IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام

المؤتمر العام

GC(59)/INF/2
٩ تموز/يوليه ٢٠١٥

توزيع عام
عربي
الأصل: انكليزي

الدورة العادية التاسعة والخمسون

البند ١٧ من جدول الأعمال المؤقت
(الوثيقة GC(59)/1)

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٥

تقرير من المدير العام

ملخّص

- استجابة لطلبات الدول الأعضاء، تُصدر الأمانة استعراضاً شاملاً يتناول التكنولوجيا النووية في كل عام. ويرد مرفقاً بهذه الوثيقة التقرير الخاص بالعام الحالي، الذي يسلّط الضوء على أبرز المستجدَّات في عام ٢٠١٤.

- ويشمل استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٥ المجالات المختارة التالية: تطبيقات القوى، والبيانات الذرية والنووية، وتطبيقات المعجِّلات ومفاعلات البحوث، والتقنيات النووية الرامية إلى تحسين صحة الحيوان، وقياس الجرعات الإشعاعية الطبية، والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية، واستخدام النظائر في الدراسات المناخية والهيدرولوجية، وفهم التغيُّرات في البيئة البحرية باستخدام التقنيات النووية.

- وستُعَدُّ الصيغة النهائية لهذا الاستعراض على ضوء المناقشات التي ستُجرى في مجلس المحافظين، وستُقَدَّمُ إلى الدول الأعضاء كوثيقة إعلامية خلال دورة المؤتمر العام العادية التاسعة والخمسين.

- ويُمكن الاطلاع أيضًا على معلومات عن أنشطة الوكالة المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية في التقرير السنوي لعام ٢٠١٤ (الوثيقة GC(59)/7)، ولا سيما في القسم الذي يتناول التكنولوجيا، وفي تقرير التعاون التقني لعام ٢٠١٤ (الوثيقة GC(59)/INF/3) الصادرين عن الوكالة.

- وقد تم تعديل الوثيقة لكي تراعي، قدر المستطاع، تعليقات معينة أدلى بها مجلس المحافظين وتعليقات أخرى وردت من الدول الأعضاء.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٥

تقرير من المدير العام

موجز جامع

١- كان ثمة ٤٣٨ مفاعلا قيد التشغيل في نهاية عام ٢٠١٤ وفَّرت طاقتها النووية قدرة عالمية على توليد الكهرباء قوامها ٣٧٦,٢ ميغاواط (كهربائي). ولم تحدث سوى عملية إغلاق دائم واحدة لمفاعل. وقد تمَّت خمس وصلات جديدة لمفاعلات بالشبكة الكهربائية وبدأ العمل على تشييد ثلاثة مفاعلات جديدة. وظلَّت آفاق النمو في الأجلين القريب والبعيد مُركَّزة في آسيا، ولا سيما في الصين. ومن بين الـ٧٠ مفاعلاً قيد التشييد، كان ٤٦ مفاعلاً قيد التشييد في آسيا، كما تم توصيل بالشبكة الكهربائية لـ٣٢ مفاعلاً من بين ٤٠ مفاعلاً تم توصيلها بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٤.

٢- وثمة ثلاثون بلدًا في الوقت الراهن تستخدم القوى النووية والعدد نفسه تقريبا من البلدان يدرس أو يخطِّط أو يعمل بهمَّة من أجل إدخال القوى النووية كجزء من مزيج الطاقة لديها. ومن أصل الـ٣٠ بلدًا التي تشغِّل محطات قوى نووية، ثمة ١٣ بلدًا إما أنها تشيِّد محطات جديدة أو تستكمل بنشاط مشاريع تشييد أوقِف العمل في تنفيذها سابقًا، و١٢ بلدًا تخطِّط إما لتشييد محطات جديدة أو استكمال مشاريع تشييد أوقِف العمل في تنفيذها. وثمة عدّة بلدان قرَّرت إدخال العمل بالقوى النووية غدت في مراحل متقدِّمة من إعداد البنية الأساسية لهذا الغرض.

٣- وتظهر توقُّعات الوكالة في عام ٢٠١٤ نموا يتراوح بين ٨٪ و٨٨٪ في قدرة القوى النووية بحلول عام ٢٠٣٠. فالنمو السكاني والطلب على الكهرباء في العالم النامي، والاعتراف بالدور الذي تؤدِّيه القوى النووية في الحدّ من انبعاثات غازات الدفيئة، وأهمية أمن إمدادات الطاقة، وتقلُّب أسعار الوقود الأحفوري، إنما هي عوامل تشير إلى أداء الطاقة النووية دورًا مهما في مزيج الطاقة في الأجل الطويل.

٤- وتَواصل العمل على إدخال تحسينات على حالة الأمان في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. وكان من بين هذه التحسينات تحديد وتطبيق الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي، وتحسين فعَّالية الدفاع في العمق، وتعزيز قدرات التأهُّب والتصدِّي للطوارئ، والارتقاء ببناء القدرات، وحماية الناس والبيئة من الإشعاعات المؤيِّنة.

٥- وعلى الرغم من الإبلاغ عن صرف قدر كبير من النفقات على عمليات الاستكشاف والتطوير، ثمة العديد من مشاريع التعدين الجديدة التي تم تأجيلها أو يُتوقَّع تأجيلها بسبب انخفاض أسعار اليورانيوم. وتساهم موارد اليورانيوم غير التقليدية في مواصلة توسيع قاعدة الموارد كما وأنَّ البحوث في استخراج اليورانيوم اقتصاديا من المحيطات أفضت إلى نتائج مشجِّعة.

٦- وظلَّت القدرة العالمية على الإثراء أعلى من إجمالي الطلب السنوي، في حين بقيت سائر أنشطة دورة الوقود بمستويات ثابتة نسبيًا. ومن أجل المساهمة في توكيد إطار الإمدادات، تم الاضطلاع بقدر كبير من العمل

بشأن الترتيبات المالية والقانونية والتقنية المتعلقة بإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في كازاخستان.

٧- ويتعيَّن عمليًا على الدول الأعضاء جميعها أن تتصرَّف بشكل ما في النفايات المشعّة. لذا أكَّد المحفل العلمي، الذي عُقد خلال دورة مؤتمر الوكالة العام الثامنة والخمسين، ضرورة اتِّباع نهج شامل ومتكامل "من المهد إلى اللحد" حيال التصرُّف في النفايات المشعّة، كما سلَّط الضوء على واقع وجود حلول يمكن تنفيذها في هذا الصدد.

٨- وبسبب إرجاء اتِّخاذ قرار على صعيد السياسات بشأن التصرُّف في الوقود المستهلك في العديد من الدول الأعضاء، فقد استمر تزايد الكميات العالمية من الوقود المستهلك قيد الخزن. وفي عام ٢٠١٤، تم تفريغ نحو ١٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة كوقود مستهلك من جميع مفاعلات القوى النووية، فوصلت بذلك الكمية التراكمية للوقود المستهلك إلى زهاء ٣٨٠ ٥٠٠ طن من الفلزات الثقيلة، خُزِن منها قرابة ٢٥٨ ٧٠٠ طن في مرافق المفاعلات أو مرافق بعيدة عن المفاعلات.

