

محطات تكرير الوقود المستهلك وتخزين النفايات المشعة

- مقدمة • محطات تكرير الوقود المستهلك
- نواتج تكرير الوقود المستهلك • النفايات المشعة
- تصنيف النفايات المشعة • معالجة النفايات وتخزينها
- التخزين النهائي للنفايات المشعة • نماذج

(٣، ١) مقدمة

الغاية الأساسية من عملية تكرير الوقود النووي المستهلك هي إعادة المواد الانشطارية غير المستهلكة إلى دورة الوقود النووي من جديد وتقليص حجم النفايات المشعة غير المرغوب في تخزينها. وتعدُّ عملية تكرير الوقود النووي المستهلك من أصعب العمليات الصناعية وأكثرها تعقيداً وخطورةً، ذلك ؛ لأنها تحتوي على مراحل متعددة من التفاعلات الكيميائية التي تتم تحت ظروف مستويات إشعاعية عالية جداً مما يحتم التصميم والتشغيل الجيدين للمحطة ، والتعامل مع المواد آلياً وعن بُعد ، بالإضافة إلى المحافظة الصارمة على سلامة البيئة.

بدأت عمليات تكرير الوقود النووي منذ أربعينيات القرن الماضي للحصول على مادة البلوتونيوم لإنتاج الأسلحة النووية خاصة. وبعد ذلك دخل العالم في إنتاج

القدرة الكهربائية عن طريق المفاعلات النووية مما أدى إلى تراكم كميات الوقود المستهلك التي يصعب التعامل معها. أنشأت حينئذ الدول المتقدمة تقنياً، مثل أمريكا، وبريطانيا، وفرنسا، وروسيا، محطات لتكرير الوقود النووي المستهلك. لكن في أواخر السبعينات قررت الولايات المتحدة الأمريكية لأسباب سياسية خاصة إيقاف برنامجها لتكرير الوقود النووي الناتج من مفاعلات القدرة الكهربائية بدعوى الحد من انتشار الأسلحة النووية، وحثت الدول الأخرى باتخاذ النهج نفسه، ونجحت في إقناع بعض الدول، مثل السويد وكندا، لكنها لم تنجح في إقناع الآخرين، مثل فرنسا وبريطانيا، والاتحاد السوفياتي السابق، واليابان، والصين، والهند في التخلي عن تكرير الوقود النووي المستهلك وإنشاء محطات لذلك. ومن ذلك الحين أصبح في العالم اتجاهان، ينص الأول منهما على عدم تكرير الوقود النووي المستهلك وتخزينه كما هو وقتياً أو نهائياً في طبقات جيولوجية ثابتة في باطن الأرض. وينص الثاني على تكرير الوقود النووي المستهلك والاستفادة من المواد الانشطارية مع تقليص حجم النفايات المشعة وتخزينها وقتياً بالنسبة للمواد المشعة التي لها عمر نصف قصير نسبياً ودفن النفايات ذات العمر نصف الطويل في باطن الأرض.

ستتطرق في هذا الفصل إلى شرح مكونات الوقود النووي المستهلك، وطرائق التكرير المتاحة، والتعامل مع نواتج عملية التكرير هذه، والتطرق إلى تقنية المحطات الخاصة بذلك. بعد ذلك سنتناول موضوع النفايات المشعة وتصنيفها، وطرائق تخزينها، والتقنيات اللازمة لتحويلها قبل دفنها النهائي في مقابر خاصة في باطن الأرض.

(٣،٢) محطات تكرير الوقود المستهلك

تُمثل محطات تكرير الوقود النووي المستهلك آخر حلقة في دورة الوقود التي تبدأ باستخراج اليورانيوم وتخصيبه، ثم تصنيع الوقود واستهلاك جزء منه في المفاعلات النووية، ثم تكريره في النهاية وإعادة المواد الانشطارية للتخصيب، وتصنيع الوقود من جديد. وتُعد محطات تكرير الوقود النووي المستهلك من المنشآت الضخمة التي تحتوي

على أجزاء متعددة لكل منها وظيفة محددة لمعالجة الوقود بتقنيات عالية تعمل آلياً وعن بُعد بسبب مستوى الإشعاع العالي في جل أجزاء المحطة.

(٣, ٢, ١) الوقود النووي المستهلك

عندما يُوضع الوقود النووي الجديد في قلب المفاعل ويتم تشغيله تحصل داخله الانشطارات النووية لنوى اليورانيوم وتنتج طاقة حرارية عالية تستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية. وتنتج عملية الانشطار هذه بالإضافة إلى ذلك عناصر جديدة ثقيلة، مثل البلوتونيوم وعناصر مشعة أخرى تسمى بشظايا الانشطار. وهكذا، فإن تركيبة عناصر الوقود النووي داخل المفاعل تتغير مع الزمن. وتستنفذ شيئاً فشيئاً كميات اليورانيوم الانشطاري (^{235}U) من الوقود وتقل كفاءته بعد مدة تتراوح بين سنة وثلاث سنوات. عند ذلك يتم تعويض جزئي للوقود الأصلي بوقود جديد للمحافظة على كفاءة المفاعل واستمرار عملية الانشطار المتسلسل داخل قلب المفاعل. ويسمى الوقود المستخرج من المفاعل عندئذٍ بالوقود النووي المستهلك أو المستنفذ الذي يحتوي عادة على حوالي ٩٦٪ من اليورانيوم غير المستهلك، و٣٪ من البلوتونيوم، و١٪ من عناصر شظايا الانشطار التي تعدّ نفايات مشعة خطيرة. وبما أن جل مواد الوقود المستهلك لا تزال صالحة للاستعمال، فإن عملية تكريره تسعى إلى فصل اليورانيوم والبلوتونيوم عن النفايات لإعادة استعمالهما من جديد في دورة الوقود النووي.

(٣, ٢, ٢) تكرير الوقود النووي المستهلك

يُوضع الوقود النووي المستهلك مباشرة عند استخراجها من المفاعل في مخازن خاصة قرب المفاعل لمدة ستة أشهر أو سنة لكي يفقد جزءاً كبيراً من طاقته الحرارية ونشاطه الإشعاعي الخاص بالعناصر ذات العمر النصفى القصير. هذه المخازن هي أحواض من الماء تكون عادة تحت الأرض وتصمم بشكل يمنع الوصول إلى الكتلة الحرجة عند غمر حزم الوقود النووي المستهلك فيها، ويعمل الماء على تبريده من ناحية وحماية البيئة من الإشعاعات من ناحية أخرى. بعد فترة التبريد، يُوضع حزم الوقود النووي المستهلك في حاويات خاصة لنقلها حسب توصيات الوكالة الدولية

للمحطة النووية إلى أماكن التخزين المؤقتي، أو إلى محطات التكرير. يُوضح الشكل رقم (٣، ١) الحاويات الخاصة التي تحتوي على طبقات متعددة من المواد لحماية الوقود وتلوث البيئة أثناء النقل.



الشكل رقم (٣، ١). حاوية لنقل الوقود النووي المستهلك [٣٩].

عندما يصل الوقود النووي المستهلك إلى محطة التكرير يُخزن لفترات زمنية حسب نوع الوقود قبل بداية التكرير. وتتلخص عملية التكرير في عدة مراحل أساسية كما هو موضح في الشكل رقم (٣، ٢) وأهمها مرحلة قطع أقلام الوقود، ثم إذابتها في حامض النتريك. تأتي بعد ذلك مرحلة الفصل الكيميائي لمكونات السائل الناتج إلى ثلاثة أنواع بمساعدة التفاعلات الكيميائية المتتالية. يحتوي النوع الأول على اليورانيوم، والثاني على البلوتونيوم، والثالث على عناصر شظايا الانشطار المشعة. أما المرحلة الأخيرة من التكرير فهي تخصص بإنتاج ثاني أكسيد اليورانيوم، وثاني أكسيد البلوتونيوم، وتركيز المواد المشعة المتبقية، وخفض حجمها وتصنيفها إلى أنواع مختلفة من النفايات ثم تخزينها. ويوضح الشكل رقم (٣، ٢) أهم مراحل عملية تكرير الوقود المستهلك.



