتعرض لأقصى إجهاد انحناء حَلَقي في اختبار الانضغاط الحَلَقي تحت الحمل المطبَّق وفوق لوحة الدعم. وكانت قيم درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى التقصُّف حوالي ١٢٠ درجة مئوية و١٩٠ درجة مئوية عند ١١٠ ميغاباسكال و١٤٠ ميغاباسكال.

وللمقارنة، اختبر Aomi وآخرون [٣١] كسوة Zry-4 عالية الحرق في درجة حرارة الغرفة فقط. واختلفت المعالجة الحرارية الشعاعية في دراسة Aomi عن تلك المعالجة في دراسة مختبر أرغون الوطني في أن الضغط والإجهاد أُبقيا ثابتين أثناء التبريد. وقد وُلِّد معظم بيانات Aomi بالنسبة لمعدل التبريد الأسرع البالغ ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$. وفيما يتعلق بكسوة Zry-4 العالية الحرق التي اختبرها Aomi وآخرون، يبدو أن المحتويات الهيدروجينية كانت منخفضة مقارنة بالعينات المستخدمة في دراسة مختبر أرغون الوطني، وكانت درجة حرارة التلدين القصوى أقل (٢٥٠-٣٤٠ درجة مئوية، مقابل ٤٠٠ درجة مئوية).

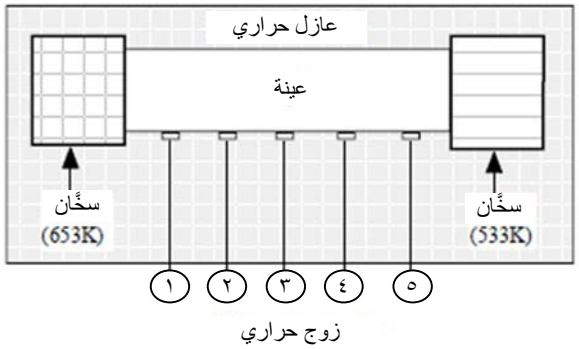
كانت نقطة بيانات الكسوة Zry-4 الوحيدة التي دلت على سلوك تقصُّفي (<٢٪ إجهاد حيود) عند درجة حرارة الغرفة تخص العينة الملدَّنة عند درجة حرارة ٣٤٠ مئوية وحوالي ١٤٠ ميغاباسكال إجهاد حَلَقي قبل التبريد. وهذه النتيجة متوافقة مع نقطة بيانات مختبر أرغون الوطني في ظروف درجة حرارة الغرفة للكسوة Zry-4 العالية الحرق التي أُخضعت للتلدين بدرجة حرارة ٤٠٠ مئوية مع إجهاد حَلَقي قدره ١٤٠ ميغاباسكال قبل التبريد. وأشارت نقاط بيانات Aomi وآخرين بشأن كسوة Zry-4 التي أُخضعت للتلدين بدرجة حرارة ٣٤٠ مئوية مع حوالي ١٤٠ ميغاباسكال إلى سلوك مطواعي عند درجة حرارة الغرفة. ومرة أخرى، قد تكون هذه النتيجة متوافقة مع نقطة بيانات مختبر أرغون الوطني بشأن كسوة Zry-4 التي أُخضعت لمعالجة حرارية شعاعية بدرجة حرارة ٤٠٠ مئوية مع إجهاد حَلَقي قدره ١٤٠ ميغاباسكال قبل التبريد. وفيما يتعلق بالبيانات الأخرى الواردة في المرجع [٣١]، كانت ظروف المعالجة الحرارية الشعاعية (٢٥٠-٣٠٠ درجة مئوية) أدنى من أن تسمح بإجراء مقارنة تطابقية.

٤-١-٢-٦- *انتقال الهيدروجين وإعادة توزُّعه*

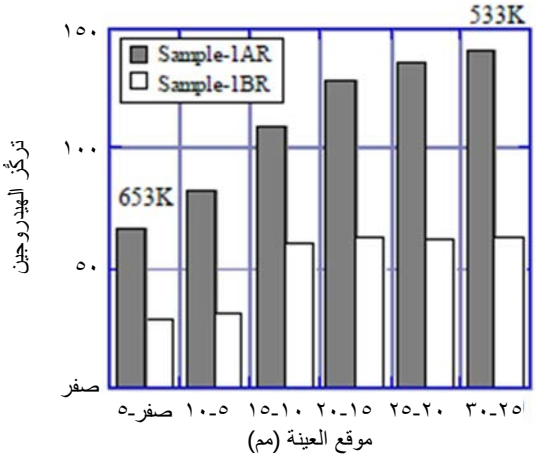
يمكن أن ينتقل الهيدروجين في المحلول الجامد من منطقة درجة الحرارة المرتفعة إلى منطقة درجة الحرارة المنخفضة في الكسوة نتيجة لوجود توزُّعات محورية لدرجات الحرارة في نظام التخزين [٣٧-٣٩]. وليس من شأن الهيدروجين أن يترسَّب في المناطق الأبرد على شكل هيدريدات إلا إذا تحقق فرط التشبُّع وكان على درجة عالية بما يكفي. وعندما يتحقق ذلك، يؤدي ترسُّب الهيدريدات إلى زيادة التقصُّف، الأمر الذي قد يؤثر على سلامة الوقود.

أُجريت تجارب بشأن إعادة توزُّع الهيدروجين في الاتجاه المحوري لأنبوب الكسوة، وتم الحصول على البيانات المتعلقة بانتقال الهيدروجين، مثل حرارة النقل ومعامل انتشار الهيدروجين وحد الذوبان [٤٠]. وفُحصت عينات من قضبان وقود مستهلكة مصنوعة من ثاني أكسيد اليورانيوم تخص مفاعلات الماء المضغوط كانت مخزنة تخزيناً جافاً لمدة عشرين عاماً، وكان معدل حرقها ٥٨ غيغاواط/يوم/طن (يورانيوم)$^{-1}$ و٣١ غيغاواط/يوم/طن (يورانيوم)$^{-1}$. واستُخدمت كسوات غير مشعَّعة أيضاً كمواد مرجعية. ورُكِّبت عينات بطول ٣٠ مم بين سخَّانات، وأُحيطت بعوازل حرارية. وأُبقيت درجة الحرارة عند أحد طرفي العينة عند ٣٨٠ درجة مئوية، وأُبقيت تلك التي عند الطرف الآخر عند ٢٦٠ درجة مئوية. وكان الجو المحيط أثناء التجربة هو الهواء، من أجل الحفاظ على طبقة أكسيدية على الكسوة لمنع الهيدروجين من الهروب إلى خارج العينة (الشكل ٣١).

ويوضح الشكل ٣٢ تركُّز الهيدروجين الذي تم تحليله في كل عينة بعد التسخين لمدة عشرة أيام. وقد انتقل الهيدروجين من منطقة درجات الحرارة المرتفعة إلى منطقة درجات الحرارة المنخفضة في العينات. وقبل الاختبار، كان الاختلاف في تركُّز الهيدروجين في العينات المتجاورة أقل من ٢,٢ جزء في المليون، واعتبر توزُّع الهيدروجين في العينات متساوياً تقريباً. ومن هذه النتائج، حُسبت حرارة النقل ومعامل الانتشار وحد القابلية للذوبان للهيدروجين بطريقة 'أفضل مطابقة' باستخدام معادلة لانتشار الهيدروجين تعتمد على الزمن [٤٠].

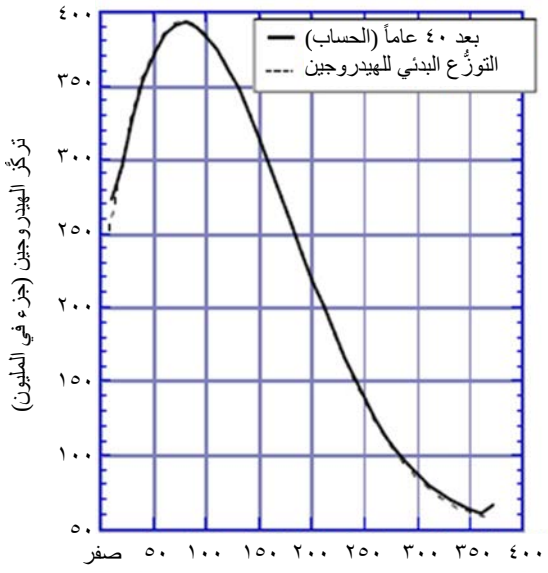


الشكل ٣١- الجهاز المستخدم في تجربة إعادة توزُّع الهيدروجين (الشكل مقدم من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية [٤]).



الشكل ٣٢- توزُّع الهيدروجين في العينات بعد تجربة إعادة التوزُّع التي كانت مدتها ١٠ أيام (الشكل مقدم من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية [٤]).

بعد ذلك قُدِّرت إعادة توزُّع الهيدروجين في قضيب مفاعلات الماء المضغوط المصنوع من ثاني أكسيد اليورانيوم، بعد أربعين عاماً من التخزين، من خلال حساب أحادي البعد لانتشار الهيدروجين، باستخدام قِيَم حرارة النقل ومعامل الانتشار وحد الذوبان المتحصل عليها في الدراسة [٤٠]. ويوضح الشكل ٣٣ إعادة توزُّع الهيدروجين المحسوبة في قضيب وقود بعد أربعين عاماً من التخزين. وكان انتقال الهيدروجين المحوري لا يؤبه له بعد أربعين عاماً من التخزين في جو الهيليوم، بسبب القيمة المنخفضة لمعامل انتشار الهيدروجين، ما عدا عند نهايات قضبان الوقود. ومن ثم لم يكن توزُّع الهيدروجين مختلفاً بقدر يؤبه له عن التوزُّع البدئي. لذلك استُنتج أن انتقال الهيدروجين ليست له آثار يؤبه لها على سلامة كسوة الوقود أثناء التخزين الجاف.



الشكل ٣٣- حساب إعادة التوزُّع المحوري للهيدروجين بعد ٤٠ سنة من التخزين (الشكل مقدم من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية [٤]).

٤-١-٣- التحميل الصدمي على الوقود المستهلك

لا يستخدم هذا القسم الفرعي إلا المراجع المذكورة فيه.

اقتُنيت البيانات من اختبارات سقوط من ارتفاع ٩ أمتار أجريت على براميل محملة بمجمَّعات وقود مصنوعة من ثاني أكسيد اليورانيوم المستهلك، أو أجريت على قضبان وقود [٧]؛ وذلك مثلاً كما في الشكلين ٣٤ و٣٥. ووفَّرت الاختبارات معلومات عن أنماط تشوُّه دبابيس الوقود، وخضوع الشبكة والفوهة، وتشوُّه مصفوفة دبابيس الوقود وانزلاقها، والحد الأقصى للأحمال التي يمكن السماح بها للكسوة غير المشععة.

وأُجريت بعض الاختبارات الأولية، الديناميكية وشبه السكونية، على قضبان وقود مفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء المغلي غير المشعَّعة، لتحديد الحمولة القصوى التي يمكن أن تدعمها مادة الكسوة. وفي حالة اختبار سقوط محوري لبرميل من ارتفاع ٩ أمتار، لم تُظهر القضبان سوى تشوهات جانبية طفيفة، ولم ينتج عنها أي تشقق أو تمزق في مادة الكسوة.

وأسفرت اختبارات الانحناء الجانبي التي أجريت على قضبان وقود مفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء المغلي والاختبارات شبه السكونية للانحناء بين الشبكات عن استطالة قدرها ٣٥ مم للقضيب عند مكان التمزق (عند درجة حرارة ٢٥ مئوية) وانحراف قدره ٦٠ مم عند مكان التمزق (عند درجة حرارة ٥٠٠ مئوية)؛ وأُطلق ٢,٦٠ غم من مادة الوقود في كل تمزق.

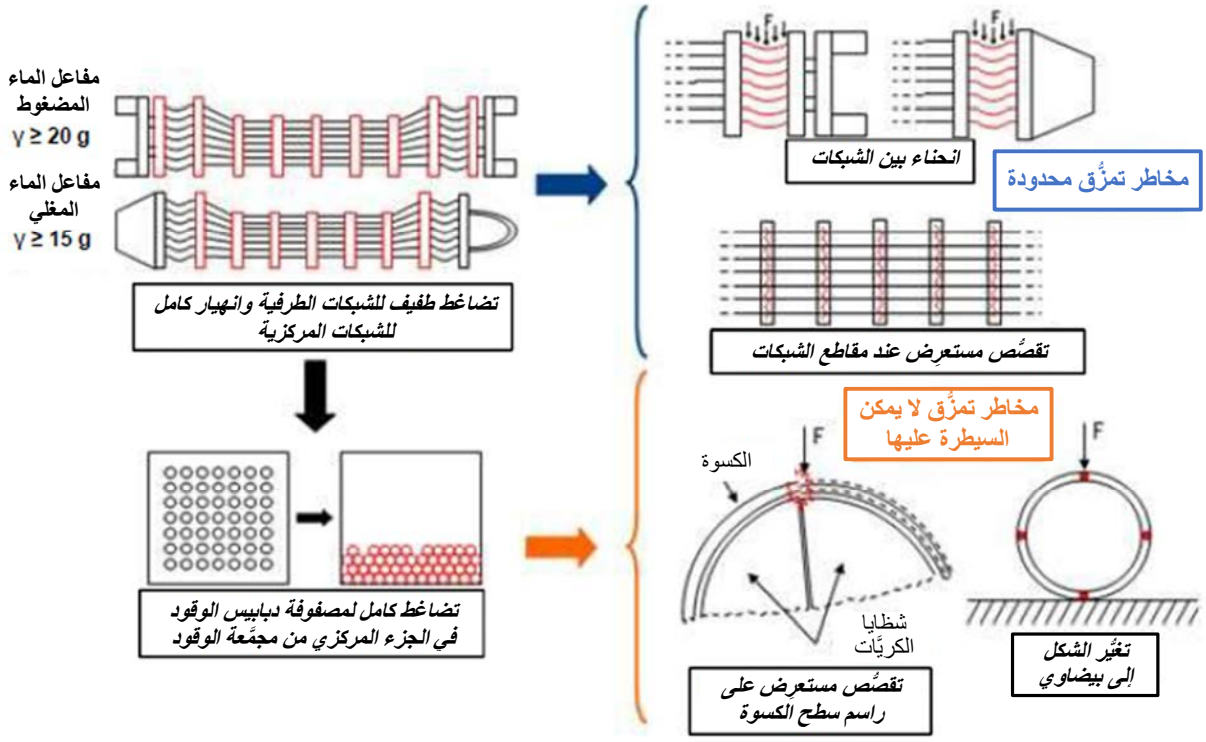
وأسفرت اختبارات الانحناء شبه السكونية التي أجريت على نهايات قضبان الوقود المشعَّعة لمفاعلات الماء المغلي عن انحراف قدره ١٠ مم عند مكان التمزق، وتراوحت زاوية التمزق بين ٢٥ و٣٠ درجة، وأُطلق ٧,٦٥ غم من مادة الوقود. وأثبتت اختبارات السحق التي أجريت على الكسوة الفارغة لدبابيس الوقود المشعَّعة لمفاعلات الماء المغلي أنه، بالنسبة للتحميل الطُّولي، احتفظت مادة الكسوة الفارغة بقوة كبيرة قبل أن تنسحق ثم تتمزق لاحقاً.

الشكل ٣٤- قضيب وقود طازج لمفاعل ماء مضغوط بعد اختبار سقوط من ارتفاع ٩ أمتار (الصورة مقدمة من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).

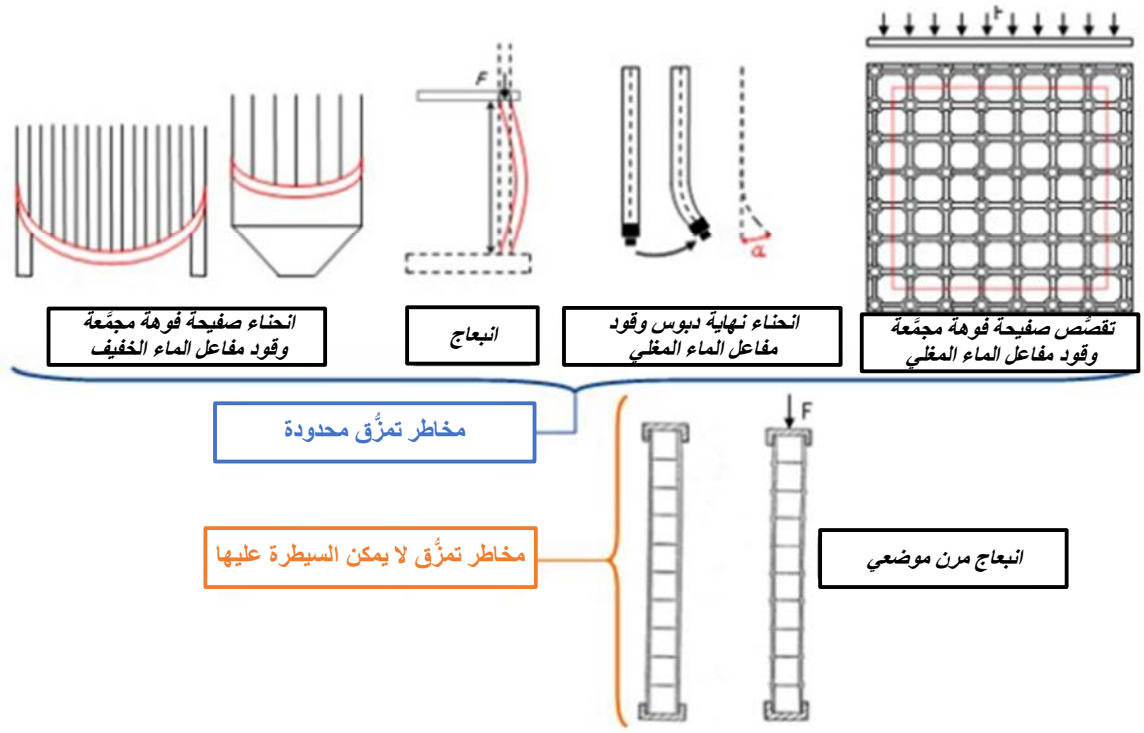
الشكل ٣٥- قضيب وقود طازج لمفاعل ماء مغلي بعد اختبار سقوط من ارتفاع ٩ أمتار (الصورة مقدمة من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).

بالنسبة للسقوط الجانبي (الشكل ٣٦)، بقوة تسارُع معتدلة، يوجد تضاغط طفيف للشبكات الطرفية وانهيار كامل للشبكات المركزية؛ وخلص إلى أن خطر تمزُّق قضيب الوقود محدود. وخلافاً لذلك يحدث، بالنسبة لقوى التسارع العالية، تضاغط كامل لمصفوفة دبابيس الوقود في الجزء المركزي من مجمَّعة الوقود، ويوجد خطر لا يمكن السيطرة عليه لتمزُّق قضيب الوقود.

بالنسبة للسقوط المحوري (الشكل ٣٧)، مع قوى تسارع معتدلة، يحدث انحناء عام أو انبعاج مرن لقضبان الوقود. وفي حالة قوى التسارع العالية، يحدث انبعاج مرن موضعي، وتشوهات غير مقبولة، وتمزُّق قضبان الوقود.

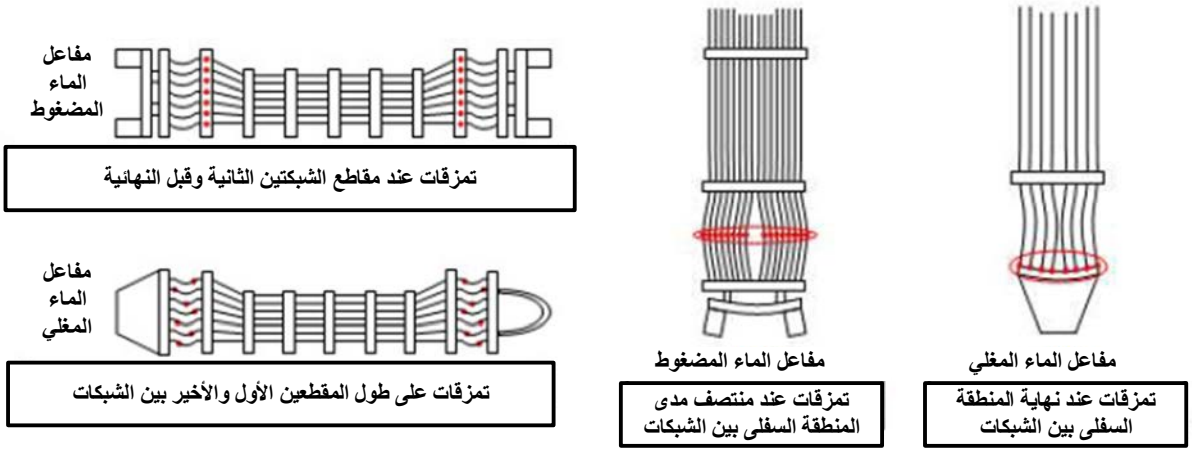


الشكل ٣٦- تقييم مخاطر تمزُّق الكسوة في السقوط الجانبي (الشكل مقدم من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).



الشكل ٣٧- تقييم مخاطر تمزُّق الكسوة في السقوط المحوري (الشكل مقدم من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).

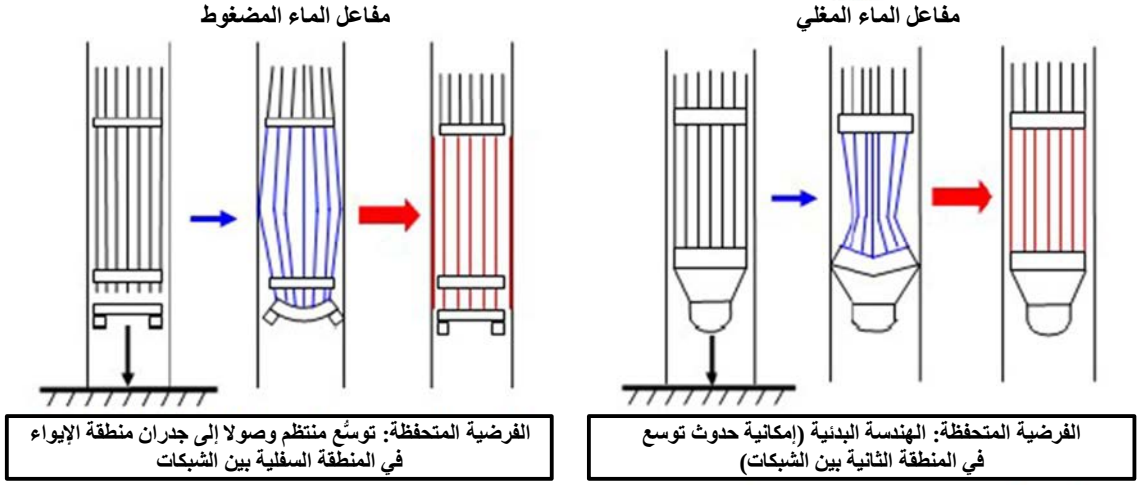
يوضح الشكل ٣٨ مواضع التمزق لدى السقوط الجانبي والسقوط المحوري. وتقدَّر كمية الوقود المنبعثة لكل تمزق بأنها كريَّة واحدة أو ٣,٥ كريَّات لكل مقطع من دبوس الوقود المكسور.



الشكل ٣٨- مواضع التمزق بالنسبة لاتجاه السقوط؛ سقوط جانبي وسقوط محوري (الشكل مقدم من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).

وتشوه المصفوفات الناتج عن السقوط الجانبي هو دالة لنمط انهيار الشبكات. وعند انهيار الشبكات في الجزء المركزي من مجمَّعة الوقود، يحدث انخفاض في المقطع العرْضي الانشطاري لمجمَّعة الوقود، وعموماً انخفاض في التفاعلية في حالة مجمَّعات وقود مفاعلات الماء الخفيف. ويتمثل النهج المتحفِّظ في الاحتفاظ ببيانات المقطع العرْضي الانشطاري الأولية باعتبارها مجموعة البيانات الأساسية لتحليل الحرجية.

وبالنسبة لقضبان وقود مفاعلات الماء المضغوط، يحدث التواء أويلر، الذي يؤدي إلى توسُّع مصفوفة وقود مفاعل الماء المضغوط. ومقارنة بذلك، تنحني نهايات قضبان وقود مفاعل الماء المغلي وتنكمش مصفوفة وقود هذا المفاعل في المنطقة السفلية بين الشبكات. وبالنسبة لمجمَّعات وقود مفاعلات الماء المغلي، كما في حالة السقوط الجانبي، يتمثل النهج المتحفظ في تطبيق الهندسة البدئية غير المشوَّهة الموجودة في المنطقة السفلية بين الشبكات، بينما يمكن أن يحدث توسُّع في المنطقة التالية بين الشبكات بسبب استمرارية التشوه. وبالنسبة لمجمَّعات وقود مفاعلات الماء المضغوط، يتمثل النهج التشاؤمي في إيلاء الاعتبار لتوسُّع منتظم للمصفوفة في المنطقة السفلية المشوَّهة بين الشبكات (الشكل ٣٩).



الشكل ٣٩- تشوُّه المصفوفات في السقوط المحوري (الشكل مقدم من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).

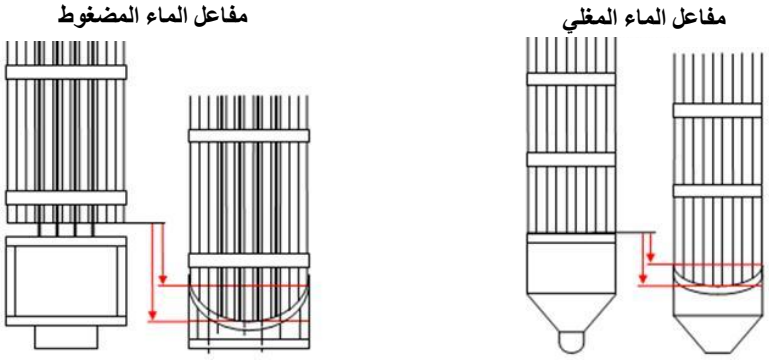
٤-١-٣-١- *إمكانية انزلاق القضيب*

في حالة السقوط الجانبي، لا يوجد حمل لكي يستحث انزلاق قضبان الوقود عبر الشبكات أو يستحث تشوُّه الفوهة؛ ونتيجة لذلك، لا يولى الاعتبار لأي إزاحة للمصفوفة، وبذلك تظل المنطقة النشطة لقضبان الوقود (المنطقة النشطة: ذات المحتوى الانشطاري) في موضعها البدئي.

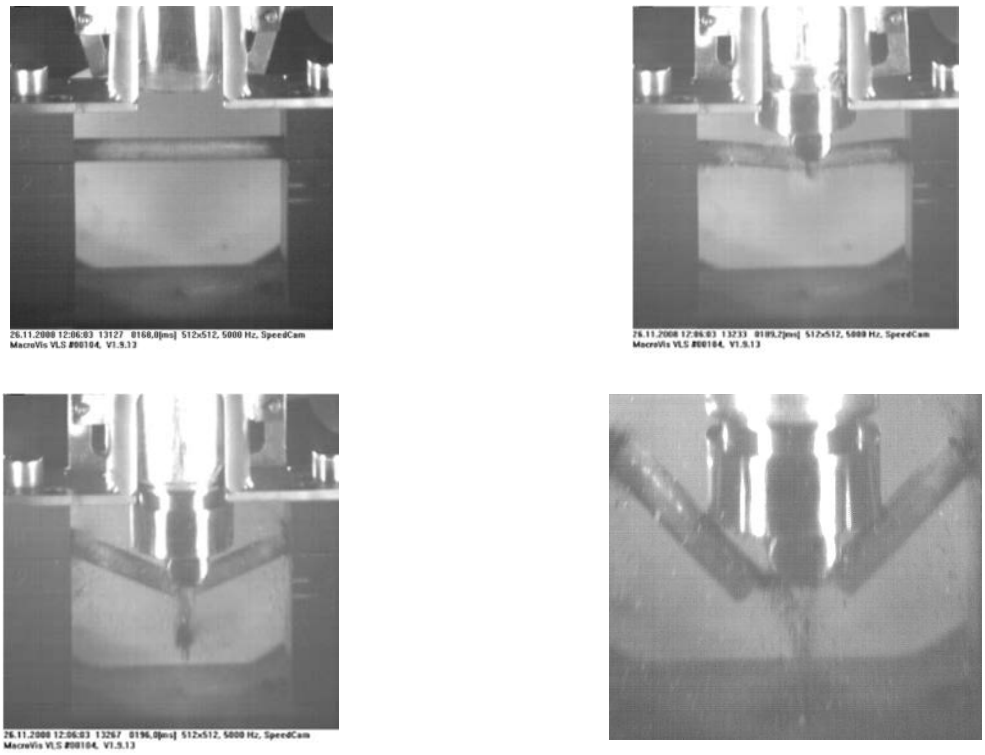
وفي حالة السقوط المحوري، وباستثناء قوى التسارع المنخفضة إلى أقصى حد، تتحرك قضبان وقود مفاعلات الماء المضغوط بانتظام لسد الفجوة بين نهاياتها وصفيحة الفوهة السفلية. ولا توجد فجوة من هذا النوع في مجمَّعات وقود مفاعلات الماء المغلي، لأن قضبان وقود هذه المفاعلات تثبَّت في الفوهات (الشكل ٤٠).

٤-١-٣-٢- دراسات سلوك تكسُّر قضبان الوقود

أُجريت أيضاً دراسات [٧] لتقييم سلوك تكسُّر قضبان الوقود المستهلكة في ظل ظروف الحمل الصدمي المستعرِض وكمية مواد الوقود التي تُطلق في حالة تكسُّر القضبان. ويتمثل الإجراء المتبع في إطلاق مطرقة تسقط سقوطاً حرًّا عبر عمود توجيه عمودي. ويوضح الشكل ٤١ بعض الصور، الملتقطة بكاميرا عالية السرعة، قبل وأثناء الصدم الواقع على قضيب وقود مفاعل ماء مضغوط خضع لمعدل حرق ٧٤ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)[١].



الشكل ٤٠- الافتراضات المستخدمة بشأن إزاحة بنية الوقود بالنسبة لسقوط محوري (الشكل مقدم من شركة TN International وشركة INS Ltd. [٧]).



الشكل ٤١- اختبارات الصدم: صور كاميرا عالية السرعة تُظهر التكسُّر الصدمي لقضيب وقود مفاعل ماء مضغوط خضع لمعدل حرق ٧٤ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)[١] (الصور مقدمة من GNS).

ويوضح الجدول ١٣ كمية جزيئات الوقود التي جُمعت بعد كل اختبار. وكمية الوقود المنطلقة لكل كسر متقاربة لجميع العينات. وفي جميع الاختبارات، كان الوقود المنطلق الذي تم تجميعه في قاع الجهاز يناظر <٢ غم لكل كسر.

وكما يتضح من الجدول ١٣، لا يمكن استنتاج علاقة واضحة بين كمية الوقود المنطلقة ومعدل حرق الوقود [٤].

الجدول ١٣- كتلة الوقود المنطلق أثناء الاختبارات الصدمية

نوع الوقود	مستوى الحرق (غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$)	عدد مواقع التكسُّر	كمية الوقود المنطلق (غم)
مفاعلات الماء المضغوط	١٩,٠	٣(أ)	٣,٩
	٤٢,٦	٣	٤,٨
مفاعلات الماء المغلي	٧٣,٦	٣	٥,٦
	٥٣,٠	٣	٤,٧

(أ) لم يحدث انفصال كامل للعينة.

أُجريت اختبارات صدمية ديناميكية أخرى على قضبان وقود مستهلكة عالية الحرق مشعَّعة في مفاعلات ماء مغلي ومفاعلات ماء مضغوط تجارية في اليابان [٧]؛ وترد مصفوفة الاختبار في الجدول ١٤. وقد دُرس التحميل المحوري والتحميل الجانبي لقضبان الوقود لتحديد الأحمال التي تتعطب عندها قضبان الوقود، والإجهاد الذي يحدث عنده التعطُّب، وكمية مواد الوقود التي تنطلق عند الصدم.

وتمثلت الاختبارات الميكانيكية الأساسية في اختبار الشد واختبار الانضغاط الحَلَقي. وتم الحصول على قوة الخضوع للشد المحوري، والإجهاد الذي يحدث عنده التعطُّب، وقوة الانضغاط الحَلَقي، ونسبة تضخيم الأعطاب.