٩- ومن شأن الخبرة الكبيرة التي اكتُسبت في مجال الإخراج من الخدمة منذ مطلع القرن أن تساعد على تناول القدر الكبير من العمل الذي يُتوقَّع القيام به في هذا المجال في السنوات القادمة: فثمة ١٤٩ محطة قوى نووية على نطاق العالم تم إغلاقها على نحو دائم أو تجتاز عمليات إخراج من الخدمة، من ضمنها ١٧ محطة أخرِجت من الخدمة على نحو كامل. وما يزيد قليلاً على نصف جميع المفاعلات العاملة بلغ ٣٠ عامًا من العمر التشغيلي، منها نحو ١٤٪ بلغ أكثر من ٤٠ عامًا من العمر التشغيلي. وبرغم أن بعضها قد يستمر تشغيله لمدة تصل إلى ٦٠ عامًا، فإن العديد منها سيُسحب من الخدمة في غضون العقدين القادمين. وبالإضافة إلى ذلك، ثمة أكثر من ٤٨٠ من مفاعلات البحوث والمجمعات الحرجة، وعدّة مئات من المرافق النووية الأخرى، مثل مرافق التصرُّف في النفايات المشعّة أو مرافق دورة الوقود، تم إخراجها من الخدمة أو تجتاز عمليات إخراج من الخدمة.

١٠- وبالمثل، قامت بعض البلدان ببناء موارد تقنية وخبرة فنية على النحو الملائم في إطار استصلاح الأراضي المتضرِّرة بممارسات وحوادث سابقة إلا أن العديد من البرامج الوطنية ذات الصلة ما زالت تواجه تحدِّيات كبيرة تعوق تنفيذ برامج الاستصلاح. وأحرزت اليابان تقدُّما كبيرًا في استصلاح الأراضي المتضرِّرة جرَّاء حادث فوكوشيما داييتشي، وأرسِيت سبل تنسيق جيدة بين أنشطة الاستصلاح من جهة وجهود الإعمار وتجديد النشاط من الجهة الأخرى. ويتَّسم بأهمية قصوى تقاسم الدروس المستفادة من أعمال الاستصلاح مع المجتمع الدولي.

١١- وباشرت الأوساط الدولية المعنية بالبيانات النووية مهمَّة توحيد ملفَّات البيانات النووية المقيَّمة، التي تشكِّل العمود الفقري لجميع جوانب التكنولوجيا النووية، من خلال مشروع التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة الذي تضطلع به وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية في الميدان الاقتصادي. وسيُوجد ذلك ملفَّات منفردة للنُوى ذات الأولوية العليا، وهي: الهيدروجين والأكسجين والحديد والأكتينيدات الرئيسية التي يمكن أن تستخدمها جميع مشاريع التقييم فيما يتعلق بالتطبيقات كافة.

١٢- وفي عام ٢٠١٤، استُهلَّ مشروعًا معجِّلات واسعًا النطاق، كلاهما في أوروبا. وسيمكِّن مرفق الوكالة التجريبي المتعدِّد التقنيات الجديد، الذي أنشِئ كمحطة نهائية لخط الحزم الإشعاعية لتألُّق الأشعة السينية، في

مرفق أليترا بتريستا، إيطاليا، أفرقة بحوث من الدول الأعضاء، وبخاصة من الدول الأعضاء النامية، من الاستفادة من أحدث مرفق سنكروترون.

١٣- وما زالت أغلبية الـ٢٤٧ من مفاعلات البحوث والمرافق الحرجة التي هي قيد التشغيل غير مستغلَّة بالكامل إلى حدّ كبير علمًا بأن متوسط عمرها التشغيلي يفوق ٤٥ عامًا. وتقوم ستة بلدان، في الوقت الحاضر، بتشييد وحدات جديدة منها، في حين تعكف عدّة بلدان أخرى على تخطيط وحدات جديدة أو تدرس بناءها. وتهدف المبادرات من قبيل مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت ومركز الوكالة الدولي المسُمَّى القائم على مفاعلات البحوث إلى تعزيز التعاون الدولي في مجال التعليم والتدريب وكفاءة استخدام هذه المرافق.

١٤- وعلى الرغم من عدم وجود أي أوجه قصور رئيسية في إمدادات النظير الطبي، الموليبدينوم-٩٩، خلال عام ٢٠١٤، فما زالت تظهر تحديات تشغيلية في مرافق المعالجة وفي مفاعلات البحوث الأكثر قدما.

١٥- وتَواصلت الأنشطة العالمية الرامية إلى التقليل إلى أدنى حدّ من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع النووي المدني، حيث تم حاليًا تحويل ٩٢ مفاعل بحوث من أصل ٢٠٠ مفاعل بحوث تندرج ضمن نطاق تنفيذ مبادرة الولايات المتحدة الأمريكية العالمية لتقليص التهديدات، من استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، أو تأكيد أنها باتت مغلقة. وبحلول نهاية عام ٢٠١٤، كان قد أنجِز ما نسبته ٧٦٪ من برنامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الذي سبق أن ورَّدته الولايات المتحدة الأمريكية وما نسبته ٨٦٪ من برنامج استرداد هذا النوع من الوقود الروسي المنشأ.

١٦- وتساعد مختبرات الوكالة للتطبيقات النووية، الكائنة في زايبرسدورف، قرب فيينا، الدول الأعضاء على تعزيز استفادتها من الاستخدامات السلمية للتكنولوجيات النووية منذ عام ١٩٦٢. ويُقدَّم الكثير من هذه المساعدة عن طريق برنامج الوكالة للتعاون التقني، فتلبَّى بذلك وبشكل مباشر احتياجات الدول الأعضاء في مجالات معيَّنة مثل الأغذية والزراعة، والصحة البشرية، والبيئة البرية، والأجهزة النووية. وتشكِّل مبادرة الوكالة الجديدة، وهي مشروع تجديد مختبرات التطبيقات النووية، أول عملية تجديد شامل للمختبرات منذ إنشائها. وترمي المبادرة إلى الارتقاء بالمختبرات إلى مستوى مختبرات ملائمة للغرض تسعى إلى مساعدة الدول الأعضاء على مواجهة التحدِّيات العالمية في مجال التطوير على مدى العقدين القادمين.

١٧- وتؤدي التكنولوجيات النووية والتكنولوجيات المتصلة بالمجال النووي دورًا مهمًا في مجال صحة الحيوان، ولا سيما فيما يتعلق بتشخيص الأمراض، وفي تحديد خصائص الكائنات المُمرِضة.