الشكل رقم (٣،٢). أهم مراحل عملية تكرير الوقود النووي المستهلك.

أجريت أبحاث كثيرة في مجال تكرير الوقود النووي المستهلك ، ولا تزال حتى اليوم لابتكار طرائق تكرير جديدة أو تحسين الطرائق المستعملة حالياً. وستناول الآن شرح طريقة التكرير "بيراكس" الأكثر استعمالاً ونجاحاً حتى اليوم.

(٣،٢،٣) طريقة تكرير الوقود بيراكس (Purex)

أهم طرائق تكرير الوقود النووي المستهلك اليوم في العالم على المستوى الصناعي والتجاري ، طريقة بيراكس التي تعني استخلاص البلوتونيوم واليورانيوم بالمذيب. تتكون هذه الطريقة من خمس مراحل مهمة :

(٣،٢،٣،١) المرحلة الأولى

تختص هذه المرحلة بتحضير الوقود قبل إذابته في سائل حامض النتريك ، وذلك لفك أقلام حزم الوقود عن بعضها ، ثم إزالة غلاف الأقلام. وتختلف طرائق إزالة

الغلاف حسب نوع الوقود ومادة الغلاف، فمنها ما يكون ميكانيكياً أو كيميائياً. فإذا كان الوقود على شكل معدن مغلف بالألمينيوم أو الحديد غير قابل الصدأ، تُقص أطراف أقلام الوقود ويُشق الغلاف على الطول ثم تُستخرج أقراص مادة الوقود. وتتوالى هذه العمليات ميكانيكياً وآلياً في غرف لها جدران سميكة من الخرسانة، ومواد أخرى للحماية من الإشعاع. يمكن أيضاً إزالة الغلاف كيميائياً بإذابته في محلول كيميائي مناسب مثل أكسيد الصوديوم NaOH أو حامض السلفر H_2SO_4 بالنسبة لغلاف الحديد غير قابل الصدأ.

أما إذا كان الوقود على شكل أكسيد اليورانيوم UO_2 ومغلفاً بالزركونيوم، فغالباً ما ينتفخ الوقود تحت تأثير النيوترونات، ويتمدد فيلتصق بداخل الغلاف مما يجعل الطريقة الميكانيكية سابقة الذكر غير مجدية لإزالة الوقود تماماً عن الغلاف. وفي هذه الحالة يجب قص أقلام الوقود إلى قطع صغيرة ميكانيكياً وآلياً عن بُعد. بعد ذلك تبدأ المرحلة الثانية بإذابة الوقود فقط كيميائياً وتنقية قطع الغلاف التي تبقى صلبة في المحلول.

(٢, ٣, ٢, ٣) المرحلة الثانية

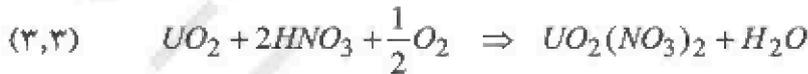
ستركز في هذه المرحلة على إذابة الوقود بدون المساس بالغلاف، وهي الطريقة الأكثر استعمالاً والمناسبة لجلل الوقود النووي المستخدم اليوم الذي عادة ما يكون على شكل ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2)، أو خليط مع ثاني أكسيد البلوتونيوم (Mox). وتتلخص هذه المرحلة في وضع قطع أقلام الوقود في حامض النيتريك (HNO_3)، الذي له خاصية إذابة الوقود فقط مما يُسهل عملية تصفية المحلول من قطع غلاف الزيركونيوم، التي تعدُّ من النفايات. كذلك ترشح الغازات في هذه المرحلة لما فيها من الإشعاعات ومعالجتها كنفايات أيضاً.

وتجدر الإشارة إلى أنه كلما زاد تركيز حامض النيتريك، زادت سرعة ذوبان

الوقود وفق المعادلات الكيميائية الآتية.



أثناء هذه التفاعلات يُضاف من حين إلى آخر كمية من الأكسجين ويصبح التفاعل الناتج كما يلي:



وعند تكثيف بخار الماء وغازات النيتريك التي تتراكم في أعلى الوعاء تُحول إلى حامض النيتريك وإعادته من جديد إلى خط الإنتاج.

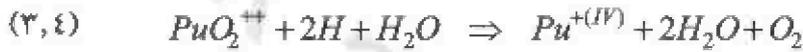
(٣,٢,٣,٣) المرحلة الثالثة

تتميز هذه المرحلة بفصل عناصر شظايا الانشطار وبعض عناصر الأكتينيد الثقيلة ($Z > 94$) عن اليورانيوم والبلوتونيوم، وتتم هذه العملية بإضافة مذيب ثاني عضوي لمحلول حامض النيتريك الناتج من آخر المرحلة الثانية. يحتوي المذيب العضوي على ٢٠٪ إلى ٤٠٪ من التريبتل الفوسفات (TBT) والكيروزين عديم الرائحة. وبعد خلط جيد ينقسم السائل إلى جزئين، يحتوي الأول على نيتريت اليورانيوم ونيتريت البلوتونيوم فقط، ويحتوي الجزء الثاني على بقية عناصر شظايا الانشطار المتبقية في حامض النيتريك. وباستخدام طريقة استخلاص سائل - سائل بالمذيبات يُفصل السائلان عن بعضهما، فيوجه سائل حامض النيتريك بما فيه من عناصر شظايا الانشطار المشعة إلى وحدة معالجة النفايات، أما سائل نيتريت اليورانيوم والبلوتونيوم فيوجه إلى وحدة ثانية لفصلهما عن بعضهما.

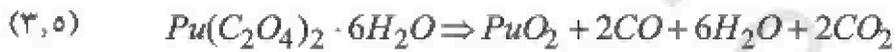
(٣,٢,٣,٤) المرحلة الرابعة

تُخص هذه المرحلة بفصل البلوتونيوم عن اليورانيوم، وذلك بالاستفادة من اختلاف حالة أكسدة كل منهما في محلول التريبتل الفوسفات (PTB) والكيروسين.

وعند إضافة أيونات الحديد والسيلفات إلى المحلول الناتج في نهاية المرحلة الثالثة تتم عملية اختزال البلوتونيوم من الحالة الرابعة Pu(VI) إلى الحالة الثالثة Pu(III)، أما اليورانيوم فيبقى على حالته السداسية الأصلية U(VI) الذائبة في المحلول. عند ذلك يصبح نيتريت البلوتونيوم Pu(III) غير ذائب في المحلول، مما يسهل فصله عن اليورانيوم الذي يبقى ذائباً في المحلول. وتنتهي المرحلة الرابعة بتركيز البلوتونيوم وإعادته إلى الحالة الرابعة من جديد لترسيبه وتنقيته، وتتم هذه العملية بتسخين محلول البلوتونيوم مع أيروجين البروكسايت عند درجة حرارة ٦٠° لتحويل البلوتونيوم إلى الحالة الرابعة وفق التفاعل الآتي:

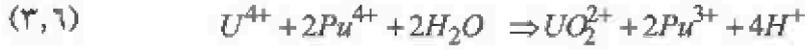


بعد ذلك يُنقى البلوتونيوم باستخدام تبادل الأيونات بالريزين والتخلص من باقي حامض النيتريك من خلال التبخير والترسيب ليصبح خالياً من الشوائب. ويمكن عند ذلك تحويل البلوتونيوم إلى معدن (Pu)، لكن غالباً ما يُحول إلى ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO₂) ليكون جاهزاً للاستخدام كوقود لبعض المفاعلات النووية. وتتم هذه العملية بحرق أكسالات البلوتونيوم عند ٣٠٠° درجة في فرن كهربائي لمحلول ثاني أكسيد البلوتونيوم بنسبة نقاوة وفق التفاعل الآتي:



(٣,٢,٣,٥) المرحلة الخامسة

تهتم هذه المرحلة بتنقية اليورانيوم وتحويله إلى الأكسيد الثلاثي (UO₃) ليصبح جاهزاً للتخصيب وإعادته إلى دورة الوقود النووي. ولهذا يُضاف حامض النيتريك المخفف إلى المحلول المتبقي في آخر المرحلة السابقة التي تحتوي على اليورانيوم وبعض الشوائب. وبعد التركيز بالتبخير ينقل نيتريت اليورانيوم إلى وحدة التنقية للتخلص من شوائب البلوتونيوم بالاختزال وفق المعادلة الآتية:



ثم يتم ترشيح الناتج بمحلول السلكا للتخلص من شوائب شظايا الانشطار وخاصة من عصري الزيركونيوم (Zr) والنيبيديوم (Nb). وأخيراً يُحوّل نيترات اليورانيوم النقي إلى ثالث أكسيد اليورانيوم (UO_3) عن طريق التبخير والحرق ليصبح جاهزاً للتخصيب. ويوضح الشكل رقم (٣,٣) المراحل الخمس المهمة لطريقة تكرير الوقود النووي المستهلك (بيراكس).