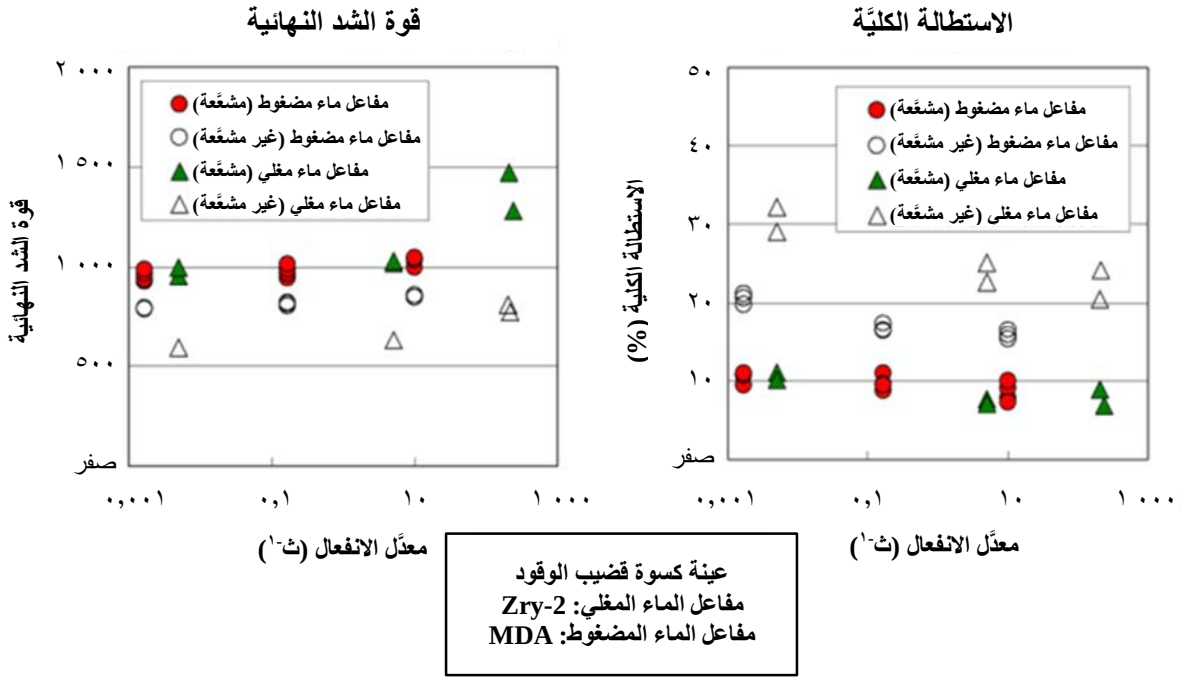
ورُسمت نتائج اختبارات الشد الديناميكية التي أُجريت على كسوات وقود مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط من حيث قوة الشد النهائية مقابل معدل الإجهاد، ومن حيث الاستطالة الكلية مقابل معدل الإجهاد؛ كما هو مبين في الشكل ٤٢. ومع ازدياد معدل الإجهاد، ازدادت قوة الشد النهائية وانخفضت الاستطالة الكلية.

الجدول ١٤- مصفوفة الاختبارات اليابانية للاختبار الصدمي الديناميكي لقضبان الوقود المشعَّعة وكسوتها

نوع الوقود/مستوى الحرق			مفاعلات الماء المغلي ٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$	مفاعلات الماء المضغوط ٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$
نوع الكسوة			Zircaloy-2	MDA™
الاختبار الميكانيكي الأساسي للكسوة	اختبار الشد الديناميكي (حتى ٢١٠ ث$^{-1}$)		٦	١٢
الاختبار الصدمي الديناميكي لقضيب الوقود	اختبار الانضغاط الحَلَقي الديناميكي (حتى ٤٠٠٠ مم/ث$^{-1}$)	مشعَّع غير خاضع لمعالجة حرارية شعاعية	٤	٣
		معاد توجُّه الهيدريدات	٤	٦
	الحمل المحوري		٥	٥
اختبار الحمل الصدمي الديناميكي لقضيب الوقود	الحمل الجانبي	مشعَّع غير خاضع لمعالجة حرارية شعاعية	٥	٦
		معاد توجُّه الهيدريدات	١(أ)	٢(ب)

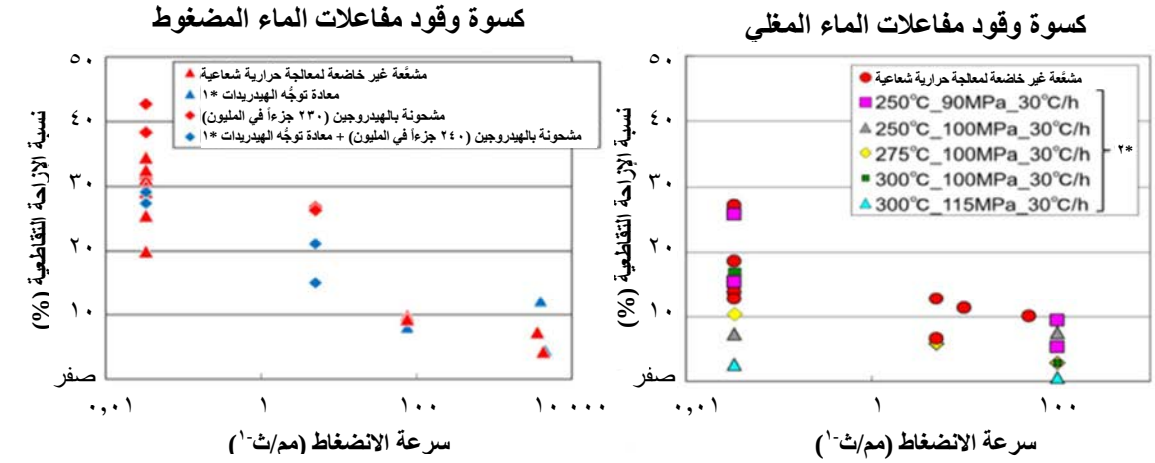
(أ) ببطانة زركونيوم.

(ب) يحتوي على كريَّات زائفة مصنوعة من الفورستريت بمقدار ٢ ملغ/كريّة.



الشكل ٤٢- نتائج اختبارات الشد (الشكل مقدم من المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية [٧]).

وتوضِّح النتائج الواردة في الشكل ٤٣، المستمدة من اختبارات الانضغاط الحلقي الديناميكية التي أُجريت على كسوات وقود مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط، والمعروضة بصفتها نسبة الإزاحة التقاطعية مقابل سرعة الانضغاط، أن المطواعية تتناقص مع تزايد سرعة الانضغاط.



$$\text{نسبة الإزاحة التقاطعية (\%)} = \frac{\text{مقدار التشوُّه اللدائني}}{\text{القطر الخارجي البدئي}} \times ١٠٠$$

***١: معالجة إعادة توجُّه الهيدريدات**
٣٠٠ درجة مئوية، ٧٠ ميغاباسكال، ٣٠ درجة مئوية/ساعة-١

***٢: معالجة إعادة توجُّه الهيدريدات**
درجة الحرارة (مئوية)، الإجهاد الحَلَقي (ميغاباسكال)، معدل التبريد (درجة مئوية/ساعة-١)

الشكل ٤٣- نتائج اختبارات الانضغاط الحَلَقي الديناميكية (الشكل مقدم من المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية [٧]).

كانت معالجة إعادة توجُّه الهيدريدات عند ٣٠٠ درجة مئوية للمواد بإجهاد حَلَقي بدئي قدره ٧٠ ميغاباسكال. وكان معدَّل التبريد ٣٠ درجة مئوية/ساعة$^{-1}$. وعند سرعة انضغاط معينة، لم يكن لمعالجة إعادة توجُّه الهيدريدات المطبَّقة على عينات كسوة مفاعلات الماء المغلي أي تأثير على قيمة مؤشر مطواعية تلك الكسوة. وفي حالة كسوة مفاعلات الماء المضغوط، يمكن رؤية تأثير معالجة إعادة توجُّه الهيدريدات على مؤشر مطواعية الكسوة بوضوح. وتفاوتت سرعة الاصطدام بين ٣,٧ و١٢ م/ث$^{-1}$. ولم يحدث تمزق الكسوة وإطلاق مادة الوقود إلا في الاختبار الذي أُجري بسرعة ١٢ م/ث$^{-1}$ (الجدول ١٥).

الجدول ١٥- نتائج الاختبار الصدمي على قضبان وقود مفاعلات الماء المغلي - الاتجاه المحوري

	(أ)	(ب)	(ج)	(د)	(هـ)
الكتلة بالوزن			٣,٥ كغم		
سرعة الاصطدام	١٢ م/ث$^{-1}$	٩ م/ث$^{-1}$	٦ م/ث$^{-1}$	٣,٧ م/ث$^{-1}$	٦ م/ث$^{-1}$
نوع العينة	مقطع قضيب الوقود (مادة قوية التماسك)				الجزء الممتلئ الأعلى
تشتت الكريَّات	نعم	لا	لا	لا	لا
التشوُّه	تحطُّم حلزوني	تقوُّس في الجزء الأسفل	لا شيء	لا شيء	انطواء في الجزء الممتلئ

وفي حالات تمزق قضبان وقود مفاعلات الماء المغلي، كانت كمية مادة الوقود المنطلقة، في الاختبار الصدمي المحوري، تعادل كريَّتين تقريباً، وكان حوالي ٦٠٪ من تلك المادة مسحوقاً ناعماً جدًّا. وفي حالة الاختبار الصدمي الجانبي، كانت الكمية تعادل ثلاث كريَّات تقريباً، وكان حوالي ٤٠٪ مسحوقاً ناعماً جدًّا.

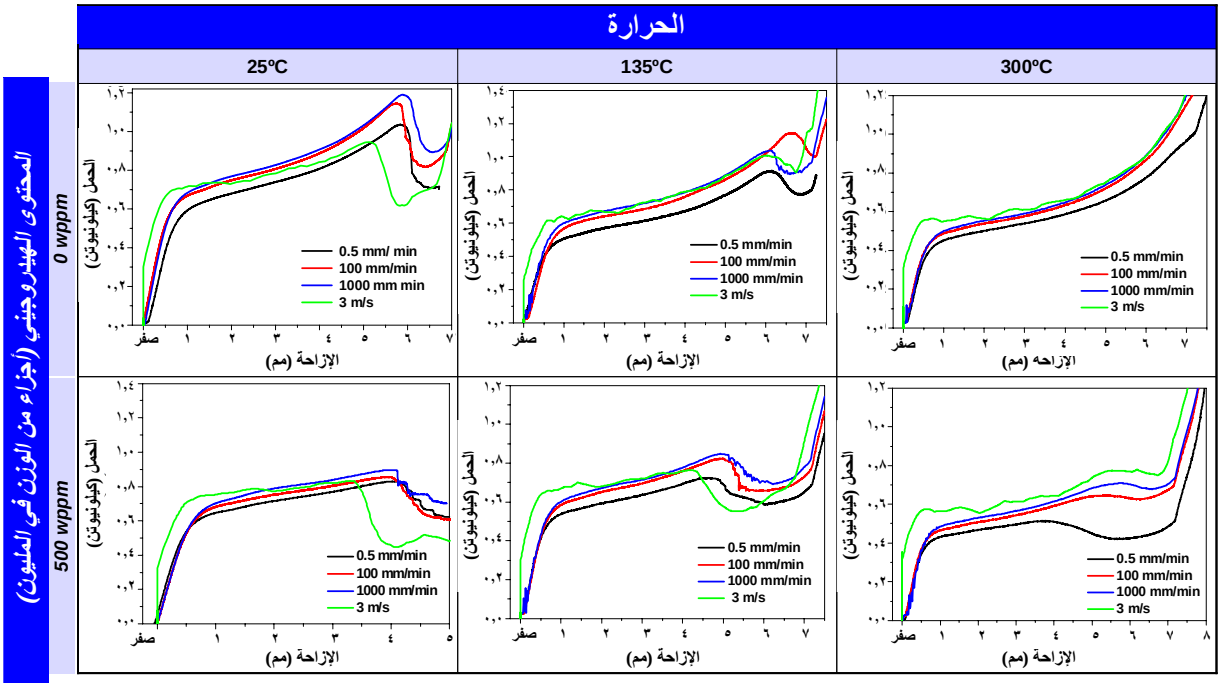
وبالنسبة لحالات مفاعلات الماء المضغوط، كانت كمية مادة الوقود المنطلقة أقل؛ أي حوالي ١,٤ غرام.

وبحثت دراسة أخرى استجابة كسوة الوقود في ظل ظروف الصدم. ولبلوغ هذ الغاية، أُجريت مقارنة بين النتائج المتحصل عليها في الاختبارات الديناميكية (أي اختبارات الثِّقل الساقط) والاختبارات السُّكونية لانضغاط الحلقة. وكانت المادة المستخدمة هي كسوة ZIRLO™ غير مشعَّعة وفي حالة إزالة الإجهاد.

وحُضِّرت عينات مقطَّعة إلى حلقات بطول ١٠ مم تحتوي على ١٥٠ و٢٥٠ و٥٠٠ جزء في المليون من الهيدروجين. وكان توزُّع الهيدريدات الناتج (في المعالجة الحرارية) متجانساً عبر المقطع العرضي، مع توجُّه الهيدريدات على طول اتجاه الحلقة في العينات.

وأُجريت التجارب الصدمية في ماكينة اختبارات برج إسقاط. وكانت السرعة الصدمية المطبَّقة ٣ أمتار/ث$^{-1}$. واختُبرت العينات عند درجات حرارة ٢٥ و١٣٥ و٣٠٠ مئوية. وأُجريت اختبارات شبه سكونية بثلاثة معدلات إزاحة: ٠,٥ و١٠٠ و١٠٠٠ مم/دقيقة$^{-1}$.

وكان شكل منحنيات اختبارات الثِّقل الساقط (٣ م/ث$^{-1}$) مشابهاً لتلك الناتجة عن الاختبارات السكونية (الشكل ٤٤).



الشكل ٤٤- منحنيات الحمل مقابل الإزاحة - الاختبارات السكونية والديناميكية لانضغاط الحلقة (الشكل مقدم من الشركة الوطنية للنفايات المشعة [٧]).

يزداد ميل منحنيات اختبارات انضغاط الحلقة، بعد الإزاحة البدئية، مع ازدياد معدل الإجهاد. وهذا يعني أن صلابة الكسوة، أي معامل يونغ، تزداد. ولم يكن هناك فرق كبير بين العينات المحتوية على الهيدروجين والعينات الخالية منه. ولا يمكن أن يلاحظ سوى تباين في الحد الأقصى للحمل الذي تم الوصول إليه وقيمة الإزاحة عند هذه النقطة.

وفي ظروف التحميل شبه السكونية، تكوَّنت سحنة نمطية لسطح متكسِّر مطواع (التصوير المجهري)، مع وجود فراغات مكروية كبيرة متوجهة في اتجاه نمو الشقوق. ولا يبدو أن درجة حرارة الاختبار تؤثر على آلية التشقق. وتم الحصول على نتائج متماثلة بشأن العينات المهدردة والعينات غير المهدردة على السواء.

ويلخص الجدول ١٦ الملاحظات المتعلقة بظروف الاختبار المختلفة على العينات المتهدردة.

الجدول ١٦- خصائص السطح المتكسِّر للعينات المُتهدرَدة (٥٠٠ جزء في المليون) المختبرة في ظل التحميل شبه السكوني والديناميكي

	درجة الحرارة		
	٢٥ مئوية	١٣٥ مئوية	٣٠٠ مئوية
الاختبارات شبه السكونية (اختبارات الانضغاط الحلقي التقليدية)	مطواع	مطواع	مطواع
الاختبارات الديناميكية (ظروف الثِّقل السَّاقط)	متقصِّف	متقصِّف + مطواع	مطواع

في السطح المتكسِّر للعينات المختبرة في درجة حرارة الغرفة، توجد هيمنة للمناطق المتقصِّفة. وتحدث الكسور المطواعة أيضاً، لكنها تقتصر على مصفوفة الكسوة ZIRLO™. وعند ١٣٥ درجة مئوية، تتعايش خصائص المطواعية والتقصُّف في السطح المتكسِّر. وعند ٣٠٠ درجة مئوية، تكون الكسور مطواعة كليًّا. ومن هذه النتائج، يمكن الاستدلال على أن لدرجة الحرارة تأثير مفيد على مقاومة الكسوة.

والخلاصة هي أن صلابة الكسوة وقوتها ازدادتا مع ازدياد معدلات الإزاحة. وتتفق هذه الحقيقة جيداً مع الافتراض المقبول عموماً بأنه، أثناء وقوع حادث، يؤدي المعدل الأعلى لتطبيق الحمل إلى تحسُّن قوة الكسوة.

وتأثير درجة الحرارة وتأثير تركُّز الهيدروجين على منحنيات الحمل مقابل الإزاحة متماثلان في اختبارات الانضغاط الحلقي الديناميكية وشبه السكونية على السواء.

٤-٢- وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز

مادة الكسوة المستخدمة في تصنيع مسامير وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز هي الفولاذ المقاوم للصدأ والمستقر 20Cr:25Ni:Nb. وأثناء تشغيل المفاعل، تصبح مكونات الفولاذ المقاوم للصدأ التي في نطاق درجة حرارة ٣٤٠-٥٢٠ مئوية (الذروة عند ٤٢٠ درجة مئوية) محسَّسة، وذلك أساساً نتيجة للفصل المستحث بالإشعاع. ويمكن أن يؤدي التحسُّس، المقترن بالإجهاد المستحث في الأخاديد المضادة للتنضيد الموجودة في دبوس الوقود، إلى تعطُّب كسوة المسامير المخزونة في ظروف الهواء الرطب أو في البرك (مع تركُّزات عالية من أيونات الكلوريد)، من خلال آلية التعطُّب المعروفة باسم التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي بين الكريَّات المستحث بالتشعيع. ولهذا الأمر آثار على احتمال دخول الهواء عند إيقاف تشغيل المفاعل وعند التبريد/التخزين البدئي لدى المفاعل في أنابيب التخزين الجاف المؤقت وبرك التخزين المؤقت.

وبالنسبة لفترات تخزين الوقود القصيرة إلى المتوسطة الأمد، يُعتبر التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي بين الكريَّات المستحث بالتشعيع الآلية الرئيسية لعيوب كسوة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز. وعلى خلاف سبائك الزركونيوم، يصبح التآكل العام قرب حافة الماء عاملاً مهمًّا إذا أصبحت فترات تخزين الوقود ممتدة (أي مئات السنين)، وبخاصة إذا كان الترقُّق البدئي لجدار الكسوة داخل المفاعل كبيراً. وتؤثر آلية التعطُّب هذه أيضاً على المواد الهيكلية المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ لعناصر الوقود (الأقواس المزدوجة، إلخ) وتهيمن فيها.

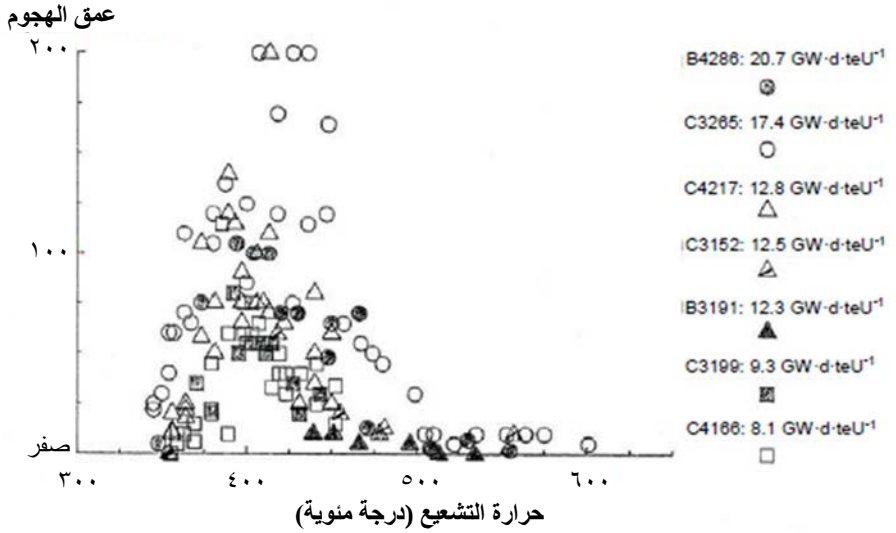
يُعتبر تحسُّس الفولاذ المقاوم للصدأ موضوعاً معترفاً به وخاضعاً للبحث على نطاق واسع. ويتسبب في هذا التحسُّس الكربون الحر الموجود في السبيكة، الذي يتفاعل مع الكروم الموجود في السبيكة لتكوين كربيدات الكروم عند حدود الكريَّات المعدنية. ويؤدي تكوُّن الكربيدات الغنية بالكروم على حدود الكريَّات إلى تجريدها من إضافات تسبيك الكروم، ويصبح الفولاذ المقاوم للصدأ متحسَّساً إزاء التآكل الموضعي لحدود الكريَّات في البيئات التي تكون فيها المادة السائبة سلبية.

ومواصفات فولاذ كسوة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز مصممة لتجنب ترسُّب كربيد الكروم، وذلك أولاً من خلال تضمين حد منخفض للكربون وثانياً عن طريق تضمين النيوبيوم. ويضاف المكوِّن النيوبيومي تحديداً لتثبيت الفولاذ ضد ترسُّب كربيدات الكروم، من خلال السماح بالتفاعل التفضيلي للكربون مع النيوبيوم. ويتيح التلدين لمدة ٣٠ دقيقة بدرجة حرارة ٩٣٠ مئوية حدوث هذا التفاعل التفضيلي، ويحدَّد تركُّز النيوبيوم بحيث يتم ضمان وجود فائض على (الكربون + النيتروجين). وبذلك يكون تركُّز الكربون المتبقي محلولاً في الفولاذ عند بداية التشعيع منخفضاً جدًّا. ومن الواضح أن رواسب الكربون التي توجد بجانب سائل التبريد في كسوة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز هي مصدر محتمل للكربون، لكن انتشار الكربون لا يُعتبر سريعاً بما يكفي ليكون قادراً على تحسيس المادة في العمق في الكسوة في نطاق درجات الحرارة ذات الصلة؛ وتم تجريبيًّا تأكيد عدم قدرة الكربون على الانتشار العميق في الكسوة عند درجات الحرارة ذات الصلة [٤١].

بيد أنه وُجد أن الفصل المستحث بالإشعاعات هو العامل المهيمن في تحسُّس كسوة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز. والنيوترونات السريعة قادرة على إحداث عيوب في المعادن عن طريق الإزاحة 'غير المرنة' للذرَّات. فيمكن أن تُطرد الذرَّة من موقعها البنيوي الطبيعي إلى موقع خِلالي، وينشأ مكان شاغر. والأماكن الشاغرة قابلة للحراك ويمكن إزالتها من البنية عند البالوعات. وتمثل حدود الحُبيبات بالوعة جيدة. ولدى تحرك المكان الشاغر في البنية، يتعين أن يتبادل المكان الشاغر موقعه مع ذرة أخرى. ومعامِلات انتشار الحديد والكروم والنيكل في الفولاذ الأوستنيتي تجعل الكروم ينتشر بأكبر سرعة. ولذلك يوجد انحياز طفيف لصالح تبادل الأماكن الشاغرة مع الكروم عند تحرك هذه الأماكن نحو البالوعة. ويتمثل التأثير النهائي في نقل الكروم بعيداً عن حدود الحُبيبات. وانتشار النيكل هو الأبطأ بين مكونات الفولاذ الرئيسية الثلاثة، ونتيجة لذلك يميل النيكل إلى أن يصبح مثرىً عند حدود الحُبيبات.

ولا يمكن الحفاظ على المناطق المستنفَدة من الكروم على حدود الحُبيبات إلا إذا لم يكن إمداد الكروم من داخل الحُبيبة سريعاً بما يكفي لتجديد تغذية المنطقة الحدودية. وعندما يكون حراك الأماكن الشاغرة منخفضاً جدًّا، سيصل عدد قليل جدًّا من الأماكن الشاغرة إلى البالوعات. ولذلك توجد نافذة في درجة حرارة التشعيع لا يُلاحَظ فوقها ولا تحتها التحسُّس الناجم عن التشعيع. وفيما يلي بعض النقاط المهمة. فأولاً، مع استمرار التشعيع عند تدفق مستمر للنيوترونات، سيكون هناك تحرك نحو حالة مستقرة لملامح استنفاد الكروم عند حدود الحُبيبات. وتنتُج الحالة المستقرة عن وجود توازن بين معدل انتقال الأماكن الشاغرة (العدد والحراك) ومعدل انتشار الكروم (الميل والحراك). واستناداً إلى نمذجة الملاحظات التجريبية، أُعدَّت تنبؤات بشأن المعدلات المحتملة لحرق وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز التي قد يستقر عندها التحسُّس الناجم عن الإشعاعات. وثانياً، من المحتمل أن تؤثر طبيعة ملامح استنفاد الكروم عند حدود الحُبيبات (عرض المنطقة المستنفدة وانخفاض تركُّز الكروم على حدود الحُبيبات نفسها) على حدوث التآكل بين الحُبيبات ومعدَّله.

ويقدِّم الشكل ٤٥ بيانات مستمدة من مفاعلين متقدِّمين مبرَّدين بالغاز تُظهر عمق الهجوم مقابل درجة حرارة تشعيع الكسوة بالنسبة للوقود الذي حقق مستويات حرق مختلفة. وكما ذكرنا سابقاً فمن المتوقع أن يستقر عمق وعرض حدود الحُبيبات المستنفَدة من الكروم مع ازدياد الحرق، ربما بعد ب لوغ معدل حرق قدره ~٢٠ غيغاواط/يوم/طن من اليورانيوم-١.



ملحوظة: $GW \cdot d \cdot teU^{-1}$ = غيغاواط/يوم/طن يورانيوم-١

الشكل ٤٥- التباين من عمود وقود إلى آخر في هجوم في منتصف الجدار بعد إجراء اختبار شتراوس لمدة ٧٢ ساعة (عينة تعرضت لحمض كبريتيك يغلي وهي ملامسة لمسحوق النحاس لمدة ٧٢ ساعة) (الشكل مقدم من شركة .Sellafield Ltd [٤]).

تم منع حدوث المشكلة الناتجة عن بدء الهجوم بين الحُبيبات في المفاعل، التي تحدث أثناء التخزين الرطب لوقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز المستهلك، عن طريق إضافة جرعات من هيدروكسيد الصوديوم وصولاً إلى أس هيدروجيني قدره ١١,٤. ومستويات هذا المثبِّط هي دالة تابعة للمحتوى من أيونات الكلوريد ودرجة حرارة ماء الحوض؛ ويمثل الأس الهيدروجيني البالغ ١١,٤ مستوى مثاليًّا لظروف التخزين في الحوض في شركة سيلافيلد. وعلى الرغم من أن الاستخدام الطويل الأمد لهيدروكسيد الصوديوم كمثبِّط كان يُعتقد في الأصل أن له عواقب سلبية، من خلال تحلل طبقة الأكسيد الواقية الموجودة على الفولاذ مع حدوث زيادة ناتجة عن ذلك في التآكل العام على حافة الماء، فإن دراسات التآكل لم تشهد أي دليل على تسارع التآكل العام.

٤-٣- وقود مفاعلات ماغنوكس

٤-٣-١- التخزين الرطب

في التخزين الرطب، تتآكل كسوة وقود ماغنوكس وفقاً للتفاعل مع الماء، مكوّنة هيدروكسيد المغنيسيوم ($Mg(OH)_2$) والهيدروجين. ومن حيث المبدأ، إذا زيد الأس الهيدروجيني إلى أكبر من ١١,٥، تكون قابلية طبقة هيدروكسيد المغنيسيوم للذوبان منخفضة، بما يؤدي عمليًّا إلى تشكُّل غشاء سطحي سلبي على المعدن. غير أن العمل البحثي يُظهر أن هذا ليس كل شيء، فهناك عوامل أخرى، مثل التشقُّق المجهري ووجود الكربون في طبقة الأكسيد، تؤدي إلى وصول معدلات التآكل إلى أعلى من ثلاثة أضعاف معدلات تآكل المواد غير المشعَّعة. ويتأثر تآكل الكسوة أيضاً بوجود شوائب في الماء، لا سيما الكلوريد، تؤدي إلى وجود مناطق منقَّرة حتى عند التركُّزات المنخفضة. ولتقليل هذه الآثار إلى الحد الأدنى، يُحافَظ على مستويات أيونات الكلوريد وأيونات الكبريتات عند مستويات <١ جزء في المليون في مياه تنقية الحوض. ويمكن أن يتسبب التآكل التنقُّري في تعطُّب الكسوة أثناء التخزين الأطول أمداً. وقد يحدث أيضاً تآكل الشقوق بين الألواح الفاصلة والكسوة. وللأسباب الموضحة أعلاه، تتم في العادة إعادة معالجة وقود مفاعلات ماغنوكس المستهلك في غضون عامين من تفريغها من المفاعل؛ إلا أن ممارسات التخزين الحالية تُظهر أداءً جيداً وأن فترات تخزين >٥ سنوات ممكنة.

٤-٣-٢- التخزين الجاف

استُحدثت كسوة وقود مفاعلات ماغنوكس لكي تُستخدم للمفاعلات المبرَّدة بالغاز، ومن ثم فهي مناسبة بصورة مثالية للتخزين الجاف. ويتم التخزين العادي في البداية في ثاني أكسيد الكربون إلى أن تنخفض درجة حرارة الكسوة إلى ما دون المستوى الذي يمكن أن يشتعل عنده هيدريد اليورانيوم (إذا كان موجوداً وكان هناك إمداد مقيَّد من الأكسجين)؛ ويطبَّق التسلسل الهرمي لتدابير الأمان. وبالنسبة للتخزين في ثاني أكسيد الكربون، تكون معدلات التآكل ضئيلة في درجات الحرارة التي تقل عن ٣٥٠ مئوية. وقد استُخدم التخزين في الهواء الجاف لعدة عقود، عند درجة حرارة وقود أقل من ١٥٠ مئوية. وفي الهواء، يحدث تدهور الوقود من خلال الهجوم التنقُّري، إذا كانت الرطوبة النسبية >٥٠٪ وكانت الأيونات العدوانية موجودة، أو إذا كان هناك دخول ماء.

٤-٤- وقود مفاعلات كاندو

٤-٤-١- التخزين الرطب

آليات تدهور الوقود المحتملة في هذا الصدد هي نفس آليات تدهور وقود مفاعلات الماء الخفيف، انظر القسم ٤-١-١.

٤-٤-٢- التخزين الجاف

الآليات المحتملة المثيرة للقلق بشأن تدهور وقود مفاعلات كاندو، أثناء التخزين الجاف الطويل الأمد، تتعلق أساساً بآثار الهيدروجين. فمعدلات حرق وقود مفاعلات كاندو المستهلك أدنى بكثير من معدلات حرق وقود مفاعلات الماء الخفيف؛ ويؤدي ذلك إلى انخفاض أرصدة المنتجات الانشطارية وانخفاض الحرارة المتبقية، بما يؤدي إلى انخفاض درجات حرارة التخزين. وتأثير درجات الحرارة المنخفضة مفيد فيما يتعلق بمعظم عمليات تدهور الكسوة، باستثناء بعض الظواهر المرتبطة بآثار الهيدروجين. وتتعزَّز آثار ترسُّب الهيدريدات وآثار الدورة الحرارية في نطاق درجة حرارة قريب من درجة حرارة الانتقال من المطواعية إلى التقصُّف، وهذا هو ما يُتوقع أن يسود منذ بداية فترة التخزين الجاف.

بالنسبة لعناصر الوقود التي تكونت فيها عيوب في الكسوة أثناء تشغيل المفاعل، يمكن أن يؤدي التعرض المحتمل للأكسجين، في ظل ظروف تخزين غير عادية، إلى تمزُّق الكسوة نتيجة لتأكسد حبيبات الوقود وتمدُّدها. ولم يُبلغ في الاختبارات التي

أجريت على حِزم الوقود المعابة عمداً والمخزونة في مجموعة متنوعة من بيئات التخزين عن أي مشاكل تتعلق بانتفاخ كريَّات الوقود أو انقسام الكسوة بسبب التعرض للهواء؛ انظر القسم ٩-٤-٢.

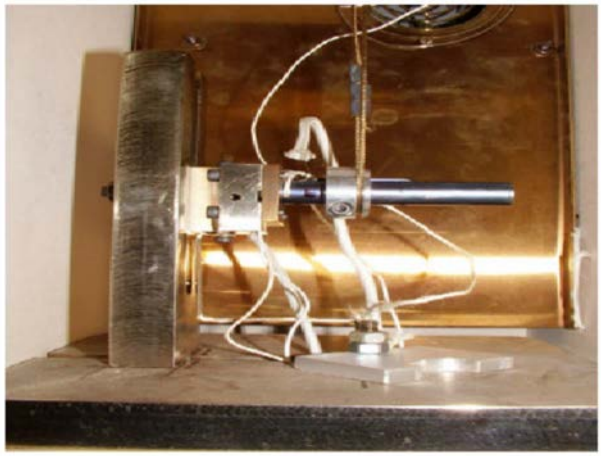
بُحثت إمكانية تعطُّب الكسوة عن طريق التمزق الزحفاني بحثاً واسع النطاق [٤٢] ويرد تلخيص لها في المرجع [٢]. ونظراً لانخفاض درجات حرارة التخزين (<٢٠٠ درجة مئوية) وانخفاض الإجهادات الحَلَقية للكسوة (<١٠٠ ميغاباسكال)، لا يُعتبر التمزق الزحفاني آلية مقيِّدة بالنسبة لوقود مفاعلات كاندو. وبالنسبة لوقود مفاعلات كاندو أيضاً، يعتبر التشقُّق الهيدريدي المتأخر للحامات السدادة الطرفية/اللوح الطرفي هو الآلية الأكثر أهمية التي يمكن أن تؤثر في سلامة حزمة الوقود أثناء التخزين الجاف.