١٨- وتُعدُّ اللقاحات أدوات مهمّة لحماية الحيوانات والبشر من الأمراض. وتتيح التطورات التي شهدتها الآونة الأخيرة في تشعيع اللقاحات استحداث لقاحات تنشط عملية الأيض إنما دون حاجة إلى تكرار استخدامها فتتيح، بالتالي، استجابة من الجهاز المناعي مماثلة للاستجابة في حالة التعرّض لكائن مُمرِض حيَّ.

١٩- كما يُعدُّ التشخيص المبكِّر والسريع أمرًا بالغ الأهمية في مكافحة انتشار الأمراض العابرة للحدود. وعلى الرغم من كون الأنزيمات والأصباغ المتألِّقة بالفلورة فعَّالة لغرض التشخيص وعملية لغرض الاستخدام الميداني، فثمة ضرورة تقتضي استخدام تقنيات نووية في الحالات التي تتطلَّب مستويات عالية من الحساسية والخصوصية النوعية (على سبيل المثال، لأغراض تشخيص فيروس إنفلونزا الطيور أو داء الحمّى القلاعية أو حمّى وادي الصدع أو حمّى الخنازير الأفريقية).

٢٠- وحدث تحسُّن بالغ الأهمية في تشخيص الأمراض المعدية مع ظهور تكنولوجيات منصّة تضخيم الحمض النووي (مثل التفاعل البوليميري المتسلسل). وتتمثَّل الميِّزة الرئيسية لهذه التقنيات في أن المستويات المنخفضة للغاية من العدوى يمكن كشفها في الحيوانات بما يتيح كشف الكائنات الممرِضة قبل ظهور المرض. وكشف الكائنات الممرِضة بشكل مبكِّر أمر ضروري للوقاية من تفشِّي الأمراض، مثل تفشِّي مرض فيروس إيبولا في عام ٢٠١٤ الذي هو الأسوأ في غرب أفريقيا. واستكملت الوكالة الجهود الدولية في هذا الصدد من خلال مساعدة الدول الأعضاء الأفريقية على استحداث أو تعزيز ما يلزمها من قدرات وسبل تشبيك على الصعيدين الوطني والإقليمي في إطار تطبيق تكنولوجيات تشخيص ومكافحة سريعة ودقيقة. ومن المسلَّم به أن إحدى هذه المنصات التكنولوجية، أي تقنية التفاعل البوليميري المتسلسل بواسطة الاستنساخ العكسي، هي تقنية سريعة وكفئة في تشخيص مرض فيروس الإيبولا.

٢١- ويمكن استخدام تقنية تحليل النظائر المستقرَّة لتوفير الوسائل اللازمة لفهم وبائيات الأمراض الحيوانية المنشأ. وينطوي استخدام النظائر المستقرَّة لتحديد خصائص فئة حيوانية على فحص العلامات النظيرية لعدد قليل من أفرادها الذين هم ممثِّلون للطائفة المعنية بأسرها. وحال معرفة النسق النظيري لفئة معيَّنة، فإن أي فرد من أفرادها يمكن أن يتيح معلومات عن الهجرة العالمية لهذا النوع.

٢٢- ومن الأهمية بمكان القيام على نحو فعَّال بقياس جرعة الإشعاعات التي يتعرَّض لها المريض أثناء العلاج والتشخيص الإشعاعيين إما للتحقُّق من أن العلاج يُنفَّذ على النحو المحدَّد أو لتقدير المخاطر المرتبطة بواقع تعرِّض المريض للإشعاعات أثناء تنفيذ أحد إجراءات التصوير الطبي.

٢٣- ويُستخدم التشخيص عن طريق التصوير بالأشعة السينية في طائفة متنوِّعة من أنواع الفحوص، بدءًا من التصوير الإشعاعي الإسقاطي البسيط وانتهاءً بالتصوير المقطعي العرضي الحركي المتقدِّم. وقد أفضى ذلك إلى استحداث طائفة واسعة أيضا من كميات قياس الجرعات، وأجهزة القياس، فضلاً عن التقنيات، التي تثير جميعها تحدِّيات أمام العاملين في البيئة السريرية.

٢٤- ويشكِّل متطلَّبا رئيسيا في إجراءات العلاج الإشعاعي ضرورة وجود معايير وإجراءات مرجعية متسِّقة لقياس الجرعات. ويجري العمل حاليًا على إعداد معايير ومبادئ توجيهية جديدة لمواكبة أوجه التقدُّم في تقنيات وتكنولوجيا العلاج الإشعاعي.

٢٥- وطرأت في الآونة الأخيرة زيادة في تقنيات العلاج الإشعاعي التي تستخدم مواضع صغيرة، الأمر الذي زاد من حالة عدم التيقُّن من قياس الجرعات السريرية وأثار الشكوك في مدى ملاءمة تطبيق بروتوكولات قياس الجرعات المرجعية القائمة التي تم إعدادها لمواضع أكبر من ذلك. ويجري وضع مدونة قواعد لقياس الجرعات من شأنها توحيد قياس الجرعات التي تتلقَّاها مواضع صغيرة.

٢٦- والأوعية المعايرة في شكل بئر هي مقياس الجرعات المفضل في معايرة المصادر المشعّة التي تُستخدم في العلاج الإشعاعي الداخلي. بيد أنه لا يُوجد مبادئ توجيهية مواءمة دوليا لتوكيد جودة/مراقبة جودة جميع المصادر التي تُستخدم في العلاج الإشعاعي الداخلي وأيضا لما يرتبط بذلك من أجهزة مُوصى بها لقياس الجرعات. ويجري بذل جهود هدفها تحديد مستويات الجرعة الممتصة في الماء من أجل تحقيق مواءمتها مع المستويات المحدَّدة في مدونة قواعد قياس الجرعات الناتجة عن العلاج الإشعاعي بالأشعة الخارجية.

٢٧- وقد تم إحراز تقدُّم مثير للإعجاب في تطوير تكنولوجيات إنتاج النظائر المشعّة فأتاح ذلك توسيع نطاق الاستفادة من عدد من النويدات المشعة الجديدة، بما في ذلك الغاليوم-٦٨، والنحاس-٦٤، والزركونيوم-٨٩، والزنك-٦٣، وسهَّل تطوير تكنولوجيات قائمة على المعجِّلات تكفل إنتاجًا تجاريًا للتكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر الذي ما يزال النويدة المشعة الأكثر استخدامًا في مجال التشخيص. وقد يؤدِّي توفُّر النظائر المشعة الجديدة للتطبيقات الطبية إلى حل مشاكل سريرية غير متوقَّعة حتى الآن. وأخذت أوجه التقدُّم هذه تحدث تغييرًا إلى حدّ كبير في أرضية الطب النووي.

٢٨- ويشكِّل ضمان الحصول على مياه الشرب المأمونة، فضلا عن إمدادات المياه العذبة الوافية لأغراض الإصحاح، وإنتاج الأغذية، وتوليد الطاقة، تحدِّيا مستمرا للعديد من البلدان. وقد ساهمت في السنوات الأخيرة الأدوات والنُهُجْ النظيرية الجديدة، بالتضافر مع التطورات التحليلية المبتكرة، في إحداث توسُّع كبير في استخدام النظائر البيئية لفهم ورصد وتقييم مدى أثر تغيُّر المناخ على المياه وسائر الموارد الطبيعية.