الشكل رقم (٣,٣). المراحل الخمس لطريقة تكرير الوقود النووي المستهلك (بيراكس) [٣٢].

(٤, ٢, ٣) طرائق التكرير الأخرى

يمكن تقسيم طرائق تكرير الوقود إلى نوعين، الأول الطرائق السائلة، والثاني الطرائق الصلبة. أبرز الطرائق السائلة هي طريقة تكرير بيراكس، التي تعتمد على استخلاص نظائر الوقود النووي المختلفة بالمذيب. أما النوع الثاني فهو يختص بطرائق معالجة الوقود على الحالة الصلبة.

(١, ٤, ٢, ٣) الطرائق السائلة

تطورت طريقة تكرير بيراكس المشهورة إلى طرائق فرعية حسب الغاية من التكرير والحد من كميات النفايات السائلة، فمثلاً طريقة التكرير يوراكس (UREX) هي شبيهة بطريقة بيراكس، إلا أنها لا تحتوي على مرحلة استخلاص البلوتونيوم، وترك هذه المادة مع نفايات عناصر شظايا الانشطار والاهتمام باستخلاص اليورانيوم فقط. أما طريقة التكرير ترويكس (TRUOX) فإنها شبيهة بطريقة تكرير بيراكس، إلا أنها تحتوي على مرحلة إضافية لاستخلاص عناصر نفايات الأكتينيد، مثل الأميريسيوم (Am)، والكيريوم (Cm) اللذين لهما نشاط إشعاعي ألفا وعمر نصف طويل جداً. وهكذا بالنسبة لطرائق التكرير السائلة الأخرى مثل ديماكس (DIAMX) أوسانكس (SANEX)، التي هي طرائق لا تزال في مرحلة البحث والتطوير لفصل بعض الأنواع الخاصة من النظائر المشعة، أو استخدام سوائل جديدة لا تحتوي على غازات ملوثة للبيئة أثناء حرق النفايات.

(٢, ٤, ٢, ٣) الطرائق الصلبة

يتم منذ فترة تطوير طرائق تكرير جديدة تعتمد على علم المعايير، والغاية منها هو استخلاص العناصر المفيدة من الوقود النووي المستهلك بدون إذابته في السوائل، مثل الماء، وحامض النيتريك اللذين يشكلان كميات كبيرة من النفايات بالنسبة لطرائق التكرير السائلة. ولا تزال الطرائق الصلبة في مرحلة الأبحاث، لكن من المتوقع أن تؤدي دوراً في المستقبل. أهم هذه الطرائق هي بيرو-أ (PYRO-A)، وبيرو-ب (PYRO-B)،

وتختص الأولى بمعالجة الوقود النووي المستهلك ، أما الثانية فتهتم بمعالجة نوع خاص من الوقود الناتج من المفاعلات السريعة المصممة للتخلص من العناصر الثقيلة (ما فوق اليورانيوم.. $Z > 92$).

تعمل طريقة تكرير الوقود المستهلك (بيرو- أ) على فصل عناصر الأكتينيدات الثقيلة ما فوق اليورانيوم ($Z > 92$) والعناصر الأخرى. ($Z \leq 92$) هذه الطريقة شبيهة بطلاء المعادن باستخدام التيار الكهربائي حيث يُوضع الوقود في سلة من الملح المذاب مكونة الأنود، أما الكاتود فتكون على شكل معدن صلب ومعدن ذائب مثل الكادميوم أو البزميت، وعند تمرير تيار كهربائي في النظام يتجمع اليورانيوم على الكاتود الصلبة، وعناصر الأكتينيدات الثقيلة الأخرى في كاتود المعدن الذائب، أما باقي عناصر شظايا الانشطار فتمتص في الملح الذائب. ميزة هذه الطريقة أن كميات النفايات المشعة تكون قليلة وذات عمر نصف قصير إلى حد ما، أما باقي العناصر الثقيلة واليورانيوم يمكن إعادتها كوقود للمفاعلات النيوترونات السريعة.

طريقة تكرير الوقود النووي (بيرو-ب) هي شبيهة بطريقة التكرير السابقة، إلا أنها صُممت لمعالجة الوقود المستهلك، الذي لا يحتوي عادة على اليورانيوم بل على العناصر الثقيلة فقط ($Z > 92$). يكون هذا الوقود الخاص ناتجاً عن مفاعلات النيوترونات السريعة، أو المعجلات المصممة لانشطار نوى العناصر الثقيلة غير الطبيعية ($Z > 92$) للتخلص من النفايات ذات العمر نصف الطويل جداً، وجعلها مثل النفايات الأخرى، التي لا تحتاج إلى مراقبة أكثر من بضعة مئات من السنين، عوضاً عن آلاف السنين.

(٣,٣) نواتج تكرير الوقود المستهلك

يتكون الوقود النووي المستهلك بعد فترة التبريد، وعند دخوله محطة التكرير من عناصر مختلفة ونظائر تم إنتاجها أثناء انشطار نوى اليورانيوم في قلب المفاعل.

ويمكن تقسيمها إلى ثلاثة أنواع مبدئياً، أهمها نظائر اليورانيوم المختلفة، التي تحتوي على النسبة الأكبر حوالي ٩٦٪ ونظائر البلوتونيوم بنسبة حوالي ١٪ والعديد من النظائر الأخرى، أو ما يُسمى بعناصر شظايا الانشطار (حوالي ٣٪). تؤدي عملية تكرير الوقود النووي المستهلك، كما تم شرحه، إلى إعادة اليورانيوم والبلوتونيوم إلى دورة الوقود النووي، وتبقى مشكلة شظايا الانشطار وبعض عناصر الأكتينيدات الثقيلة التي تعدّ نفايات مشعة خطيرة يجب معالجتها للحد من تلوث البيئة.

(٣,٣,١) نظائر اليورانيوم

يحتوي اليورانيوم الناتج عن عملية تكرير الوقود النووي المستهلك داخل المفاعلات الحرارية للماء الخفيف على جل نظائر اليورانيوم مثل ^{238}U , ^{236}U , ^{235}U , ^{233}U , ^{232}U وتظهر نظائر اليورانيوم ^{236}U , ^{233}U , ^{232}U بنسب قليلة جداً مقارنةً بنسبة اليورانيوم ^{238}U التي تساوي حوالي ٩٩٪. أما نسبة النظير ^{235}U الذي لم ينشطر داخل قلب المفاعل والمتبقية في الوقود، فهي تساوي حوالي ٠,٩٪. ولا تمثل إعادة اليورانيوم الناتج من عملية التكرير إلى محطات التخصيب وتصنيع الوقود مشكلة في حد ذاتها، على الرغم من التلوث البسيط بالنظائر ^{232}U , ^{236}U , ^{233}U لوحدات التخصيب مقارنةً بوحدات تخصيب اليورانيوم الطبيعي؛ ولهذا يُستعمل هذا النوع من اليورانيوم مثل غيره لتصنيع وقود المفاعلات النووية الحرارية، أو وقود خليط ثاني أكسيد اليورانيوم والبلوتونيوم موكس (Mox).