٤-٤-٢-١- دراسات التشقُّق الهيدريدي المتأخر

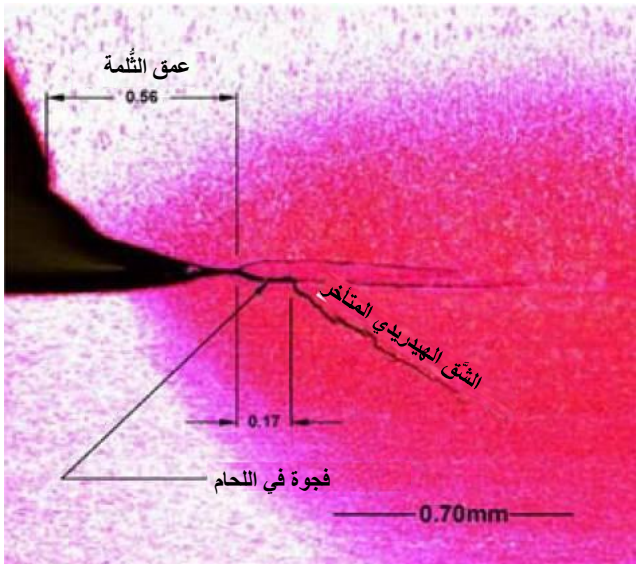
لتحسين فهم خصائص لحامات السدادات الطرفية/الألواح الطرفية لحزمة الوقود، ولتحديد ما إن كان التشقُّق الهيدريدي المتأخر يمكن أن يكون مصدر قلق، استُحدث جهاز ومنهجية يمكن استخدامهما بسهولة في خلية ساخنة لفحص لحامات السدادات الطرفية/الألواح الطرفية للوقود المشعَّع. وتشمل المَعلَمات المهمة عامل شدة الإجهاد الذي يمكن أن يؤدي إلى تكوُّن شقوق السدادات الطرفية/الألواح الطرفية، وتحديد سرعة تشقُّق لحامات السدادات الطرفية/الألواح الطرفية للوقود المشعَّع كدالة لدرجة الحرارة في النطاق من ٥٠ تحت الصفر إلى ١٥٠ درجة مئوية ذي الصلة بظروف التخزين الجاف.

أُنجزت المرحلة الأولى من البرنامج في عام ٢٠٠٧ بتطوير الجهاز واختبار المنهجية على لحامات السدادات الطرفية/الألواح الطرفية غير المشعَّعة لحزمة من وقود مفاعل كاندو التجاري. وتستند المنهجية إلى اختبار انحناء يشتمل أساساً على نزع اللوح الطرفي من السدادة الطرفية عن طريق تطبيق عزم دَوَراني على اللحام. ويقاس الحمل الذي يوفِّره العزم الدَّوَراني، ويُتابَع نمو الشق بقياس انخفاض الجهد على طول الشق وبالانبعاث الصوتي. وتظهر في الشكل ٤٦ صورة لجهاز اختبار التشقُّق الهيدريدي المتأخر.

ونجح جهاز الاختبار في بدء ومتابعة نمو الشقوق في لحام السدادة الطرفية/اللوح الطرفي. ويظهر في الشكل ٤٧ صدع نمطي.



الشكل ٤٦- جهاز اختبار التشقُّق الهيدريدي المتأخر، وتظهر فيه عينة سدادة نهائية/لوح نهائي يجري تحميلها بواسطة الكابل (الصورة مقدمة من شركة أونتاريو لتوليد القوى الكهربائية [٤]).



الشكل ٤٧- مقطع معدني يُظهر ثُلمة اللحام وفجوة اللحام والشق الناجم عن التشقُّق الهيدريدي المتأخر (الصورة مقدمة من شركة أونتاريو لتوليد القوى الكهربائية [٤]).

يبدأ الشق عند النُّقرة الموجودة في لحام السدادة الطرفية/اللوح الطرفي، قبل أن ينتقل إلى مادة اللحام في اتجاه اللوح الطرفي لدى زيادة التحميل الناتج عن إجهاد الانحناء. وتعمل نُقرة اللحام كرافعة للإجهاد من الموضع الذي ينمو منه الشق.

استُخدم الاختبار الأول لبدء تشغيل الجهاز وللإيضاح العملي للمنهجية. وكانت المادة المختبرة المأخوذة من حزمة الوقود تحتوي على تركُّزات من الهيدروجين في بنية سبيكة الزركالوي تبلغ حوالي ١٠ أجزاء في المليون، واستُعملت لتأكيد ما إن كان التشقُّق الهيدريدي المتأخر يمكن أن يكون فعالاً عند تركُّزات الهيدروجين التي تُعتبر ضئيلة بالنسبة للحزمة المصنَّعة، وأيضاً لإجراء سلسلة من الاختبارات على لحامات اللوح الطرفي/السدادة الطرفية المحتوية على التركُّزات ذات الصلة بالتركُّزات التي توجد في الوقود المشعَّع.

وأكدت النتائج أن التشقُّق الهيدريدي المتأخر يمكن أن يكون فعالاً في السدادات الطرفية/الألواح الطرفية عند تركُّزات منخفضة للهيدروجين وعامل شدة إجهاد قدره ١٣,٩ ميغاباسكال/م$^{١/٢}$ و١٣٠ درجة مئوية. واستعداداً لاختبار لحامات السدادات الطرفية/الألواح الطرفية المشعَّعة، أُجريت سلسلة من الاختبارات في درجات حرارة وأحمال مختلفة بغية زيادة تطوير المنهجية وتوفير نتائج تُستخدم كمعايير.

ومن أجل هذه الاختبارات، حُمِّلت كسوة الحزمة غير المشعَّعة ولحامات السدادة الطرفية/اللوح الطرفي كهروكيميائيًّا مع هيدروجين إلى مستوى حوالي ٤٠ جزءاً في المليون. وقُيِّمت نتائج الاختبارات باستخدام المعادلات التحليلية لعامل شِدَّة الإجهاد ذات الصلة بجيومترية العينات المختبرة، وباستخدام شيفرة عناصر متناهية طُوِّرت لهذا الغرض. وحَسَبت شيفرة العناصر المتناهية عوامل شِدَّة الإجهاد التي تتفق مع النماذج التحليلية. وتم تأكيد التشقُّق الهيدريدي المتأخر من خلال تحليل مورفولوجيا الشقوق بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح. وتبلغ عوامل شدة الإجهاد (K_{IH}) المتحصل عليها من الاختبارات حوالي ٧,٦-١٣,٦ ميغاباسكال/م$^{١/٢}$ عند درجة حرارة ١٥٠ مئوية وسرعات تشقُّق بدرجة ١٠$^{-٩}$/م/ث$^{-١}$. ويرد مزيد من المعلومات حول هذه الدراسات في المرجع [٤٣].

٤-٥- المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٤٠/١٠٠٠

لا يستخدم هذا القسم إلا المراجع المذكورة فيه.

٤-٥-١- التخزين الرطب

آليات تدهور الوقود المحتملة في هذا الصدد هي نفس آليات تدهور وقود مفاعلات الماء الخفيف، انظر القسم ٤-١-١.

٤-٥-٢- التخزين الجاف

نظراً لأن من المتوقع أن يكون وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠/٤٤٠ عرضة لآليات تدهور مماثلة لتلك التي تم النظر فيها بالنسبة لوقود مفاعلات الماء الخفيف (القسم ٤-١-٢)، فقد ركَّز تقييم تدهور الكسوة في ظل ظروف التخزين الجاف على السلوك الزحفاني للكسوة Zr-1%Nb، المستخدمة في جميع أنواع المفاعلات. وأُجريت الدراسات التالية من أجل الإيضاح العملي لأداء الكسوة Zr-1%Nb [٢، ٤]:

- اختبار قِطَع أنابيب من الكسوة Zr-1%Nb (طولها ٨٠ مم) ضُغطت بغاز الأرغون ثم شُعِّعَت لبلوغ معدَّلات تدفُّق مختلفة في مفاعل الأبحاث BOR-60. وأجريت اختبارات زحفان في فراغ لمدة ٢٠ يوماً عند درجة حرارة ٤٠٠ مئوية. ولوحظ أن المواد المشعَّعة شهدت تصلُّداً ناجماً عن الإشعاعات، على غرار سبائك الزركونيوم الأخرى، بما أدى إلى تقليل الزحفان الحراري؛ أي أن من شأن اختبار العينات غير المشعَّعة أن يكون أسوأ الحالات [٤٤].
- أُجريت اختبارات زحفان في الجمهورية التشيكية على أنابيب الكسوة Zr-1%Nb غير المشعَّعة، عند نطاق من درجات الحرارة والإجهادات الحَلَقية، بغية تحديد درجة الحرارة القصوى التي يمكن السماح بها لتخزين وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٤٠ في برميل من نوع CASTOR 444/84. والدراسة مبلغ عنها في المرجع [٤٥].
- حُمِّل برميل CASTOR خاص بوقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠ بثلاث علب تحتوي على ٣ من قضبان وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٤٠ (في كل علبة) في محطة نوفوفورونيج للقوى النووية؛ وكان معدل حرق القضبان ٣٦ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. واستُخدمت اثنتا عشرة مجمَّعة وقود مستهلكة لمفاعلات مبرَّدة ومهدأة بالماء-١٠٠٠ كمصدر حرارة في البرميل، وأُبلغ عن درجات حرارة في النطاق ٣٣٠-٣٨٠ درجة مئوية للقضبان المُزالة من البرميل بعد تخزينها لمدة ٢,٥ شهر [٤٦]. وأظهر استقصاء ما بعد الاختبار عدم وجود أي تغير في قضبان الوقود، لا سيما عدم حدوث زيادة في القطر تتجاوز حد الكشف [٢، ٤]. وكان المخطط له هو أن تكون المدة الإجمالية للاختبار ١٢ شهراً.
- أُخضع قضيبا وقود مفاعلات مبرَّدة ومهدأة بالماء-٤٤٠ لمعدل حرق ٤٨,٢ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ لتخزين جاف محاكى في كبسولة محكمة السد مليئة بغاز الأرغون ومسخَّنة من الخارج عند ٣٥٠ درجة مئوية لمدة شهرين، وعند ٣٩٠ درجة مئوية لمدة شهرين آخرين، في خلية ساخنة في معهد البحوث العلمية للمفاعلات الذرية في ديميتروفغراد [٤٧]. وأُخضعت ثلاثة قضبان تحكُّم من نفس مجمَّعة الوقود لسلسلة من التحاليل المتلفة وغير المتلفة. وخلصت فحوص ما بعد الاختبار إلى ما يلي:

> *"لم يتغير بعد الاختبار المظهر الخارجي لسطح كسوة قضبان الوقود، وسماكة طبقة الأكسيد، وطول قضيب الوقود، وتوزُّع المنتجات الانشطارية التي يحتوي عليها الوقود. وأدى تقييم إحصائي لجميع تغيرات القُطر المقاسة إلى تحديد تغيُّر في القطر قدره ٢,٦ ميكرومتر. وعلاوة على ذلك فإن الانفعال الحَلَقي التراكمي المحسوب (حوالي ٠,٠٢٪) في ظل الظروف الواقعية لتناقص درجة حرارة الكسوة يؤدي إلى تشبُّع الزحفان بعد ١٠ سنوات [٤٧]".*

٥- سلوك الوقود في التخزين الرطب

تم الحصول على المعلومات الواردة في هذا الفصل من المراجع [٢، ٤، ٦]. والمراجع الأخرى مذكورة في النص حسب الاقتضاء.

٥-١- الأداء العام

تمتد الآن الخبرة في مجال التخزين الرطب للوقود النووي المستهلك إلى ما يقرب من ٦٠ عاماً. والفوائد التي توفرها هذه التكنولوجيا تتعلق أساساً بكفاءة التبريد وبالتدريع. كذلك ييسِّر ماء الحوض اتخاذ الإجراءات الوقائية، وعمليات تفتيش/فحص الوقود، والمرونة التشغيلية (وبخاصة فيما يتعلق بعمليات إعادة المعالجة)، من خلال تحليل ماء الحوض، الذي يتيح إثبات استمرار سلامة كسوة الوقود ويسمح بسهولة جمع البيانات المحددة عن مجمَّعات الوقود.

وقد وردت في القسم ٤ العوامل التي يمكن أن تؤثر على سلامة مجمَّعات الوقود/الكسوة، ما عدا عمليات مناولة الوقود الروتينية.

وبصفة عامة، يبدو أن التخزين الرطب للوقود المستهلك لا يقيّده سوى الظروف الكيميائية المعاكِسة في حوض تخزين الوقود أو تدهور بنية الحوض. والعوامل التي تؤثر على إزالة الوقود، في حالة المرافق الموجودة لدى المفاعل، هي الحفاظ على سعة احتياطية من أجل عمليات تفريغ أحمال الوقود من المفاعل في المستقبل أو الإغلاق الكامل للمفاعل لأسباب اقتصادية في وقت إيقاف تشغيل المفاعل.

والأساليب القياسية لتأكيد الأداء الجاري للوقود المستهلك هي التحليل المتلِف (القياسات الفيزيائية على عينات مقطوعة، التي تُجرى في الخلايا الساخنة) والتحليل غير المتلِف (التقنيات التي يمكن استخدامها في الموقع). وترد مناقشة هذا الأسلوب الأخير في القسم ٨.

٥-٢- وقود مفاعلات الماء الخفيف (مفاعلات الماء المغلي، مفاعلات الماء المضغوط)

كان أداء وقود مفاعلات الماء الخفيف في التخزين الرطب ممتازاً بصفة عامة، مع عدم وجود مشاكل تشغيلية أو حوادث إلا أحياناً. وبالنسبة للوقود المكسو بسبيكة الزركونيوم، توجد بيانات لأكثر من ٥٠ عاماً عن التخزين المستمر في الحوض، ولمدة ٣٢ عاماً عن الوقود المكسو بالفولاذ المقاوم للصدأ.

وعند بداية المشروع، كان معظم الأساس للتخزين الرطب في أحواض المياه لوقود المفاعلات المبرَّدة بالماء قد تم تحديده، مع عدم الاحتياج إلى مزيد من الاستقصاءات إلا بشأن أثر زيادة حرق الوقود. وبحلول أوائل ثمانينات القرن العشرين، كانت قد أُجريت استقصاءات بشأن سلامة الكسوة، من خلال التحليلات المتلفة وغير المتلفة على السواء، في عدد من البلدان المشاركة، ومن بينها ألمانيا وفنلندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية. وكان الوقود المخزون تخزيناً رطباً لأطول مدة هو كسوة الزركالوي ذات الحرق المنخفض التي ظلت في ماء منزوع الأيونات لمدة >٢٠ عاماً. وكان الوقود المكسو بالفولاذ المقاوم للصدأ والذي خزن لأطول مدة عند الفحص قد خُزن لمدة ٦ سنوات في ماء معالج بحامض البوريك. وفي ألمانيا، كان يجري استقصاء أداء الوقود العالي الحرق (حتى ٣٩ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$)؛ وكان الوقود الذي تمت معايرته يُعاد فحصه بعد سنة واحدة و٣ سنوات و٦ سنوات من التخزين. وكان الاستنتاج العام من هذه الدراسات الوطنية هو أنه لم يُلاحظ أي تدهور في الكسوة يمكن اكتشافه [١، ٣]. بيد أنه كانت هناك بعض الأدلة على أن النفايات بدأت في التنقُّع والانفكاك من كسوة وقود مفاعلات الماء المضغوط بعد ٨ سنوات من التخزين.

وفي السنوات اللاحقة، كان عدد العمليات المكرَّرة لفحص الوقود بعد التخزين محدوداً. غير أن عمليات تفتيش/مراقبة سلامة الوقود تتم روتينيًّا أثناء تفريغ أحمال الأحواض ودعماً لعمليات إعادة المعالجة. فمثلاً يوجد في الولايات المتحدة الأمريكية اشتراط بإجراء فحص بصري لكل مجمَّعات الوقود قبل تسليمها [٤٨]. ويقدم الجدول ١٧ مثالين على البيانات التي جُمعت خلال عمليات جرت مؤخراً لتفريغ أحمال الأحواض في الولايات المتحدة الأمريكية [٤٩-٥٠].

الجدول ١٧- أمثلة على المعلومات التي جُمعت عن سلامة الوقود المستهلك، دعماً لتفريغ الأحواض الموجودة لدى المفاعلات في الولايات المتحدة الأمريكية

محطة القوى النووية	مجمَّعات الوقود التي فُتّشت	مجمَّعات الوقود التي عُدِّلت	مجمَّعات الوقود التي أُخذت منها عينات بالرشف	مجمَّعات الوقود التي وُضعت في عُلب الوقود المصاب بتلف	أقدم وقود	التعليق
زيون	٢٢٢٦	١٤٧٨	١٣٦٩	٩٨	١٩٧٣	عُدِّلت بواسطة قضبان ربط أنابيب الأجهزة
كيواوني	٨٨٧	٢٤١	١٦١	٣	١٩٧٤	عُدِّلت بواسطة دبابيس تثبيت أنابيب التوجيه لم توجد أوجه شذوذ بنيوية

ووُجد بصفة عامة أن حالة وقود مفاعلات الماء الخفيف المخزون لمدة طويلة (أكثر من ٤٠ عاماً) تكون جيدة عند استرجاعها لدعم عمليات إعادة المعالجة أو تفريغ حمولة الحوض في براميل التخزين الجاف. ولا يوجد دليل يشير إلى حدوث أي تدهور في مجمَّعات الوقود نتيجة لنظام التخزين الرطب المستخدَم. ولم يُعثر أيضاً على آثار مقيِّدة أثناء التخزين الرطب لدى المفاعل؛ بما في ذلك تخزين الوقود عالي الحرق المحتوي على مواد بنيوية جديدة مقاوِمة للتآكل.

بيد أنه أُبلغ عن تآكل الغلاف، الذي يؤدي لاحقاً إلى فصل الفوهة العلوية أثناء مناولة الوقود، فيما يتعلق ببعض أنواع وقود مفاعلات الماء المضغوط المحتوية على أنابيب توجيه مصنوعة من الزركالوي ووصلات إسفينية مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ من نوع ٣٠٤ تحتوي على مستويات أعلى من المستوى العادي من الكربون. وحُدِّدت آلية التدهور بأنها التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي بين الحُبيبات للوصلات الإسفينية المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ (التي تتحسَّس إما أثناء التصنيع أو في قلب المفاعل ويبدأ تحسُّسها عن طريق التعرض لظروف كيميائية معاكسة في الحوض). ومنذ أن جرت هذه الملاحظات في تسعينات القرن العشرين، نُفِّذت في تصميمات مفاعلات الماء المضغوط اللاحقة تغييرات في التصميم والمواد. ولتقليل تآكل المواد الهيكلية للوقود المستهلك المودع في التخزين الرطب، تُقصَر تركُّزات الكلوريد والفلوريد والكبريتات أيضاً على ٠,١ جزء في المليون، ويجب أن تكون محتويات الصوديوم والكالسيوم أقل من ٠,٥ أجزاء في المليون، بينما يبلغ الحد الأدنى لقيمة الأس الهيدروجيني ٤,٥.

ودعماً لعمليات إعادة المعالجة في المملكة المتحدة، أُجري فحص قبل المناولة لعدد من مجمَّعات وقود مفاعلات الماء المضغوط المعرَّضة لتآكل الوصلات الإسفينية. ولم يُظهر الفحص المتكرر، على مدى سنوات عديدة، لمجمَّعة وقود واحدة حدث فيها تآكل ملحوظ للوصلة الإسفينية، أي تدهور في الحالة بمرور الزمن، وتم استرجاع الوصلة لاحقاً وإعادة معالجتها دون أن تنفصل الفوهة العلوية. وتوفِّر الخبرات في إسبانيا في إعادة تنضيد حوالي ٠٠٠ ١٣ مجمَّعة وقود مستهلكة مزيداً من الدعم للملاحظات التي جرت في المملكة المتحدة.

بيد أن احتمال انفصال الفوهة العلوية لا يزال يمثل مشكلة بالنسبة لاسترداد الوقود المخزون لفترة طويلة. ولتجنب أي احتمال لانفصال الفوهة العلوية، نُفِّذت ضوابط إجرائية و/أو إصلاحات للأجهزة من أجل التصرف في مجمَّعات الوقود القابلة للتضرر. فمثلاً، في عملية جرت مؤخراً لاسترداد ٨٨٧ مجمَّعة وقود من حوض لدى المفاعل في محطة كيواوني للقوى النووية (الولايات المتحدة الأمريكية)، كانت هناك ٢٤١ مجمَّعة وقود معروفة بأنها عرضة لتآكل الوصلة الإسفينية، واتُّخذت إجراءات علاجية قبل نقل الوقود إلى علب التخزين الجاف [٥٠]. وتضمنت الخطوات العلاجية إدخال ستة براغي تثبيت في أنابيب التوجيه والقيام باختبار الحمل حتى ٤٥٠ كغم/م$^{-1}$.

وفي مراحل مشروع سبار القريبة العهد، تم تقييم أداء الوقود المستهلك لدى المفاعلات، استجابةً لأحداث ١١ أيلول/سبتمبر ٢٠٠١ ('١١/٩')، والأحداث التي وقعت في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية في وقت أقرب (٢٠١١). وفي الولايات المتحدة الأمريكية، قُيِّم احتمال الفقدان السريع للمياه من حوض التخزين، والتفاعل غير المنضبط لمكونات سبيكة الزركونيوم

مع الهواء (حرائق الزركونيوم)، لوقود مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط، وأدى التقييم إلى استحداث استراتيجيات لتخفيف تأثير فقدان تبريد الحوض لمدة طويلة [٥١، ٥٢]. وأشارت دراسة حول سلامة أحواض الوقود المستهلك في محطة مفاعلات ماء مغلي مرجعية إلى وجود احتمال قدرة حوالي مرة واحدة في كل ١٠ ملايين سنة بأن يتسبب زلزال عنيف في انطلاق إشعاعي من حوض وقود مستهلك. وأكد التقييم الرقابي أن هذه النتائج من شأنها أن تنطبق على جميع محطات الولايات المتحدة [٥٣].

أُجريت أيضاً دراسات مماثلة في بلدان أخرى من بلدان مشروع سبار. ويرد أحدث تقرير موجز عن النتائج المستخلصة من هذه الاستقصاءات في تقرير لجنة أمان المنشآت النووية بوكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي حول 'أحواض الوقود المستهلك في ظل ظروف حوادث فقدان التبريد وفقدان سائل التبريد' [٥٤].

٥-٣- وقود مفاعلات كاندو

تخزن كندا وقود مفاعلات البحوث تحت الماء منذ خمسينات القرن العشرين. ويُخزن وقود مفاعلات القوى كاندو في أحواض مياه في مواقع المفاعلات، وكان هناك تخزين مستمر لنحو ٤٥ عاماً. وكانت خبرة التخزين الرطب ممتازة.

في الفترة ١٩٧٨/١٩٧٧، بدأت شركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة وشركة أُونتاريو هايدرو تجربة في مختبرات تشوك ريفر التابعة لشركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة لتقييم جدوى تخزين وقود مفاعلات كاندو، المكسو بالزركونيوم والمشعَّع، في الماء لمدة ٥٠ عاماً على الأقل. واختير أصلاً للبرنامج ١٧٦ قضيب وقود من ١٩ حزمة وقود. وتضمنت هذه القضبان نموذجاً أولياً لوقود محطة توليد شُعِّع في مفاعل الأبحاث الوطني الشامل بمختبرات تشوك ريفر، ووقود إنتاج شُعِّع في مفاعل القوى النووية الإيضاحي ومحطة دوغلاس بوينت للقوى النووية ومحطة بيكرينغ للقوى النووية. وفُرّغت أقدم حزمة تم اختيارها للبرنامج من مفاعل القوى النووية الإيضاحي في أيار/مايو ١٩٦٢. وفُكِّكت جميع الحزم التسع عشرة وخُزن الوقود في شكل قضبان وقود مفردة في أنابيب مفتوحة الطرف مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ. وعُبِّئت مجموعات من ثمانية أنابيب في علب تخزين مصنوعة إما من الألومنيوم أو الفولاذ المقاوم للصدأ. واختيرت علب التخزين المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ ومن الألومنيوم للبرنامج لبحث الاختلافات في سلوك مواد التخزين

حُدِّدت خصائص الوقود الذي اختير أصلاً للبرنامج في الفترة ١٩٧٨/١٩٧٧، واشتمل تحديد الخصائص على فحص متلِف لعناصر وقود محدَّدة من كل حزمة، بالإضافة إلى فحص غير متلِف للعناصر المتبقية. ولم يكشف الفحص عن حدوث أي تغيرات في حالة الوقود أو الغلاف عن حالتهما في فحوصات ما بعد التشعيع الأصلية، وذلك بعد ١٦ عاماً من التخزين الرطب.

وفي عام ١٩٨٨، استُرجعت عناصر وقود محدَّدة من كل حزمة لإجراء فحص مفصَّل للتخزين المؤقت. ولم يكشف الفحص عن أي تغير ظاهر في حالة الوقود أو الكسوة في أي من عناصر الوقود السليمة، بعد ٢٦ عاماً من التخزين الرطب. ويُبلغ عن حالة الوقود المُعاب عمداً في القسم ٩ من المرجع [٥٥]. ولم يُبلغ عن أي فحوصات أخرى لهذا الوقود.

٥-٤- وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء

الشروط المقررة للتخزين الرطب لدى المفاعل للوقود الناشئ في الاتحاد الروسي هي التالية: إبقاء حمض البوريك في حدود ١٢-١٦ غم/كغم$^{-1}$؛ وإبقاء تركُّزات الهاليدات (الكلوريد والفلوريد) أدنى من ٠,١ ميكروغرام/كغم$^{-1}$؛ والأس الهيدروجيني في النطاق ٤,٣-٦,٥. وتُملأ الأحواض الموجودة خارج المفاعل بمياه منزوعة المعادن، وتُبقى تركُّزات الهاليدات أقل من ٠,١٥ مغم/كغم$^{-1}$، والأس الهيدروجيني في نطاق ٥,٥-٧,٠.

ويوجد أكثر من ~٥٠ عاماً من الخبرة في التخزين الرطب لوقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء والمفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات المكسو بالسبيكة Zr-1%Nb. ولم يُبلغ عن أي تعطُّب في كسوة الوقود في التخزين الرطب، في ظل ظروف التشغيل العادية، استناداً إلى مراقبة النشاط الإشعاعي لمياه الحوض. غير أنه أُبلغ عن تآكل شبكات المباعَدة

المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ. واستُعيض الآن عن شبكات المباعدة بمكونات مصنوعة من سبائك الزركونيوم للتغلب على هذه المشكلة.

وأُجريت دراسات للتآكل على عينات للكسوة المصنوعة من السبيكة Zr-1%Nb مقطوعة من مجمَّعات وقود مستهلك للمفاعلات العالية القدرة المزوَّد بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء بفترات حرق وتبريد مختلفة. وأظهرت النتائج أن لمستوى الحرق تأثير على لدونة الكسوة أكبر كثيراً من تأثير مدة التخزين.

وبالنسبة لوقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات، لوحظ معدل نمو أقصى لطبقة الأكسيد يتراوح بين ٣ و٥ ميكرومترات/سنة$^{-1}$ في المنطقة الملامِسة لشبكة المباعدة، بالنسبة للوقود المستهلك المخزون في علب مفتوحة مع كيمياء غير متحكم فيها وبمدة تخزين تصل إلى ١٥ سنة. وبالنسبة لوقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-٤٤٠، يتوزع السُّمك المقاس للغشاء الأكسيدي توزُّعاً منتظماً على طول الكسوة الكليَّة، ويبلغ متوسط قيمته ٠,٠١ مم. وفي مواقع شبكات المباعدة، لوحظت زيادة موضعية في سُمك الغشاء الأكسيدي بمقدار ٠,٠٠٥ مم [٢].

٥-٥- وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز

بالنسبة لكسوة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز المصنوعة من سبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ 20Cr:25Ni:Nb، توجد خبرة تخزين تبلغ ٣٨ عاماً. وعلى الرغم من أن معدلات التآكل العام لكسوة هذه الأنواع من الوقود أعلى بكثير من معدلات تآكل كسوة سبائك الزركونيوم (عند ~٠,١ ميكرومتر/سنة$^{-1}$)، فإن التآكل العام ليس عاملاً محدِّداً للزمن بالنسبة لفترات التخزين المتصورة حاليًّا (حتى ١٠٠ عام).

وبالنسبة لوقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز، يلزم إيلاء اهتمام خاص لكيمياء مياه الحوض، لأن أجزاء من عمود الوقود تتحسَّس أثناء تشغيل المفاعل (انظر القسم ٤-٢)، بما يؤدي إلى جعل الكسوة قابلة للهجوم بين الحُبيبات في وجود الأنيونات العدوانية، لا سيما الكلوريد. ولمنع الهجوم بين الحُبيبات فإن نظام التخزين الرطب الموصى به للوقود هو ماء الحوض المعالَج بهيدروكسيد الصوديوم عند الأس الهيدروجيني ١١,٤. وتوجد خبرة مستمرة للتخزين في هذه البيئة تصل إلى ٢٤ عاماً. ولم تحدث أي حالات تعطُّب في الكسوة قابلة للكشف بالنسبة للوقود المخزون في الأحواض المعالجة بهيدروكسيد الصوديوم. وكما هو مبلغ عنه في مشروع سبار الثاني، استُهلت دراسات لتقييم كيمياء تخزين بديلة فيما يخص وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز، بغية تسهيل التخزين المشترك للمواد المحتوية على الألومنيوم المرتبطة بتخزين وقود مفاعلات الماء الخفيف في حوض الاستلام والتخزين بشركة ثورب. وتم في البداية المضي قدماً في زيادة تطوير المعالجة بنترات الصوديوم، بما في ذلك الفحص النشط على نطاق المختبرات باستخدام مادة دُعامة عالية الحرق وإجراء سلسلة من الدراسات المحكومة على عدد محدود من حاويات التخزين المحتوية على وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز والمعزولة عن ماء الحوض السائب. وتقرَّر لاحقاً التخلي عن تطبيق المعالجة بالنترات، على أساس عدم وجود خبرة تشغيلية، وبعض أوجه عدم اليقين في قدرة النترات على إيقاف التآكل تماماً أثناء الاختبارات المحكومة، ومخاوف بشأن إمكانية تعزيز تكاثر الطحالب.

وتم لاحقاً تحديد وتنفيذ المعالجة القصيرة الأمد لحوض الاستلام والتخزين بشركة ثورب بهيدروكسيد الصوديوم حتى الأس الهيدروجيني ٩ باعتبار تلك المعالجة كيمياء مياه بديلة تحمي كسوة وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز المتحسِّسة في التخزين الرطب وتتوافق مع مكونات الألومنيوم المخزونة في الوقت نفسه في الحوض. ويوفر ذلك عدة مزايا، من بينها الاستفادة من الخبرة الواسعة في استخدام هيدروكسيد الصوديوم في أحواض التخزين في سيلافيلد.

٥-٦- وقود مفاعلات ماغنوكس

الوقود المكسو بسبيكة المغنيسيوم (ماغنوكس Al80) معرَّض بصفة خاصة لتآكل الكسوة في ظروف التخزين الرطب. وعلى الرغم من تشكُّل غشاء واقٍ من هيدروكسيد المغنيسيوم في البداية فإن وجود أي أيونات عدوانية في الماء يعزِّز تحلُّل طبقة الأكسيد الواقية ويترك الكسوة معرَّضة لهجوم التنقُّر. لهذا السبب، يخزن وقود ماغنوكس في ماء عالي النقاء معالج

بمواد كاوية إلى أس هيدروجيني لا يقل عن ١١,٤، وتميل مدة التخزين إلى أن تكون محدودة، وفي العادة <٥ سنوات. وخارج المفاعلات، يُخزن وقود ماغنوكس داخل حاويات تعالَج في البداية بحيث تصل إلى الأس الهيدروجيني ١٣,٠.

ويتواصل العمل أيضاً لإثبات جدوى التخزين الرطب لوقود ماغنوكس بما يتجاوز الفترات المقبولة حاليًّا. وتهدف الاستقصاءات إلى دعم خيارات إجراءات الطوارئ في حالة حدوث عطب كبير في مرفق إعادة معالجة لوقود ماغنوكس [٥٦].

٦- سلوك الوقود في التخزين الجاف

٦-١- الأداء العام

يوجد ما يقرب من ٤٠ عاماً من الخبرة الإيجابية في التخزين الجاف لوقود مفاعلات القوى المستهلك، وحوالي ٥٠ عاماً في التخزين الجاف لوقود مفاعلات البحوث. وتوجد تجربة تخزين جاف لوقود من مجموعة متنوعة من أنواع المفاعلات (مفاعلات كاندو، ومفاعلات الماء الثقيل، ومفاعلات الماء المضغوط، ومفاعلات الماء المغلي، والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء، والمفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات، ومفاعلات ماغنوكس، والمفاعلات العالية الحرارة المبرَّدة بالغاز). ومنذ بداية التخزين الجاف للوقود المستهلك، تطور ذلك التخزين إلى مجموعة واسعة من النظم (يقدم القسم ٣-٢ مزيداً من التفاصيل). وجميع البلدان تقريباً التي شاركت في البرامج المختلفة لمشروع بفاست أو مشروع سبار (الاتحاد الروسي، الأرجنتين، إسبانيا، ألمانيا، جمهورية كوريا، سويسرا، فرنسا، كندا، المملكة المتحدة، هنغاريا، الولايات المتحدة الأمريكية، اليابان) تمارس شتى تقنيات التخزين الجاف. كما أن جميع الدول المشاركة تضطلع بنشاط ببرنامج بحث وتطوير في مجال التخزين الجاف. وتشير نتائج البحوث حتى الآن إلى أنه يمكن تخزين الوقود بأمان في ظل الظروف الحالية لعدة عقود [٢، ٤، ٦].

