استشراف آفاق المستقبل: تكنولوجيات ابتكارية لمعالجة النفايات المشعة والتخلُّص منها

إن دورات الوقود النووي المأمونة والمقاوِمة للانتشار والمتَّسمة بالكفاءة من الناحية الاقتصادية بحيث تقلِّل إلى أدنى حدّ من توليد النفايات ومن التأثيرات البيئية هي مدخل رئيسي إلى الطاقة النووية المستدامة. ويمكن أن يؤدِّي تطبيق نُهُج وتكنولوجيات ابتكارية إلى الحدّ بشكل ملحوظ من السمِّية الإشعاعية، أو الأخطار التي تشكِّلها المواد المشعّة بالنسبة للإنسان، فضلاً عن الحدّ من النفايات التي تولِّدها. وسيؤدِّي تقليص حجم النفايات والحِمل الحراري والمدة التي يلزم أن تُعزل فيها النفايات عن المحيط الحيوي إلى تبسيط مفاهيم التخلُّص من النفايات بقدر كبير.

كما أن إعادة التدوير وإعادة الاستخدام تقلِّلان حجم النفايات إلى الحد الأدنى. ويشكِّل هذا المفهوم، جنباً إلى جنب مع الاستخدام الأمثل للموارد الطبيعة، الأساس الذي تقوم عليه 'دورة الوقود المغلقة'، حيث يُعاد تدوير الأجزاء القابلة لإعادة الاستخدام من الوقود المستهلك ولا تُعتبَر بمثابة نفايات.

ويمكن معالجة الوقود النووي المستهلك من أجل فصل العناصر المشعّة الطويلة العمر و/أو تحويلها إلى أشكال أقصر عمراً وأقلّ خطورة. ويَنتُج عن هذه العملية، المعروفة باسم 'التجزئة والتحويل'، حجم أصغر من النفايات مع درجة أقل كثيراً من السمِّية الإشعاعية.

إعادة التدوير وإعادة الاستخدام تقلِّلان حجم النفايات إلى الحد الأدنى. ويشكِّل هذا المفهوم، جنباً إلى جنب مع الاستخدام الأمثل للموارد الطبيعة، الأساس الذي تقوم عليه 'دورة الوقود المغلقة'، حيث يُعاد تدوير الأجزاء القابلة لإعادة الاستخدام من الوقود المستهلك ولا تُعتبَر بمثابة نفايات.

التجزئة والتحويل

يتسم الوقود النووي المستهلَك المُفرَغ من مفاعل نووي بدرجة عالية من السمِّية الإشعاعية بسبب احتوائه على ثلاث مجموعات من العناصر: أكتينات رئيسية، هي اليورانيوم والبلوتونيوم؛ وأكتينات ثانوية تشمل النبتونيوم والأميريشيوم والكوريوم؛ ونواتج انشطارية. وبسبب الأكتينات الطويلة العمر والنواتج الانشطارية المُوَلِّدة للحرارة، يُعتبر الوقود المستهلك نفايات قويّة الإشعاع ولا بد من احتوائه وعزله عن المجال الحيوي داخل مرفق جيولوجي عميق لمئات الآلاف من السنين.

وتُعدُّ العناصر الأكتينية الطويلة العمر أكبر مساهم في السمِّية الإشعاعية الطويلة الأجل. والنواتج الانشطارية، رغم أنها تولِّد الحرارة، قصيرة العمر ولا تساهم في السمِّية الإشعاعية إلا خلال الـ١٠٠ سنة الأولى من عمرها.