(٣,٣,٢) نظائر البلوتونيوم

تؤدي عملية تكرير الوقود المستهلك إلى إنتاج كميات مختلفة من نظائر البلوتونيوم ^{236}Pu - ^{244}Pu حسب نوع المفاعل كما هو موضح في الجدول رقم (٣,١) الآتي:

الجدول رقم (١، ٣). إجمالي نظائر البلوتونيوم الناتجة عن عملية تكرير الوقود المستهلك كغم/ ميقاوات - سنة
(Kg/MWe-year).

نوع المفاعل	إجمالي البلوتونيوم	البلوتونيوم الانشطاري
مفاعلات الماء الخفيف	0.26	0.18
مفاعلات الماء الثقيل	0.51	0.25
مفاعلات الجرافيت والغاز	0.58	0.43
مفاعلات الغاز المتقدمة	0.22	0.13
مفاعلات النيوترونات السريعة	1.35	1.0- 0.7

نظائر البلوتونيوم الانشطارية هي خاصة ^{241}Pu و ^{239}Pu ، أما النظائر الأخرى على الرغم من قلة نسبتها فتعدُّ عائقاً لنقاوة البلوتونيوم. وبما أن عمر نصف النظير ^{241}Pu حوالي ١٤ سنة، فلا يجب تخزينه فترات طويلة بل الاستفادة منه قبل أن يتحول إلى نظائر غير انشطارية. استعمل البلوتونيوم في أول الأمر لإنتاج الأسلحة النووية، إلا أن جل الكميات المنتجة اليوم تُستعمل لإنتاج الوقود النووي موكس للمفاعلات النووية الحرارية، أو مفاعلات النيوترونات السريعة.

تجدر الإشارة إلى أن تكرير وقود المفاعلات موكس الذي يحتوي على نسب عالية نسبياً من البلوتونيوم (١٠-١٥٪)، يزيد عملية التكرير تعقيداً بسبب انخفاض نسبة النظائر الانشطارية (^{241}Pu , ^{239}Pu) وزيادة نسب النظائر الأخرى مثل ^{238}Pu المنتج لأشعة جاما والنيوترونات؛ ولهذا فإن تكرار عمليات التكرير تحتاج إلى عناية وحماية أكبر أثناء عمليات التكرير وإنتاج الوقود موكس.
(٣، ٣، ٣) عناصر شظايا الانشطار (النفايات)

تؤدي عملية انشطار نوى اليورانيوم داخل قلب المفاعل إلى إنتاج عناصر كثيرة متوسطة الكتلة الذرية (A) كلها نظائر مشعة في البداية لكن بعضها يصل إلى الحالة المستقرة بعد فترة قصيرة بالتفكك حسب عمر نصفها. وتعدُّ هذه النظائر من النفايات إلا القليل منها يتم فصله للاستفادة من نشاطه الإشعاعي للاستخدامات الطبية

والصناعية والزراعية. تتوزع عناصر شظايا الانشطار من الزنك ($Z=30$) إلى اللتتايد، ($Z = 57-71$)، مكونة في وسط جدول العناصر قمتين لهما نسب متفاوتة. وتحتوي القمة الأولى للتوزيع على عناصر Pd, Rh, Ru, Te, Mo, Zr، أما قمة التوزيع الثانية فتحتوي على عناصر Nd, Ce, La, Cs, Xe, I. جل هذه العناصر لها عمر نصف قصير، مما يجعلها تتحول إلى عناصر مستقرة بعد فترة، إلا أن بعضها له عمر نصف متوسط أو طويل (٣٠ سنة) مثل ^{129}I , ^{99}Te , ^{137}Cs , ^{90}Sr ، مما يُحتم حفظها وتخزينها مدة طويلة.

تمثل عناصر شظايا الانشطار مع القليل من عناصر الأكتينيد الثقيلة ($Z > 92$) حوالي ٣٪ من كتلة الوقود النووي المستهلك. وتحتاج هذه النفايات مع بعض السوائل الناتجة عن عملية التكرير إلى معالجة وتخزين. وسنتطرق إلى شرح كل هذا في الجزء الأخير من هذا الفصل.

(٣, ٤) النفايات المشعة

تؤدي عملية تكرير الوقود النووي المستهلك إلى إنتاج كميات مختلفة الحجم والنشاط الإشعاعي من النفايات، مما يحتم تصنيفها ومعالجة كل منها على حدة، وتنتج هذه النفايات وفق الحالات الثلاث للمادة: غازية، سائلة، وصلبة.

(٣, ٤, ١) النفايات الغازية

تنتج النفايات الغازية المشعة خاصة أثناء المرحلة الأولى من تكرير الوقود التي يتم فيها قص أقلام الوقود ميكانيكياً وإذابته لفصل الغلاف. ويمثل الأيودين (I_2) والريثينوم (RuO_4) أخطر الغازات المشعة للذان يتم حبسهما بنسبة حوالي ٩٩,٥٪ عند مخرج الغازات للوعاء، الذي تُذاب فيه قطع الوقود، وذلك عن طريق المرشحات وغسل الغازات وتنقيتها. كذلك يُحبس حوالي ٩٩٪ من الغازات الخاملة مثل الكريبتون ^{85}Kr بعد فصله بالتكثيف في أسطوانات ثم الاستفادة منه لاحقاً. أما

الأكسينون (Xe)، فعادةً ما يكون قد وصل إلى الحالة المستقرة بعد فترة حوالي سنة من تبريد الوقود.

تنتج عملية التكرير أيضاً كميات من غاز التريتيوم T_2 عند قص الأقطاب أو على شكل سائل (HTO) أثناء إذابة قطع الوقود. وتوجد طرائق كيميائية لتحويل هذا السائل إلى ماء ثقيل، وعلى الرغم من التكلفة العالية لهذه العمليات، إلا أن جزءاً من التريتيوم يُطلق في جو محطات التكرير بكميات تحددها القوانين المحلية والدولية. وكذلك الحال بالنسبة للكربون ^{14}C الذي يمكن تحويل حوالي ٨٠٪ منه إلى الحالة الصلبة، $CaCO_3$ وتسريح الباقي في الجو على شكل غاز ثاني أكسيد الكربون $^{14}CO_2$.

(٣، ٤، ٢) النفايات السائلة

تنتج النفايات السائلة في مختلف مراحل التكرير وأكثر السوائل نشاطاً إشعاعياً وخطورةً ما يفصل في المرحلة الثالثة من التكرير، حيث يحتوي حامض النترك (HNO_3) على أكثر من ٩٩,٥٪ من عناصر شظايا الانشطار، أما بقايا اليورانيوم والبلوتونيوم فتكون أقل من ٠,٥٪ و ٠,٢٪ تالياً. تأتي بعد ذلك سوائل متوسطة وقليلة النشاط الإشعاعي ناتجة عن عمليات التبخير وغسل الغازات والمذيبات عند إعادتها لحظ الإنتاج في أماكن مختلفة في المحطة. وتُصنف هذه السوائل حسب مكوناتها ونشاطها الإشعاعي، ثم تُرسل إلى وحدات معالجة النفايات للتركيز وتقليص أحجامها. وتعالج السوائل العضوية مثل بقايا الكيروزين وتريبتين الفوسفات (TPB) الناتجة عن عمليات التخفيف وغسل المذيبات عن طريق الحرق أو التحليل الكهربائي، وذلك للحصول على بقايا صلبة لما تحمله من عناصر الأكتينيد ($Z > 92$) بالإضافة لليورانيوم والبلوتونيوم وشظايا الانشطار، مثل الرتيتيوم Ru، والزرنيوم Zr، والنيوبيوم Nb.