وقد ازدادت الكميات المودعة في التخزين الجاف ازدياداً كبيراً خلال الأعوام العشرين الماضية. وفي نهاية عام ٢٠١٣، كان هناك حوالي ٥٠٠ ٥٢ طن (معدن ثقيل) في التخزين الجاف [٤]؛ وبالنسبة لبعض البلدان، يمثل ذلك حوالي ٣٠٪ من إجمالي مخزون الوقود.

ويُفاد في المرجع [٣] عن الأساس المُستند إليه في اختيار بيئة التشغيل (الغاز الواقي) وظروف التخزين الجاف للوقود المستهلك. وأدت الدراسات التي أُجريت في الهواء وفي الغازات الخاملة إلى اعتماد أحد نهجين: تحميل الوقود المستهلك في الهواء عند درجة حرارة لا تتأثر فيها أكسدة أي وقود مكشوف؛ وتحميل الوقود المستهلك في بيئة غاز خامل (لتجنب أي أكسدة للوقود المكشوف وكسوة الوقود).

يُستخدم الهيليوم في الغالب للتخزين الجاف لوقود مفاعلات الماء الخفيف، حيث يتعين استيعاب درجات حرارة متبقية عالية للكسوة من أجل تسهيل إزالة الوقود المستهلك في الوقت المناسب من الأحواض الموجودة خارج المفاعل [٢]. وقد اختير الهيليوم بسبب خواصه الحرارية، لكونه موصلاً للحرارة ٥-٦ مرات أكثر من الهواء أو النيتروجين أو ثاني أكسيد الكربون أو غاز الأرغون. وأظهرت أيضاً دراسات تقييم السلوك الحراري في برميل أو في نظام مغلق أن زيادة ضغط الغاز الواقي أدت إلى تحسين كفاءة نقل الحرارة، بالنسبة لمدى الضغط ٠,١-٠,٥ ميغاباسكال [٣].

والاستثناءات هي وقود مفاعلات كاندو، الذي يُخزن في الهواء الجاف، ووقود مفاعلات ماغنوكس، الذي يُخزن في البداية في ثاني أكسيد الكربون ثم يُنقل إلى الهواء حالما يبرد، والنيتروجين المستخدم في تكنولوجيات التخزين الجاف في الأقبية النمائطية[٩].

ويُرخص بالتخزين الجاف للوقود المستهلك لمفاعلات الماء الخفيف في جو خامل في الولايات المتحدة الأمريكية وإسبانيا اعتماداً على مستوى الحرق ونوع البراميل بالنسبة لدرجات الحرارة التي تصل إلى ٤٠٠ درجة مئوية (وأعلى من ٤٠٠ درجة مئوية بالنسبة للوقود المنخفض الحرق إذا أمكن إثبات أنه يمكن إبقاء الإجهاد الحَلَقي للكسوة أقل من ٩٠ ميغاباسكال). ويُرخص بالتخزين الجاف في النيتروجين بدرجة حرارة ٤١٠ مئوية في هنغاريا بالنسبة للوقود المكسو بالسبيكة Zr-1%Nb [٢، ٤، ٦].

وفي ألمانيا، لا تُشترط درجة حرارة محددة للحصول على الترخيص. وبدلاً من ذلك، ينبغي استيفاء المعيارين التاليين من أجل استبعاد حدوث أعطاب منتظمة في كسوة قضبان الوقود أثناء التخزين الجاف:

- يجب ألا يتجاوز الانفعال المُماسي الأقصى للكسوة قيمة ١٢٠ ميغاباسكال؛
- يجب ألا يتجاوز الانفعال المُماسي المتبقي للكسوة قيمة ١٪ في نهاية فترة التخزين الجاف [٢].

[٩] تُستخدم بيئة مختلطة من النيتروجين والهيليوم في التكنولوجيات الجديدة للتخزين الجاف في أقبية نمائطية في مجمَّع التعدين والكيميائيات في جيليزنوغورسك بالاتحاد الروسي.

وفي حالة مجمَّعات الوقود ذات مستوى الحرق ٥٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$، التي تم تبريدها في الماء لمدة ٥ سنوات تقريباً، يؤدي ذلك إلى حد لدرجة الحرارة يبلغ ٣٦٠ درجة مئوية عند سطح الكسوة [٢، ٤].

يكون معظم الوقود المودع في التخزين الجاف مكسواً بسبيكة زركونيوم (Zry-2، وZry-4، وZr-1%Nb)؛ إلا أنه توجد أيضاً تجربة تخزين جاف لوقود مكسو بالمغنيسيوم والألومنيوم [٢، ٤].

ويصل الحد الأقصى لمستوى الحرق إلى ٦٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. وهناك اتجاه شبه عالمي نحو زيادة مستوى حرق عناصر الوقود عند التفريغ من المفاعل. ففي ألمانيا، مثلا، زاد متوسط مستوى الحرق عند التفريغ لمجمَّعات وقود مفاعلات الماء المضغوط من ٣٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ في عام ١٩٨٣ إلى ٥٠ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ في عام ١٩٩٨، وتُحقَّق حاليًا قيمة ٦٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. وفي الولايات المتحدة الأمريكية ودول مشروع سبار الأخرى، يُفرَّغ معظم مجمَّعات الوقود المستهلك بمستوى حرق يزيد عن ٤٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$. وعلى الرغم من ذلك فإن غالبية نظم التخزين الجاف تقتصر على حد أقصى لحرق الوقود في النطاق ٤٥-٦٥ غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-1}$ لوقود مفاعلات الماء الخفيف [٢، ٤].

والبيانات اللازمة لتأكيد الأداء الجاري للوقود المستهلك المودع في التخزين الجاف محدودة، فيما عدا وقود مفاعلات ماغنوكس الذي كان وما زال يُسترد بصفة راتبة من مرافق التخزين الجاف في محطة ويلفا للقوى النووية دعماً لأنشطة إعادة المعالجة [٢]. وفي معظم الحالات، لا يتم تأكيد عدم تدهور الوقود المستهلك أثناء التخزين إلا عند فتح نظام التخزين. والمفترض في أساس التصميم بالنسبة لغالبية هذه النظم هو أن الوقود سيظل سليماً بشرط أن يكون نظام التخزين قد ظل محكم المنع للتسرب، وهذه هي الوظيفة التي غالباً ما تُراقَب لاستنتاج مدى السلامة الجارية للوقود. والاستثناء الرئيسي هو الوقود المكشوف المخزون في نظم أقبية نمائطية حيث يمكن ممارسة المراقبة الدورية للغاز الواقي لأنبوب التخزين.

٦-٢- وقود مفاعلات الماء الخفيف (مفاعلات الماء المغلي، مفاعلات الماء المضغوط)

تم أصلاً إثبات أداء وقود مفاعلات الماء الخفيف في التخزين الجاف من خلال اختبارات إيضاحية قصيرة الأمد أجريت في ثمانينات القرن العشرين [٣]. فمثلاً، أجرت ألمانيا عدداً من الاختبارات الإيضاحية تراوحت مدتها بين أسبوع واحد إلى ٣٠ شهراً باستخدام براميل نقل من النوعين CASTOR وTN، حيث كانت مجمَّعات الوقود المعايَرة تُسترجع وتُفحص لتحديد ما إن كانت قد حدثت فيها أي تغيرات [٥٧].

ويرد في الجدول ١٨ ملخص لقائمة بعمليات فحص الوقود والبراميل جرت في وقت أقرب.

واستُهل في مختبر أيداهو الوطني في عام ١٩٨٤ برنامج إيضاحي دعماً للتخزين الجاف لوقود مفاعلات الماء الخفيف في الولايات المتحدة [٥٨]. وتضمنت المرحلة الأولى من ذلك البرنامج أخذ عينات دورية من غاز التجويف الداخلي للبراميل للتأكد من مدى السلامة الجارية لكسوة الوقود [٥٨]، وبعد ١٤ عاماً فُحص أحد هذه البراميل وأُعيد فتحه في عام ١٩٩٩، وهو من نوع CASTOR V/21. وشمل الفحص إزالة كل مجمَّعات الوقود البالغ عددها ٢١ مجمَّعة وإجراء فحوص غير تدميرية عليها للتأكد من حالة الوقود المستهلك. وفيما يلي ملخص لنتائج هذه الفحوصات:

> *"... لم يكن هناك دليل على تدهور البرميل أو التدريع أو قضبان الوقود أثناء التخزين الطويل الأمد (١٤ عاماً) من شأنه أن يؤثر على أداء البرميل أو سلامة الوقود. ولم يكن هناك دليل على تدهور خارجي أو داخلي للبراميل خلال فترة التخزين، كما لم تكن هناك أي علامات على تعطُّب السدادات المُحكمة أو التدريع. وكان الوقود سليما، ولم تكن هناك دلائل على أي زحفان مهم للكسوة أو تقوُّس مهم للقضيب. ...." [٥٩].*

الجدول ١٨- ملخص لدراسات سلامة الوقود المستهلك المخزون في براميل التخزين الجاف

سنة الفحص	١٩٥٨-١٩٩٨	١٩٩٩	٢٠٠٠	٢٠٠٥	٢٠٠٩	٢٠١٣
نوع البرنامج	إيضاحي	إيضاحي	شرط رقابي	شرط رقابي	شرط رقابي	عمليات تحقُّق من السلامة بعد وقوع حدث محتاط له في التصميم
نطاق الفحص	أخذ عينات من غاز الفجوة	سلامة البراميل والوقود	سلامة البراميل والوقود	سلامة البراميل والوقود	سلامة البراميل والوقود	سلامة البراميل والوقود
صاحب البرنامج	وزارة الطاقة/شركة Virginia Power/معهد بحوث القوى الكهربائية	وزارة الطاقة/شركة Dominion/معهد بحوث القوى الكهربائية	شركة طوكيو للقوى الكهربائية	شركة طوكيو للقوى الكهربائية	المنظمة اليابانية لأمان الطاقة النووية	شركة طوكيو للقوى الكهربائية
البلد	الولايات المتحدة الأمريكية	الولايات المتحدة الأمريكية	اليابان	اليابان	اليابان	اليابان
عدد البراميل	٥	١	١	٥	١	٩
مدة التخزين قبل الفحص (بالسنوات)	فحص الأداء بعد مدة تصل إلى سنة واحدة – جميع البراميل ١٠-١٣ برميل – من نوع CASTOR V/21 ٧-١١ برميل – من نوع VSC-17	١٤	٥	١٠	٧	١٨
نوع البراميل	CASTOR V/21, MC-10, TN-24P, REA-2023, VSC-17	CASTOR V/21	TN-24 (٣٧ مفاعل ماء مغلي)	TN-24 (٥٢ مفاعل ماء مغلي)	Hitachi-Zosen (٦١ مفاعل ماء مغلي)	TN-24 (٣٧ و٥٢ مفاعل ماء مغلي)
حرارة الاضمحلال الإشعاعي عند التحميل (كيلوواط)	١٢,٦-٢٨,٤	٢٨	غير متوفر	غير متوفر	١٣	غير متوفر
أخذ عينات غاز الفجوة	الكريبتون[٨٥] ليس فوق مستويات الخلفية الإشعاعية – براميل CASTOR V/21، وVSC-17، وMC-10 اكتُشفت أعطاب في قضبان مفردة في براميل REA-2023 وTN-24P أثناء فحص الأداء	الكريبتون[٨٥] ليس فوق مستويات الخلفية الإشعاعية	الكريبتون[٨٥] ليس فوق مستويات الخلفية الإشعاعية	الكريبتون[٨٥] ليس فوق مستويات الخلفية الإشعاعية	الكريبتون[٨٥] ليس فوق مستويات الخلفية الإشعاعية	الكريبتون[٨٥] ليس فوق مستويات الخلفية الإشعاعية

الجدول ١٨- ملخص لدراسات سلامة الوقود المستهلك المخزون في براميل التخزين الجاف (تابع)

سنة الفحص	١٩٥٨-١٩٩٨	١٩٩٩	٢٠٠٠	٢٠٠٥	٢٠٠٩	٢٠١٣
معدل تسريب الغطاء الداخلي (باسكال/متر^{٣}/ث$^{-١}$)	غير متوفر		$٥,٣ \times ١٠^{-٨}$	$١,٦ \times ١٠^{-٧}$	لا يوجد تغيير مقارنة بالحالة عند التحميل	$<١ \times ١٠^{-٦}$ (١ × البراميل)
حالة سطح السدادة المُحكمة/الأطواق المانعة للتسريب	غير متوفر		لوحظ ابيضاض الطوق المانع للتسريب في الغطاء الثانوي(أ)	لوحظ ابيضاض الطوق المانع للتسريب في الغطاء الثانوي(ب)	لم تلاحظ تغيرات	تآكل الطوق المانع للتسريب في الغطاء الثانوي بمياه البحر(ج)
مستوى حرق الوقود المفحوص (غيغاواط/يوم/طن (معدن ثقيل)$^{-١}$)	٣٥-٢٤	٣٥-٢٤	٣٢	٢٨	٣٣,٥	
حالة الوقود مقارنة بالحالة عند التحميل	لا يوجد دليل على تدهور قضبان الوقود أثناء التخزين، بناء على أخذ عينات الغاز	لا يوجد دليل على تدهور قضبان الوقود	لم يلاحظ تغير	لم يلاحظ تغير	لم يلاحظ تغير	لم تلاحظ تشوهات أو أوجه شذوذ

(أ) غُيرت في عام ٢٠٠١ الأطواق المانعة للتسريب في كل البراميل المخزونة.
(ب) ذُكر سبب مختلف عن السبب الذي ذُكر في عام ٢٠٠٠.
(ج) غُيرت جميع أطواق الغطاء الثانوي المانعة للتسريب.

وفي اليابان، أجرت أيضاً شركة طوكيو للقوى الكهربائية والشركة اليابانية للقوى الذرية عمليات فحص لسلامة البراميل والوقود. وكانت أهداف عمليات الفحص هذه هي تأكيد سلامة الاحتواء بواسطة الطوق المعدني المانع للتسريب وسلامة الوقود المستهلك. فبالنسبة للاحتواء، لم يُظهر الفحص البصري لسطح السِدادة المُحكمة والطواق المانع للتسريب أي حالة غير طبيعية للبراميل في موقع توكاي داييني [٤]. بيد أن التفتيش في محطة فوكوشيما داييتشي في عام ٢٠٠٠ أظهر بعض التلوين للجزء الموجود على سطح الطوق المعدني المانع للتسريب والمستخدم في السِدادة المُحكمة للغطاء الرئيسي؛ وزاد هذا التلوين عند التفتيش في عام ٢٠٠٥. وأثناء الفحص في عام ٢٠٠٠، لوحظ وجود ناتج أبيض على السطح؛ واستُنتج أن تفاعلاً حدث بين مادة الألومنيوم التي صُنع منها الطوق المعدني المانع للتسريب والماء المتبقي. وفي عام ٢٠٠٥، حدث التغيُّر إلى اللون الأبيض أثناء غمر البرميل في حوض المفاعل لعدة أيام قبل فتح الغطاء الأساسي [٦٠]. وبالنسبة لسلامة الوقود المستهلك، لم يُكتشف غاز الكريبتون[٨٥] من خلال أخذ عينات الغاز من تجويف البرميل، ولم يُظهر الفحص البصري لسطح مجمَّعات الوقود أي حالة غير طبيعية [٤].

وخلال الزلزال والتسونامي اللاحق له (٢٠١١)، تأثر مرفق تخزين البراميل في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية بكمية هائلة من مياه البحر والرمل والحطام ترسبت في المبنى. ونُقلت البراميل التسعة المخزونة، بعد التأكد من أداء السلامة من خلال المظهر الخارجي لأجسام البراميل، من مرفق التخزين الجاف إلى الحوض المشترك في الموقع، وأُجري مزيد من عمليات الفحص لتأكيد سلامة الاحتواء والبقاء دون حالة الحرجية وسلامة الوقود. وأكد الاستقصاء عدم وجود أوجه شذوذ في أجسام البراميل أو أي أوجه شذوذ في المظهر الخارجي لمجمَّعات الوقود المستهلك التمثيلية الثلاث التي تم فحصها. ولم يُنظر في إزالة الغطاء الرئيسي للبراميل الثمانية الأخرى إلا إذا وجد تسريب في السدادة المحكمة للغطاء الرئيسي أو اكتُشف الكريبتون[٨٥]؛ ولم تكن هناك حاجة إلى اتخاذ مزيد من الإجراءات. وفي جميع الحالات، استُبدلت السدادة المحكمة للغطاء الثانوي بسبب التآكل الناجم من مياه البحر [٦١].

٦-٣- وقود مفاعلات كاندو

نفَّذت شركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة وشركة أونتاريو هايدرو برامج إيضاحية لدعم التخزين الجاف لوقود مفاعلات كاندو، وذلك بين عامي ١٩٧٨ و١٩٩٦ في مختبرات وايتشيل التابعة لشركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة [٢، ٤]. وترد تفاصيل سيرة الوقود ونطاق الدراسات ونتائجها في الجدول السادس من المرجع [٥].

وكانت عناصر الوقود التي حُدِّدت خصائصها والواردة من محطتي بيكرينغ وبروس للقوى النووية اللتين كانتا في ذلك الوقت تابعتين لهيئة أونتاريو لتوليد القوى الكهربائية تُسحب دوريًّا من التخزين وتُخضع لفحوصات ما بعد التخزين. وكانت تؤدَّى فحوصات متلِفة وغير متلِفة على السواء. وكان الاستنتاج الرئيسي من هذه الدراسات هو أنه لم تُكتشف أي تغيرات يمكن ملاحظتها.

ولم يُبلغ المشاركون من الأرجنتين وجمهورية كوريا عن أي فحص لوقود مفاعلات كاندو المخزون تخزيناً جافًّا.

٦-٤- وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات

أُبلغ بأن تخزين عناصر وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات في الهواء لمدة ٣ سنوات بعد تبريد ذلك الوقود بالماء لمدة ٨-١٠ سنوات لا يُسبب أي تأثير خطير على مقاومة التآكل وعلى الخصائص الميكانيكية. وعلاوة على ذلك فنظراً لأن حرارة اضمحلال وقود المفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات تكون منخفضة نسبيًّا بعد ٥ سنوات من التخزين الرطب، كان متنبأ بأن درجة الحرارة في وسط برميل التخزين الجاف لن تتجاوز ٢٧٠ درجة مئوية [٥].

٦-٥- وقود المفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء

انظر القسم ٤-٥-٢.

أُبلغ أيضاً [٥] عن إجراء تحميل إيضاحي لبرميل من نوع TK-13 يحتوي على ١٢ مجمَّعة وقود للمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء-١٠٠٠ في محطة جنوب أوكرانيا للقوى النووية بين عامي ١٩٨٨ و١٩٨٩؛ ولم يُبلغ عن أي تسريب.

٦-٦- وقود مفاعلات ماغنوكس

كانت التجربة العامة في التخزين الجاف لوقود مفاعلات ماغنوكس في محطة ويلفا للقوى النووية منذ سبعينات القرن العشرين، سواء التخزين القصير الأمد في مخازن مبَّردة بثاني أكسيد الكربون أو التخزين لأمد أطول في مخزنين مملوءين بالهواء، جيدة جدًّا [٢، ٤]. ونظراً لأن آخر مفاعل عامل في موقع ويلفا أوقف تشغيله في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥، وأن سياسة الحكومة هي إعادة معالجة كل وقود مفاعلات ماغنوكس. وتجري حاليًّا إزالة الوقود من الموقع إلى موقع سيلافيلد.

وكانت المشاكل الوحيدة المتعلقة بسلامة الوقود التي أُبلغ عنها راجعة إلى دخول المياه إلى أحد المخازن المبرَّدة الهواء؛ انظر القسم ٩-٤-٢.

٦-٧- وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز

على الرغم من إجراء عدد من دراسات البحث والتطوير حول سلوك وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز في ظروف التخزين الجاف (التخزين خارج المفاعل) [٦٢، ٦٣]، لا توجد حاليًّا خبرة صناعية في هذا الصدد.

بيد أن مسار تصميم التخزين لدى المفاعل لوقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز يتضمن فترة تبريد بدئية في أنابيب تخزين مبرَّدة قسريًّا بثاني أكسيد الكربون. والقدرة على تخزين الوقود تخزيناً جافًّا لدى المفاعل محدودة للغاية لمعظم محطات القوى النووية ذات المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز، ولذلك يشتمل مسار الوقود على تفكيك عمدان الوقود بعد تبريدها في البداية في ثاني أكسيد الكربون، ثم تخزينها تخزيناً رطباً لدى المفاعل قبل نقلها إلى سيلافيلد.

٧- هياكل التخزين الرطب والجاف

يجب أن تكون الهياكل المرتبطة بتخزين الوقود مقاوِمة للإشعاعات والحرارة وهجوم التآكل لعدة عقود. وتُستخدم مجموعة متنوعة من المواد في تخزين الوقود المستهلك. يتم التخزين الرطب للوقود عادة في رفوف مصممة خصيصاً ومخزونة في أحواض عميقة مملوءة بالمياه وذات جدران خرسانية سميكة تكون عادةً مبطنة بالفولاذ المقاوم للصدأ، لتقليل تآكل الخرسانة/قضبان التسليح وللمساعدة على إيقاف التشغيل. أما التخزين الجاف فيشتمل أساساً على نظم تخزين مدرَّعة ذاتيًّا (براميل معدنية أو خرسانية)، ونظم تخزين في العُلب (عُلب من الفولاذ المقاوم للصدأ محكمة السد وغير مدرَّعة موضوعة داخل هيكل خرساني)، أو مبنى تخزين مدرَّع مشيد لهذا الغرض يمكن أن يستوعب مجمَّعات وقود مفردة أو متعددة في أنابيب تخزين. وقد تكون للبراميل كل المقومات التالية أو بعضها: جسم؛ زعانف تبريد خارجية؛ ركائز دوران للرفع؛ نظام أغطية أحادي أو متعدد؛ سدادات محكمة (من المعدن و/أو المطاط الاصطناعي أو لحامات)؛ سلة لوضع مجمَّعات الوقود المستهلك؛ مواد ممتصة للنيوترونات. وعلى خلاف ذلك، يُقصد أساساً من الأنواع الأخرى من نظم التخزين احتجاز الوقود المستهلك ونقل الحرارة؛ ويضمن الهيكل الخرساني التدريع والحماية المادية للوقود المعلَّب أو الوقود الموضوع في أنبوب تخزين، ويسهِّل نقل الحرارة من الوقود المخزون.

تلخص الأقسام التالية المعلومات عن المواد الرئيسية المستخدمة في نظم تخزين الوقود المستهلك، وآليات تدهورها، وأعمال البحث والتطوير المتعلقة بالمواد والتي أُبلغ عنها إلى مشاريع بفاست وسبار البحثية المنسقة.

٧-١- المواد

٧-١-١- الفولاذ المقاوم للصدأ [٢، ٤]

تتسم المكونات المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ بمقاومة عالية لهجوم التآكل، بسبب تكوُّن أغشية أكسيدية واقية. فمثلاً، تبيَّن أن التآكل الناتج من التنقُّر أو من الهجوم الغلفاني ضئيل، وأن معدلات التآكل العام (أو المنتظم) لا تصبح مهمة إلا على مدى فترات زمنية ممتدة (مئات السنين). ولوضع هذه المعدلات في سياقها، فإن معدل التآكل المقاس في الأمد القصير للفولاذ المقاوم للصدأ الموضوع في الماء المشع يبلغ ~٠,٣ ميكرومترات في السنة$^{-1}$، ويبلغ <٠,١ ميكرومتر في السنة$^{-1}$ للفولاذ المقاوم للصدأ الموضوع في الماء المنزوعة منه المعادن والمعالج بهيدروكسيد الصوديوم حتى الأس الهيدروجيني ١١,٤. وأهم آليتين للتعطب تؤثران على الفولاذ المقاوم للصدأ، في ظل الظروف الصحيحة، هما التشقُّق الناتج عن التآكل الإجهادي والتعطُّب الميكروبي.

٧-١-٢- سبائك الألومنيوم

تتأثر سبائك الألومنيوم المودعة في التخزين الرطب بمجموعة واسعة من ظواهر التآكل، تمتد من التآكل السريع الاختراق إلى التآكل الطفيف على مدى عقود. وبصفة عامة، يعتمد استقرار المادة اعتماداً كبيراً على الاحتفاظ بالحاجز الأكسيدي الواقي. فمثلاً، يكون التآكل المنتظم أو العام للألومنيوم منخفضاً في نطاق الأس الهيدروجيني ٤-٨,٥، ولكن عند أس هيدروجيني أعلى أو أدنى يصبح ذلك التآكل مهما بسبب ذوبان الغشاء الواقي. وأهم آلية تدهور هي التدهور المتأتي من الهجوم التنقُّري؛ إلا أنه أُبلغ أيضاً عن آليات أخرى مثل تآكل الشقوق والتآكل الغلفاني والتآكل الميكروبي؛ لا سيما بالاقتران مع كيمياء مياه الحوض ذات الموصِّلية >٣ ميكرو سيمنز/سم$^{-1}$ [٢].

أثناء التخزين الجاف، تُستخدم سبائك الألومنيوم أساساً كموصل حراري كفء داخل البراميل. ويمثل الألومنيوم، بسبب كثافته المنخفضة مقارنة بالمعادن الأخرى، مادة أساسية مناسبة للسلال، من أجل زيادة عدد مجمَّعات الوقود التي تُحمَّل في البرميل بغية ضمان كفاءة النقل والتخزين. وإلى جانب ذلك، تُستخدم سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات، ومواد الألومنيوم

المركَّبة، كمواد ممتصَّة للنيوترونات. وفي ظل ظروف التخزين الجاف، يُستبعد التآكل أو يقلَّل إلى الحد الأدنى، لأن الأجزاء المصنوعة من الألومنيوم تكون إما مطلية بأكسيد الألومنيوم أو مصنوعة من سبائك منخفضة التآكل.

لا يوجد حمل ميكانيكي خارجي على الأجزاء المصنوعة من سبائك الألومنيوم، لأن الحمل على البراميل يقتصر على المناولة الرأسية أو الأفقية والحمل الميت، لأنها تقف مستقيمة أو ترقد أفقيًّا. وفي العادة لا تحدث تغيرات في الخواص الميكانيكية لسبائك الألومنيوم عند تدفقات النيوترونات السريعة التي تقل عن ٢٠١٠ نيوترون/سم$^{-٢}$. وكمية النيوترونات المنبعثة من المخزون خلال فترة التخزين المؤقت المتوقعة أصغر من ذلك بعدة رتب حجمية. ومن ثم لا يُتوقع حدوث تغيرات مهمة في الخواص الميكانيكية لسبائك الألومنيوم ناجمة عن تأثيرات الإشعاع.

٧-١-٣- استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ المعالج بالبورات أو سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات والمواد المركَّبة كمواد ممتصة للنيوترونات [٤]

تُنشر المواد الممتصَّة للنيوترونات في رفوف تخزين الوقود المستهلك، وسلال النقل، وما إليها، كوسيلة للحفاظ على حالة ما دون الحرجية. وفيما يلي أنواع المواد الممتصَّة المعالجة بالبورات والشائعة الاستخدام:

- كربيد البورون الموضوع في مادة مطاط سيليكوني رابطة. مثلاً، المادة "بورافليكس" (Boraflex)؛
- كربيد البورون المشتت بين كسوة سبائك الألومنيوم. مثلاً، المادة "بورال" (Boral)؛
- سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات؛ مثلاً، المادة BC-A6N01SS-T1 والمادة 1%B-A6061-T6/T651؛
- سبيكة الفولاذ المقاوم للصدأ المعالجة بالبورات؛
- معدن الكادميوم الموضوع في كسوة مانعة للتسرب؛ مثلاً، المادة "كادمينوكس" (Cadminox).

وقد استوجبت أحدث تصاميم براميل النقل والتخزين استخدام مواد جديدة ممتصَّة للنيوترونات لتلطيف أنواع الوقود الشديدة الإثراء (حتى ٥٪ يورانيوم^{٢٣٥}) والعالية الحرق (>٥٥ غيغاواط/يوم/طن (يورانيوم)$^{-١}$)؛ أي ضرورة تحسين الكفاءة الحرارية والنيوترونية، وذلك، مثلاً، باستخدام مواد مركَّبة ذات مادة بينيَّة معدنية يمكنها أن تستوعب حمولات من البورون أعلى بكثير مقارنة بأنواع الفولاذ المقاوم للصدأ والمعالج بالبورات. وهذه المواد، المشتقة من سبائك الألومنيوم، تعمل كمادة ممتصة للنيوترونات وكمكون هيكلي لسلال الوقود المستهلك على السواء. ويوفر الألومنيوم موصِّلية حرارية ممتازة.

وتُستخدم إحدى تقنيتين لإدراج المواد الممتصة للنيوترونات:

- إضافة البورون إلى الألومنيوم المصهور (صناعة السبائك المعدنية)؛
- خلط المادة المركبة المستقرة، مثلاً المادة B_4C، مع مساحيق سبائك الألومنيوم (صناعة المساحيق المعدنية).

وبصفة عامة، يتعين أن تكون للألومنيوم المعالج بالبورات الخصائص التالية:

- جزيئات البورون (أو كربيد البورون) مشتتة بانتظام في المواد للتحكم في الحرجية؛
- موصِّلية حرارية عالية لإزالة حرارة الاضمحلال الإشعاعي من الوقود المستهلك؛
- الحفاظ على القوة الميكانيكية اللازمة لفترة طويلة (أكثر من ٦٠ سنة) تحت درجة حرارة عالية (>٢٠٠ درجة مئوية).

٧-١-٤- الخرسانة [٤]

الخرسانة بطبيعتها مادة غير منتظمة وغير متجانسة. وهي غير مكلفة نسبيًّا، وعلى الرغم من أن لديها قوة انضغاط عالية فإنها ضعيفة في حالة الشد. ويُدمج في الخرسانة في مناطق الإجهاد الشدِّي الفولاذ، الذي هو أغلى ثمناً وله مقاومة شد عالية جدًّا، وبذلك يحل محل الخرسانة في تحمُّل هذه التأثيرات الشدِّية. وللفولاذ أيضاً تأثير مفيد على الخرسانة من خلال التحكم في عرض الشقوق المرتبطة بالإجهادات الشدِّية في الخرسانة. وقد تكون الإجهادات الشدية هذه ناتجة عن التحميل الميكانيكي

والحراري، و/أو تأثيرات الانكماش المكبوح الناتج عن التجفيف (بعد الصَّب بوقت قصير)، وكذلك إجهادات الانكماش الحراري للسطح بسبب تدرُّجات درجة الحرارة أثناء ظروف المعالجة. ويمكن توقع بقاء الخرسانة العصرية ذات النوعية الجيدة في بيئة حميدة إلى أجل غير مسمى دون أي تدهور خطير في الخصائص الهيكلية.

٧-١-٥- الحديد الزهر [٢]

على غرار الفولاذ الكربوني غير المعالج، يتميز الحديد الزهر بمقاومة تآكل ضعيفة نسبيًّا. وهو يُستخدم أساساً في تصنيع براميل النقل/التخزين ومعدات مناولة البراميل. غير أن سلوك هذه المادة يؤخذ في الاعتبار عند تصميم مكونات التخزين، مثل البراميل الجافة، حيث يُستنبط سمك جسم البرميل من متطلبات التدريع؛ والمهمة المقترحة، بافتراض معدل تآكل منتظم؛ وهامش أمان (مثلاً ١٠٠٪). وللتخفيف من التآكل المنتظم، يُعالَج الحديد الزهر في العادةً بعدة طبقات من الإيبوكسي. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنه أُجريت اختبارات تآكل طويلة الأمد للحديد الزهر المطاوع في ظل ظروف قاسية للغاية في الماء المالح وأظهرت معدلاً توازنيًّا للتآكل قدره حوالي ٠,١ مم في السنة-١. وهذا هو نتيجة الالتصاق الجيد لطبقة الأكسيد، بسبب المحتوى العالي من الكربون في الحديد الزهر.