٢٩- ولعمليات التقييم الشاملة القائمة على أسس علمية تأثير بالغ على التنمية المستدامة. وتساهم حاليًا الأجهزة القائمة على الليزر التي هي أبسط وأرخص مما عداها ولا تتطلَّب سوى حد أدنى من الصيانة في توسيع نطاق التطبيقات القائمة على النظائر المستقرة. ويُتوقَّع أن يتواصل الطلب في المستقبل القريب على الأدوات النظيرية المستجدَّة اللازمة لتأريخ المياه الجوفية والتي تتطلَّب أساليب تحليلية أكثر تطورا لقياس نظائر الغازات الخاملة والنويدات المشعة الطويلة العمر.

٣٠- وتؤثِّر الزيادات في ثاني أكسيد الكربون المنتشر في الغلاف الجوي بشكل تدريجي في البيئة البحرية. وتوفِّر النويدات المشعة أدوات لها تأثير قوي على فهم دورة الكربون المتغيِّرة وكيفية تأثير ذلك على الكائنات الحية. ويمكن أيضًا استخدامها لإعادة تكوين صورة التغيُّرات القديمة في كيمياء مياه البحر من أجل فهم التغيرَّات الحالية والكيفية التي قد تؤثِّر بها هذه التغيُّرات الأخيرة في المحيطات مستقبلاً.

٣١- وعندما يتم امتصاص ثاني أكسيد الكربون في المحيطات فأنه يُحمِّض المياه، الأمر الذي يؤثِّر، بدوره، في الكائنات البحرية. وتُستخدم النظائر المشعة لاستقصاء التغيُّرات التي تطرأ على العمليات في الكائنات البحرية، مثل التكلس والتمعدن الحيوي والاستقلاب، استجابة لهذه الحموضة المتزايدة.

٣٢- وتُستخدم تقنيات النظائر النووية والمستقرة لإعادة تكوين صورة أحداث التلوُّث السابقة، وتتبُّع اتجاهات التلوُّث، وتقييم مدى فعَّالية تدابير مكافحة التلوُّث. كما أنها تستخدم لدراسة مصادر التلوُّث البري الناتج عن المواد المغذيِّة التي تسبب الإثراء الغذائي الساحلي، من أجل التمييز بين التركيزات البشرية المنشأ والتركيزات الطبيعية للملوِّثات، وتحديد مصادر التلوُّث لأغراض دراسات الطب الشرعي التي تتناول التلوُّث، والتعرُّف على السموم البيولوجية ذات الصلة بتكاثر الطحالب الضارة.

٣٣- ويشكِّل تلوُّث المياه الساحلية بالنفط مشكلة بيئية عالمية ناجمة عن التفريغات الهيدروكربونية البترولية. وثمة حاجة متزايدة لاتِّباع أساليب حسَّاسة وموثوق بها لرصد التلوَّث النفطي وأثره، ووضع أساليب من شأنها أن تحدِّد منشأ التلوث النفطي لأغراض رقابية. وبهدف تتبُّع مصادر وجود النفط في البيئة البحرية، يُستخدم تحليل نسب نظائر الكربون المستقرة في الهيدروكربونات مقترنًا بأساليب كيميائية لضبط البصمات التي تتركها البقع النفطية ضبطًا دقيقًا.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٥

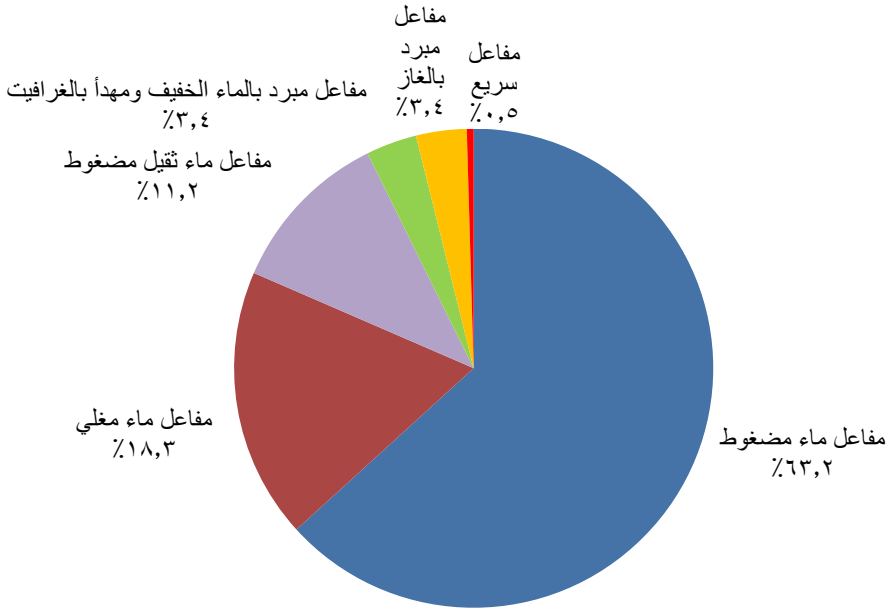
التقرير الرئيسي

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤، كان ثمة ٤٣٨ مفاعل قوى نووية قيد التشغيل على نطاق العالم، يبلغ إجمالي قدرتها على توليد الكهرباء ٣٧٦,٢ غيغاواط (كهربائي)[١] (انظر الجدول ألف-١). ويمثّل ذلك زيادة طفيفة تبلغ نحو ٤,٥ غيغاواط (كهربائي) في إجمالي القدرة مقارنةً بأرقام عام ٢٠١٣.

٢- ومن بين المفاعلات قيد التشغيل، يُوجد زهاء ٨١,٥٪ من المفاعلات المهدّأة والمبرّدة بالماء الخفيف؛ و١١,٢٪ من المفاعلات المهدّأة والمبرَّدة بالماء الثقيل والمبرّدة بالماء الثقيل؛ و٣,٤٪ من المفاعلات المبرّدة بالماء الخفيف والمهدأة بالغرافيت؛ و٣,٤٪ من المفاعلات المبرّدة بالغاز (الشكل ألف-١). ويوجد اثنان من المفاعلات السريعة المبرّدة بفلز سائل.



الشكل ألف-١ - التوزُّع الحالي لأنواع المفاعلات. (مفاعل ماء مغلي؛ مفاعل سريع؛ مفاعل مبرَّد بالغاز؛ مفاعل مبرَّد بالماء الخفيف ومهدَّأ بالغرافيت؛ مفاعل ماء ثقيل مضغوط؛ مفاعل ماء مضغوط).

---

[١] واحد غيغاواط (كهربائي) يساوي ألف مليون واط من القوى الكهربائية.