(٣، ٤، ٣) النفايات الصلبة

تؤدي عملية تكرير الوقود إلى إنتاج كميات من النفايات الصلبة في مختلف المراحل عند ترشيح السوائل. وتُصنف هذه النفايات حسب العناصر ونشاطها

الإشعاعي، ثم تُرسل إلى وحدات المعالجة. وتعدُّ الحالة الصلبة أفضل الحالات للنفايات المشعة، حيث تسهل معالجتها بالكبس لتقليص حجمها، ومزجها بمواد أخرى، مثل الأسمنت، أو البتيم (الإسفلت)، ثم تخزينها لفترات قصيرة ومتوسطة. أما إذا كانت النظائر المشعة طويلة العمر النصفية وتحتاج إلى تخزين طويل المدى، فعادةً ما يتم مزجها مع مادة البروسلكات ثم حرقها عند درجة حرارة عالية (١٠٠٠-١٢٠٠) لتصبح على شكل مادة زجاجية يصعب تأكلها مع مرور الزمن.

(٣,٥) تصنيف النفايات المشعة

توجد تصنيفات عديدة للنفايات المشعة تعتمد على نوع النظائر، وعمر النصف، والنشاط الإشعاعي، وحالات المادة المشعة إلى آخره. لكن التصنيف الأكثر تداولاً والأوضح تعريفاً هو الذي يعتمد على النشاط الإشعاعي، الذي على أساسه صيغت أكثر التوصيات الدولية والقوانين والتصنيفات المحلية، ولهذا سنعتمد هذا التصنيف خلال فصول هذا الكتاب.

(٣,٥,١) نفايات الصنف الأول (VLLW)

تشمل نفايات الصنف الأول المواد التي لها مستوى إشعاعي قليل جداً (LLW) بسبب التلوث القليل بالمواد المشعة، مثل بقايا التربة والسوائل المستعملة لتركيز مناجم اليورانيوم. هذه المواد لا تحتاج إلى عناية خاصة، لكن لا توضع مع النفايات العادية غير المشعة، وتخزن في أماكن خاصة بها.

(٣,٥,٢) نفايات الصنف الثاني (LLW)

تشمل نفايات الصنف الثاني المواد التي لها مستوى إشعاعي قليل (LLW) بسبب التلوث بالمواد المشعة، مثل الملابس الوقائية والقفازات وبعض أدوات المختبرات التي لامست المواد المشعة. ولا تحتاج هذه المواد إلى حماية معينة لكن تُخزن في أماكن خاصة بها حسب حالتها المادية، وتُعرف نفايات الصنف الثاني كما يلي:

تُعد النفايات من الصنف الثاني إذا كان لها مستوى إشعاعي قليل (LLW)، بمعنى أن نشاطها الإشعاعي لا يفوق 4×10^9 باكريل للطن الواحد (4GBq/Ton) بالنسبة لجسيمات ألفا أو 12×10^9 باكريل للطن الواحد (12GBq/Ton) بالنسبة لجسيمات بيتا. (٣, ٥, ٣) نفايات الصنف الثالث (MLW)

تشمل نفايات الصنف الثالث المواد التي لها مستوى إشعاعي متوسط (MLW)، وهي المواد التي تم تشيعها داخل المفاعلات النووية، مثل المعدات، وبعض المواد التابعة لتكرير الوقود النووي المستهلك.

تحتاج هذه المواد إلى أوعية مدرعة للحماية أثناء نقلها أو تخزينها وتُعرف هذه النفايات كما يلي: تُعدُّ النفايات من الصنف الثالث إذا كان مستواها الإشعاعي يفوق مستوى نفايات الصنف الثاني، ولا تحتاج إلى تبريد اصطناعي لخفض درجة حرارتها. (٣, ٥, ٤) نفايات الصنف الرابع (HLW)

تشمل نفايات الصنف الرابع المواد التي لها مستوى إشعاعي عالٍ (HLW)، وهي المواد الصلبة، مثل الوقود النووي المستهلك، أو المواد السائلة والصلبة الناتجة عن عملية تكرير الوقود النووي المستهلك مثل سوائل عناصر شظايا الانشطار. هذه المواد تحتاج إلى أوعية مدرعة للحماية أثناء نقلها وتخزينها، بالإضافة إلى تبريد اصطناعي لخفض الحرارة الصادرة منها.

(٣, ٦) معالجة النفايات وتخزينها

تحتوي النفايات المشعة، كما سبق شرحه، على مواد متنوعة ذات نشاط إشعاعي متباين، مما يحتم تصنيفها، واختيار أفضل الطرائق للمعالجة والتخزين. وتعتمد بشكل عام عمليات معالجة النفايات وتخزينها على المبادئ الثلاثة الآتية:

أولاً: التركيز والاحتواء.

ثانياً: التصنيف والتثبيت.

ثالثاً: التأخير والتأجيل.

ولا يختص المبدأ الأول والثاني بالنفايات المشعة فقط بل يتناسب أيضاً مع معالجة النفايات غير المشعة وتخزينها، أما المبدأ الثالث (التأخير والتأجيل) فهو خاص بالنفايات المشعة؛ ذلك لأن النشاط الإشعاعي يتناسب عكسياً مع عمر النصف، وكلما مر الزمن تحولت النظائر المشعة إلى عناصر مستقرة، والمشكلة الأساسية للنفايات المشعة أنها تحتوي أحياناً على نظائر لها عمر نصف طويل جداً (آلاف السنين) مما يعقد عمليات المعالجة والتخزين لعزلها نهائياً عن الكائنات الحية والبيئة لآلاف السنين.

يُستخدم المبدأ الثاني (التخفيف والتشتيت) لبعض النفايات المشعة الغازية والسائلة منها فقط، وذلك بإطلاقها مباشرة في الجو، أو في البحار بكميات محدودة لا تؤثر في الكائنات الحية. وكذلك يُستخدم المبدأ الثالث (التأخير والتأجيل) لحل مشكلة النفايات المشعة القصيرة والمتوسطة العمر النصفية (حوالي ثلاثين سنة)، وذلك بحفظها وتخزينها بضعة مئات من السنين على الأكثر فتلاشى وتتحول إلى عناصر مستقرة، علماً أن المستوى الإشعاعي ينخفض إلى أقل من واحد بالمائة بعد مدة تخزين تساوي سبع مرات عمر النصف. أما المبدأ الأول (التركيز والاحتواء)، فيختص بالنفايات المشعة الصلبة خاصة طويلة عمر النصف. هذا النوع من النفايات يحتاج إلى تركيز عالٍ لتقليل الحجم ومعالجة نهائية تمنعها من التسرب إلى البيئة لمدة زمنية طويلة جداً (آلاف السنين).

(١، ٦، ٣) معالجة نفايات الصنف الأول والثاني

لا تمثل نفايات الصنف الأول (VLLW) خطورة على البيئة عادة حيث إن نشاطها الإشعاعي قليل جداً وجل هذه النفايات بقايا إنتاج مناجم اليورانيوم، التي تترك عادة مع التربة والسوائل في مكان مخصص لذلك قرب المنجم نفسه؛ ولا تخرج مع النفايات العادية غير المشعة الأخرى. وتعد هذه الطريقة كافية لمعالجة هذا الصنف من النفايات، وحماية البيئة والكائنات الحية، خاصة عندما يُؤخذ بالاحتياطات اللازمة لعدم تسربها إلى المياه الجوفية.