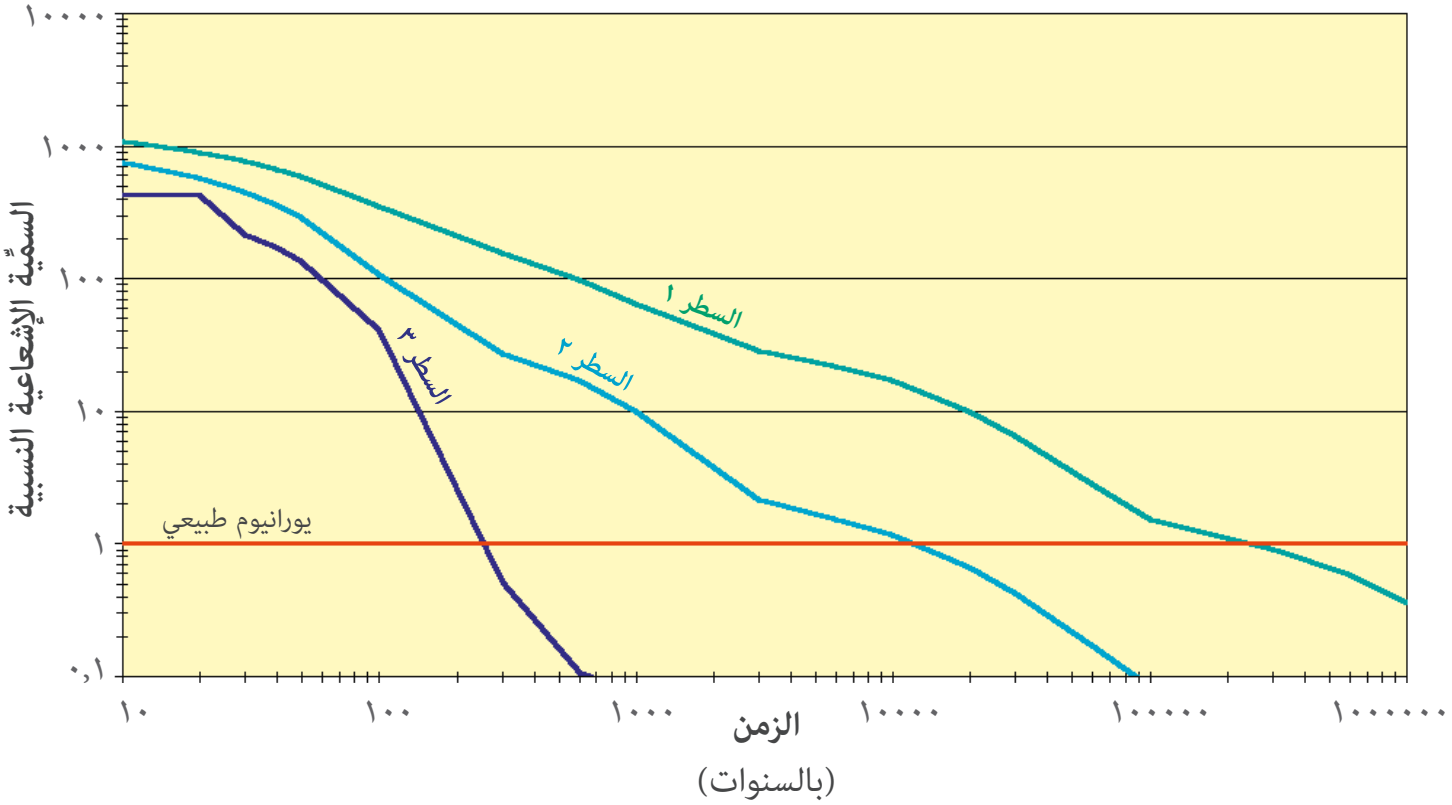
وفي عملية التجزئة والتحويل، يُستخرَج كلٌّ من البلوتونيوم والأكتينات الثانوية من الوقود المستهلك عن طريق الفصل الكيميائي. ويلي ذلك التحويل حيث تُدمَّر عناصر ما وراء اليورانيوم (النبتونيوم والبلوتونيوم والأميريشيوم والكوريوم) عن طريق الانشطار في مفاعل نووي مصمَّم خصّيصاً لهذا الغرض. ويمكن أن يؤدِّي استخدام نهج التجزئة والتحويل إلى تحسين كفاءة التصرّف في النفايات المشعّة بسبب تقليل حجم النفايات الذي يفضي إلى مخطّطات تصرف أكثر فعّالية من حيث التكلفة.

وفي الوقت الحاضر، تُعَدُّ النظم النيوترونية السريعة هي مجال البحث الأكبر لتكنولوجيات التحويل القادرة على تدمير العناصر الأكتينية الطويلة العمر. ويمكن إجراء التحويل في مفاعلات أخرى مثل مفاعلات الماء المضغوط لكن الانشطار يكون أقل كفاءةً فيها.