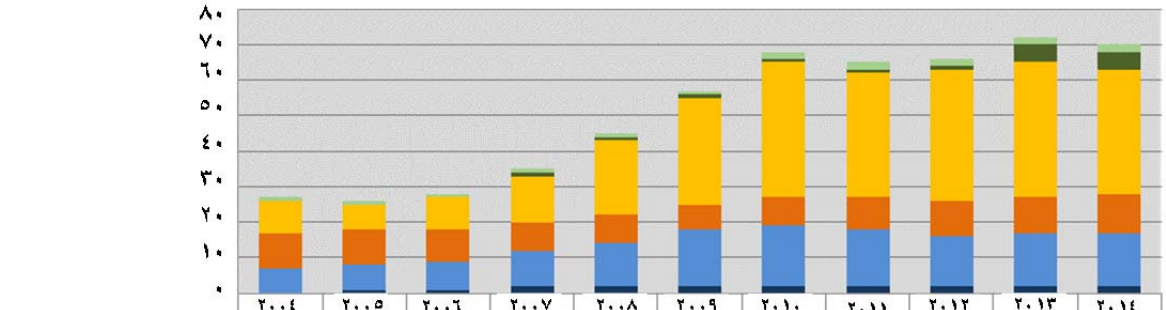
٣- وفي اليابان، أبقِيت الـ٤٨ وحدة من وحدات المفاعلات العاملة خارج نطاق التشغيل في عام ٢٠١٤. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٤، وافق محافظ مقاطعة كاجوشيما على استئناف تشغيل وحدتيْ محطة سينداي ١ و٢، اللتين أصبحتا الوحدتين الأوليين في البلد اللتين أجيز لهما استئناف التشغيل من قِبل السلطة الرقابية النووية وفقا لمعايير الأمان الجديدة التي تم فرضها بعد وقوع حادث فوكوشيما داييتشي النووي في آذار/مارس ٢٠١١. وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤، وافقت الهيئة الرقابية النووية في اليابان على استئناف تشغيل الوحدتين ٣ و٤ من مفاعلات تاكاهاما.

٤- وفي عام ٢٠١٤، تم وصل خمسة مفاعلات جديدة بالشبكة الكهربائية، وهي:أتوشا-٢ (٦٩٢ ميغاواط (كهربائي)) في الأرجنتين، ونينجدي-٢ (١ ٠١٨ ميغاواط (كهربائي))، وفوكينغ-١ (١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي))، وفانغياشان-١ (١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي)) في الصين؛ وروستوف-٣ (١٠١١ ميغاواط (كهربائي)) في روسيا. وكان قد بدأ تشييد وحدة مفاعل أتوشا-٢ أصلًا في عام ١٩٨١، إلا أنه أرجِئ ولم يُفعَّل من جديد إلا في عام ٢٠٠٩.

٥- ولم تحدث سوى عملية إغلاق دائم واحدة لمفاعل في عام ٢٠١٤. فد أنهت محطة فيرمونت يانكي ذات الوحدة الواحدة، بالولايات المتحدة الأمريكية، عمليات التشغيل التجارية في ٢٩ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤ بسبب اعتبارات مالية.

٦- ولم يكن سوى ثلاث حالات تشييد لمفاعلات في عام ٢٠١٤، وهي : بيلاروسيان-٢ في بيلاروس، وبركة-٣ في الإمارات العربية المتحدة، وكارم-٢٥، وهو نوع متكامل صغير من تصميم مفاعل ماء خفيف مضغوط في الأرجنتين.

٧- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤، كان ٧٠ مفاعلاً قيد التشييد. وكما كانت الحال في السنوات السابقة، ظلَّت حالات التوسّع وكذلك آفاق النمو في الأجلين القريب والطويل مركَّزة في آسيا (الشكل ألف-٢)، ولا سيما في الصين. ومن أصل إجمالي عدد المفاعلات قيد التشييد، ثمة ٤٦ مفاعلاً في آسيا، كما أن فيها ٣٢ مفاعلاً من أصل آخر ٤٠ مفاعلاً جديدًا تم وُصلها بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٤.



	٢٠٠٤	٢٠٠٥	٢٠٠٦	٢٠٠٧	٢٠٠٨	٢٠٠٩	٢٠١٠	٢٠١١	٢٠١٢	٢٠١٣	٢٠١٤
أمريكا - اللاتينية	١	١	١	١	١	١	٢	٢	٢	٢	٢
أمريكا - الشمالية	٠	٠	٠	١	١	١	١	١	١	٥	٥
آسيا - الشرق الأقصى	٩	٧	٩	١٣	٢١	٣٠	٣٨	٣٥	٣٧	٣٨	٣٥
آسيا - الشرق الأوسط وجنوب آسيا	١٠	١٠	٩	٨	٨	٧	٨	٩	١٠	١٠	١١
أوروبا - الوسطى والشرقية	٧	٧	٨	١٠	١٢	١٦	١٧	١٦	١٤	١٥	١٥
أوروبا - الغربية	٠	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢

الشكل ألف-٢ - عدد المفاعلات قيد التشييد حسب المنطقة.

٨- وفي عام ٢٠١٤، أحرزت عدة بلدان تقدُّماً كبيراً في سبيل تشييد أولى محطاتها للقوى النووية. وفي الإمارات العربية المتحدة، وافقت السلطة الاتحادية للتنظيم الرقابي النووي على طلب مؤسسة الإمارات للطاقة النووية بناء وحدتين اثنتين إضافيتين على موقع بركة. أما وحدات بركة ١، و٢، و٣، فهي قيد التشييد بالفعل ويُتوقَّع أن تكون عاملة بحلول عام ٢٠١٧، وعام ٢٠١٨، وعام ٢٠٢٠، على التوالي.

٩- وسكبت بيلاروس الطبقة الخرسانية الأولى من وحدتها الثانية في نيسان/أبريل ٢٠١٤ وانتقلت إلى مرحلة ما فوق الأرض من تشييد الوحدة ١. وكلتا الوحدتين مفاعلان مبردان ومهدآن بالماء طراز WWER-1200 من المقرَّر تشييدهما بموجب عقد تم توقيعه مع شركة Atomstroyexport التابعة للاتحاد الروسي في تموز/يوليه ٢٠١٢.

١٠- وتواصل تركيا تطوير البنية الأساسية لبرنامجها للقوى النووية. ففي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤، وافقت وزارة البيئة والتخطيط العمراني على تقييم الأثر البيئي لأربع وحدات مفاعلات مبرَّدة ومهدَّأ بالماء طراز WWE-1200 مقترح إقامتها في أكويو. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤، استدعت الهيئة الرقابية التركية منظمة معنية بالدعم التقني للمساعدة في استعراضها وتقييمها طلب رخصة تشييد خاصة بأكويو من المتوقَّع تقديمه في عام ٢٠١٥. وعقب التوصُّل إلى اتفاق على صعيد حكومي دولي تم توقيعه مع اليابان في عام ٢٠١٣، تعمل تركيا حاليا أيضا على مشروع محطة قوى نووية ثانٍ في سينوب وباشرت، بالتعاون مع شركائها، إجراء استقصاءات موقعية وإعداد دراسة جدوى تقنية.