تحتوي نفايات الصنف الثاني (LLW) عادةً على مصادر إشعاعية صغيرة، أو مواد لوثت بالإشعاعات، مثل ملابس الوقاية، والقفازات، وأدوات الغسيل، إلى آخره. وتكون أكثر هذه النفايات على شكل صلب، لكن إذا كانت على شكل سوائل فأول خطوة لمعالجتها هي تركيزها، أو تبخيرها لتصبح صلبة. وتأتي هذه النفايات عادةً من المستشفيات، وبعض المختبرات، والصناعة، وأحياناً من محطات القدرة النووية أيضاً. نفايات المستشفيات عادةً ما تكون مصادر لجسيمات بيتا وجاما، لها عمر نصف قصير مثل: ^{90}Y (يوم $T_{1/2}=2.7$)، ^{131}I (أيام $T_{1/2}=8$)، ^{89}Sr (يوماً $T_{1/2}=52$)، ^{192}Ir (يوماً $T_{1/2}=74$) التي تستعمل لأغراض التشخيص أو علاج الأورام السرطانية. وأول خطوة لمعالجة هذه النفايات تخزينها لفترات قصيرة نسبياً، لتصبح بعد فقدان نشاطها الإشعاعي نفايات الصنف الأول (LLW). أما النفايات التي تأتي من المختبرات والصناعة ومحطات القدرة النووية، فهي تحتوي على مصادر ألفا وبيتا وجاما، وكذلك مصادر نيوترونية صغيرة؛ ولهذا فإن العلاج الأمثل لهذه النفايات هو فصل النظائر طويلة عمر النصف، خاصة إذا كانت كثيرة وتركيزها في السوائل عالياً، وإن استدعى الأمر رفع مستوى تصنيفها (HLW). بعد ذلك تُحرق نفايات الصنف الثاني لخفض حجمها، ثم توضع في قوالب من الخرسانة لتصبح جاهزة للتخزين. وبما أن مخازن نفايات الصنف الثاني (LLW) والصنف الثالث (MLW) هي واحدة، فستناول موضوع التخزين في الفقرة القادمة. ويمثل حجم نفايات الصنف الثاني حوالي ٩٠٪ من حجم النفايات المشعة، إلا أن مستواها الإشعاعي لا يفوق ١٪ من النشاط الإشعاعي الإجمالي للنفايات المشعة في العالم.

(٣, ٦, ٢) معالجة نفايات الصنف الثالث

تأتي نفايات الصنف الثالث (MLW) عادةً من النشاط الصناعي النووي وخاصة من محطات تكرير الوقود المستهلك. وتحتوي هذه النفايات على الراتنجات (الرزين) والمواد الكيميائية المترسبة الناتجة عن عمليات التكرير، وكذلك بعض معدات المحطات النووية والمواد الملوثة الناتجة عن تفكيك محطات القدرة النووية القديمة. إذا كانت هذه

النفايات على شكل سوائل، فتعالج بالتركيز والحرق لتحويلها إلى نفايات صلبة حتى وإن اقتضى الأمر تحويل تصنيفها إلى الصنف الأعلى (HLW)؛ ذلك لأن نفايات الصنف الثاني والثالث يجب أن تكون صلبة فقط، ثم بعد ذلك تُطمر هذه النفايات داخل قوالب من الخرسانة، لتصبح جاهزة للتخزين. ويمثل حجم نفايات الصنف الثالث (MLW) حوالي ٧٪ من حجم النفايات المشعة، إلا أن مستواها الإشعاعي لا يفوق ٤٪ من النشاط الإشعاعي الإجمالي للنفايات المشعة في العالم.

تُوضع القوالب الخرسانية التي تحتوي على نفايات الصنف الثاني (LLW)، والصنف الثالث (MLW) في خنادق ذات جدران خرسانية، أو حجرية، يتراوح عمقها بين ٥ و ١٠ أمتار. ويُفضل اختيار أماكن هذه المخازن، أو المقابر، في مناطق جافة صحراوية، أو صخرية، أو منطقة يتم عزلها تماماً عن تسرب المياه الجوفية إليها. تتركم هذه النفايات التي يكون نشاطها الإشعاعي عادةً حوالي 1MBq/Kg داخل أنفاق مبطنة على شرط ألا تفوق جرعتها الإشعاعية الصادرة على بعد ٠,٣ متر واحد ملي قرابي في الساعة (1mGy/hr). وبعد امتلاء الخندق يُردم بطبقة عازلة من التراب والصخور، مما يجعل الجرعة الإشعاعية على السطح لا تتجاوز واحداً في المئة (أي عشرة ميكرو قرابي في الساعة 10 uGy/hr).

وتوجد مقابر لتخزين هذا النوع من النفايات في كل من أمريكا وفرنسا وبريطانيا

والسويد وبلجيكا والاتحاد السوفيتي السابق.

(٣, ٦, ٣) معالجة نفايات الصنف الرابع

تتكون نفايات الصنف الرابع (HLW) من مواد سائلة وصلبة، وتأتي المواد السائلة خاصة من محطات تكرير الوقود المستنفد، التي تحتوي على عناصر شظايا الانشطار، وبعض عناصر الأكتينيدات الثقيلة ($Z > 94$). وتنتج عمليات تكرير الوقود المستهلك حوالي ٥ أمتار مكعبة لكل طن من الوقود، وتقلص هذه الكمية إلى ما بين ٠,٥ و ١ متر مكعب. لهذه النفايات نشاط إشعاعي عالٍ يسبب إصدار حرارة كبيرة، مما يحتم مراقبتها، وتبريدها أثناء تخزينها الوقتي. ويُوضح الجدول رقم (٣, ٢)

كميات النظائر المشعة المنتجة عند تكرير طن واحد من الوقود المستهلك بعد حرقه
33000 MWd/t.

الجدول رقم (٣،٢). كميات النظائر المنتجة عند تكرير طن واحد من الوقود المستهلك لمفاعل الماء
الخفيف بعد حرقه 33000 MWd/t وتبريده لمدة ٣ سنوات [٢].

نوع النفايات	النفايات الأصلية كغم / حجم (م ^٣)	الجزئى الغرامى (molarity) للحجم المركز ٥ م ^٣
H ⁺	1.4	1.0
NO ₃ ⁻	900	2.4
نواتج الانشطار		
المجموعة I (Rb,Cs) :	2.94	0.046
المجموعة II (Sr,Ba) :	2.37	0.041
المجموعة III (Y, Ln) :	10.31	0.15
Zr	3.54	0.076
Mo	3.32	0.068
Te	0.77	0.016
المجموعة IV (Ru, Rh, Pd) :	4.02	0.078
Te	0.48	0.0075
النظائر الأخرى	0.35	0.004
مجموع النظائر	28.1	0.487
نواتج التآكل : Fe, Cr, Ni	1.4	0.051
فوسفات (TBP)	0.9	0.02
الأكتينيد : U, Np, Pu, Am, Cm	5.5	0.047
النظائر السامة للنيوترونات : Gd	12	0.15

تتمثل عمليات معالجة هذه النفايات في عملية تركيزها أولاً ثم وضعها ثانياً في
خزانات ذات طبقات متعددة مصنعة من الحديد غير قابل للصدأ والخرسانية
المسلحة، وتتراوح سعتها بين ٥٠ و ٥٠٠ متر مكعب. توضع هذه الخزانات بعد ذلك
داخل خنادق مصممة خصيصاً لها بحيث يمكن تبريدها عن طريق الهواء أو الماء

ومراقبتها طول فترة هذا التخزين الوتقي. وبعد فترة هذا التخزين الوتقي تُعالج هذه النفايات من جديد لتصبح صلبة ويمكن تخزينها نهائياً في طبقات جيولوجية ثابتة في باطن الأرض.

يمثل الجزء الآخر، أي المواد الصلبة لنفايات الصنف الرابع، بعض القطع المعدنية والمرشحات والترسبات المنتجة في محطات تكرير الوقود. وعندما تكون السياسة المتبعة عدم تكرير الوقود المستهلك، فإنَّ جل النفايات الصلبة هي في الواقع الوقود النووي المستهلك نفسه؛ ولهذا فإنَّ الوقود المستهلك الذي يأتي من محطات القدرة النووية بعد فترة التبريد الأولية يعدُّ أهم مصدر لنفايات الصنف الرابع (HLW) الصلبة. ولا يزال هذا النوع من النفايات (الوقود النووي المستهلك بدون تكرير) في الدول التي اتبعت تلك السياسة مثل أمريكا وكندا والسويد في مخازن وقتية تحت المراقبة والتبريد في انتظار دفنه نهائياً في طبقات جيولوجية ثابتة في باطن الأرض.