٧-١-٦- الفولاذ الكربوني [٢]

يتسم الفولاذ الكربوني غير المعالج بمقاومة ضعيفة نسبيًّا للتآكل في المياه المؤكسجة، عند درجات الحرارة المنخفضة، ولذلك لا توجد له استخدامات عامة. وللتغلب على هذا التأثير، يُعالج الفولاذ الكربوني عادةً بالزنك و/أو يُطلى باستخدام نُظم طلاء بالإيبوكسي. ومن ثم فآلية التدهور الرئيسية التي يجب أخذها في الاعتبار هي التآكل التنقُّري، حيثما يكون الطلاء الواقي قد تعرض للتلف أثناء التشغيل أو كان التحضير الأصلي للمواد سيئاً. وفي حالة حدوث هذه العيوب، يتقدم التآكل التنقُّري عند وجود الأيونات العدوانية، مثل الكلوريد. وفي هذه الحالة أيضاً يكون من شأن الحفاظ على ظروف كيمياء مياه جيدة أن يخفض هذا التأثير إلى الحد الأدنى.

٧-١-٧- البوليمرات [٤]

في التخزين الرطب، يمكن استخدام البوليمرات في شكل أشرطة بوليمرية عريضة مرنة تحتفظ بالماء، أو 'قضبان حاجزة للماء' في الهياكل غير المبطَّنة التي تحتفظ بالماء. ويُمنع تسرب الماء عند وصلات التمدُّد من خلال إدراج قضبان كلوريد البوليفينيل، مثلاً. كما تُملأ الفجوات بين الوصلات بمواد بوليمرية مانعة للتسرب، مثل متعدِّدات الكبريتيد أو البولي يوريثان.

وفي التخزين الجاف، تُستخدم مجموعة متنوعة من البوليمرات كمواد تدريع مضادة للنيوترونات. وتشمل هذه البوليمرات البولي بروبلين والبولي إيثيلين والبوليستر وراتنجات الإيبوكسي ومجموعة متنوعة من البوليمرات المختلطة. وكما يوحي الاسم فإن الغرض من مواد التدريع المضادة للنيوترونات هو إيقاف النيوترونات. وهذا يعني أنه يجب إبطاء النيوترونات السريعة أولاً قبل أن تلتقطها ممتصات النيوترونات. ويتحقق إبطاء النيوترونات السريعة بواسطة البوليمرات، بسبب تركُّزاتها العالية من ذرات الهيدروجين.

٧-٢- آليات التدهور

٧-٢-١- آليات التدهور في المعادن

٧-٢-١-١- التلف الإشعاعي

التلف الإشعاعي للمعادن، مثل الحديد الزهر والفولاذ المقاوم للصدأ، يرجع أساساً إلى النيوترونات السريعة، أي النيوترونات التي تزيد طاقاتها على ١٠٠ كيلو إلكترون فولط. ومن المتوقع حدوث تعديل كبير في الخصائص الميكانيكية للمعادن عند تدفقات النيوترونات التي تزيد على ^{١٨١٠}/نيوترون/سم$^{-٢}$. بيد أن الكمية المطلقة النمطية للنيوترونات المنبعثة ينتج عنها تدفق أقل كثيراً من هذه القيمة. فمثلاً، تعرض المعادلة (٦) طيف الطاقة الكامل لمخزون برميل CASTOR® على مدار ٤٠ عاماً:

$$N(40y)= 10^{19}–10^{20}\ n\cdot(cask)^{-1} \qquad (٦)$$

٧-٢-١-٢- التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي

يحدث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي عادةً في الفولاذ المقاوم للصدأ المحتوى على الكروم المستنفد (يكون المحتوى من الكروم في حدود الكُريَّات قد انخفض إلى أقل من ١٢٪) عندما يتعرض في الوقت نفسه لإجهاد ميكانيكي وأيونات عدوانية، مثل الكلوريد [٢، ٤].

وفي التخزين الجاف، قد ينتُج تحسُّس الفولاذ المقاوم للصدأ في نطاق معين من درجات الحرارة. والتحسُّس هو عملية يمكن فيها أن ينتقل الكروم الموجود في بعض أنواع الفولاذ المقاوم للصدأ من حدود الكريَّات إلى كتلة المعدن ويتفاعل مع أي كربون حُر لتكوين جزيئات كربيد الكروم. وعمليات التلدين الحرارية كافية لإعادة إقرار التوزيع المتجانس للكروم [٢، ٤]؛ ومن ثم فالتحسُّس الحراري هو عملية قابلة للعكس.

حُدِّد التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي باعتباره مشكلة محتملة لنظم التخزين الجاف في العُلب والموجودة في المواقع البحرية. والسبب في ذلك هو أن العلبة الملحومة الداخلية تُصنع عادةً من الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي مع لحامات غير مزالة الإجهاد، وهناك احتمال بأن يدخل الملح في اللحامات أثناء عمليات التبريد.

٧-٢-١-٣- الهجوم الميكروبي

بمرور الزمن، قد تلتصق المستعمرات الميكروبية بالأنابيب وما إليها، بما يؤدي إلى إنشاء بيئات موضعية مؤاتية لنمو أنواع من الميكروبات ما كانت لتعيش لولا ذلك. وتتسم المستعمرات الراسخة أيضاً بمقاومة عالية لقوى السوائل ومعظم المعالجات الكيميائية، بما يجعل إزالتها صعبة. وتقوم المستعمرات الميكروبية بتدريع السطح المعدني بفعالية ضد المواد الكيميائية التي تعالَج بها المياه، الشيء الذي يجعل مثبطات التآكل غير فعالة. وقد ثبت أن لحام الفولاذ الأوستنيتي المقاوم للصدأ يزيد من قابلية الأنابيب للتأثر بالتآكل الميكروبي مقارنة بأسطح الأنابيب الملساء. وفي الواقع، يصبح اللحام والمناطق المرتبطة به المتأثرة بالحرارة المنطقة الرئيسية لهجوم التآكل الميكروبي. وقد تجوهِل تأثير التآكل الميكروبي بصفة عامة، لأنه يصعب اكتشافه، وعادة ما يحجب التآكل العام هذه الآلية. والدلالة الوحيدة على تأثيرها هو أن المكونات المدرجة في برامج استبدال دوري يتعين استبدالها موضعياً بتواتر أعلى قليلاً مما يكون متوقعاً أصلاً [٢، ٤].

ولتجنب التآكل الميكروبي، يوصَى بأخذ عينات دوريًّا لتحديد ما إن كانت توجد أي أنواع ميكروبية يمكن أن تسبِّب التآكل. وتنطوي الإجراءات التصحيحية على إزالة المصادر التي من شأنها تعزيز نمو المستعمرة، مثل الضوء والكربون وما إلى ذلك.

٧-٢-١-٤- التآكل التنقُّري [٢]

يكون التآكل التنقُّري بارزاً بأكبر قدر في البيئات العالية الكلوريد. وغالباً ما تتكون النُّقر عند العيوب الموجودة في الغشاء السلبي، حيث تعزّز أيونات الكلوريد الذوبان الموضعي للغشاء الأكسيدي الواقي، وليس ذلك فحسب، بل تحفز أيضاً ذوبان المعدن وبذلك تعزّز نمو التجويف الناتج أو النُّقرة الناتجة. ويقتصر الهجوم بصفة عامة على مناطق صغيرة، حيث تتطور بيئات كيميائية محلية في النُّقر. وفي بعض الحالات، تكون البيئات الكيميائية معزولة عن المياه السائبة بقشور تتشكل فوق النُّقر. وفي هذه الحالات قد لا يؤدي تحسين كيمياء الماء إلا إلى إبطاء الآلية بدلاً من منع الهجوم تماماً.

وقد شوهدت حالة معينة من التآكل التنقُّري في السدادات المحكمة للبراميل الخارجية المصنوعة من الألومنيوم عالي الجودة. وسبائك السلسلة ١٠٠٠ هي سبائك ألومنيوم عالية النقاء توفِّر في معظم البيئات مستوى عالياً من المقاومة للتآكل، بسبب التكوُّن السريع لغشاء واقٍ رقيق ومحكم من أكسيد الألومنيوم. إلا أنه في بعض البيئات، مثل تلك التي تحتوي على حمض البوريك، مع وجود الكلوريدات، يمكن أن تقترب السبائك من احتمالات تنقُّرها بل يمكن أن تتجاوزها. وفي هذه الحالة، يمكن أن تدمِّر الكلوريدات هذا الغشاء الأكسيدي الواقي السلبي، بما يؤدي إلى التنقُّر. ولا شك في أن الألومنيوم، الذي يوضع في هذه الحالة على تماس وثيق بمعدن أكثر كاثودية، سيتعرض حينئذ للتآكل نتيجة للخلية الغلفانية التي تتشكل حالما يحدث التنقُّر.

٧-٢-١-٥- الهجوم الغلفاني [٢]

تقع سبائك الألومنيوم في الطرف النشط من السلسلة الغلفانية. وقد لوحظ التآكل الغلفاني لسبائك الألومنيوم في بيئات تخزين الوقود عند اقتران تلك السبائك بالفولاذ المقاوم للصدأ، وحتى عند اقترانها بسبائك الألومنيوم المختلفة، في المياه ذات الموصِّلية العالية >١٠٠ ميكرو سيمنز/سم$^{-١}$. وفي المياه الشديدة النقاء (١-٣ ميكرو سيمنز/سم$^{-١}$)، لم يظهر أن التأثيرات الغلفانية تقلِّل قدرة مكونات سبائك الألومنيوم على العمل؛ ما عدا في الشقوق المعدنية غير المتشابهة، التي تسهِّل تكوُّن شوائب منخفضة الأس الهيدروجيني والتركُّز.

٧-٢-١-٦- تآكل الشقوق [٢]

تآكل الشقوق هو شكل موضعي من أشكال الهجوم، يحدث في الأسطح المنضَّدة عن قرب ومتباعدة بما يكفي لإتاحة دخول الماء. وتحدث آلية الهجوم المقترحة عند سحب أيونات الكلوريد إلى الشق، بما يتسبب في تقدُّم ذوبان المعدن وتكوُّن ظروف حمضية.

وكما هو الحال في الهجوم الغلفاني، يمكن تحقيق التخفيف من تآكل الشقوق عن طريق الحفاظ على موصِّلية المياه في نطاق ١-٣ ميكرو سيمنز/سم$^{-١}$.

٧-٢-٢- تدهور الخرسانة

في المقابل، وخلافاً للخرسانة العادية، ليست الخرسانة المسلحة، بصفة عامة، معمِّرة بطبيعتها بنفس القدر، بسبب ميل فولاذ التسليح فيها للتآكل. و'الغطاء' هو الحد الأدنى المحدَّد لسُمك الخرسانة مقاساً من التسليح إلى سطح الخرسانة الخارجي. وحالما تفقد الخرسانة الموجودة في منطقة غطاء حديد التسليح هذه قلويتها، ونظراً لإمكانية وصول الرطوبة والأكسجين إلى حديد التسليح، سيبدأ تآكل فولاذ التسليح. وهناك العديد من الأسباب الممكنة للتدهور في إنشاءات الخرسانة المسلحة؛ وهي تشمل الظروف الفيزيائية (مثل حركة الأساسات، والحمل الزائد الهيكلي، والتلف الناتج عن الصدمات العَرَضية)، والدورات الحرارية، والتأثيرات الكيميائية/البيئية (مثل الكربنة أو دخول الكلوريد). لذلك من الضروري فحص الهياكل الخرسانية بانتظام (يتم ذلك عادةً سنويًّا بالنسبة لأحواض التخزين الرطب الكبيرة) لكي يتسنى اكتشاف علامات التحذير وتحديد أسباب العيوب [٢، ٤].

٧-٢-٢-١- تكربن الخرسانة

أثناء ترطيب الخرسانة، يوجد تكوُّن لهيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$)، وهو مسؤول عن علو قلوية الخرسانة (الأس الهيدروجيني ≤١٢). غير أن هيدروكسيد الكالسيوم يتحول تدريجيًّا إلى كربونات الكالسيوم (CaCO3). ويؤدي التفاعل مع ثاني أكسيد الكربون المستمد من الهواء إلى انخفاض الأس الهيدروجيني إلى حوالي ٩. وفي بيئة رطبة، يبدأ السطح في 'التآكل'، المرتبط بتضخيم للحجم. وتبعاً لكثافة الخرسانة، يمكن أن يخترق ثاني أكسيد الكربون بعض المليمترات أو بعض السنتيمترات في الخرسانة.

٧-٢-٣- تدهور البوليمرات

يُضعف تدهور البوليمرات خصائصها الميكانيكية ويقلل من قدرتها على إبطاء النيوترونات السريعة. وكثيراً ما يُطلق على هذه التغيرات في الخصائص اسم 'الشيخوخة'؛ لذلك يزداد احتمال فقدان البوليمرات الشائخة لخصائصها المحدَّدة. وستتدهور البوليمرات بمرور الزمن بسبب التأثيرات المشتركة للإشعاعات وعوامل بيئية أخرى، وأساساً العوامل الكيميائية (الأحماض والقلويات وأملاح معينة)، في الرطوبة والحرارة في ظل ظروف التخزين الجاف. وبالمثل، يعتمد تدهور البوليمرات على عوامل من بينها ما إن كان البوليمر ملامساً للماء أو معرضاً للهواء أم لأجواء خالية من الأكسجين. ويتبع تدهور مختلف البوليمرات نفس النمط، فهي تفقد الوزن عن طريق إطلاق جزيئات كيميائية صغيرة نسبيًّا من قبيل الهيدروجين وكلوريد الهيدروجين والماء والمركَّبات المؤكسَدة. وتعتمد الجزيئات الكيميائية المنبعثة على تركيبة البوليمر. وحيثما تكون البوليمرات على اتصال بماء الحوض، ستُنضح الجزيئات الكيميائية الصغيرة إلى حوض الماء السائب، ويرتبط ذلك بتأثير محتمل على نظم معالجة المياه [٤].

استُخدمت مجموعة متنوعة من المواد البوليمرية، مثل البولي بروبيلين والبولي إيثيلين والبوليستر وراتنجات الإيبوكسي ومجموعة متنوعة من البوليمرات المختلطة، كمواد تدريع مضادة للنيوترونات [٤]. فمثلاً، يُزرع البولي إيثيلين ذو الوزن الجزيئي الفائق العلو في جدران براميل CASTOR® وفي كل من طرفي البراميل؛ بحيث يتاح حيز كافٍ للتمدد الحراري في ظل استبعاد الأكسجين. لذلك يتعين النظر في آليتين فقط من آليات التدهور المحتملة. وهذا هو تأثير الإشعاعات العالية الطاقة على البولي إيثيلين ذي الوزن الجزيئي الفائق العلو، بما يؤدي إلى انبعاثات غالبها الهيدروجين وإلى توليد ترابطات مستعرضة. وهكذا تتشكل روابط بين سلاسل البوليمر المنفصلة. ولا تعتمد كمية غاز الانحلال الإشعاعي المتولد والترابطات المستعرضة إلا على الجرعة الممتصة في المادة أثناء فترة التخزين. وتؤخذ في الاعتبار في تصميم البراميل الزيادة المحتملة في الضغط بالقرب من مواد التهدئة.

ويُتوقع أن تكون البوليمرات المزروعة كمواد تدريع في براميل النقل/التخزين قادرة على تحمُّل درجات حرارة عالية لفترات زمنية قصيرة، كما في حالة نشوب حريق، أي عند ٨٠٠ درجة مئوية لمدة ٣٠ دقيقة. ومع التحول إلى زيادة حرق الوقود واستخدام وقود الأكسيد المختلط، تزداد أهمية الثبات الحراري الطويل الأمد لهذه البوليمرات، نظراً لتزايد درجة الحرارة التي تعمل فيها البراميل. وقد دعا الطلب المتزايد على الاستقرار الحراري الطويل الأمد، إلى جانب المقاومة للجرعات العالية من النيوترونات/أشعة غاما، إلى تطوير مواد جديدة [٤].

٧-٣- الاستقصاءات ونتائجها

يُقدَّم في المرجع [٦٤] استعراض لأداء المواد في بيئات التخزين الرطب. ويتضمن الاستعراض بيانات التآكل، ويمثل حالة المعرفة حتى عام ١٩٩٧؛ وبالنسبة لمعظم المواد، لا يزال ذلك المرجع منشوراً مرجعيًّا مفيداً.

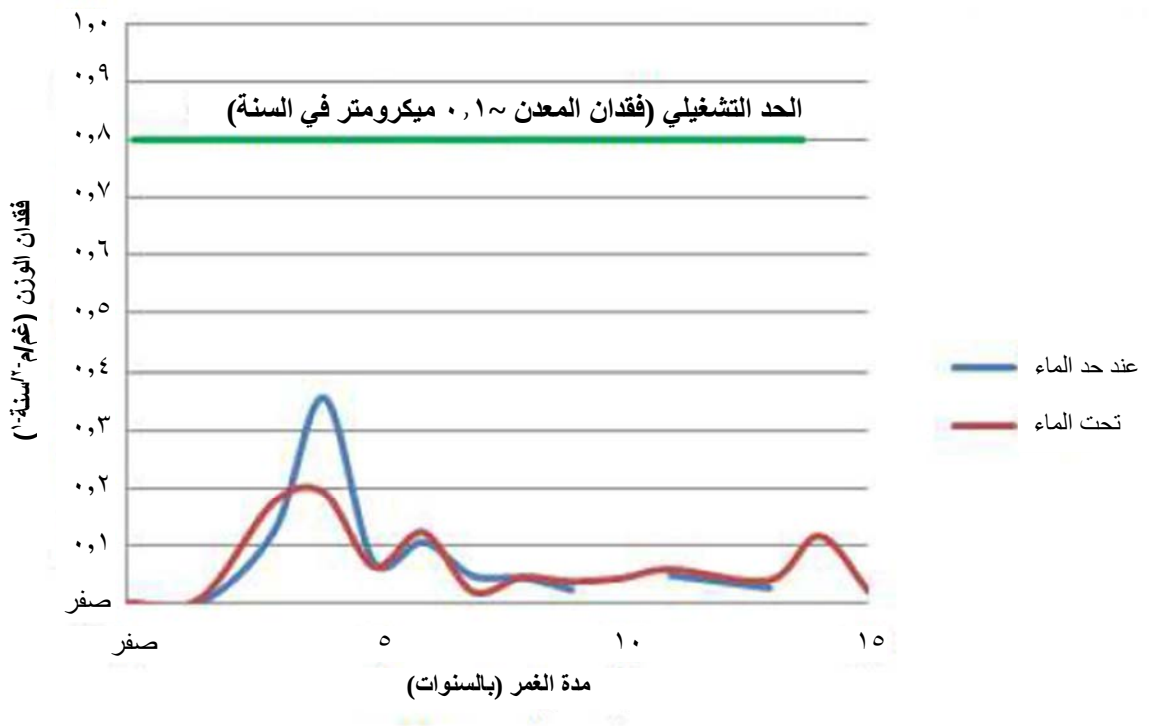
٧-٣-١- الفولاذ المقاوم للصدأ

يقوم برنامج مراقبة، بالنيابة عن مرفق التخزين المؤقت للوقود المستهلك في ياسلوفسكي بوهونيتسه، بتقييم معدلات التآكل وسلوك المواد المستخدمة في سلال تخزين الوقود المستهلك وبطانة الحوض [٧]. وتم تصنيع المواد لتصبح في شكل قضبان اختبار تآكل تشتمل على ما يلي:

- قضبان اختبار تآكل قياسية؛
- حنية نونية؛
- خرزة دائرية ملحومة؛
- عارضة منحنية للشقوق؛
- أنواع خاصة، مثلاً وصلات ملحومة سداسية الأضلاع.

وروقب سلوك هذه المواد في بيئة التخزين من خلال قياسات فقدان الوزن القياسية وتحليل قضبان اختبار التآكل عن طريق الفحص المجهري.

والنتائج متوافقة مع التوقعات في حالة بطانة الحوض، المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ من نوع ANSI 321 (انظر الشكل ٤٨). وهناك بعض التباين في النتائج المبلغ عنها، بسبب اختلاف العينات ولأن قياسات الوزن كانت عند حد القياس.

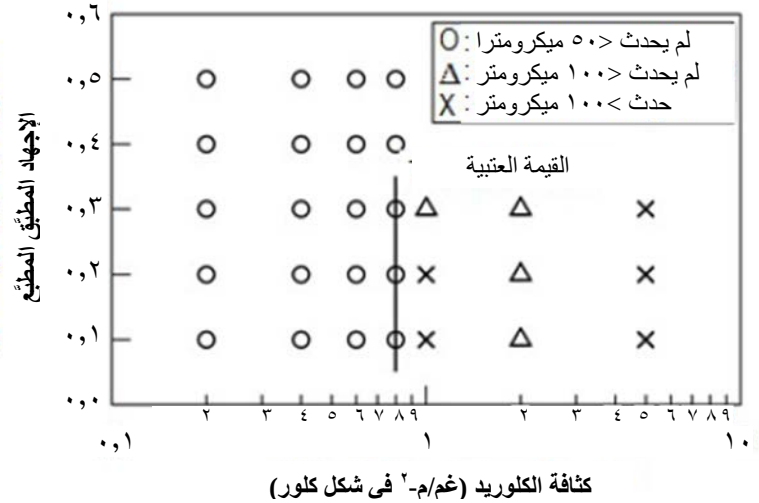


الشكل ٤٨- قياسات فقدان الوزن للفولاذ المقاوم للصدأ من نوع ANSI 321 المستخدم في بطانة الحوض.

٧-٣-١-١- *التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي لعلب الوقود*

وهناك احتمال لحدوث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي في علب الوقود المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي المستخدمة في نظم التخزين القائمة على البراميل الخرسانية المهوَّاة. ويمكن أن يبدأ هذا التشقُّق في مناطق اللحام في هذه العلب في حالة وجود إجهادٍ متبقٍّ وأيونات عدوانية، مثل الكلوريد. ويُبلغ في المرجعين [٤، ٧] عن الدراسات التي تقيّم الحد الأدنى من تركُّز الملح لبدء التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي، ومعدلات نمو الشقوق، والتخلص من الملح/ نقل الملح. وفيما يلي تلخيص للنتائج الرئيسية.

خلصت الدراسات اليابانية عن الفولاذ المقاوم للصدأ من نوع 304 L إلى أن الحد الأدنى من تركُّز الملح لبدء التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي هو ٠,٨ غم/م$^{-2}$ في شكل كلوريد تحت ظروف الاختبار المطبقة (الشكل ٤٩). وتقرَّر حد لطول الشق السطحي يصل إلى ≤١٠٠ ميكرومتر كمعيار لتحقيق مكافحة التلف بعد بدء التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي.



الشكل ٤٩- نتائج اختبار بدء التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي – العينة B، المدة ٥٠٠٠ ساعة، الصلادة ٢٤٧ برقم اختبار فيكرز (الشكل مقدم من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية).

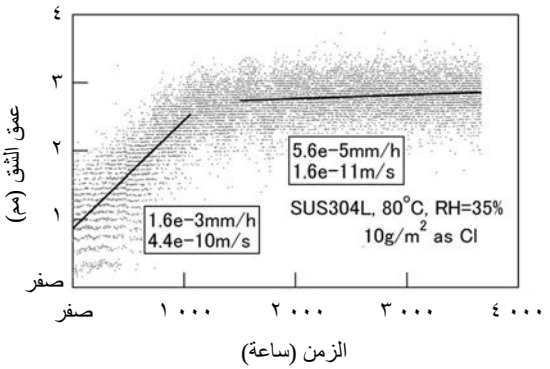
ولاحظت الدراسات التي أُجريت في الولايات المتحدة في ظل ظروف جوية طبيعية وجيهة، بحد أقصى للرطوبة المطلقة ٣٠ غم/م$^{-3}$، بدء التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي في عينات حنيَّة نُونيَّة من النوع ٣٠٤ في درجات حرارة ٣٥-٦٠ مئوية، عندما كانت الرطوبة النسبية أثناء التعرُّض أعلى من الرطوبة النسبية المقاسة لتميُّع ملح البحر المُحاكَى. ولوحظ بدء التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي على العينات المودعة مع ما لا يزيد على ٠,١ غم/م$^{-2}$ من ملح البحر المُحاكَى، مقارنة بـ ٠,٨ غم/م$^{-2}$ (في الدراسات اليابانية). وزاد مدى التشقُّق مع ازدياد التركُّز السطحي للملح. وبسبب عدم إجراء أي اختبار بتركُّزات ملح أقل من ٠,١ غم/م$^{-2}$، لم تُحدَّد عتبة التركُّز السطحي للملح لحدوث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي. وكانت المادة المُحسَّسة في الأفران أكثر قابلية لهذا التشقُّق. وأظهرت المناطق المتأثرة بالحرارة لعينات الحنيَّة النُونيَّة الملحومة قابلية لهذا التشقُّق، وكانت بنيتها الميكروية مماثلة لبنية المادة بحالتها المستلمة.

ولوحظ التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي أيضاً على عينات حلقات في شكل C مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ من النوع 304L منفعلة إلى نسبة ٠,٤ أو ١,٥٪، مع تركُّزات لملح السطح المترسِّب قدرها ١ أو ١٠ غم/م$^{-2}$ عند درجات حرارة ٣٥-٥٢ درجة مئوية. ولم تُجر اختبارات في درجات حرارة أعلى أو أدنى. وعند الانفعال بنسبة ٠,٤٪، يكون الإجهاد على عينة الحلقة ذات الشكل C مساوياً تقريباً لإجهاد خضوع المادة.

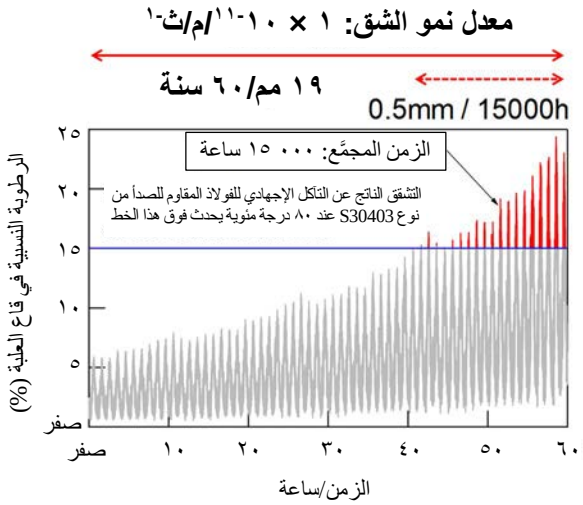
ولم يُلاحظ أي تشقُّق ناتج عن الإجهاد التآكلي على عينات حنية نُونيَّة من النوع ٣٠٤ مع رواسب من نترات الأمونيوم (NH_4NO_3) وبيكبريتات الأمونيوم (NH_4HSO_4) والرماد المتطاير، المتوقع صدورها من الأنشطة الزراعية والتجارية والصناعية. ولوحظ التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي على عينات حنية نُونيَّة من النوع ٣٠٤ عُرِّضت لمخاليط من نترات الأمونيوم وكلوريد الصوديوم بنسبتي مول للنترات والكلوريد قدرهما ٣,٠ و٦,٠، ولكن مع أقل من ١٠ غم/م$^{-2}$ من كلوريد الصوديوم، ويشير ذلك إلى أن النترات ليس مثبطاً فعالاً للتشقُّق الناتج عن الإجهاد التآكلي الكلوريدي.

وقِيس في اليابان معدل نمو الشقوق في ظل ظروف مختلفة باستخدام عينة اختبار انحناء ذي أربع نقاط مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ من نوع 304L. ويوضح الشكل ٥٠ نتائج عينة اختبار وُضعت في ظروف درجة حرارة ورطوبة نسبية ثابتة؛ أي ٨٠ درجة مئوية و٣٥٪ رطوبة نسبية. ويوضح معدل نمو الشقوق المُقاس أن الشق انتشر بسرعة في البداية ثم انخفض معدل انتشاره. وبافتراض حجم بدئي للشق ناتج من الانتشار البدئي السريع للشق، يمكن تقييم جدار العلبة المتبقي

باستخدام بيانات معدل الانتشار البطيء. ويَظهر في الشكل ٥١ مثال للرطوبة النسبية المحسوبة على سطح العلبة مع مرور الزمن. ووفقاً لهذا الحساب فإن الفترة الزمنية المتراكمة التي تتجاوز فيها الرطوبة النسبية ١٥٪ (عتبة حدوث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي) ستكون حوالي ١٥ ٠٠٠ ساعة (أي < سنتين) خلال فترة تخزين قدرها ٦٠ عاماً. وباستخدام معدل نمو شقوق قدره ١ × ١٠-١١ م/ث-١، تكون القيمة التقديرية لانتشار الشق خلال هذه الفترة هي ٠,٥ مم فقط.



الشكل ٥٠- نتائج اختبار نمو الشقوق (الشكل مقدم من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية).



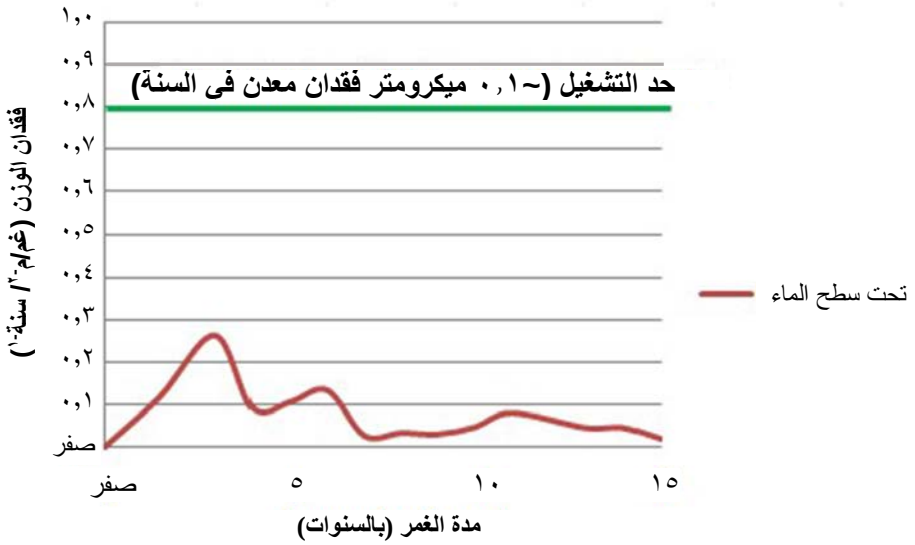
الشكل ٥١- تغيُّر الرطوبة النسبية في قاع العلبة مع مرور الزمن (الشكل مقدم من معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية).

دُرس أيضاً استخدام تقنيات المعالجة السطحية، مثل الطَّرْق بالكُريَّات، والطَّرْق بالصدم الليزري، والتلميع المنخفض اللدونة، لتخفيف الإجهاد في مناطق اللحام. ويمكن الاطلاع على مزيد من المعلومات حول هذا الموضوع في المرجع [٧].

٧-٣-٢- الفولاذ المقاوم للصدأ والمعالج بالبورات

مادة امتصاص النيوترونات المستخدمة في سلال تخزين الوقود المستهلك في ياسلوفسكي بوهونيتسه هي الفولاذ المقاوم للصدأ من نوع ANSI 304 المسبوك مع ما لا يقل عن ١,١٪ من البورون (وتسمى ATABOR). وقد أُخضعت هذه المادة لنفس برنامج المراقبة المبيَّن في القسم ٧-٣-١. والنتائج المستمدة من قياسات فقدان الوزن لهذه المادة موضحة في الشكل ٥٢.

غير أن تحليل هذه المادة أظهر عدة شقوق ميكروية في المعدن الخسيس المرتبط بالمناطق ذات المحتوى العالي من الكروم. وتبيَّن أن الشقوق خالية من التآكل وناتجة من التحضير الأوَّلي للعينة، بسبب الطابع الهش للروابط بين الكروم والبورون. ولم يكن هناك دليل يدعم انتشار الشقوق [٧].



الشكل ٥٢- قياسات فقدان الوزن للفولاذ المقاوم للصدأ من نوع ATABOR المستخدم في رفوف التخزين.

٧-٣-٣- سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات

دُرست في اليابان الخواص الميكانيكية لمواد الألومنيوم المعالجة بالبورات [٧]. وخلص إلى أن تأثير التشعيع، في الاختبار الذي أُجري في مفاعل بحوث، لا يؤبه له.

وتتوفر في المرجع [٦٥] معلومات إضافية عن استخدام سبائك الألومنيوم المعالجة بالبورات في سلال النقل/التخزين.

٧-٣-٤- الخرسانة

٧-٣-٤-١- البراميل الخرسانية المهواة

تركزت اهتمامات البحث والتطوير في هذا المجال أساساً على الأغلفة الخارجية المصنوعة من الخرسانة المسلحة والمستخدمة للتخزين الجاف لوقود مفاعلات الماء الخفيف في نظم براميل الخرسانة المهواة [٢، ٤]. ونظرت الدراسات التي أُجريت في اليابان في معدلات انتشار ثاني أكسيد الكربون والكلوريد في ظل مجموعة متنوعة من ظروف التشغيل (درجة الحرارة والرطوبة) لعينات خرسانة ذات نطاق من نسب الماء والأسمنت. من خلال دراسة هذه المَعلَمات، يمكن تحديد دلالة على الحد الأدنى من 'الغطاء' الأسمنتي اللازم لمجموعة معينة من ظروف التشغيل والعمر التصميمي. والنتائج المستمدة من هذه الدراسات مبلغ عنها في المراجع [٢، ٤، ٧]. ويرد سرد كامل لهذه الدراسات في المرجع [٦٦].