١١- وفي كانون الثاني/يناير، أكَّد مجلس وزراء بولندا القرار القاضي بإدخال قدرة نووية قوامها ٦ ٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) ضمن مزيج الطاقة، إلى جانب خطط ترمي إلى تشغيل الوحدة الأولى منها بحلول عام ٢٠٢٤.

١٢- وفي عام ٢٠١٣، انتهت فييت نام من إعداد دراسات جدوى لموقعين ستُقام عليهما محطتا قوى نووية في نينه ثوان بقدرة إجمالية تبلغ ٤ ٠٠٠ ميغاواط (كهربائي). واستضافت فييت نام، في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٤، بعثة متابعة في إطار الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية قدَّمت إليها تعقيبات على ما أحرِز من تقدُّم في الإجراءات التي اتُّخذت في سياق تطوير بنيتها الأساسية النووية. وطلبت رسميا كل من كينيا والمغرب ونيجيريا إيفاد بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية بحيث يُحدَّد موعد إجراؤها في عام ٢٠١٥.

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤)[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٤		مجموع الخبرة التشغيلية خلال عام ٢٠١٤	
	عدد الوحدات	مجموع الميغاواط (كهربائي)	عدد الوحدات	مجموع الميغاواط (كهربائي)	تيراواط-ساعة	٪ من المجموع	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٤	٢٤ ٦٥٤	٩	٧ ٣٧١	١٦٩,١	١٨,٦	١ ١٥٧	٣
الأرجنتين	٣	١ ٦٢٧	١	٢٥	٥,٣	٤,١	٧٣	٢
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٣	٣٠,٧	٤٠	٨
إسبانيا	٧	٧ ١٢١			٥٤,٩	٢٠,٤	٣٠٨	١
ألمانيا	٩	١٢ ٠٧٤			٩١,٨	١٥,٨	٨٠٨	١
الإمارات العربية المتحدة			٣	٤ ٠٣٥				
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	١ ٩٠٠	٨٣,١	٤٩,٤	٤٤٣	٦
باكستان	٣	٦٩٠	٢	٦٣٠	٤,٦	٤,٣	٦١	٨
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٢٤٥	١٤,٥	٢,٩	٤٧	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩٢٧			٣٢,١	٤٧,٥	٢٦٨	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٢٦			١٥,٠	٣١,٨	١٥٧	٣
بيلاروس			٢	٢ ٢١٨				
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٩٠٤			٢٨,٦	٣٥,٨	١٤٠	١٠
جمهورية إيران الإسلامية	١	٩١٥			٣,٧	١,٥	٣	٤
جمهورية كوريا	٢٣	٢٠ ٧١٧	٥	٦ ٣٧٠	١٤٩,٢	٣٠,٤	٤٥٠	١
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٦٠			١٤,٨	٦,٢	٦٠	٣
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٨	١٨,٥	٢٥	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٤	٢	٨٨٠	١٤,٤	٥٦,٨	١٥٢	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٦,١	٣٧,٣	٣٣	٣
السويد	١٠	٩ ٤٧٠			٦٢,٣	٤١,٥	٤٢٢	٦
سويسرا	٥	٣ ٣٣٣			٢٦,٥	٣٧,٩	١٩٩	١١
الصين	٢٣	١٩ ٠٠٧	٢٦	٢٥ ٧٥٦	١٢٣,٨	٢,٤	١٨١	٧
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٣٠	٤١٨,٠	٧٦,٩	١ ٩٩٠	٤
فنلندا	٤	٢ ٧٥٢	١	١ ٦٠٠	٢٢,٦	٣٤,٧	١٤٣	٤
كندا	١٩	١٣ ٥٠٠			٩٨,٦	١٦,٨	٦٧٤	٦
المكسيك	٢	١ ٣٣٠			٩,٣	٥,٦	٤٥	١١
المملكة المتحدة	١٦	٩ ٣٧٣			٥٧,٩	١٧,٢	١ ٥٤٣	٧
الهند	٢١	٥ ٣٠٨	٦	٣ ٩٠٧	٣٣,٢	٣,٥	٤١٨	٦
هنغاريا	٤	١ ٨٨٩			١٤,٨	٥٣,٦	١١٨	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٩	٤,٠	٧٠	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٩	٩٨ ٦٣٩	٥	٥ ٦٣٣	٧٩٨,٦	١٩,٥	٤ ٠١٢	٤
اليابان	٤٨	٤٢ ٣٨٨	٢	٢ ٦٥٠	٠,٠	٠,٠	١ ٦٩٤	٤
المجموع [ب، ج]	٤٣٨	٣٧٦ ٢١٦	٧٠	٦٨ ٤٥٠	٢ ٤١٠,٤		١٦ ٠٩٦	١٠

(أ) استُقِيت البيانات من نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة، المتاح على الموقع الشبكي (http://www.iaea.org/pris)

(ب) ملحوظة: مجموع الأرقام هذا يتضمّن البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين:
٦ وحدات، ٥٠٣٢ ميغاواط(كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط(كهربائي) قيد التشييد؛
٤٠,٨ تيراواط- ساعة من الكهرباء المولَّدة نووياً، أي ما يمثّل ١٨,٩٪ من إجمالي حجم الكهرباء المولَّدة.

(ج) يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً و٨ أشهر)؛ وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ أشهر)؛ وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ أشهر)؛ وتايوان، الصين (٢٠٠ عاماً وشهر واحد).

١٣- وثمة عدّة بلدان قرَّرت إدخال العمل بالقوى النووية غدت في مراحل متقدِّمة من إعداد البنية الأساسية لهذا الغرض. وعقب التوصُّل إلى اتفاق على صعيد حكومي دولي مع الاتحاد الروسي بشأن التعاون على تشييد محطة روبور للقوى النووية المكوَّنة من وحدتين، بدأت بنغلاديش الأعمال التحضيرية الموقعية في عام ٢٠١٣، ويُتوقَّع البدء بالتشييد في عام ٢٠١٦. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٣، اختار الأردن شركة Atomstroyexport التابعة للاتحاد الروسي كجهة بائعة مفضَّلة، ويعمل في الوقت الراهن على تحديد خصائص موقع عمرة. وخلصت بعثة خاصة بالاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية أجرِيت في أب/أغسطس ٢٠١٤، إلى استنتاج مفاده أن الأردن أحرز تقدُّماً في إرساء بنيته الأساسية النووية كما قدَّمت توصيات بشأن اتِّخاذ مزيد من الإجراءات في هذا الصدد.