وثمة مزيَّة تتجلَّى بشكل واضح وهي أنه عندما تُستخدم المفاعلات السريعة مقترنةً بتكنولوجيات دورة الوقود الجديدة، يمكن إعادة تدوير الأكتينات الرئيسية والثانوية دون الحاجة إلى مخطّطات تنقية عالية، كما هي الحال بالنسبة لمحطات إعادة المعالجة القائمة في الاتحاد الروسي وفرنسا والهند واليابان. ويتَّسم هذا النظام بدرجة عالية من مقاومة الانتشار بسبب انعدام الحاجة إلى فصل البلوتونيوم عن الأكتينات الأخرى. والجمع بين المفاعلات السريعة (أو استخدام الطيف السريع) والمعالجة الحرارية المتقدمة للوقود المستهلك ما زال قيد التطوير في الوقت الراهن وتُجرى تجارب إيضاحية عليه في الاتحاد الروسي والاتحاد الأوروبي والهند.

السميّة الإشعاعية في النفايات النووية

على مرّ الزمن، بالنسبة لمختلف دورات الوقود



السطر ١: نفايات ناجمة عن التخلُّص المباشر من الوقود المستهلك تشمل **FP + MA + Pu**

السطر ٢: نفايات ناجمة عن إعادة تدوير البلوتونيوم تشمل **FP + MA**

السطر ٣: نفايات ناجمة عن إعادة تدوير **MA + Pu** تشمل **FP**

FP= نواتج انشطار **MA**= أكتينات ثانوية **Pu**= بلوتونيوم

يمكن أن تقلِّص تكنولوجيا النيوترونات السريعة من السميّة الإشعاعية للنفايات إلى مستوى اليورانيوم الطبيعي في نحو ٤٠٠ سنة بدلاً من مئات الآلاف من السنين.

وتتيح إعادة تدوير الأكتينات في المفاعلات السريعة تقليصاً كبيرا في حجم النفايات والحِمل الحراري والزمن اللازم لخفض مستويات السمِّية الإشعاعية إلى مستوى ركاز اليورانيوم الطبيعي المستخدم في وقود مفاعلات الماء الخفيف. وتدلِّل عمليات البحث والتطوير الراهنة على أن مفهوم 'التخلُّص المعادل للاضمحلال الطبيعي' قابل للتطبيق. وبعبارة أخرى، فإنه يمكن من الناحية التقنية توليد نفايات مشعّة من شأنها أن تَضمحلّ إلى مستويات طبيعية معيّنة على مدى يتراوح بين ٣٠٠ و٤٠٠ سنة، بدلاً من الـ ٢٥٠ ٠٠٠ سنة اللازمة لاضمحلالها فيما لو تم التخلُّص من الوقود المستهلك بشكل مباشر. أو يمكن القول ببساطة إن استحداث محطة قوى نووية حديثة سيقلِّل بقدر كبير من عبء النفايات على الأجيال القادمة.

غير أن تلك مهمَّة معقَّدة ومن الضروري تعزيز تكنولوجيات إعادة المعالجة وإعادة التدوير من أجل تحقيق ما يلي: تحسين كفاءة عمليات فصل الأكتينات، وتقليل حجم النفايات الثانوية، وتجنب مشاكل الانتشار. وتدلِّل الدراسات التي تضطلع بها الوكالة في مجال تطوير المفاعلات السريعة وفيما يتعلق بدورات الوقود الابتكارية على أن تلك المسائل يمكن حلُّها وأن الصناعة النووية يمكن أن تمضي قدماً نحو تحقيق دورة وقود جديدة أكثر استدامة.

وتُبذَل أيضاً جهود جدِّية في مجال البحث والتطوير تركِّز على استخدام الثوريوم بدلاً من اليورانيوم، وعلى زيادة استخدام نظم المفاعلات التي تتَّسم بمعدَّلات حرق أعلى للوقود، مثل المفاعلات المبرَّدة بالغاز الفائقة الحرارة ومفاعلات الملح المصهور. وتهدف هذه الجهود إلى تقليص كميات عناصر ما وراء اليورانيوم مع إنتاج القدر ذاته من الكهرباء.

ألكسندر ف. بيشكوف، نائب المدير العام للوكالة لشؤون الطاقة النووية