تجدر الإشارة إلى أن المستوى الإشعاعي لحزم الوقود النووي المستهلك عند إخراجها من المفاعل يكون عالياً جداً مما يسبب إنتاج حرارة تُقدر بحوالي خمسة كيلوات بعد سنة من التبريد وواحد كيلوات بعد خمس سنوات من التبريد، وينخفض المستوى الإشعاعي لحزمة الوقود المستهلك إلى حوالي واحد في الألف من المستوى الأصلي بعد أربعين سنة. يمثل حجم نفايات الصنف الرابع (HLW) حوالي ٣٪ من حجم النفايات المشعة، إلا أن مستواها الإشعاعي يعادل ٩٥٪ من النشاط الإشعاعي الإجمالي للنفايات المشعة في العالم.

(٣,٧) التخزين النهائي للنفايات المشعة (HLW)

لا تزال الدراسات جارية لاختيار أفضل طرائق المعالجة والتخزين النهائي لنفايات الصنف الرابع (HLW)، التي تمثل المشكلة الحقيقية للنفايات المشعة. وأهم الاتجاهات للأبحاث الحالية لحل هذه المشكلة في المستقبل ما يلي:

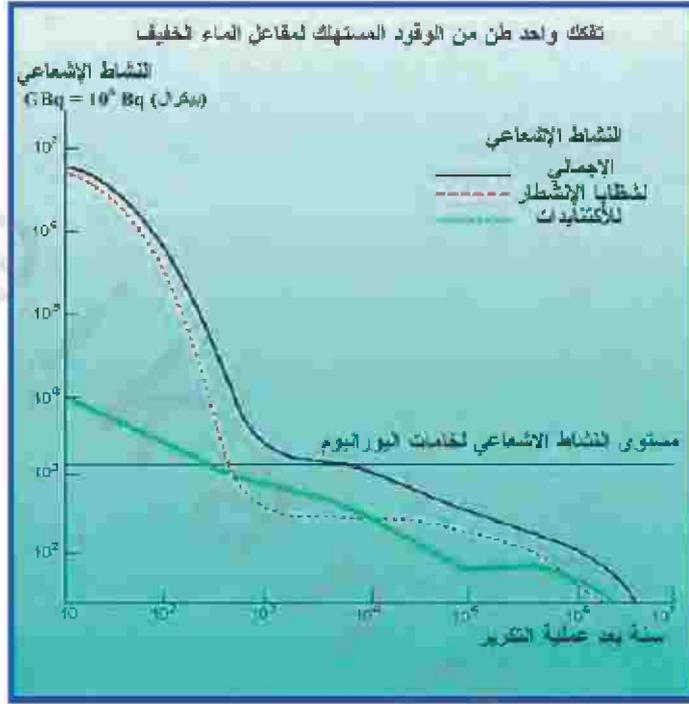
- أولاً: التخلص من النفايات وإرسالها إلى الفضاء.
 ثانياً: فصل النظائر ومعالجة كل مجموعة على حدة.
 ثالثاً: معالجة النفايات وتخزينها نهائياً في باطن الأرض.

(٣,٧,١) التخلص من النفايات

تُعدُّ عملية التخلص من النفايات بإرسالها إلى الفضاء الخارجي وتوجيهها إلى المدارات الشمسية لحرقها غير واقعية اليوم، على الرغم من أن إمكانية ذلك شبه متوافرة تقنياً. لكن عدم الثقة التامة (مائة بالمائة) في التقنية الحالية لإنجاح هذه المهمة أدى إلى تأجيل هذا الحل إلى المستقبل البعيد.

(٣,٧,٢) فصل النظائر إلى مجموعات

فصل نظائر النفايات المشعة ومعالجة كل مجموعة على حدة لا يزال في طور الأبحاث، ويعمل هذا الاتجاه على تخزين الوقود النووي المستهلك وقتياً تحت المراقبة لخفض مستواه الإشعاعي، كما هو موضح في الشكل رقم (٤,٣). بعد ذلك يمكن تكريره لإنتاج ثلاث مجموعات من المواد تحتوي المجموعة الأولى على اليورانيوم، والثانية على عناصر الأكتينيد الثقيلة بما في ذلك نظائر البلوتونيوم. وفي هذه الحالة يُعاد اليورانيوم إلى دورة الوقود النووي من جديد وتُعالج عناصر شظايا الانشطار متوسطة العمر النصفية لتخزينها نهائياً، حيث لا تحتاج إلى مدة تخزين تفوق الأربعمئة سنة، ليصبح مستواها الإشعاعي قريباً من مستوى مناجم اليورانيوم، التي لا تمثل خطراً. أما المجموعة الثالثة التي تحتوي على عناصر الأكتينيد الثقيلة بما في ذلك نظائر البلوتونيوم التي لها عمر نصف طويل، فتُستعمل كوقود لبعض أنواع المفاعلات وتحويلها بالانشطار النووي إلى نظائر خفيفة ذات عمر نصف قصير أو متوسط. وبالإمكان أن تتم هذه العملية داخل مفاعلات النيوترونات السريعة، أو مفاعلات الاندماج النووي في المستقبل.



الشكل رقم (٤، ٣). مستوى النشاط الإشعاعي للوقود المستهلك [٢٥].

(٣، ٧، ٣) معالجة النفايات وتخزينها نهائياً

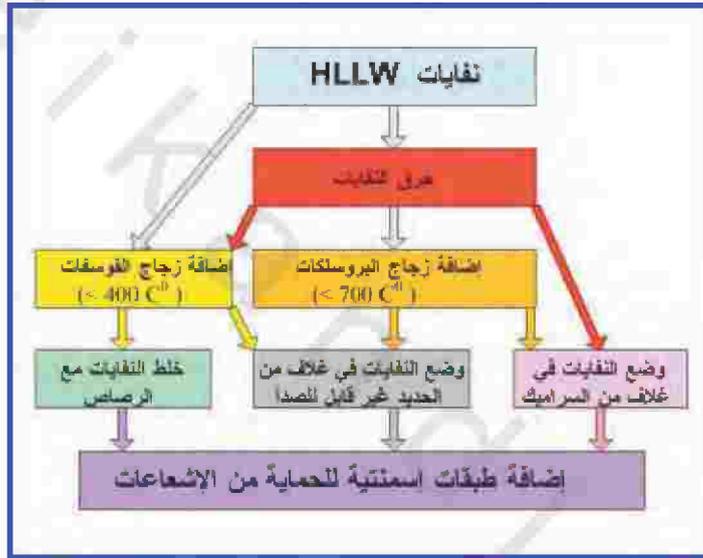
تُعدُّ عملية معالجة نفايات النصف الرابع (HLW) ثم تخزينها نهائياً في باطن الأرض واعدة وشبه جاهزة اليوم في كثير من الدول النووية. ويتضرع هذا الاتجاه إلى محورين : الأول تكرير الوقود المستهلك بعد فترة تبريد لا تفوق سبع سنوات للاستفادة من البلوتونيوم واليورانيوم ثم معالجة النفايات المتبقية ودفنها نهائياً في باطن الأرض وفق جدول زمني يحكمه المستوى الإشعاعي كما هو موضح في الشكل رقم (٥، ٣). أما المحور الثاني فيعمل على تخزين وقتي أطول للوقود المستهلك ثم معالجته بدون تكرير وعده نفايات ككل ، ثم دفنه نهائياً أيضاً في باطن الأرض.



الشكل رقم (٣,٥). المراحل الزمنية لمعالجة الوقود المستهلك [٢٥].