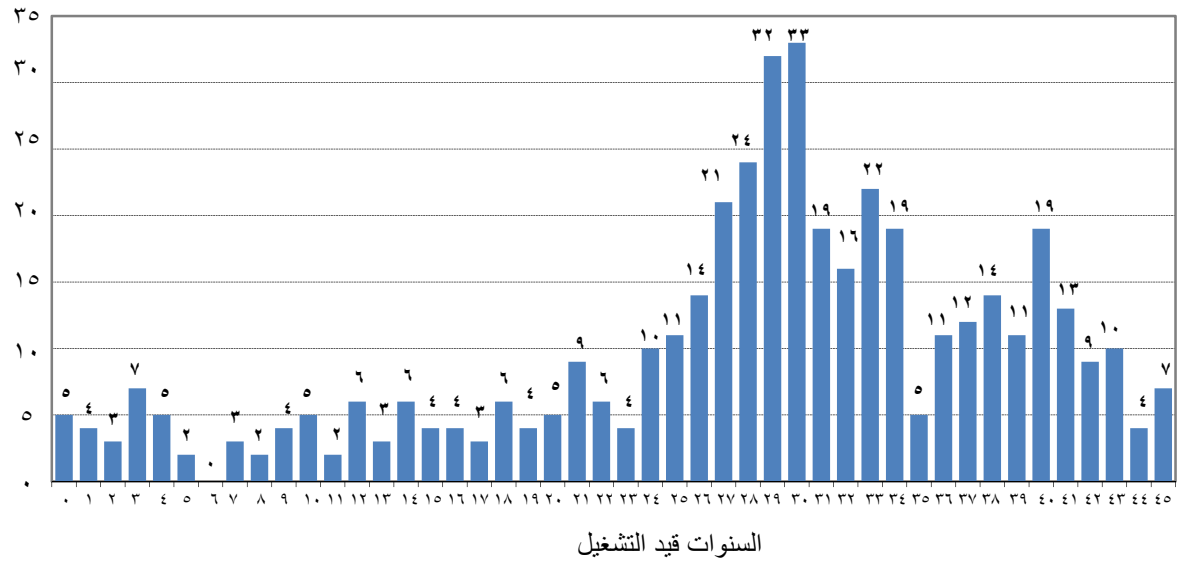
١٤- وتواصل عدّة بلدان النظر في إدخال القوى النووية لديها. ويعكف بعضها بهمِّة على التحضير لاتخاذ قرار مستنير بشأن احتمال تنفيذ برنامج قوى نووية، وتقوم عدّة بلدان بصوغ استراتيجياتها الخاصة بالطاقة لتشمل الأخذ بخيار القوى النووية. وينصب التركيز في هذه المرحلة على إرساء البنية الأساسية القانونية والرقابية الشاملة اللازمة لدعم برنامج قوى نووية، بالإضافة إلى تنمية الموارد البشرية المطلوبة.

١٥- ويظلُّ العمل على بناء القدرات من الأهمية بمكان في ضمان استمرار توافر عاملين أكفاء من أجل القيام على نحو مأمون وآمن ومستدام بإدارة برنامج قوى نووية أو التخلِّي تدريجيًا عن هذا البرنامج. وتم التشديد أيضًا على أهمية بناء القدرات في خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي (التي أقرَّها المؤتمر العام في عام ٢٠١١) التي تدعو الدول الأعضاء التي لديها برامج قوى نووية، وكذلك الدول التي تخطط للشروع في برنامج من هذا القبيل، إلى تعزيز برامجها لبناء القدرات وتطويرها واستيفائها وتنفيذها. وقام أكثر من ٣٠٠ مشارك من ٦٥ دولة عضوًا و٥ منظمات دولية حضروا مؤتمر الوكالة الدولي بشأن *تنمية الموارد البشرية لأغراض برامج القوى النووية: بناء واستدامة القدرات* الذي عُقد في فيينا في أيار/مايو ٢٠١٤، بمناقشة التحدِّيات التي تواجه بناء القدرات على الصعيد العالمي وتسليط الضوء على أهمية ضمان توفير إمدادات مستدامة من الموارد البشرية المؤهَّلة لهذا الغرض.

١٦- وأخذت المفردات المزيَّفة والمغشوشة والمشبوهة تشكِّل مصدر قلق متزايد للمنظمات المشغِّلة والهيئات الرقابية ويجري كشف ما يتصل بهذا المصادر من وثائق تدلِّل على نوعيتها. وفي بعض الحالات، عانت محطات قوى نووية قيد التشغيل أو قيد التشييد من آثار اقتصادية خطيرة، بما في ذلك حالات تم فيها إغلاقها مؤقَّتا، نتيجة لاستخدامها مفردات من هذا القبيل. وتتَّخذ المنظمات المشغِّلة عددا متزايدا من التدابير الوقائية، بما في ذلك زيادة الوعي والتدريب، وتحسين مواصفات المشتريات، وإجراء عمليات تفتيش، فضلا عن الحدّ من ظاهرة الاستعانة بسماسرة. وتتزايد مطالبة الهيئات الرقابية بضرورة تقديم تقارير عن المفردات المزيَّفة والمغشوشة والمشبوهة، بما في ذلك المفردات التي تم كشفها قبل إقامة المحطة. وقامت الوكالة، في إطار المساعدة على معالجة هذه المسألة، بعقد اجتماع تقني، في أيلول/سبتمبر ٢٠١٤، ركَّز على أنشطة الشراء والمفردات المزيَّفة والمغشوشة والمشبوهة. وبدأت أيضًا بصوغ مبادئ توجيهية تقنية عن تصميم عمليات الشراء. وتتضمَّن هذه المبادئ توصيات بشأن كيفية تفادي استخدام المفردات المزيَّفة والمغشوشة والمشبوهة.

١٧- ومن أصل محطات القوى النووية قيد التشغيل البالغ عددها ٤٣٨ محطة، ثمة ٢٢٥ محطة ما زالت في الخدمة منذ ٣٠ عامًا أو أكثر من ذلك (انظر الشكل- ألف-٣). وتُوجد نماذج لإدارة أعمار تشغيل المحطات بما يكفل التشغيل الطويل الأجل إلى ما بعد مدد الرخص ذات الصلة. وثمة نموذج مُتَّبع في الولايات المتحدة الأمريكية وفي بعض الدول الأعضاء يستند إلى مفهوم ينطوي على تقديم "طلب تجديد الرخصة". ففي هذا

النموذج، تُصدر السلطة المعنية بالترخيص رخصة التشغيل لمدة تصل إلى ٤٠ عامًا بحيث يمكن تجديدها لفترة إضافية أقصاها ٢٠ عامًا لكل طلب تجديد. وحتى نهاية عام ٢٠١٤، كان قد حصل ما مجموعه ٧٣ مفاعلاً من أصل الـ٩٩ مفاعلاً العاملة في الولايات المتحدة الأمريكية على تجديد الترخيص لمدة ٢٠ عامًا. ويستند نموذج آخر للترخيص إلى عملية استعراض الأمان الدوري، وهو يُستخدم في المقام الأول بشأن المفاعلات العاملة في أوروبا. وبموجب هذا النموذج، ينبغي أن يجري المرخص له عملية استعراض أمان دوري على فترات فاصلة منتظمة، تكون عادة مرَّة كل عشر سنوات لتأكيد توافر شروط الترخيص والشروط البيئية. واستعراض الأمان الدوري هو استعراض شامل لجميع الجوانب الهامة من الأمان، وهو يرمي إلى تحديد الفجوات وسدِّها استنادًا إلى متطلبات الترخيص الراهنة. ويتمثَّل أحد التحدِّيات الرئيسية التي تواجه التشغيل الطويل الأجل في إعداد وتنفيذ برامج إدارة التقادم الرامية إلى تقييم سلامة الهياكل الأساسية والنظم وما يتبقَّى من العمر التشغيلي للمكوّنات ذات الأهمية البالغة. وقد وضعت الوكالة دليلاً برنامجيًا والعديد من أدلَّة إدارة التقادم التي تخص مكوِّنات محدَّدة بعينها.