خلصت الدراسات إلى أن تركُّز أيون الكلوريد اللازم لبدء تآكل قضيب التسليح كان ~١,٢/كغم/م$^{-3}$ في نطاق درجة الحرارة ٢٠-٩٠ مئوية. وتم الحصول على معاملات انتشار أيون الكلوريد عن طريق اختبارات الغمر لعينات خرسانة في محلول كلوريد الصوديوم بنسبة ١٠٪ في نطاق درجات حرارة التشغيل. وفي ظل شروط الاختبار المطبَّقة والعينات المستخدمة، استُنتج ما يلي:

- يزداد معامل انتشار الكلوريد مع تزايد درجة الحرارة؛
- توجد علاقة خطية بين لوغاريتم معامل الانتشار ومقلوب درجة الحرارة؛
- العينات الخرسانية ذات النسبة الأكبر بين الماء والأسمنت تميل إلى أن يكون لها معامل انتشار أكبر.

واستُخدمت نتائج هذه الاختبارات كأساس لاقتراح معادلة لتقييم معامل الانتشار. وترد المعادلة في المرجعين [٧، ٦٦].

وفيما يتعلق بإدارة الشيخوخة، يمكن استخدام تحليل عينات صغيرة تؤخذ بالحَفر من مناطق غير حرجة من لُب الخرسانة من أجل تحديد عمق التكربُن والكلوريد في النظم المستخدمة. ويعتمد عمق التكربُن ونفاذ الكلوريد على ظروف التشغيل في الموقع، وتركيبة خليط الخرسانة، ونوعية نظام التصنيع.

٧-٣-٤-٢- البراميل الخرسانية

في حالة البراميل الخرسانية، حيث تكون الخرسانة المسلحة محصورة بين الصفيحة المعدنية الداخلية والصفيحة المعدنية الخارجية، لا يُعتبر فقدان قلويَّة الخرسانة مشكلة. ولم يُظهر الفحص البصري لبرميل CONSTOR® أُعيد فتحه أي آثار تآكل مهمة على الجدران [٢].

التغيير في رتبة الأسمنت المستخدم في براميل التخزين الجاف في هيئة أونتاريو لتوليد القوى الكهربائية [٤]

تستخدم الرابطة الكندية للمقاييس الأسمنت من النوع ٢٠ في تصنيع حاويات التخزين الجاف لهيئة أونتاريو لتوليد القوى الكهربائية. وبسبب الشواغل المتعلقة بالتوافر الطويل الأمد للأسمنت من النوع ٢٠ (أي النوع ذي حرارة الترطيب المعتدلة)، أُجريت دراسات لتقييم استخدام ما يلي:

- أنواع أسمنت مكافئة لأسمنت الرابطة الكندية للمقاييس من النوع 20E أو النوع 50E. وعلى وجه الخصوص، الاستعاضة عن حوالي ٢٠٪ من الأسمنت البورتلاندي العادي بخَبَث أفران الصهر المحبَّب المطحون؛
- أسمنت الرابطة الكندية للمقاييس من النوع ٥٠ (أي أسمنت عالي المقاومة للكبريتات).

وبالنسبة لتركيبات الأسمنت المشتملة على الخَبَث، أُثير شاغل من احتمال تآكل فولاذ التسليح الكربوني نتيجة للمحتوى الكبريتيدي للخَبَث. وخلصت دراسة متابعة ديناميكية حرارية إلى أن الكبريتيد يمكن أن يتحول إلى كبريتيد الهيدروجين في ظل مجموعة معيَّنة من الظروف؛ أي إذا كان هناك ما يكفي من الماء المتبقي لتشكيل طور مائي في بنية الخرسانة. وإذا بقي طور بخار ماء فقط، فمن المتوقع أن يكون توليد كبريتيد الهيدروجين لا يؤبه له. وأشارت الدراسة إلى أهمية أن يكون المحتوى الرطوبي المتبقي منخفضاً لتقليل مخاطر تعزيز تآكل فولاذ التسليح ومكونات حاويات التخزين الجاف الفولاذية. ولم تُجر دراسات للمعدل الحركي من أجل تأكيد النتائج الديناميكية الحرارية.

أفضت النتائج المذكورة أعلاه إلى استهلال برنامج تطويري يبحث النوع ٥٠ من الأسمنت. وتضمَّن البرنامج فحوصاً مختبرية متعددة الأطوار وتجربة ميدانية. وكان الغرض من الفحوص المختبرية هو تطوير وتحسين واختبار خرسانة عالية الكثافة مرشَّحة يُستخدم فيها النوع ٥٠ من الأسمنت. وصُمِّمت التجربة الميدانية لتأكيد الأداء الكامل النطاق للخرسانة، بالإضافة إلى معالجة الجوانب العملية لتجهيز الخرسانة، مثل الخلط وفصل الدفعات وتنظيم الجفاف.

تم الحصول على نتائج مرضية بشأن استخدام النوع ٥٠ من الأسمنت، واستوفت النتائج التجريبية مواصفات حاويات التخزين الجاف، بالإضافة إلى متطلبات الأداء والمتانة الطويلتي الأمد. واستوفى الأسمنت من النوع ٥٠ حد حرارة الترطيب لمدة ٧ أيام المقرر عند ٣٠٠ كيلوجول/كغم أسمنت، وفقاً لمواصفات حاويات التخزين الجاف. وأشارت نتائج التجربة الميدانية إلى أن بعض التَّنخرُب/التطبُّق الموضعي لوحظ في الخرسانة المتصلِّدة، وعُزي إلى عدم كفاية الرضم أثناء توضيع الخرسانة، وحُلت هذه المشكلة لاحقاً.

وأثبت الاستنتاج الرئيسي لبرنامج التطوير أنه يمكن التوصية باستخدام النوع ٥٠ من الأسمنت كبديل للنوع ٢٠ من الأسمنت.

٧-٣-٥- البوليمرات

٧-٣-٥-١- البوليمرات (البولي فينيل كلوريد) المستخدمة للسد المحكم للإنشاءات الكبيرة [٤]

تتأثر درجة تدهور البولي فينيل كلوريد بعدد من المَعلَمات يشمل السماكة، والتركيبة (وجود مواد أخرى)، ومعدل الجرعة، والوسيط الذي تتلامس معه هذه المواد (الهواء، الماء، حمض البوريك، إلخ). فمثلاً، يكون التدهور أكبر إذا شُعِّعت المادة بمعدل جرعة منخفض لفترة طويلة، مقارنةً بالتدهور الذي ينتج عن التشعيع للوصول إلى نفس الجرعة الإجمالية بمعدل جرعة مرتفع خلال فترة زمنية أقصر.

وأظهر اختبار الإشعاعات المعجَّل لمادة شريط حجز الماء المصنوع من البولي فينيل كلوريد والمستخدم في الوصلات التمدُّدية الخاصة بأحواض مرفق الاستلام والتخزين التابع لشركة ثورب في سيلافيلد بالمملكة المتحدة (مرفق ثورب) أن المادة تعرضت لتلف متوسط إلى شديد يصل إلى ١ × ١٠^٦ غراي، وتدهورت عند ٥ × ١٠^٦ غراي، عند تشعيعها في الماء بدرجة حرارة ٣٥ مئوية بمعدل جرعة مطبَّق قدره ١٠^٤ غراي/ساعة[١]. وبعد النظر في عدد من العوامل، منها مثلاً إجراء تصحيح لمراعاة معدل امتصاص الجرعة المنخفض، والفرق بين التشعيع في الهواء والتشعيع في الماء، وما إلى ذلك، طُبِّق هامش أمان قدره رتبتا حجم، بما يؤدي إلى حد عملي لامتصاص الجرعة قدره ٢ × ١٠^٤ غراي.

وتم تقييم تأثير إطالة عمر خدمة مرفق ثورب، من حيث عمر خدمة قضبان حجز الماء، من أجل استمرار تشغيل المرفق حتى ٨٠ عاماً. واستُخدمت في التقييم بيانات عن نماذج تخطيط تخزين الوقود في الماضي والمستقبل وبيانات أشعة غاما المستمدة من حسابات شيفرة 'قائمة جرد نواتج الانشطار' (FISPIN) لأنواع الوقود الأكثر تطلُّباً التي وُضعت وستوضع فوق الوصلات التمدُّدية.

وخلص التقييم إلى أن عدداً من قضبان حجز المياه لن يقترب من الحد ٢ × ١٠^٤ غراي، ولكن يوجد احتمال بتجاوزه في منطقة واحدة. واقتُرح عدد من خيارات التصرف لضمان عدم بلوغ الحد الأقصى.

٧-٣-٥-٢- البوليمرات المستخدمة في التدريع ضد النيوترونات

لمقابلة معدلات حرق الوقود الحالية والمتوقعة، قُيِّمت في فرنسا راتنجات تدريع جديدة لاستخدامها في براميل النقل/التخزين [٧]. ومواد التدريع العالية الأداء ضرورية للحماية من المصادر الشديدة للنيوترونات وأشعة غاما. ويُتوخى أن تكفل الاشتراطات الجديدة ما يلي [٤]:

- كفاءة أكبر في الحماية من النيوترونات (من خلال محتوى أعلى من الهيدروجين والبورون)؛
- مقاومة الحريق (بالمعيار M1)؛
- مقاومة درجات الحرارة العالية الطويلة الأمد (١٦٠ درجة مئوية إلى ١٨٠ درجة مئوية).

وأُجري تقييم للراتنج البوليمري 'فيال' (Vyal). ويُنتَج الراتينج فيال عن طريق تفاعل بوليمر فينيل إستر مع الستايرين (راتنج فينيل إستر في محلول ستايرين). ويكون البوليمر الناتج شديد الترابط وصلباً. وتُشتَّت داخل بنية البوليمر الحشوتان المعدنيتان، وهما هيدرات الألومنيوم وبورات الزنك (وكلاهما مثبِّط حريق ومَصدر بورون)، لتوفير قدرة الراتنج فيال التدريعية ضد الإشعاع النيوتروني [٤].

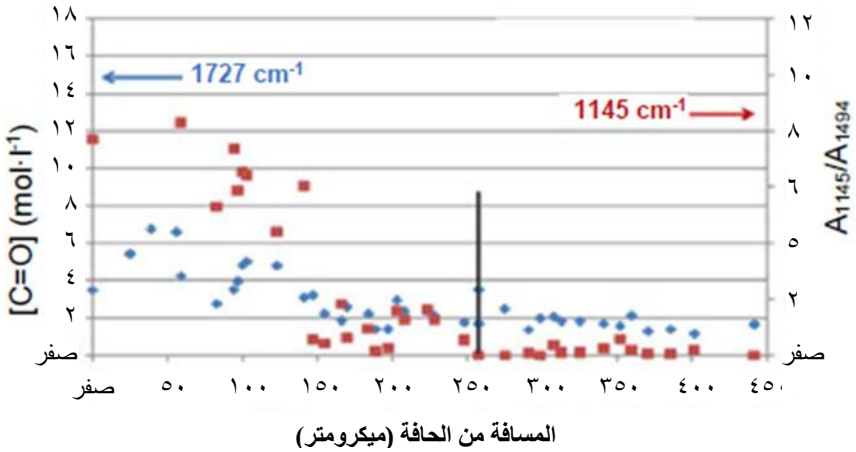
يُظهر الراتنج فيال، عند مقارنته بمواد التدريع الأخرى ضد النيوترونات، وهي راتنج البوليستر ومطاط الإيثيلين بروبيلين، فقداناً أقل للوزن عند نفس درجة الحرارة لنفس حجم العينة ومدة الاختبار. وعند ١٦٠ درجة مئوية، فقد الراتنج فيال ~٢,٥٪ من وزنه بعد ١٠ ٠٠٠ ساعة، وهذا الفقدان للوزن أقل من فقدان وزن مطاط الإيثيلين بروبيلين (~٣٪) وراتنجات البوليستر الموجودة (<٤٪). وبالمثل، وُجد أن مقاومته للحريق ممتازة، حيث تبين أن المادة ذاتية الإطفاء وفقدت ٧٪ فقط من وزنها [٤].

وأثناء الخدمة، تحدث التغيرات في أداء مادة التدريع ضد النيوترونات بسبب التشعيع والعمليات الحرارية. وقد أظهرت النتائج التجريبية أن الأكسدة هي بفارق كبير أكثر العمليات شيوعاً. ودُرست الأكسدة في مواد التدريع ضد النيوترونات القائمة على بنية مصلَّدة بالحرارة من خلال ما يلي:

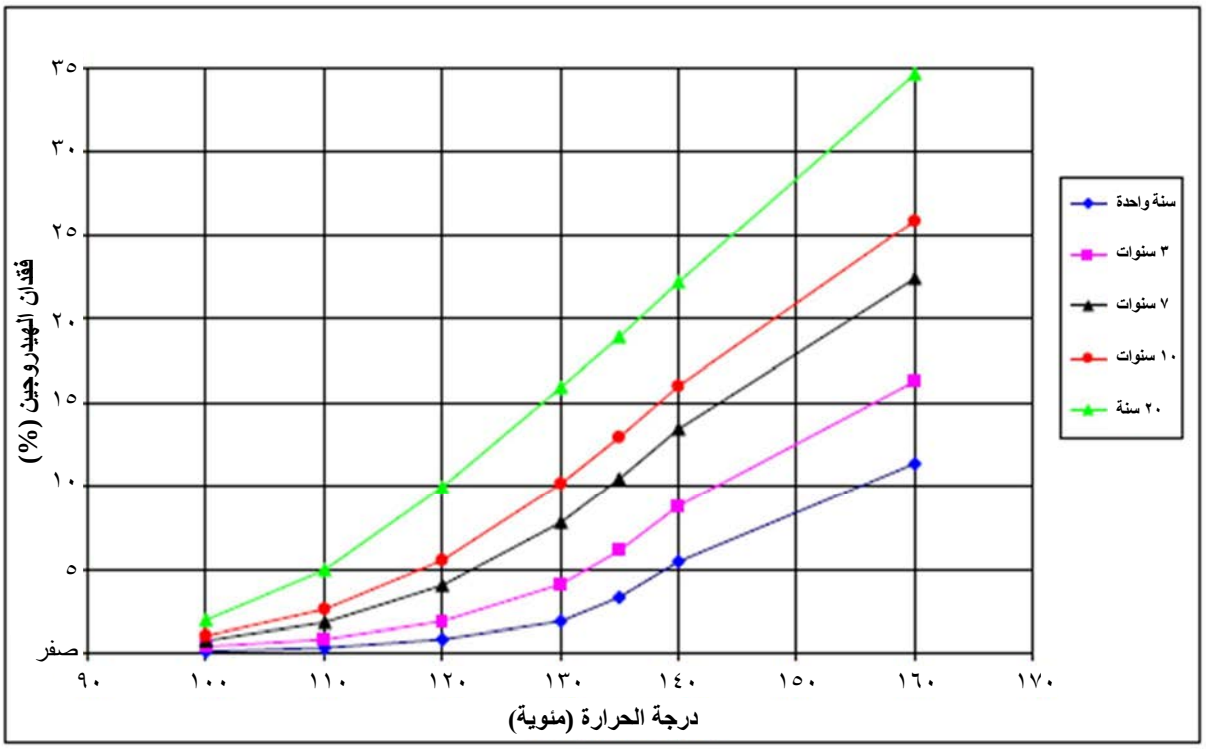
- اختبارات الشيخوخة المعجَّلة لعينات مواد التدريع ضد النيوترونات في مختلف درجات الحرارة ومختلف الضغوط الجزئية للأكسجين الجزيئي (O_2)؛
- اختبارات نفاذية الأكسجين الجزيئي لتقدير كل من انتشارية الأكسجين الجزيئي وقابليته للذوبان في أغشية التدريع ضد النيوترونات؛
- استخدام نموذج غير تجريبي من أجل فحص الخصائص الطويلة الأمد. ولهذا الغرض، يُجمع بين حركية الأكسدة وانتشار الأكسجين. ويحاكي النموذج حالات فقدان الوزن (التي تتحول بعد ذلك إلى فقدان ذرات الهيدروجين) وملامح الأكسدة.

واستُنتج ما يلي:

- لوحظ وجود خاصية تأكسد مقيَّدة الانتشار. كما هو موضح في الشكل ٥٣؛
- تؤدي زيادة درجة الحرارة وزيادة ضغط الأكسجين الجزيئي إلى تسريع فقدان وزن العينة؛
- هناك علاقة خطية بين فقدان ذرات الهيدروجين والفقدان العام للوزن؛
- كانت البيانات المحاكاة متوافقة توافقاً جيداً مع النتائج التجريبية لجميع الشروط المشمولة بالدراسة. وسمح ذلك بالتنبؤ بفقدان ذرات هيدروجين عينات فيال B أثناء الخدمة على مدى عقود؛ كما هو مبين في الشكل ٥٤.



الشكل ٥٣- عينات فيال B المعرضة لـ ١٦٠ درجة مئوية وضغط أكسجين جزيئي ٢ بار تُظهر طبقة سطحية (حوالي ٢٥٠ ميكرومتراً) بينما لا يتأثر القلب (الشكل مقدم من شركة AREVA TN [٧]).

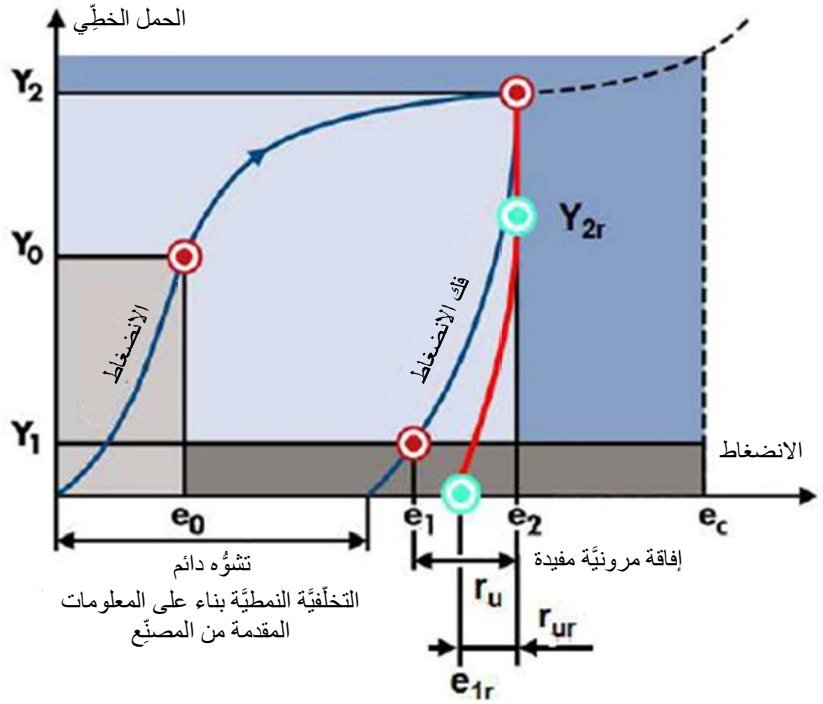


الشكل ٥٤- رسم بياني لفقدان الهيدروجين مقابل درجة الحرارة والزمن (الشكل مقدم من شركة AREVA TN [٤، ٧]).

٧-٣-٦- السِّدادات المُحكمة المعدنية

من الشائع استخدام السِّدادات المُحكمة المعدنية أو الأطواق المانعة للتسرب للسد المحكم لبراميل التخزين الجاف. ومن أكثر أنواع السدادات المُحكمة استخداماً السدادة المُحكمة الحلقية المنشَّطة بنابض. ويشتمل النوع المستخدم في تطبيقات التخزين الجاف للوقود المستهلك على نابض حلزوني داخلي يُنشئ ضغطاً داخليًّا مانعاً للتسرب، وغلاف داخلي من الفولاذ المقاوم للصدأ يوزِّع قوة النابض بالتساوي، وغلاف خارجي مَطيل مصنوع من الألومنيوم أو الفضة، ينضغط ليدخُل في شفة الغطاء لامتصاص الانعطافات. وتتميز السدادات المُحكمة المعدنية التي من هذا النوع بخصائص رجوعية ممتازة تضمن إفاقة مرونيَّة مفيدة. والإفاقة المرونيَّة شرط مسبق لاستيعاب التشوهات الطفيفة التي تحدث في مجمَّعة إغلاق الغطاء بسبب التغيرات في الأحمال الداخلية والخارجية، حتى في ظل ظروف النقل العَرَضية. ويوضح الشكل ٥٥ دورة الانضغاط وفك الانضغاط النمطية لسدادة مُحكمة من نوع HELICOFLEX® (منشَّطة بنابض).

ولم تُظهر التجربة التشغيلية المتراكمة (براميل نوع CASTOR®) أي مؤشر على أي تأثير شيخوخي في الأداء الاحتوائي للسدادات المحكمة من نوع HELICOFLEX®.



الشكل ٥٥- سلوك الحمل والانضغاط لسدادة محكمة من نوع HELICOFLEX® (الشكل مقدم من GNS [٧]).

٧-٣-٦-١- دراسات التدهور

آلية التدهور السائدة في الأمد الطويل للسدادات المُحكمة المنشطة بنابض هي الزَّحفان الحراري في ظل الحمل الميكانيكي. ويؤدي الزحفان إلى تغيرات في الحمل الخطِّي بين السدادة المُحكمة والسطح المانع للتسرب، وفي الإفاقة المرنة. وبالرجوع إلى الشكل ٥٥ نجد أن تأثير الزحفان ينتج عنه، مع مرور الزمن، انجراف من نقطة الانضغاط الأمثل نحو قيم الحمل المنخفضة (Y_{2r}). ويقلل التشوه الدائم الإضافي للسدادة المُحكمة، مع مرور الزمن، الإفاقة المرنة المفيدة. ويمثل ذلك اعتباراً مهمًّا بالنسبة للنقل، لأنه يتعين إيلاء الاعتبار للإفاقة المرنة الأدنى (r_{ur}) في تصميم مجمَّعة إغلاق الغطاء. فيتعين أن تكون الفجوة بين جسم البرميل وشفاه الغطاء محدودة بأقل من الإفاقة المرنة المتبقية قبل النقل، بناءً على فترة التخزين المعتزمة. وعلاقة الارتباط بين سلوك الحمل والانضغاط ومعدل التسريب مهمة لأي تنبؤ بسلوك البراميل في فترة تخزين ممتدة أو عملية نقل بعد تخزين طويل الأمد.

وقد أُجري عدد من الاستقصاءات لاستكشاف التغيُّر في سلوك الضغط-الحَمل للسدادات المُحكمة المنشَّطة بنوابض إزاء الزمن ودرجة الحرارة؛ انظر مشروعي سبار الثاني والثالث [٤، ٧].

وفيما يلي ملخص للنتائج الرئيسية المستمدة من هذه الدراسات:

- باستخدام بيانات أداء الاحتواء التي جُمعت على مدى ١٩ عاماً للسدادات المُحكمة المحفوظة عند درجة حرارة ثابتة قدرها ١٦٠ مئوية، وُضعت معلمة لارسون ميلر للسدادات المُحكمة التي تُصنع أغلفتها من الألومنيوم والفضة؛ معلمة لارسون ميلر = ٧٩٤٢ (للألومنيوم) و٧٧٨١ (للفضة). وأُبلغ بأن العتبة التي يحدث عندها التسريب هي ٨٠٥٠. واستناداً إلى الافتراض بأن التقديرات الطويلة الأمد لأداء السد المُحكم يمكن التنبؤ بها من النتائج الأقصر أجلاً فإنه يُتنبأ، بتمديد الاتجاهات إلى ٦٠ عاماً، بأن أداء السد المُحكم سيُحافظ عليه بالنسبة للسدادات المُحكمة التي تُصنع أغلفتها من الألومنيوم والفضة إذا كانت درجة الحرارة الأولية للسدادة المُحكمة <١٣٤ درجة مئوية و<١٢٥ درجة مئوية، على التوالي؛

- خلصت الاختبارات الأخرى الطويلة الأمد التي تزيد مدتها على ٤ سنوات للسدادات المُحكمة المحفوظة عند درجة حرارة ثابتة قدرها ١٥٠ درجة مئوية إلى ما يلي:
  - تنخفض قيم الحمل (Y_{2r}) والإفاقة المرنة (r_{ur}) بمرور الزمن. ويحدث الانخفاض بسرعة أكبر مع تزايد درجة الحرارة. ويمكن الاستنتاج بأن درجة الحرارة البدئية عند تحميل البراميل لها أكبر تأثير على مدة خدمة السدادة المحكمة؛
  - على مقياس زمني لوغاريتمي، يَظهر السلوك في شكل دالة خطية؛
  - أكد تمديد الاتجاهات إلى فترة تخزين مدتها ٤٠ عاماً أن الطوق المانع للتسرب لديه القدرة على البقاء مانعاً للتسرب حتى عند درجة حرارة ثابتة قدرها ١٥٠ درجة مئوية؛
- أكدت الاختبارات القصيرة الأمد حتى ٢٥٠ درجة مئوية و١٠ ٠٠٠ ساعة معدل تسرب[١٠] يبلغ <١٠$^{-١٠}$ باسكال/م^{٣}/ث$^{-١}$.

وبحثت دراسات أخرى سلوك التآكل الطويل الأمد للسدادات المُحكمة في وجود مياه حوض معالج بالبورات محصورة بين الغلاف الداخلي والغلاف الخارجي وفي وجود عيب يخترق الغلاف الخارجي. وتأكَّد منع التسرب في الحالتين كلتيهما. كما أُجريت اختبارات استرخاء حراري على السدادات المُحكمة المعدنية؛ انظر المرجع [٧] للاطلاع على المزيد من التفاصيل.

[١٠] يُعتبر معدل التسرب <١٠$^{-١٠}$ باسكال/م^{٣}/ث$^{-١}$ مانعاً للتسرب.

٨- الرصد (في التخزين الرطب والجاف)

تم الحصول على المعلومات الواردة في هذا الفصل من المرجعين [٢، ٤]. والمراجع الأخرى مذكورة في النص حسب الاقتضاء.

في المرحلتين الأولى والثانية لمشروع سبار [٢، ٤]، خُصص جزء من المشاريع لتجميع المعلومات عن تكنولوجيات الرصد وتقنياته. وتم بيان الغرض من رصد الأداء، وقُدمت أوصاف موجزة لتقنيات الرصد التي تُستخدم بصفة راتبة. وأُبلغ أيضاً في مشروع بفاست الثالث عن المزيد من خبرات الدول الأعضاء وممارساتها في مجال الرصد والمراقبة [٦].

وتُبلغ مشاريع بفاست وسبار البحثية المنسقة عن أنشطة المراقبة في البلدان المشاركة. والهدف الرئيسي من هذه التكنولوجيات هو تأكيد استمرار سلامة الوقود المستهلك أو تقديم مؤشر مبكر للظروف الناشئة التي من شأنها أن تؤثر على السلامة الطويلة الأمد للوقود المستهلك إذا لم يُتخذ إجراء تصحيحي.

٨-١- أساليب تأكيد الأداء

تمتد التقنيات المستخدمة من عمليات الفحص البصري الأساسية (عبر التدريع البيولوجي الرطب أو الجاف (الكهف)) إلى النظم المتطورة لقياس الإشعاعات (من قبيل أجهزة رصد الحرق).

ويرد في الجدولين ١٩ و٢٠ ملخص لأمثلة على التقنيات الشائعة الاستخدام في البلدان المشاركة. والتقنيات موصوفة في المرجع [٢].

ومعظم تقنيات تأكيد سلامة الوقود المستهلك أثناء التخزين ارتجاعية أو تفاعلية؛ أي أنه عندما تُكتشف نويدات مشعة، مثلاً السيزيوم في ماء الحوض أو الكريبتون في الغاز الواقي، يكون الوقود المستهلك قد تعطَّب بالفعل. ويتعين على مشغِّل المحطة عندئذ تحديد مكان حدوث العطب، وإجراء شكل ما من أشكال تحليل الأعطاب، ثم اتخاذ قرار بشأن كيفية التصرف في الوقود المعطوب.

وفي الأقسام التالية، يُبلغ عن التطبيقات الجديدة/المستحدثة التي استُخدمت أو اختُبرت لتأكيد استمرار سلامة الوقود المستهلك ونظم التخزين.

الجدول ١٩- ملخص لتكنولوجيات الرصد وتطبيقاته

التقنية/الوظيفة	الاحتواء	التدريع	الحرجية	الصلاحية للشتغيل	تأكيد بيانات البحث والتطوير	وظائف أمان أخرى
رصد الضغط	ü				ü	
أخذ عينات غازات الانشطار	ü					
درجة الحرارة				ü	ü	ü
نظم كشف الإشعاعات		ü				ü
أخذ عينات السوائل	ü			ü		ü
عمليات الفحص البصري	ü		ü	ü		ü
أخذ عينات الغازات (غير النشط)					ü	
نظم الفحص في الحوض					ü	ü
الحرق			ü		ü	ü
الاختبار بالموجات فوق الصوتية	ü			ü		

الجدول ٢٠- ملخص لتقنيات وتطبيقات الرصد الراهنة والمستقبلية في كل من البلدان

التقنية/الوظيفة	الأرجنتين		كندا		فرنسا		ألمانيا		هنغاريا		اليابان		كوريا		الاتحاد الروسي		سلوفاكيا		إسبانيا		السويد		المملكة المتحدة		الولايات المتحدة	
	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج	ر	ج
رصد الضغط	-	-	-	م	-	-	-	ح	-	ح	-	ح	-	-	-	م	-	م	-	ح	-	-	-	-	-	ح
أخذ عينات غازات الانشطار	-	ح	-	م	-	ح#	ح	-	ح	ح	-	ح	-	-	ح	م	ح	م	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-
درجة الحرارة	ح	ح	ح	ح	ح	-	ح	-	ح	ح	ح	ح	ح	-	ح	-	ح		ح	ح	ح	-	ح	ح	ح	-
نظام كشف الإشعاعات	ح	ح	ح	ح	ح	-	ح	ح	ح	ح	ح	ح	ح	ح	ح	م	ح	م	ح	ح	ح	-	ح	ح	ح	ح
أخذ عينات السوائل	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح		ح	-	ح	-	ح	م	-	-	ح	-	ح	-	ح	-
الفحص البصري	ح	ح	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح		ح	ح	ح	م	ح	م	ح	ح	ح	-	ح	ح	ح	ح
أخذ عينات الغازات (غير نشط)	-	-	-	م	-	-	-	-	-	ح	-	ح	-	-	-	م	-	-	-	-	ح	-	ح	-	-	ح
نظم الفحص في الحوض	-	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-	-	-	-	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-	ح	-
رصد الحرق	-	-	-	س	م#	-	-	-	-	س	م	م	م	م	-	-	-	-	م	م	-	-	-	-	س	م
الاختبار بالموجات فوق الصوتية	-	-	-	ح	-	-	-	-	-	ح	-	ح	-	-	-	-	-	-	ح	-	-	-	-	-	-	-
مسابير التآكل	-	م	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	م	-

ر: تخزين رطب، ج: تخزين جاف، ح: حالي، م: مستقبلي، س: سابق لإعادة المعالجة أو داعم لها.
براميل نقل.

٨-١-١- تكنولوجيات تأكيد استمرار سلامة الوقود المستهلك المودع في التخزين الرطب

يتم بصفة راتبة تأكيد استمرار سلامة الوقود المستهلك المودع في التخزين الرطب، بأخذ عينات من ماء الحوض للبحث عن ناتجي الانشطار المتنقلين السيزيوم[١٣٤] والسيزيوم[١٣٧]. وتوفِّر نسبة السيزيوم[١٣٤] إلى السيزيوم[١٣٧] مؤشراً على ما إن كان قد حدث عطب في الوقود أو، حيثما يكون هناك بالفعل العديد من أعطاب الوقود، ما إن كانت تحدث أعطاب وقود جديدة. المشكلة في هذا النهج هي أنه حين يُكتشف السيزيوم يكون ذلك عادة بعد فوات الأوان. وبالنسبة لبعض أنواع الوقود/المكونات، مثل الفولاذ المقاوم للصدأ، حيث يتم التخزين في مياه منزوعة المعادن، يمكن رصد مؤشر مبكر لظروف التدهور من خلال أخذ عينات للبحث عن النيكل الأوَّلي وعن نواتج التنشيط الإشعاعي المنغنيز[٥٤] والحديد[٥٥] والكوبالت[٦٠] والنيكل[٦٣]. وفي حالة وجود وقود مفاعلات الماء الخفيف، يمكن أن يعرقِل التداخل المتأتي من النفايات اكتشاف ظروف التخزين الناشئة.

وعند بحث الممارسة الواردة أعلاه، لا يمكن المبالغة في تقدير أهمية مراقبة الاتجاهات وعدم الاكتفاء بالاعتماد على المستويات المستوجبة للتدخل أو المستويات المستوجبة لاتخاذ الإجراءات. ومن الجدير بالملاحظة أنه، مثلاً، يمكن أن يتطلب الأمر حدوث أعطاب متعددة في دبابيس الوقود في الأحواض الكبيرة قبل الوصول إلى المستويات المستوجبة لاتخاذ الإجراءات أو إلى مستوى مستوجب للتدخل، ولا يمكن إثبات وجود ظروف التدهور إلا من خلال نتائج أخذ العينات لتحديد الاتجاهات.