تتلخص عمليات معالجة النفايات الصنف الرابع (HLW) السائلة الناتجة عن تكرير الوقود بعد فترة التبريد والمراقبة في تحويلها إلى مواد صلبة غير قابلة للتآكل مع الزمن. وتتم هذه العملية حالياً في بعض الدول مثل بريطانيا وفرنسا وروسيا، وذلك بتكليس هذه النفايات بالحرق ومزجها داخل قوالب بلورية من زجاج البروسلكات، أو الفوسفات، أو الصخور الاصطناعية "سانروك (Synroc)". ويوضح الشكل رقم (٣, ٦) أهم مراحل معالجة نفايات الصنف الرابع وتحويلها إلى مادة صلبة بلورية قابلة للدفن في الطبقات الجيولوجية الثابتة. حيث تُدخل النفايات السائلة إلى فرن عالي

الحرارة (١٠٠٠-١٢٠٠) فتتحول إلى مواد صلبة يُضاف إليها قطع من الزجاج، التي تذوب تحت تأثير الحرارة مكونةً خليطاً متجانساً مع النفايات. بعد ذلك يُصب هذا السائل في نهاية خط الإنتاج داخل حاويات سعتها حوالي ٤٠٠ كيلوغرام وذات طبقات متعددة من الخزف والحديد غير قابل الصدأ.



الشكل رقم (٣,٦). أهم مراحل معالجة نفايات الصنف الرابع.

ويوضح الشكل رقم (٣,٧) معمل تصنيع تلك القوالب البلورية، وتتكون بعد فترة تبريد السائل داخل هذه الحاويات الاسطوانية مادة صلبة زجاجية تحتوي على ٢٠٪ إلى ٣٠٪ من النفايات المشعة. وتُخزن بعد ذلك هذه الحاويات وقتياً للمراقبة ولخفض مستواها الإشعاعي ودرجة حرارتها ثم تُضاف لها طبقات من الرصاص والتيتانيوم يتراوح سمكها بين ٥ و ١٠ مم لتصبح جاهزة للدفن النهائي في باطن الأرض.



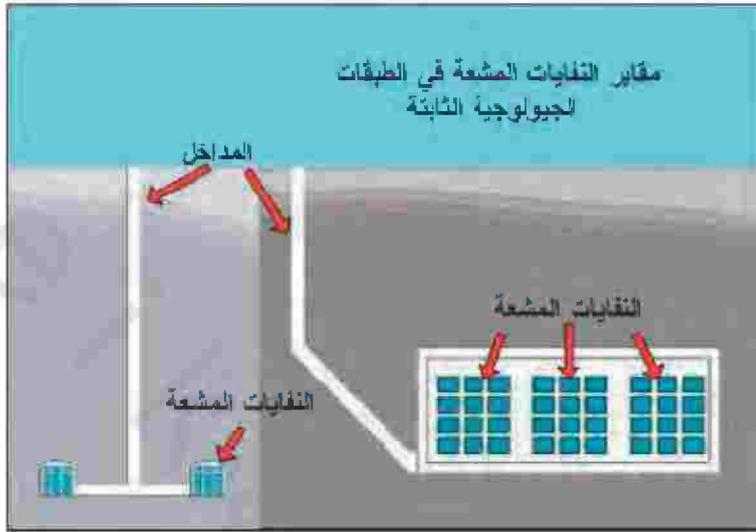
الشكل رقم (٣,٧). تصنيع قوالب الزجاج لحفظ نفايات الصنف الرابع [٢٥].

تتلخص عملية المعالجة النهائية لنفايات الصنف الرابع (HLW) الصلبة مثل حزم الوقود المستهلك بدون تكرير في وضعها داخل حاويات أسطوانية لا يقل سمك جدرانها عن ٥٠ مم من النحاس أو الحديد غير قابل الصدأ. ولتسهيل عملية التبريد أثناء التخزين الوتقي لهذه الأسطوانات تُملأ الفراغات بين أقلام الوقود بالحديد لتقل الحرارة الداخلية. وقبل التخزين النهائي في باطن الأرض لهذه النفايات الصلبة تُضاف لهذه الأسطوانات طبقات إضافية من المواد المقاومة للتآكل والعزل الإشعاعي مثل صفائح "الهستل" C_4 والرصاص. ويتوقع أن تكون هذه الطبقات بالإضافة إلى الطبيعة الحزفية للوقود النووي المستهلك (UO_2) كفيلاً لبقاء هذه النفايات على حالتها الفيزيائية بدون تدهور داخل باطن الأرض آلاف السنين.

(٣,٧,٤) دفن النفايات في باطن الأرض

أدت الدراسات والتجارب للبحث عن أفضل الطبقات الجيولوجية في السنوات الأخيرة وفي العديد من الدول إلى اختيار طبقات معينة تكفل حفظ النفايات المشعة لآلاف السنين. وتُشير نتائج هذه البحوث إلى أن تكون هذه الطبقات في مناطق ثابتة جيولوجياً منذ ملايين السنين وخالية من الحركة التكتونية والهزات الأرضية والبراكين، وكذلك ألا يقل عمق هذه الطبقات التي تتوافر فيها المواصفات المرغوبة عن ثلاثمائة متر. ولهذا الغرض دُرست ثلاث طبقات واعدة تتمثل في طبقة الصخور البلورية القاصية مثل الجرانيت، وطبقة الطين الخزفي، وطبقة صخور مهد الملح. وحُددت هذه الطبقات على أعماق تفوق ٦٠٠ متر في العديد من الدول وبنيت مطامر تجريبية للطبقات صخور مهد الملح في كل من السويد وسويسرا وبلجيكا وفرنسا وكندا. وأكثر المشاريع تقدماً في هذا المجال مشروع (KBS-ASPO) بالسويد ومشروع (UKAMTAN) في النيومكسيك بأمريكا ومشروع (LOBE) بفرنسا. وتوجد أيضاً مشاريع بحثية مشتركة في بعض الدول، مثل أستراليا وروسيا ويوضح الشكل رقم (٣,٨) نموذجاً لهذه المقابر المظمورة في باطن الأرض للتخزين النهائي للنفايات المشعة.

ووصلت هذه المشاريع التجريبية إلى درجة من النضج والنتائج المشجعة حتى أنه من المتوقع أن تستقبل هذه المقابر الدفعات الأولى من النفايات المشعة لدفنها نهائياً في حلول سنة ٢٠١٠م. وهناك اجتماع علمي الآن على أن الحل الأمثل للتخلص من نفايات الصنف الرابع (HLW) هو دفنها في مقابر عمقها أكثر من ثلاثمائة متر في باطن الأرض، وفي طبقات جيولوجية ذات مواصفات معينة. وتعدُّ هذه الطريقة مثالية إلى حد ما؛ لأنها لا تمنع استعادة هذه النفايات إذا ثبت لها فائدة في المستقبل القريب أو البعيد للأجيال القادمة.



الشكل رقم (٣,٨). مقابر دفن النفايات المشعة.

(٣,٨) تمارين

- ١- عرّف الوقود النووي المستهلك. وما الغاية الأساسية لتكرير هذا الوقود؟
- ٢- اذكر دورة الوقود النووي وارسم شكلاً توضيحياً لهذه الدورة.
- ٣- اذكر أهم طرائق تكرير الوقود النووي المستهلك.
- ٤- اشرح باختصار أهم مراحل طريقة بيراكس لتكرير الوقود النووي المستهلك.
- ٥- ما النواتج الأساسية لعملية تكرير الوقود المستهلك، وما الفائدة لكل منها؟
- ٦- اذكر أهم أنواع النفايات المشعة لعملية تكرير الوقود المستهلك.
- ٧- اشرح بشكل مبسط تصنيف النفايات المشعة الناتجة عن النشاطات النووية بشكل عام والناتجة عن عملية تكرير الوقود المستهلك خاصة.

٨- اذكر باختصار طرائق معالجة النفايات المشعة.

٩- ما الطرائق الحالية المتوافرة للتخزين السوقي للنفايات المشعة، موضحاً

الأصناف التي يمكن معالجتها بهذه الطريقة؟

١٠- اذكر أهم الطرائق النهائية للتخلص من النفايات المشعة طويلة العمر

النصفي حالياً في العالم.