يمكن أن يوفر استخدام مجسات التآكل التي تعمل أثناء حالة الحرجية، والمُصنَّعة من أغلفة دبابيس الوقود، أو المجسات المصممة لمحاكاة آليات تآكل الوقود المعروفة، آلية لسد الفجوة بين اكتشاف العطب وبدء الظروف التي من شأنها أن تؤدي إلى التعطُّب إذا لم يُتخذ إجراء تصحيحي. وتشمل التقنيات التي بُحثت أثناء مشروع سبار ما يلي: قياس الضوضاء الكهروكيميائية، ومطيافية المعاوقة الكهروكيميائية، وأمِيتر انعدام المقاومة، وطريقة بصمة المجال الكهربائي، والمقاومة الكهربائية المقيسة إشعاعيًّا.

ويُعد استخدام مجسات التآكل التي تعمل أثناء حالة الحرجية ذا أهمية خاصة للوقود المستهلك، المعروف بأنه عرضة للتعطُّب في ظل ظروف التشغيل غير العادية. وعلى الرغم من أن الوقود المكسو بالزركونيوم غير معروف بأنه عرضة للتآكل في ظل معظم ظروف التشغيل فقد استُخدمت مجسات مصنوعة من سبيكة الزركونيوم Zry-4 لدراسة تأثير تغيير كيمياء مياه الأحواض على وقود مفاعلات الماء الخفيف. وقد يسمح تحقيق المزيد من التطوير والنضج لهذه التقنيات بتطبيقها في توفير البيانات الداعمة لإعادة الترخيص أو أنشطة استعراض حالة الأمان، كبديل للقيام بفحص ما بعد التخزين للوقود المخزون لفترة طويلة.

وكان من الأمثلة على استخدام مجسات التآكل ما يلي:

- تطبيق قياس الضوضاء الكهروكيميائية ومطيافية المعاوقة الكهروكيميائية لتأكيد سلبية وقود ماغنوكس، انظر القسم ١٠-٢-٤ [٤]؛
- استخدام مسبار هجوم التآكل بين الخلايا باستعمال تقنيات أمِيتر انعدام المقاومة وطريقة بصمة المجال الكهربائي لدراسة بداية التآكل في وقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز، انظر القسم ٤-١-٣ [٤].

٨-١-٢- تكنولوجيات تأكيد سلامة الوقود المستهلك المودع في التخزين الجاف

فيما عدا تكنولوجيا الأقبية، حيث يمكن أخذ عينات من الغاز الواقي لأنابيب التخزين المفردة في الموقع بواسطة جهاز تحليل غازات محمول بحثاً عن وجود نواتج الانشطار الغازية، يتطلب تأكيد سلامة الوقود المستهلك في تقنيات التخزين الجاف الأخرى كسر الاحتواء من أجل فحص الوقود أو رصده. ويُستدل على استمرار سلامة الوقود المستهلك في النظم الأخرى بمراقبة درجة الحرارة الخارجية والاحتواء (إما مراقبة ضغط السدادات المُحكمة (نظم البراميل المقفولة بمزلاج) و/أو عمليات الفحص الإشعاعي/البصري لبنية البرميل الخارجي أو العلبة)، وبضمان الجودة أثناء إغلاق النظام، وبدعم البحث والتطوير الذي يوفر الثقة بأنه يمكن استبعاد حدوث التعطُّب أثناء التخزين.

وقد نوقشت في القسم ٦-٢ الاستقصاءات المحددة التي أُجريت بفتح البراميل، ويرد فيما يلي إبلاغ عن البحث والتطوير حول رصد أعطاب الوقود في النظم المغلقة.

ولتوفير مزيد من الطمأنة لأصحاب المصلحة الرئيسيين بأن الوقود المستهلك لا يزال سليماً أثناء التخزين، اقتُرح عدد من التقنيات غير الاقتحامية.

رصد أشعة غاما

ربما يكون أحد أكثر الخيارات جاذبية لرصد حالة الوقود المستهلك المودع في التخزين الجاف هو القياس المباشر لخط غاما ٥١٤ كيلو إلكترون فولط للكريبتون^{٨٥} (^{85}Kr γ-line 514 keV). وتُعتبر هذه التقنية اقتراحاً جذاباً بصفة خاصة لرصد حالة الوقود المستهلك خلال السنوات الأولى من التخزين الجاف (التي ربما تكون أثقل السنوات عبئاً على الوقود المكسو بسبيكة الزركالوي). وإذا مُدِّدت فترة التخزين إلى ٥٠ عاماً فأكثر، تصبح هذه التقنية عندئذ أقل جاذبية نظراً لعمر النصف للكريبتون^{٨٥} (١٠ سنوات).

وتتطلب هذه التقنية، التي بحثها معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية، تعديل ترتيب الأغطية. وقد أظهرت الدراسات أنه إذا انطلق كريبتون^{٨٥} <٧ × ١٠١٠ بيكريل من قضيب معطوب أو قضبان وقود معطوبة فسيلتقطها كاشف أشعة غاما؛ انظر القسم ١٠-٢-٢ [٦].

الرصد الصوتي

يشكل رصد سرعة الصوت عبر الغاز الواقي آلية بديلة تُستخدم للكشف عن حالة الجو داخل نظام مغلق. وقد اقتُرح هذا الأسلوب لنظام التخزين TranStor™ [٦٧] للكشف عن الأكسجين الموجود في الهليوم (مؤشر لدخول الهواء)، ولكن لم يُطوَّر ليصبح نظاماً يعمل بكامل طاقته.

٨-١-٣- تكنولوجيات تأكيد سلامة نظم التخزين

٨-١-٣-١- التخزين الرطب

استخدام الانبعاث الصوتي لرصد سلامة بطانة الأحواض

تنطوي هذه التقنية على الاستماع إلى موجات الطاقة الطبيعية التي تنبعث عندما تتعرض المادة لتشوه بلاستيكي. وفي حالة البطانة المعدنية للحوض، ينتُج هذا عن التغيرات في الحمل أو الضغط أو درجة الحرارة. وهذه التقنية هي تقنية نوعية لتحديد التلف الذي يحدث داخل البنية، وتُستخدم لرصد تطور العيوب النشطة. وتُكتشف العيوب لأن مستويات الإجهاد (ومستويات الطاقة المقابلة المنبعثة) أمام طرف الشق تكون أعلى عدة مرات من مستويات إجهاد المعدن المحيط.

وفي محطة ياسلوفسكي بوهونيتسه للقوى النووية (سلوفاكيا)، توجد ستة أجهزة استشعار مثبتة في كل حوض، وتُجرى القياسات دوريًّا باستخدام نظام محمول لجمع البيانات. وتُستخدَم المقارنة بالبيانات المحفوظة لتحديد ما إن كانت هناك أي تشققات أو عيوب ناشئة. وحتى الآن لم تُكتشف أي عيوب هامة.

٨-١-٣-٢- التخزين الجاف.

رصد درجة حرارة براميل التخزين الجاف في كندا

لتأكيد أن براميل التخزين الجاف لن تعاني بقدر كبير من التلف الناجم عن التجمُّد والذوبان، وُضع برنامج لرصد درجات حرارة مرفق التخزين وبراميل التخزين الجاف. وجرى الرصد في مرفق تخزين الوقود المستعمل - المرحلة الأولى - في محطة بيكرينغ، ابتداء من الجزء الأخير من كانون الأول/ديسمبر ٢٠٠٠، وحتى نهاية آذار/مارس ٢٠٠١، بالتزامن مع عودة درجات الحرارة الأعلى من التجمُّد. وكان الغرض من الرصد هو تسجيل درجات الحرارة الدنيا التي يمكن أن تتعرض

لها براميل التخزين الجاف. ولبلوغ هذا الهدف، وُضع ما مجموعه ٣١ مزدوجة حرارية في مواقع مختلفة كما يلي: خارج مرفق التخزين لقياس درجات حرارة الهواء المحيط، وفي داخل مرفق التخزين بما في ذلك سطح الأرضية الخرسانية، وعلى سطح الغلاف الخارجي لبراميل التخزين الجاف لرصد أكثر البراميل تعرضاً لأبرد درجات الحرارة؛ ووُضعت مزدوجات حرارية في قيعان براميل التخزين الجاف لقياس درجة حرارتها في أماكن ملامستها للأرضية الخرسانية.

دلت درجات الحرارة الملاحظة على أن درجة الحرارة خارج مرفق التخزين في أبرد يوم كانت -١٧,٥ درجة مئوية، وكانت هناك ٣١ دورة تجمُّد-ذوبان خلال فترة الرصد. ومع ذلك، ظلت درجات حرارة الأرضية الخرسانية تحت براميل التخزين الجاف أعلى من الصفر في جميع الأوقات، وكذلك كانت درجات حرارة الغلاف الخارجي لبراميل التخزين الجاف حوالي درجتين مئويتين فوق الصفر. وفي المرفق نفسه، وصلت أدنى درجة حرارة للهواء إلى -٤,٥ درجة مئوية، وكانت أدنى درجة حرارة للأرضية الخرسانية المكشوفة -٠,٥ درجة مئوية. وداخل مرفق التخزين، كان عدد دورات تجمُّد-ذوبان الهواء المحيط بين برميلين من براميل التخزين الجاف سبع دورات، بينما كان عدد دورات التجمُّد-الذوبان للجدار الأكثر انكشافاً في المرفق أربع دورات.

أظهرت نتائج هذا الرصد أن مرفق التخزين يوفر حماية كبيرة ضد ظروف التجمُّد-الذوبان. وأشارت البيانات إلى أن درجة حرارة براميل التخزين الجاف ظلت فوق الصفر في جميع الأوقات على الرغم من أن درجات حرارة الهواء المحيط داخل المرفق كانت، في سبع مناسبات، أقل من درجة التجمد. غير أن درجات الحرارة المنخفضة المسجلة داخل المرفق تشير إلى أن براميل التخزين الجاف قد تتعرض، مع الاضمحلال الإشعاعي للوقود المخزون، لبعض دورات التجمُّد-الذوبان خلال عمرها التصميمي البالغ ٥٠ عاماً. ونظراً لأن نسبة احتواء الهواء المتوفرة في الخرسانة تبلغ ٦٪، لا يُعتبر أن حدوث بعض دورات تجمُّد-ذوبان الخرسانة يؤدي إلى تأثير ضار.

تحليل سطوح علب التخزين الملحومة

من أجل اكتشاف ما إن كانت توجد الظروف البيئية، أي وجود الكلوريد، اللازمة لإحداث التشقق الناتج عن التآكل الإجهادي في العلب الملحومة غير مزالة الإجهاد، بحث معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية تقنية مطيافية التكسير المستحث بالليزر. ومزية هذه التقنية هي أنها غير تلامسية ولذلك تسهِّل التحليل في الموقع دون أخذ عينات. ويتيح ذلك تحليل العلب ذات درجات الحرارة العالية، ويمكن أن يقلِّل من امتصاص الجرعات الإشعاعية من جانب المشغِّلين.

وباستخدام عينات من الفولاذ المقاوم للصدأ معالجة بكميات مختلفة من الكلوريد، تم إثبات جدوى استخدام هذه التقنية لتوفير التحليل الكمِّي للكلور. وأظهرت الدراسة أن شدة انبعاث الكلور المطبَّعة بشدة انبعاث الأكسجين زادت باستمرار إزاء ازدياد تركُّز الكلور في النطاق ٠,٠٥ إلى ٠,٤ غم/م$^{-٢}$ (حتى ١,٠ غم/م$^{-٢}$). ويقدم القسم ٨-٢-٤-٦ في المرجع [٧] مزيداً من المعلومات عن هذه الدراسة.

فقدان الاحتواء - علب الوقود الملحومة

في نظم التخزين في البراميل الخرسانية، يُحمَّل الوقود المستهلك في علب من الفولاذ المقاوم للصدأ، تُملأ بغاز الهيليوم ثم تُلحم بإحكام يمنع التسرب. وفي حين أن الدور الأساسي للهيليوم هو تخزين الوقود في جو خامل فإن الهيليوم يعزز أيضاً إزالة الحرارة من الوقود المستهلك. وإذا تسرب غاز الهليوم من العلبة فسيتأثر انتقال حرارة الاضمحلال الإشعاعي من الوقود إلى سطح العلبة؛ أي أنه، من حيث المبدأ، ستتغير درجة الحرارة على سطح العلبة.

بحث معهد البحوث المركزي لصناعة القوى الكهربائية تأثير فقدان الهيليوم على درجة حرارة جسم العلبة. وبينما كان من الصعب الحكم على ما إن كانت التغيرات في درجة حرارة السطح ناتجة عن تسرب غاز الهيليوم أم لا، فإن الدراسة أظهرت فعلاً أنه بالنسبة للعلبة المعطوبة كان هناك فرق في درجة الحرارة بين الجزء السفلي والجزء العلوي من العلبة قدره حوالي ٨ درجات مئوية بعد ستين ساعة. ويقدم القسم ٨-٢-٤-٦ في المرجع [٧] مزيداً من تفاصيل هذه الدراسة.

٩- سلامة الوقود (الوقود المسرِّب/المصاب بتلف)

تم تناول موضوع سلامة الوقود المستهلك بشيء من التفصيل في مشروع سبار الثاني (انظر القسم ٦) [٤]. وفي هذا القسم، يقتصر ملخص الإبلاغ عن مشروعي بفاست وسبار على أنواع التلف، والتقنيات التي تُستخدم في المفاعل للكشف عن أعطاب الوقود المستهلك، والتجربة التشغيلية في تخزين الوقود المصاب بتلف أو المعطوب. ويتناول مشروع سبار الثاني تقنيات تعبئة الوقود المصاب بتلف ونقله، ولا تُستنسخ هنا.

٩-١- تعريف ومعايير سلامة الوقود [٢]

تختلف المصطلحات المستخدمة لوصف سلامة الوقود، وتحديداً تعريفات الوقود 'المصاب بتلف' أو 'المعطوب'، بين البلدان، وترد تفاصيل المعايير الخاصة بكل بلد في تقريري مشروعي سبار الأول والثاني، [٢، ٤]. وبصفة عامة، يُستخدم مصطلح الوقود 'المعطوب' في تقارير المشاريع البحثية المنسقة لوصف أي مجمَّعة وقود يكون قد حدث فيها:

١- تصدّع لحاجز احتواء الكسوة، أو؛

٢- تشوهات هيكلية تؤثر في مناولة بنية الوقود النووي المستهلك؛ أو

٣- عيوب ميكانيكية في الوقود النووي المستهلك.

وتجدر ملاحظة أن مجمَّعة الوقود يمكن أن تتعرض لأضرار ميكانيكية طفيفة أو لتعديل بنيوي دون أن تُصنَّف بالضرورة على أنها 'معطوبة'. ومن الممكن أيضاً بالنسبة لتلف الكسوة، الذي يُكتشف أثناء التشغيل، أن ينغلق أثناء التخزين بعد التفريغ من المفاعل، عن طريق التعافي الذاتي' أو من خلال نمو/ترسُّب نواتج التآكل فوق المنطقة المصابة.

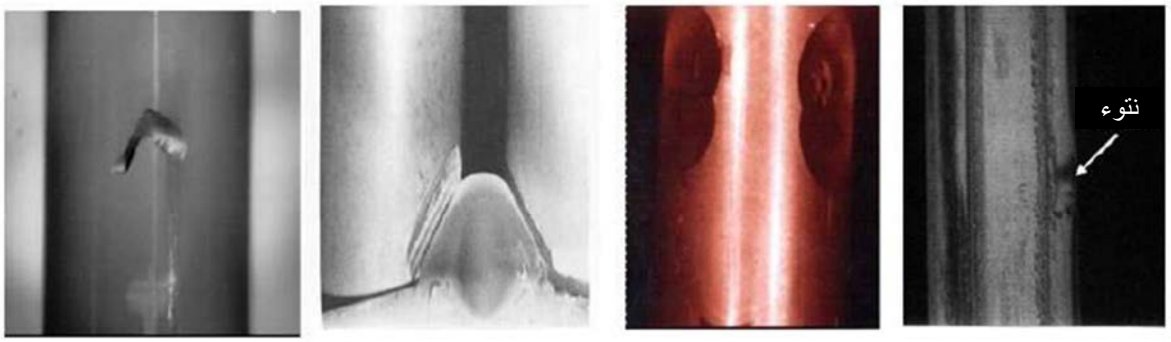
٩-٢- أمثلة على الوقود المصاب بتلف [٤]

٩-٢-١- قضبان الوقود المصابة بتلف

يقدم الشكلان ٥٦ و٥٧ أمثلة على العيوب الأولية والثانوية التي تنشأ في مفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء المغلي. وينجم العديد من العيوب الأولية عن الحطام المعدني الصغير. وبسبب اهتزازات القضيب، يمكن أن تهترئ الكسوة موضعيًّا. وقد يحدث وضع مماثل إذا كانت شبيكة شبكة المباعدة ذات قوة احتجاز منخفضة جدًّا، أو إذا كان القضيب يتفاعل مع ريشة شبكة المباعدة، أو مع النابض نفسه. وكثيراً ما يمكن التعرف على التدهور الثانوي من خلال ظهور بثرة هيدريدية في مواقع محورية نمطية من قضيب الوقود. ومن حين لآخر، يمكن ملاحظة تدهور ثانوي شديد، مثل الانشقاقات الطويلة للكسوة، انظر الشكل ٥٧ [٦٨].

٩-٢-٢- الأجزاء الهيكلية المصابة بتلف

قد يظهر أيضاً تلف في الأجزاء الهيكلية. وتُلاحظ أثناء عمليات التفتيش في حوض الوقود المستهلك مجموعة شديدة التنوع من المُكتَشفات، مثل علامات تلامُس واهتراء على ألواح الربط، وعلامات اهتراء احتكاكي في شبكات المباعدة حتى زوايا أو شبائك شبكة المباعدة المصابة بتلف، وكذلك أنابيب توجيه مكسورة أو مجمَّعات وقود ملتوية قليلاً. ويوضح الشكل ٥٨ على الجانب الأيسر زاوية مصابة بتلف، وعلى الجانب الأيمن شبائك خارجية مصابة بتلف لشبكة مباعدة. وقد ينشأ التلف أثناء التشغيل أو أثناء مناولة مجمَّعات الوقود. ولا تؤثر حالات التلف هذه بصفة عامة على سلامة قضيب الوقود، ولكن قد يكون لها تأثير على القدرة على مواصلة مناولة مجمَّعات الوقود في حوض المفاعل أو في إطار عمليات التخزين.

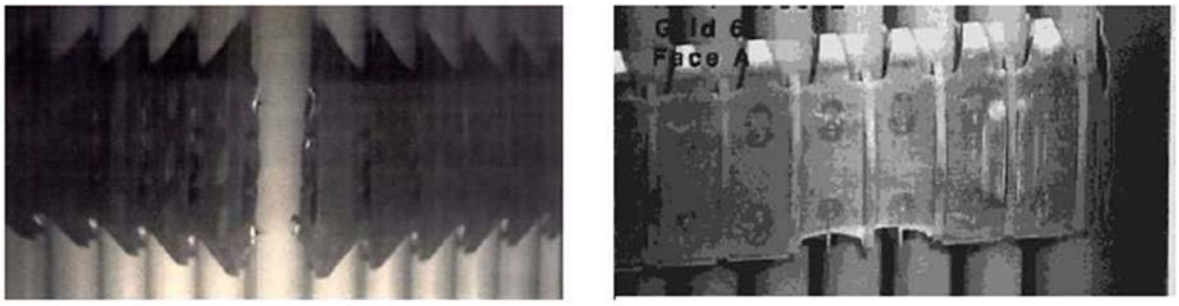


تدهور ثانوي (بثرة هيدريدية) | اهتراء احتكاكي ناجم عن ارتخاء النابض | اهتراء احتكاكي ناجم عن تماس بين ريشة شبكة المباعدة والقضيب | اهتراء احتكاكي ناجم عن التفاعل مع الحطام

الشكل ٥٦- تلف قضيب الوقود بسبب الاهتراء الاحتكاكي والتدهور الثانوي (الصور مقدمة من شركة Framatome ANP GmbH [٤]).

شق لولبي | شق محوري | علامة اهتراء احتكاكي

الشكل ٥٧- نماذج لتلف قضبان الوقود (الصور مقدمة من شركة Framatome ANP GmbH [٤]).

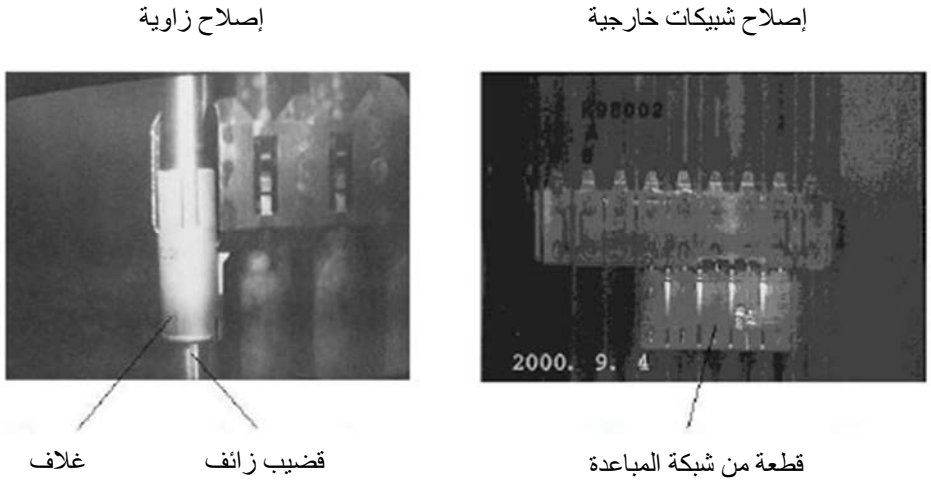


شبيكات خارجية مصابة بتلف (الجدار الجانبي والنوابض) لشبكة مباعدة | زاوية مصابة بتلف لشبكة مباعدة

الشكل ٥٨- نماذج لشبكات مباعدة مصابة بتلف (الصورتان مقدمتان من شركة Framatome ANP GmbH [٤]).

٩-٢-٣- إعادة تشكيل الوقود المصاب بتلف

الهدف الأساسي من إعادة تشكيل مجمَّعات الوقود هو التمكين من إعادة إدخالها في المفاعل لمواصلة تشغيله. والتقنيات الرئيسية لإعادة التشكيل هي استبدال قضبان الوقود المصابة بتلف، وإصلاح شبكات المباعدة، وتبديل هياكل كاملة. ويمكن أن يستعاض عن قضبان الوقود المصابة بتلف بقضبان وقود جديدة أو قضبان زائفة مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ أو من سبيكة الزركالوي. وتتوفر أيضاً مجموعة متنوعة من التقنيات لإعادة تشكيل الأجزاء الهيكلية من مجمَّعات الوقود لمواصلة تشغيل المفاعل. ومن الأمثلة على ذلك إصلاح زوايا شبكة المباعدة وشبيكات الشبكة الخارجية (الشكل ٥٩)، وإعادة معايرة النوابض في شبيكات شبكة المباعدة، وضبط الرّيَش المركَّبة على شبكات المباعدة، وتبديل ألواح الربط ونوابض التثبيث، إلخ.



الشكل ٥٩- إصلاح زاوية وشبيكة خارجية من شبكة مباعدة (الصورتان مقدمتان من شركة Framatome ANP GmbH [٤]).

٩-٣- إثبات سلامة الوقود المستهلك [٤]

التقنيات النمطية لرصد الوقود المعيب هي الرصد أثناء حالة الحرجية، واختبارات الرشف والنَّض، والفحوص التفصيلية لمجمَّعات الوقود، مثل الفحص البصري أو الفحص بالموجات فوق الصوتية أو اختبار التيارات الدوَّامية.

وتحتوي جميع المفاعلات على نظام واحد على الأقل للرصد أثناء حالة الحرجية لاكتشاف أعطاب الوقود داخل قلب المفاعل كوسيلة للتحكم في تلوث دوائر التبريد الأولية وفي الجرعة اللاحقة التي تصيب العاملين أثناء عمليات الصيانة. وفي مفاعلات الماء الخفيف، عادةً ما تُكتشف بداية عطب الوقود من خلال مراقبة مستوى نشاط أشعة غاما المرتبط بنواتج انشطار إشعاعية معيَّنة توجد في سائل تبريد المفاعل أو في الغاز العادم. ويتمثل مؤشر نمطي للعطب في ازدياد نشاط نظائر الزينون أو الكريبتون أو اليود. بيد أنه يتعين لتوصيف العطب التمييز بين نواتج الانشطار القادمة من اليورانيوم المتشرد وتلك القادمة من القضبان المعيبة. وفي مفاعلات كاندو، يقيس نظام النيوترونات المتأخرة النشاط الذي يأتي من اليود^{137} أو من البروم^{87} (يُطلِقان النيوترونات، وهما أيضاً باعثان لأشعة بيتا وأشعة غاما). وتشير زيادة إشارة النيوترونات المتأخرة إلى إطلاق اليورانيوم إلى سائل التبريد [٦٩].

بالإضافة إلى النظم القائمة في قلب المفاعل، تحتوي معظم المفاعلات أيضاً على نظم رشف ثانوية مرتبطة بعمليات إزالة الوقود وبالعمليات التي تتم داخل الحوض للتحقق من سلامة الكسوة/مجمَّعات الوقود. ويستند اكتشاف تعطُّب الوقود عن طريق الرشف إلى انطلاق نواتج الانشطار الغازيَّة من القضيب المسرّب. ويمكن أخذ العينات إما من الجزء العلوي من مجمَّعة الوقود أو يمكن إدخال مجمَّعة الوقود في علبة مغلقة. وقد تتزايد حرارة القوى الدافعة لإطلاق نواتج الانشطار أثناء الرشف، بسبب انخفاض تبريد الماء أو بسبب ما يرتبط برفع مجمَّعة الوقود إلى عمق أقل في الحوض من انخفاض في الضغط الخارجي.

ويقدَّم في القسم ٦-٣-١ من المرجع [٤] مزيد من المعلومات عن نظم وتقنيات الرشف المستخدمة للكشف عن الوقود المعطوب في المفاعلات.

٩-٤- التجربة في تخزين الوقود المصاب بتلف

٩-٤-١- التخزين الرطب

تشير التجربة العامة بالنسبة للوقود المخزون تخزيناً رطباً إلى أن العيب لا يتدهور أو ينتشر أثناء التخزين لفترات طويلة، باستثناء الوقود المعلَّب المشبع بالماء أو المملوء بالماء [٢، ٤].

وهناك خبرة من العديد من البلدان في التعامل مع وقود مفاعلات الماء الخفيف المعطوب المكسو بسبيكة الزركالوي بعد فترات التخزين الرطب.

اشتمل برنامج ألماني مدته ١٨ عاماً على عمليات فحص دورية لقضبان الوقود المكسوة بسبيكة الزركالوي وتوجد فيها عيوب أولية وعيوب متغلغلة مخترِقة للكسوة وكانت مخزونة في إطار برنامج إيضاحي. وشملت العيوب الشقوق، والأعطاب الهيدريدية، والبقع الناجمة عن البِلى [٦]. ولم تُكتشف أي آثار أو تغيرات غير متوقعة في العيوب، بما يوفر دليلاً قويًّا على أن التخزين الرطب لهذه الأنواع من الوقود يكون، مع توافر كيمياء المياه والنظافة الملائمتين، آمناً وموثوقاً [٢، ٧٠-٧١].

وأجرت جمهورية كوريا دراسة طويلة الأمد حول تخزين قضبان مفاعلات ماء مضغوط أُحدث بها تلف عمداً. وفي السلسلة الأولى، فُحصت ١٠ قضبان وقود، من بينها ٧ بها عيوب متعمدة مخترقة للكسوة، وذلك بعد سنة و٢,٥ سنوات و٥ سنوات من التخزين [٦]. ولم تكن هناك مؤشرات على تغيرات في الأبعاد حتى بعد ٥ سنوات. غير أنه عُثر على بعض الترسبات حول العيوب. ولوحظ بعد ٢,٥ سنوات وجود مادة بيضاء (اعتُقد أنها هيدروكسيد السيزيوم)، ولوحظ بعد ٥ سنوات وجود مادة صفراء لم يُتعرف على هويتها. واستُخدمت اختبارات الموجات فوق الصوتية لتحديد مسافة نفاذ الماء على أوقات قصيرة. وتم أيضاً تقدير معدل إطلاق السيزيوم من القضبان المعيبة، ووُجد أنه يزيد بسرعة خلال أول ٣٠ يوماً، ويزيد بمعدل أبطأ حتى ٩٠ يوماً، ثم يظل ثابتاً تقريباً. كما سُجل ذوبان الكوبالت٦٠، ووُجد أن القيمة المقاسة البالغة ٠,٠٠٩٣ بيكريل/ث-١/قضيب-١ متوافقة مع القيمة المُبلغ عنها البالغة ٠,١ بيكريل/ث-١/قضيب-١. وفي السلسلة الثانية، فُتش وفُحص، باستخدام تقنيات الفحص اللاحق للتشعيع، اثنان من الدبابيس التي كانت قد خُزنت لمدة ١٢ عاماً. ومرة أخرى، لم تكن هناك مؤشرات على أي تغيرات في الأبعاد أو تغيرات في إشارة التيار الدوَّامي في المواضع المعيبة. ولم تتبين عند فحص هذه القضبان المادة الصفراء التي عُثر عليها سابقاً على قضيب معيب آخر [٢].

وفي السويد، أُجريت دراسة حول سلوك قضيب وقود معيب للتأكد من التغيرات في التركيب الكيميائي والسلامة البنيوية للكسوة ولكريَّات الوقود نتيجة لاستمرار التشغيل بعد وقوع اختراق للكسوة [٧٢]. وعند المقارنة بقضيب سليم من نفس النوع، كان من الواضح حدوث فقدان كبير للسيزيوم بنسبة ٣٠٪، لا سيما بين أماكن اختراق الكسوة. وثبت أن قابلية السيزيوم واليورانيوم والكوريوم للنضّ في الماء المنزوع الأيونات أعلى في القضيب المعيب، وكانت النتائج بالنسبة للسترنشيوم والبلوتونيوم والأمريشيوم أكثر تعقيداً. وحدث في القضيب المعيب أيضاً تغير في البنية، مع نموّ حبيبات وتغيُّر توجُّه البنية، ربما بسبب ازدياد المحتوى الأكسجيني. كما كانت الكسوة الموجودة على القضيب مهدردة في بعض الأجزاء.

وفُحصت بصريًّا في المملكة المتحدة أنواع من وقود مفاعلات الماء الخفيف المعطوب بعد تبريدها لفترة طويلة (حتى ٢٣ عاماً)، ولم يتسن تحديد ما إن كان التخزين المطوَّل في الحوض ينشر الأعطاب. غير أن أيًّا من أنواع الوقود لم يُعتبر أنه توجد به عيوب بنيوية من شأنها إعاقة مناولته. وفُتشت مجمَّعة واحدة ذات مناطق تآكل معروفة كانت مخزونة داخل زجاجة متعددة العناصر، وأفاد تقييمها بأنها لم تتدهور منذ الفحص السابق الذي جرى قبل تسع سنوات.

وفُحصت في الولايات المتحدة الأمريكية، بعد ما يصل إلى ٨ سنوات من التخزين، مجمّعات وقود مفاعلات ماء مضغوط مكسوة بسبيكة زركالوي وبها عيوب أحدثها المفاعل. ولم يكن هناك تدهور واضح للكسوة حول العيوب أو فقدان كبير للوقود بسبب الذوبان [٧٣].

وتم بعد ٢١ عاماً و٢٧ عاماً من التخزين الرطب فحص وقود مفاعلات كاندو أُعيب عن عمد. وثبت أنه لم تحدث أكسدة قابلة للقياس لسطح الكسوة وأنه لم تُلاحظ أي تغيرات في حالة الوقود [٦]. وأظهر فحص ثاني أكسيد اليورانيوم داخل المنطقة المباشرة للعيب المتعمد للوقود الذي خُزن تخزيناً رطباً لمدة ٢١ عاماً أن أسطح شظايا الوقود كانت مترطبة بالكامل ومتأكسدة بقدر كبير [٢، ٦]. إلا أن الأكسدة اقتصرت على طبقة رقيقة جدًّا (أي نانومترات) على السطح [٢]، ولم يكن هناك دليل على ازدياد في قطر العنصر بسبب تأكسد ثاني أكسيد اليورانيوم [٦]. وأوحت الأدلة بأن تخزين الحزم المعيبة في الحوض يمكن أن يستمر لمدة ٥٠ عاماً على الأقل دون حدوث تدهور كبير فيها [٦].

وخُزن وقود معيب للمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء تخزيناً رطباً في علب مفردة في كل من الاتحاد الروسي وهنغاريا، وفي الحالتين كلتيهما لم تقع أحداث غير متوقعة ولم يلاحظ أي مزيد من التدهور [٢، ٤].

ويمكن أن يتعرض وقود مفاعلات ماغنوكس المستهلك للتآكل التنقُّري أثناء التخزين الرطب. وتتطلب هذه العيوب إزالة نواتج الانشطار والأكتينيدات من مياه التخزين، لكنها لا تسبّب بخلاف ذلك أي مشاكل في التعامل مع الوقود، شريطة إبقاء الوقود رطباً. ولتقليل التآكل إلى الحد الأدنى، يُخزن وقود ماغنوكس في مياه عالية النقاء معالجة بمادة كاوية [٤].

ولم يُظهِر تخزين الوقود المعيب للمفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز في المملكة المتحدة سوى تأثير ضئيل على عمليات التخزين الرطب، من حيث إنه لم تُواجه أي مشاكل في مناولته وكان إطلاق نواتج الانشطار منخفضاً مقارنة بوقود ماغنوكس المعطوب [٦]. وتبيَّن أن وجود وقود معيب لا يؤثر في تدميج القضبان بواسطة تقنيات التفكيك.

وبحثت هيئة الطاقة الذرية والطاقات البديلة بفرنسا تخزين وقود موكس المعطوب [٧٤]. وتم نضّ عينة مشعَّعة من وقود موكس في ماء نقي مهوَّى، مع وجود أشعة غاما خارجية ودون وجودها، في ظل ظروف ثابتة ولمدة ١٤ يوماً. ووُجد أنه بالنسبة للعينة التي لم تتعرض لأشعة غاما خارجية تزايدت تركُّزات اليورانيوم والبلوتونيوم في الماء باطراد مع مرور الزمن دون الوصول إلى حالة استقرار. ومن الناحية الأخرى فإن العينة التي تم نضّها في وجود أشعة غاما وصلت بسرعة إلى ظروف حالة مستقرة. واستُخدمت في مجموعة ثانية من التجارب مطيافية رامان لتحديد خصائص تطور سطح الوقود. وتم نضّ عينة الوقود المراد تحديد خصائصها لمدة ٣ أشهر في ماء نقي مهوَّى في وجود أشعة غاما. ووُجد أنه لم يلاحظ سوى تغير بنية ثاني أكسيد اليورانيوم. وكان الاستنتاج العام من الدراسة هو أنه في حالة حدوث خرق لكسوة وقود موكس لن يكون سلوكها أسوأ من السلوك الذي يمكن ملاحظته بالنسبة لوقود ثاني أكسيد اليورانيوم المستهلك القياسي.

٩-٤-٢- التخزين الجاف

خضعت مجمَّعة وقود مفاعلات ماء مضغوط لتجارب سلامة الكسوة في مرفق EMAD في منتصف ثمانينات القرن العشرين، وتبيَّن أن المجمَّعة احتوت على قضيب معطوب بعد شهرين من التخزين عند ٢٧٥ درجة مئوية مع غازٍ واقٍ هوائي [٧٥]. وكانت المجمَّعة قد خُزنت في الهواء لمدة عامين قبل إنهاء الاختبار دون ظهور دليل على أي تدهور إضافي للوقود. وكان سبب العطب غير محدد. وكان قد أُبلغ عن وجود أدلة على أن العيوب الكبيرة، المحدثة بواسطة مفاعل أو المتعمدة، تسمح للوقود بالتأكسد ونشر العيوب إذا تعرض الوقود للهواء عند درجات حرارة عالية بما فيه الكفاية [٧٦-٧٧].

وخُزنت في أواخر ثمانينات القرن العشرين شظايا وقود مستهلك ومقاطع قضبان معيبة في هواء مرطَّب، للحصول على بيانات الأكسدة المتعلقة بالتخزين الجاف للوقود المستهلك [٢، ٤]. ولوحظت زيادة كبيرة في الوزن وانقسام في الكسوة

بسبب تأكسد ثاني أكسيد اليورانيوم، بينما لم يلاحظ أي اعتماد على مستوى الحرق أو على مستويات رطوبة الغاز الواقي. وكان أحد الأمثلة هو حالة مقطع قضيب مكسو بالزركونيوم معيب عمداً تعطَّب عن طريق الانقسام بعد ٠٠٠ ٢٣ ساعة تخزين في الهواء عند ١٥٠ درجة مئوية [٧٨].

وأُجري في مختبرات باتيل-كولومبوس تقييم لتأثير الغاز الواقي على التخزين الجاف لقضبان وقود مفاعلات الماء المغلي المكسوة بسبيكة زركالوي والمحتوية على عيوب أحدثتها المفاعلات، وذلك عن طريق تخزين القضبان لمدة ١٠٠ ٢ ساعة عند ٣٢٥ درجة مئوية. ووُضع أحد القضبان في غاز الأرغون والآخر في الهواء. ولم يُظهر القضيب المعرَّض للغاز الخامل أي تغير في عيوب الكسوة. وحدث في القضيب المعرَّض للهواء قدر ملحوظ من تأكسد الوقود وانتفاخه وتشوُّه الكسوة [٧٩].

وأُدرجت في أواخر سبعينات القرن العشرين حزم وقود كاندو، معيبة عمداً، في برنامج تجريبي طويل الأمد للتخزين الجاف في العلب الخرسانية. وخُزنت الحزم في الهواء الجاف عند درجات حرارة تصل إلى ١٥٠ درجة مئوية دون أن تحدُث زيادات واضحة في أقطار الوقود، واحتفظت الكسوة بسلامتها البنيوية، على الرغم من أن كمية كبيرة من الوقود كانت قد تأكسدت. وخُزنت حزم وقود كاندو أخرى معيبة عمداً في هواء محدود مشبع بالرطوبة لمدة ٨ سنوات وفي هواء غير محدود مشبع بالرطوبة لمدة عامين إضافيين (كلاهما عند ١٥٠ درجة مئوية)، ولوحظ أن الحزم حدثت فيها كسور في الأغطية الطرفية امتدت إلى الكسوة. وعُزيت هذه الكسور إلى التشقق الهيدريدي المتأخر الناتج عن التهدرد الشديد للأغطية الطرفية والإجهاد الإيجابي للكسوة بجوار الأغطية الطرفية، اللذين حدثا أثناء العمليات داخل المفاعل، علاوة على التلف الذي تعرضت له حزمة الوقود قبل التخزين الجاف.

وأُجري في محطة ويلفا للقوى النووية فحص مفصَّل لوقود موكس مخزون تخزيناً جافًّا ومصاب بتلف بسبب نفاذ الماء إليه، ووُجد أنه في حالة مستقرة.

١٠- الاستنتاجات

١٠-١- أداء الوقود المستهلك في التخزين الرطب والتحزين الجاف

بالنسبة لوقود مفاعلات الماء الخفيف المستهلك المكسو بالزركونيوم أو الفولاذ المقاوم للصدأ، يوجد >٥٠ عاماً من الخبرة في التخزين الرطب و>٣٠ عاماً في التخزين الجاف. ويظل الأداء في التخزين ممتازاً، من دون تحديد آلية تعطُّب عامة أو معايشتها.

والموقف فيما يتعلق بوقود المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز المستهلك المكسو بالفولاذ المقاوم للصدأ هو أن هناك >٣٠ عاماً من الخبرة في التخزين الرطب. وأداء التخزين جيد بشرط أن يخزن الوقود في وجود مانع تآكل.

وفي حالة وقود ماغنوكس المستهلك، هناك ~٥٧ عاماً من الخبرة في مناولته وتخزينه؛ ويشمل ذلك ~٤٣ عاماً من عمليات التخزين الجاف. والاتجاه هو التخزين لفترات زمنية قصيرة نسبيًّا وحسب في التخزين الرطب، ولكن سيبقى الوقود سليماً لفترات أطول بشرط الحفاظ على الكيمياء المثلى للتخزين في الحوض. ولم يُبلغ عن أي تدهور في وقود ماغنوكس المستهلك المسترد من التخزين الجاف.[١١]

١٠-٢- آليات تدهور الوقود المستهلك (في التخزين الرطب والتخزين الجاف)

آليات التدهور المحتملة التي قد تؤثر على سلامة كسوة الزركونيوم في التخزين الرطب هي التالية [٤]:

- التآكل المنتظم (المائي)؛
- التآكل التنقُّري والغلفاني والميكروبي؛
- التهدرد.

ولم يثبت أن أيًّا من هذه الآليات يساهم بقدر كبير في ظل ظروف التخزين الرطب، على ما يمكن استنتاجه من الدراسات التي أجراها المشاركون في مشروعي بفاست وسبار (ما يصل إلى ٣٠ منظمة من ٢١ بلداً والمفوضية الأوروبية). لذلك يمكن استنتاج أنه لا يوجد حتى الآن دليل متاح، أو لم تُوضع حتى الآن آلية نظرية، من شأنهما الحد من وقت بقاء الوقود المكسو بسبيكة الزركونيوم في التخزين الرطب، بشرط الحفاظ على كيمياء الحوض ضمن حدود معيَّنة.

وآليات التدهور المحتملة التي قد تؤثر على سلامة كسوة الزركونيوم في التخزين الجاف وعمليات المناولة والنقل اللاحقة هي التالية [٤]:

- التأكسد بواسطة الهواء؛
- الزحفان الحراري؛
- التشقُّق الناتج عن التآكل الإجهادي؛
- التشقُّق الهيدروجيني المتأخر؛
- إعادة توجُّه الهيدريدات؛
- تنقُّل الهيدروجين وإعادة توزُّعه.

والآليات التي تلقى حاليًّا اهتماماً من المشاركين في المشاريع البحثية المنسَّقة، في ظل ظروف التخزين الجاف العادية، هي الزحفان الحراري (على الرغم من أن هذا لا يعتبر مشكلة في الولايات المتحدة الأمريكية)؛ والتشقق الهيدريدي المتأخر، الذي كان مشكلة قيد البحث فيما يخص وقود كاندو في مشروع سبار الثالث وربما يكون قد تمت معالجته الآن؛ وتأثير الهيدروجين على سلوك كسوة الزركونيوم. وهذه الآلية الأخيرة هي مجال لا يزال قيد البحث، ومن المحتمل أن تكون مشكلة في ظل ظروف تشغيل/مناولة معيَّنة.

[١١] باستثناء الكمية الصغيرة من الوقود التي تأثرت بنفاذ الماء إلى أحد المخازن الجافة المبرَّدة بالهواء في محطة ويلفا للقوى النووية.

يختلف الوضع قليلاً بالنسبة للوقود المكسو بسبائك الفولاذ المقاوم للصدأ وسبائك المغنيسيوم. وفي الحالتين كلتيهما لا يتأثر أي من الكسوتين بالتهدرد، بيد أن آليات أخرى تصبح هي المهيمنة. فالمواد المكسوة بالفولاذ المقاوم للصدأ التي شهدت درجات حرارة تشغيل مفاعل تتراوح بين ٣٥٠ و٥٢٠ درجة مئوية تكون قابلة للهجوم بين الكريَّات في التخزين (الرطب والجاف كليهما). ويُخفَّف من هذا الهجوم بتعديل كيمياء التخزين في حالة التخزين في الحياض أو الاستبعاد التام للرطوبة في حالة التخزين الجاف.

وقد صُمِّمت كسوة وقود ماغنوكس خصيصاً بحيث لا تتأكسد في الغاز، ولذلك ينبغي أن تكون صامدة في ظروف التخزين الجاف. وتدعم الأدلة المستمدة من عمليات استرداد الوقود هذا الرأي، حيث لم يُعثر على تدهور في الوقود. غير أن كسوة وقود ماغنوكس لم تصمَّم للتخزين الرطب، وتتفاعل مع الماء. ويؤدي تغيير كيمياء الحوض إلى إبطاء هذه العملية إلى مستوى مقبول. وسياسة حكومة المملكة المتحدة هي إعادة معالجة وقود ماغنوكس المستهلك.

واستناداً إلى معايير التخزين الجيدة، تدعم الأدلة المتوفرة حتى الآن أن النقل بعد التخزين المؤقت لا ينبغي أن يثير أي مخاوف.

١٠-٣- هياكل التخزين الرطب والتخزين الجاف

هناك العديد من المواد المستخدمة في تخزين الوقود المستهلك، مثل المعادن والخرسانة والبوليمرات. وقد دُرس السلوك الطويل الأمد لهذه المواد أثناء مشروعي بفاست وسبار، والنتائج ملخصة في هذا المنشور.

والمجالات التي تم تحديدها حتى الآن على أنها تتطلب مزيداً من الدراسة هي إدارة الشيخوخة والقضايا المتعلقة بالتشقق الناتج عن التآكل الإجهادي في نظم التخزين الجاف.

وأحد المجالات التي يوجد فيها مستوى عالٍ من المعرفة هو السلوك الطويل الأمد للسِّدادات المُحكمة المعدنية. وقد أثبتت الخبرة المتراكمة المستمدة من السدادات المُحكمة المعدنية المستخدمة في الميدان ومن الاختبارات الطويلة الأمد داخل المباني متانة هذه السدادات. وبناءً على هذه الخبرة، يوحي تمديد الاتجاهات إلى أطر زمنية أطول بأن فترات التخزين التي تتراوح بين ٤٠ و٦٠ عاماً لا ينبغي أن تكون مشكلة. ومن أجل تحسين هذا التنبؤ الطويل الأمد، يجري توسيع مجموعة البيانات الحالية عن طريق القيام بمزيد من الاستقصاءات.

١٠-٤- الرصد (في التخزين الرطب والتخزين الجاف)

تُرصد سلامة الوقود المستهلك المودع في التخزين الرطب بصفة راتبة من خلال أخذ عينات من مياه الحوض. وتحديد اتجاه عينات المياه مهم لإيجاد دلالة مبكرة على أي ظروف متدهورة.

وغالباً ما يُستدل على استمرار سلامة الوقود المستهلك المودع في التخزين الجاف من خلال رصد درجة الحرارة الخارجية والاحتواء (بالنسبة للأنظمة المغلقة بمزاليج، يكون ذلك في العادة رصداً دائماً لأداء نظام الغطاء لوظائفه)، وإن كانت الدراسات حول كيفية معالجة هذه المشكلة قد اكتسبت بعض الزخم في السنوات الأخيرة.

١٠-٥- سلامة الوقود (الوقود المسرِّب/المصاب بتلف)

الخبرة العامة للتخزين الرطب الطويل الأمد للوقود المستهلك ذي الكسوة المعيبة هي أن العيب لا يتدهور أو ينتشر مع مرور الزمن [٢، ٤]. والاستثناءان من ذلك هما الوقود المودع في العلب والمشبع بالماء أو المملوء بالماء، ووقود ماغنوكس. وفي

البداية يؤدي نضّ النشاط الإشعاعي من عيب في كسوة الوقود إلى إطلاق مخزون الفجوة، إذا كان حجم العيب أكبر من ثقب إبرة، ويلي ذلك انخفاض كبير في المعدل الأساسي للنضَ، الذي يتناقص وفقاً لعمر النصف للسيزيوم[١٣٧].

وفي حالة تخزين الوقود المعيب تخزيناً جافًّا في بيئة غاز خامل عند درجات حرارة عالية، يظل الوقود دون تغيير [٢]. وبالمثل، لم يكن هناك انتشار للعيب في كسوة الوقود المصابة بعيب مخترق للجدار والمخزونة في هواء جاف عند درجات حرارة تصل إلى ١٥٠ مئوية؛ أي أقل من درجة الحرارة التي يتحول عندها ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) إلى ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8).

المراجع

[١] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Water Reactor Spent Fuel in Water Pools – Survey of World Experience, Technical Report Series No 218, IAEA, Vienna (1982).

[٢] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research, IAEA-TECDOC-1343, IAEA, Vienna, (2003).

[٣] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Behaviour of Spent Fuel Assemblies During Extended Storage, (BEFAST-I), IAEA-TECDOC-414, IAEA, Vienna (1987).

[٤] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research: Final Report of a Coordinated Research Project (SPAR-II), IAEA-TECDOC-1680, IAEA, Vienna (2012).

[٥] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extended Storage of Spent Fuel, (BEFAST-II), IAEA TECDOC-673, IAEA, Vienna (1992).

[٦] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Further analysis of extended storage of spent fuel (BEFAST III), IAEA-TECDOC-944, IAEA, Vienna (1997).

[٧] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Performance Assessment and Research: Final Report of a Coordinated Research Project on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR-III) 2009-2014, IAEA-TECDOC-1771, IAEA, Vienna (2015).

[٨] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، مبادئ الأمان الأساسية، سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة، العدد SF-1، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٧).

[٩] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها، سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية، العدد رقم GSR Part 5، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٩).

[١٠] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، أمان مرافق دورة الوقود النووي، سلسلة معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية، العدد رقم SSR-4، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠١٨).

[١١] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Fuel Cycle Facilities, Safety Standards Series No. SSG–41, IAEA, Vienna (2016).

[١٢] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Fuel Cycle Research and Development Facilities, Safety Standards Series No. SSG–43, IAEA, Vienna (2017).

[١٣] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design of Fuel Handling and Storage Systems in Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G–1.4, IAEA, Vienna (2003).

[١٤] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Spent Nuclear Fuel, Safety Standards Series No. SSG–15, IAEA, Vienna (2012).

[١٥] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for the Processing, Handling and Storage of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. GS-G-3.3, IAEA, Vienna (2008).

[١٦] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Radioactive Waste Management in the Operation of Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-2.7, IAEA, Vienna (2002).

LE BIEZ, V., MACHIELS, A., SOWDER, A., “Advanced Nuclear Fuel Cycles – Main Challenges And Strategic Choices”, GLOBAL 2013, Salt Lake City, Utah, September 30–October 3 (2013), paper 7802. [١٧]

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Survey of wet and dry spent fuel storage, IAEA-TECDOC-1100, IAEA, Vienna (1999). [١٨]

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Spent Fuel Storage Operation – Lessons Learned, IAEA-TECDOC-1725, IAEA, Vienna (2013). [١٩]

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radioactive Waste Management Glossary 2003 Edition, Vienna (2003). [٢٠]

THOMAS, L.E., EINZIGER, R. E., Effect of fission products on air-oxidation of LWR spent fuel, J. Nucl. Mater., 201 (1993) 310-319. [٢١]

SASAHARA, A., MATSUMURA, T., PAPAIOANNOU, D., “Examinations of Spent Fuels during Interim Storage (5) – Oxidation Behavior of Irradiated UO_2 Fuel in Air”, Autumn meeting of the Atomic Energy Society of Japan (2003). [٢٢]

SPILKER, H., PEEHS, M., DYCK, H.P., KASPAR, G., NISSEN, K., Spent LWR Fuel Dry Storage in Large Transport and Storage Casks after Extended Burnup, J. Nucl. Mater. 250 (1997) 63-74. [٢٣]

FERRY, C. et al., Référentiel Scientifique sur l’Evolution à long terme des Combustibles Usés, Commissariat à l’Energie Atomique, RT DPC/SECR 04-032, Gif-sur-Yvette (2005). [٢٤]

QUECEDO M. et al., “Results of thermal creep on highly irradiated ZIRLO™”, paper presented at TOP FUEL 2008, Seoul, Republic of Korea, October (2008) Paper 8063. [٢٥]

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, “Creep Modeling and Analysis Methodology for Spent Fuel in Dry Storage”, EPRI 1003135, EPRI, Palo Alto, CA. (2001). [٢٦]

RASHID, J., MACHIELS, A., “Examination of the creep rupture phenomena and the development of an acceptance criterion for spent fuel storage”, Storage of Spent Fuel from Power Reactors, IAEA-CSP-20, IAEA, Vienna (2003) 431–441. [٢٧]

GRUSS, K. A., BROWN, C. L., HODGES, M. W., “U.S. Nuclear Regulatory Commission Acceptance Criteria and Cladding Considerations for the Dry Storage of Spent Fuel”, paper presented at TOP FUEL 2003, Wurzburg, Germany (2003). [٢٨]

PEEHS, M., GARZAROLLI, F., GOLL, W., “Assessment of Dry Storage Performance of Spent LWR Fuel Assemblies with Increasing Burnup”, Storage of Spent Fuel from Power Reactors, IAEA-TECDOC-1089, IAEA, Vienna (1999) 313–324. [٢٩]

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, “Creep as the Limiting Mechanism for Spent Fuel Dry Storage”, EPRI 1001207, EPRI, Palo Alto, CA (2000). [٣٠]

AOMI, M., et al., “Evaluation of hydride reorientation behavior and mechanical property of high burnup fuel cladding tube in interim dry storage”, Zirconium in the Nuclear Industry: 15th Int. Symp., STP 1505, ASTM, West Conshohocken (2009) 651. [٣١]

MCMINN, A., DARBY, E.C., SCHOFIELD, J.S., “The terminal solid solubility of hydrogen in zirconium alloys”, Zirconium in the Nuclear Industry: 12th Int. Symp., STP 1354, ASTM, West Conshohocken, PA (2000) 173-195. [٣٢]

KAMMENZIND, B.F., FRANKLIN, D.G., PETERS, H.R. AND DUFFIN, W.J. “Hydrogen pickup and redistribution in alpha-annealed Zry-4,” Zirconium in the Nuclear Industry: 11th Int. Symp., STP 1295, ASTM, West Conshohocken, PA (1996) 338–370. [٣٣]

[٣٤] COLAS, K., Fundamental Experiments On Hydride Reorientation In Zircaloy**,** PhD Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Mechanical and Nuclear Engineering (2012).

[٣٥] BILLONE, M.C., BURTSEVA, T.A., EINZIGER, R.E., Ductile-to-brittle transition temperature for high burnup cladding alloys exposed to simulated drying–storage conditions, J. Nucl. Mater., **433** (2013) 431–448.

[٣٦] SABOL, G.P., "In-reactor corrosion performance of ZIRLO™ and Zry-4", Zirconium in the Nuclear Industry: 10th Int. Symp., STP 1245, ASTM, West Conshohocken, PA (1994) 724–744.

[٣٧] SAWATZKY, A., Hydrogen in Zircaloy-4: Its Distribution and Heat of Transport, J. Nucl. Mater., **2**, No.4 (1960) 321-328.

[٣٨] HONG, H.S., KIM, S.J., LEE, K.S., Thermotransport of Hydrogen in Zircaloy-4 and Modified Zircaloy-4, J. Nuc. Mat., **257** (1998) 15–20.

[٣٩] FORSBERG, K., MASSIH, A.R. Redistribution of Hydrogen in Zircaloy, J. Nucl. Mater., **172**, (1990) 130–134.

[٤٠] SASAHARA, A., MATSUMURA, T., TSUCHIUHI, Y., "Experiment of Hydrogen Migration under Temperature Gradient in Irradiated Cladding", 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Oct. 2–6, 2005, Kyoto, Japan, (2005) Paper #1036.

[٤١] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Effects of radiation and environmental factors on the durability of materials in spent fuel storage, IAEA-TECDOC-1316, IAEA, Vienna, (2002).

[٤٢] PARE, F.E., PATTANTYUS, P., HANSON, A.S., "MACSTOR: Dry spent fuel storage for the nuclear industry", Proc. Int. Conf. on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, Prague, Vol 1. ASME New York, NY (1993) 275–279.

[٤٣] SHEK, G.K., WASILUK, B.S., LAMPMAN, T., FREIRE-CANOSA, J., "Testing the susceptibility of CANDU fuel bundle endcap/endplate welds to delayed hydride cracking", paper presented at 10th CNS International Conference on CANDU Fuel, Ottawa, 2008.

[٤٤] KADARMETOV, I.M., BIBILASHVILI, Y.K., MEDVEDEV, A.V., "Evaluation of the maximum allowable temperature of WWER-1000 spent fuel under dry storage conditions", Proc. Int. Symp. on Safety and Engineering Aspects of Spent Fuel Storage, IAEA Proceedings Series STI/PUB/949, IAEA, Vienna (1995) 269–279.

[٤٥] VESELY, J., VALACH, M., FREJTICH, Z., PRIMAN, V., "Creep properties of non-irradiated Zr-1%Nb cladding tubes under normal and abnormal storage conditions", Storage of Spent Fuel from Power Reactors, IAEA-TECDOC-1089, IAEA, Vienna (1999) 305–312.

[٤٦] ZALIOTNYCH, B.A., NOVIKOV, YU.B., TIKHONOV, N.S., MAKARCHUK, T.F., TOKARENKO, A.I., KOZLOV, YU.V., RAZMASHKIN, N.V., "Investigation of the behaviour of WWER spent fuel rods at Novovoronezh NPP", Extended synopses International Symposium on Storage of Spent Fuel from Power Reactors, 9–13 November, 1998, IAEA-SM-352, IAEA, Vienna (1998).

[٤٧] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WWER-440 fuel rod experiments under simulated dry storage conditions, IAEA-TECDOC-1385, IAEA, Vienna (2004).

[٤٨] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, "Classifying the Condition of Spent Nuclear for Interim Storage and Transportation Based on Function", ISG-1 Rev. 2, U.S. NRC, Washington, DC (2007).

[٤٩] WOOD, B., “Fuel transfer operations” paper presented at NEI Used Fuel Management Conference, 5–7 May, Orlando, 2015.

[٥٠] RIDDER, R., “Fuel characterization challenges for pool offload at Kewaunee” paper presented at NEI Used Fuel Management Conference, 3–5 May, Orlando, 2016.

[٥١] DURBIN, S.G., LINGDREN, E.R., “Investigation of zirconium fires during spent fuel pool LOCAs”, paper presented at NEI Used Fuel Management Conference, Baltimore, 2011.

[٥٢] ZIGH, G., VELAZQUEZ-LOZADA, E.R., “Zirconium fire on pressurized water reactor (PWR) spent fuel pools (SFP)”, paper presented at U.S. NRC Regulatory Information Conference, Washington, DC, 2013.

[٥٣] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, “Consequence Study of a Beyond - Design Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark 1 Boiling Water Reactor”, NUREG-2161, U.S. NRC, Washington, DC (2014).

[٥٤] NUCLEAR ENERGY AGENCY, “Status Report on Spent Fuel Pools under Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accident Conditions”, NEA/CSNI/R(2015)2, NEA, Paris (2015).

[٥٥] FROST C. R. “Current Interim Used Fuel Storage Practice in Canada”, Ontario Hydro Nuclear Report N-03710-940052, Ontario Hydro (1994).

[٥٦] NUCLEAR DECOMMISSIONING AUTHORITY, MAGNOX Fuel Strategy: Contingency Options (2014), http://www.nda.gov.uk/publication/magnox-fuel-strategy-contingency-options-january-2014.

[٥٧] FLEISCH, J., “Analysis of spent fuel behaviour in dry storage cask demonstrations in FRG”, CONF-860417-Volume 1, Proceedings of 3rd International Spent Fuel Storage Technology Symposium/Work Shop, Seattle, PNNL (1986) S-254–262.

[٥٨] MCKINNON, M.A., STEWART, L., “Spent Nuclear Fuel Integrity during Dry Storage”, Storage of spent fuel from power reactors, IAEA-TECDOC-1089, IAEA, Vienna (1999) 297–302.

[٥٩] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, “Dry Cask Storage Characterization Project – Phase 1: CASTOR V/21 Cask Opening and Examination”, NUREG/CR-6745, U.S. NRC, Washington, DC (2001).

[٦٠] KUMANO, Y., “Integrity inspection of dry storage casks and spent fuels at Fukushima Daiichi nuclear power station”, paper presented at CRIEPI Int. Conf. ISSF 2010, Tokyo, 2010.

[٦١] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY., “Report of Investigation and Maintenance Results of the Dry Storage Casks at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, Technical Meeting on Spent Fuel Storage Options, IAEA-TM-45455, Vienna (2013).

[٦٢] BRADLEY, N., BROWN, G.A., “Interim dry storage of irradiated fuel and vitrified high activity level waste”, Nuclear Power Experience – Nuclear Fuel Cycle, Proceedings Series, IAEA-CN-42/142, IAEA, Vienna (1983) 863–874.

[٦٣] GRAVENOR, J.G., BLANCHARD, A., KENDALL, D.S., JACKSON, P.A., “Post-Irradiation testing of AGR element components in support of the Scottish Nuclear Limited dry store project”, Fuel Management and Handling, ISBN 0 7277 2033 3, BNES, London (1995) 128.

[٦٤] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Durability of spent nuclear fuel and facility components in wet storage, IAEA-TECDOC-1012, IAEA, Vienna (1998).

ISSARD, H., “Anticipating future needs for the transport and storage of spent fuel from evolutionary nuclear power reactors”, Proc. IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, 19–23 June 2006, IAEA, Vienna (2007) 341–351. [٦٥]

CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF ELECTRIC POWER INDUSTRY, Basis of Spent Nuclear Fuel Storage, ISBN978-4-900622-55-5, ERC Publishing Co. Ltd., Tokyo (2015) 274–289. [٦٦]

DICKSON, R.M., “Flexibility of the BNFL dry storage systems”, Storage of Spent Fuel from Power Reactors, IAEA-TECDOC-1089, IAEA, Vienna (1999) 195–200. [٦٧]

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Damaged Spent Fuel, IAEA NE series No. NF-T-3.6, IAEA, Vienna (2009). [٦٨]

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors, Technical Reports Series No. 388, IAEA, Vienna (1998). [٦٩]

PEEHS, M., BANCK, J., BOKELMANN, R., ―Spent fuel storage performance data and storage strategy assessment in nuclear power performance and safety‖, Proc. Int. Conf. Spent Fuel Management, Vienna, 1987, IAEA, Vienna (1988). [٧٠]

PEEHS, M., EINFELD, K., “Effects of long term dry storage of spent fuel”, Proc. of Int. HLRWM Conf., Las Vegas NV (1992). [٧١]

FORSYTH, R., JONSSON, T., “Experimental Study of Defect Power Reactor Fuel”, Final Report, Studsvik/ NF(P)-82/72 (1982). [٧٢]

JOHNSON, Jr., A.B., et al., Materials Behavior in Interim Storage of Spent Fuel, Trans. Am. Nucl. Soc. 43 (1982) pp. 314-315. [٧٣]

JÉGOU, C., CARABALLO, R., DE BONFILS, J., BROUDIC, V., PEUGET, S., VERCOUTER, T., ROUDIL, D., Oxidizing dissolution of spent MOX47 fuel subjected to water radiolysis: Solution chemistry and surface characterization by Raman spectroscopy, J. Nucl. Mater. **399** (2010) 68–80. [٧٤]

JOHNSON, Jr., A.B., et al., ‘Simulated Dry Storage Test of a Spent PWR Nuclear Fuel Assembly in Air”, Proceedings of Waste Management 85, Tucson, Arizona, USA, March 24-28 (1985). [٧٥]

HASTINGS, I.J., MCCRACKEN, D., “Behavior in Air at 175-400 C of Irradiated UO_2 Fuel”, Proceedings of Int. Workshop -Irradiated Fuel Storage: Operating Experience and Development Programs, Toronto, Canada, October 17-18 (1984), pp. 626-654. [٧٦]

OLSEN, C.S., “Fuel Rod and Crud Behavior Under Long-Term Dry Storage Conditions”, Proceedings of Int. Workshop - Irradiated Fuel Storage: Operating Experience and Development Programs, Toronto, Canada, October 17-18 (1984), pp.432-455. [٧٧]

CUNNINGHAM, M.E., et al., "Status of spent UO_2 oxidation studies supporting on dry storage of spent fuel", Paper presented at INMM Spent Fuel Management Seminar VIII, Washington D.C. (1991). [٧٨]

KOHLI, R., et al., The Behavior of Breached Boiling Water Reactor Fuel Rods on Long-Term Exposure to Air and Argon at 598 K, Nucl. Tech. 69, May (1985), pp.186-197. [٧٩]

قائمة المختصرات

بفاست	سلوك مجمَّعات الوقود المستهلك أثناء التخزين (BEFAST)
ث	ثانية
س	ساعة
سبار	تقييم وبحوث أداء الوقود المستهلك (SPAR)
سم	سنتيمتر
غم	غرام
الفريق العامل التقني	الفريق العامل التقني المعني بخيارات دورة الوقود النووي والتصرف في الوقود المستهلك
كاندو	المفاعل الكَنَدي الموقد باليورانيوم ومهدأ بالديوتريوم
كغم	كيلوغرام
م	متر
ماغنوكس	مغنيسيوم غير مؤكسِد (كسوة مصنوعة من سبيكة مغنيسيوم، المملكة المتحدة)
مم	مليمتر
موكس	وقود أكسيد مختلط
الوكالة	الوكالة الدولية للطاقة الذرية

المساهمون في الصياغة والاستعراض

Hanson, B.	المختبر الوطني لمنطقة شمال غرب المحيط الهادئ، واشنطن، الولايات المتحدة الأمريكية
Hillier, A.	مؤسسة سيلافيلد المحدودة، كمبريا، المملكة المتحدة
Issard, H.	شركة تي أن (TN) الدولية، مونتيني، لو بروتونو، فرنسا
Jussofie, A.	شركة بي غي تسد (BGZ) لتشغيل مرافق التخزين المؤقت، إسن، ألمانيا
Kyffin, J.	مؤسسة سيلافيلد المحدودة، كمبريا، المملكة المتحدة
Machiels, A.	معهد بحوث الطاقة الكهربائية، كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية
McManniman, L.	مؤسسة سيلافيلد المحدودة، كمبريا، المملكة المتحدة
Standring, P.	الوكالة الدولية للطاقة الذرية
Takáts, F.	شركة تي إس (TS) إينيركون، بودابست، هنغاريا

اجتماع للاستشاريين

فيينا، النمسا: ١١-١٥ آب/أغسطس ٢٠١٤

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
فيينا