الشكل ألف-٣- توزُّع مفاعلات القوى قيد التشغيل حسب أعمارها التشغيلية حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤. (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة، المتاح على الموقع الشبكي http://www.iaea.org/pris).

١٨- وتم إغلاق وحدتيْ دويل-٣ وتيهانجي-٢ في بلجيكا في عام ٢٠١٢ بعد اكتشاف عيوب في أوعية ضغط المفاعل الخاصة بكل منهما. وعقب إجراء استقصاءات دقيقة وبعد الوفاء بالمتطلبات الرقابية، استُؤنِف تشغيلهما في أيار/مايو ٢٠١٣. بيد أن إجراء مزيد من الاختبارات التعدينية حدا بالمرفق المشغِّل، وهو الكترابل، إلى إغلاقهما في آذار/مارس ٢٠١٤ إلى حين حل أوجه عدم التيقُّن بشأن تأثير النيوترونات على القوة الميكانيكية لفولاذ أوعية ضغط المفاعل. وبغية تبادل الدروس المستفادة بشأن السلامة الهيكلية، عُقدت دورة تدريب نظَمتها الوكالة، في أيلول/سبتمبر ٢٠١٤، واستضافها مركز بحوث الطاقة والبيئة والتكنولوجيا في مدريد، بإسبانيا، ركَّزت على تقييم آليات تدهور المكوِّنات الأساسية في محطات القوى النووية.

١٩- وأفضت عمليات إعادة تقييم الأمان، نتيجة لوقوع حادث فوكوشيما داييتشي، في كثير من الحالات، إلى صرف نفقات رأسمالية إضافية لتلبية المتطلبات الرقابية الجديدة. وسيكون لذلك تأثير على تكلفة توليد الطاقة النووية وقد يكون له تأثير أيضًا على الاستدامة الاقتصادية للتشغيل الطويل الأجل. ومن أجل تقييم الآثار

الاقتصادية، بدأت الوكالة بإعداد دليل تقني جديد يتناول نهج التقييم الاقتصادي للتشغيل الطويل الأجل في محطات القوى النووية.

ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية

٢٠- في إطار توقُّعات الوكالة في عام ٢٠١٤، ستنمو قدرة القوى النووية مما هي عليه حاليًا، أي ٣٧٢ ميغاواط (كهربائي)، إلى ٤٠١ ميغاواط (كهربائي) في سياق التوقُّعات المنخفضة، وإلى ٦٩٩ ميغاواط (كهربائي) في سياق التوقُّعات المرتفعة، بحلول عام ٢٠٣٠. وتعكس هذه التوقُّعات نموًا إيجابيًا بنسبة ٨٪ و٨٨٪ فيما يخص التوقُّعات المنخفضة والتوقُّعات المرتفعة، على التوالي. والتوقُّعات في عام ٢٠١٤ هي أدنى بنحو ٢٣ ميغاواط (كهربائي) في الحالة المرتفعة وبما مقداره ٣٤ ميغاواط (كهربائي) في الحالة المنخفضة[٢] مقارنةً بالتوقُّعات في عام ٢٠١٣. ومن بين العوامل التي تساهم في هذا الانخفاض حالات سحب مفاعلات من الخدمة على نحو أبكر مما كان متوقَّعًا، وإرجاء عمليات بناء جديدة، فضلاً عن إضافة تكاليف تُعزى إلى تنفيذ التعديلات الإضافية المتصلة بالأمان. غير أن الاهتمام بالقوى النووية ما يزال قويًا في بعض المناطق، ولا سيما في البلدان ذات الاقتصادات النامية والتي لديها احتياجات في مجال الطاقة. ويشير النمو المستمر إلى أن الأسس التي تدعم مواصلة استخدام القوى النووية لم تتغيَّر.

٢١- وتُستمد هذه التوقُّعات من تجميع التقييمات التي أجرِيت لكل بلد على حدة. ويستعرض الخبراء أوضاع جميع المفاعلات العاملة، والتمديدات المحتملة للرخص، وحالات الإغلاق المُعتزمة، ومشاريع التشييد المعقولة المتوخّاة على مدى عدّة عقود قادمة في الدول الأعضاء في الوكالة. ويتم إعداد التوقُّعات من خلال تقييم معقولية كل مشروع في ضوء الافتراضات العامة التي تنطوي عليها كل من حالة التوقُّعات المنخفضة وحالة التوقُّعات المرتفعة. ولا يُقصد منها أن تكون تنبؤيَّة ولا أن تعكس مجموعة السيناريوهات المستقبلية المحتملة بأكملها بدءًا من أدنى الحالات الممكنة وانتهاءً بأعلى هذه الحالات.

٢٢- وعلى المدى القصير، يُتوقَّع أن يؤثِّر انخفاض أسعار الغاز الطبيعي وتزايد قدرات الطاقة المتجدِّدة المدعومة في آفاق النمو النووي في بعض مناطق العالم المتقدِّم. ويعود السبب إلى حدّ ما في انخفاض أسعار الغاز الطبيعي هذه إلى تدّني مستوى الطلب نتيجة للظروف التي يشهدها الاقتصاد الكلي، فضلاً عن أوجه التقدم التكنولوجي. وعلاوة على ذلك، ما زالت الأزمة المالية الجارية تثير تحدِّيات أمام المشاريع التي تنطوي على كثافة رأس المال مثل مشاريع القوى النووية. ويتبنَّى الخبراء الافتراض القائل إن التحدِّيات المذكورة أعلاه، بالإضافة إلى حادث فوكوشيما داييتشي، قد تؤدِّي مؤقَّتا إلى إرجاء إقامة بعض محطات القوى النووية. فالأساسيات الكامنة في النمو السكاني والطلب على الكهرباء في العالم النامي، والاعتراف بالدور الذي تؤدِّيه الطاقة النووية في تفادي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، والمسائل المتعلقة بأمن إمدادات الطاقة، وتقلُّب أسعار الوقود الأحفوري بأنواعه، إنما هي عوامل تشير إلى استمرار الطاقة النووية في أداء دور مهم في مزيج الطاقة على المدى الأطول.

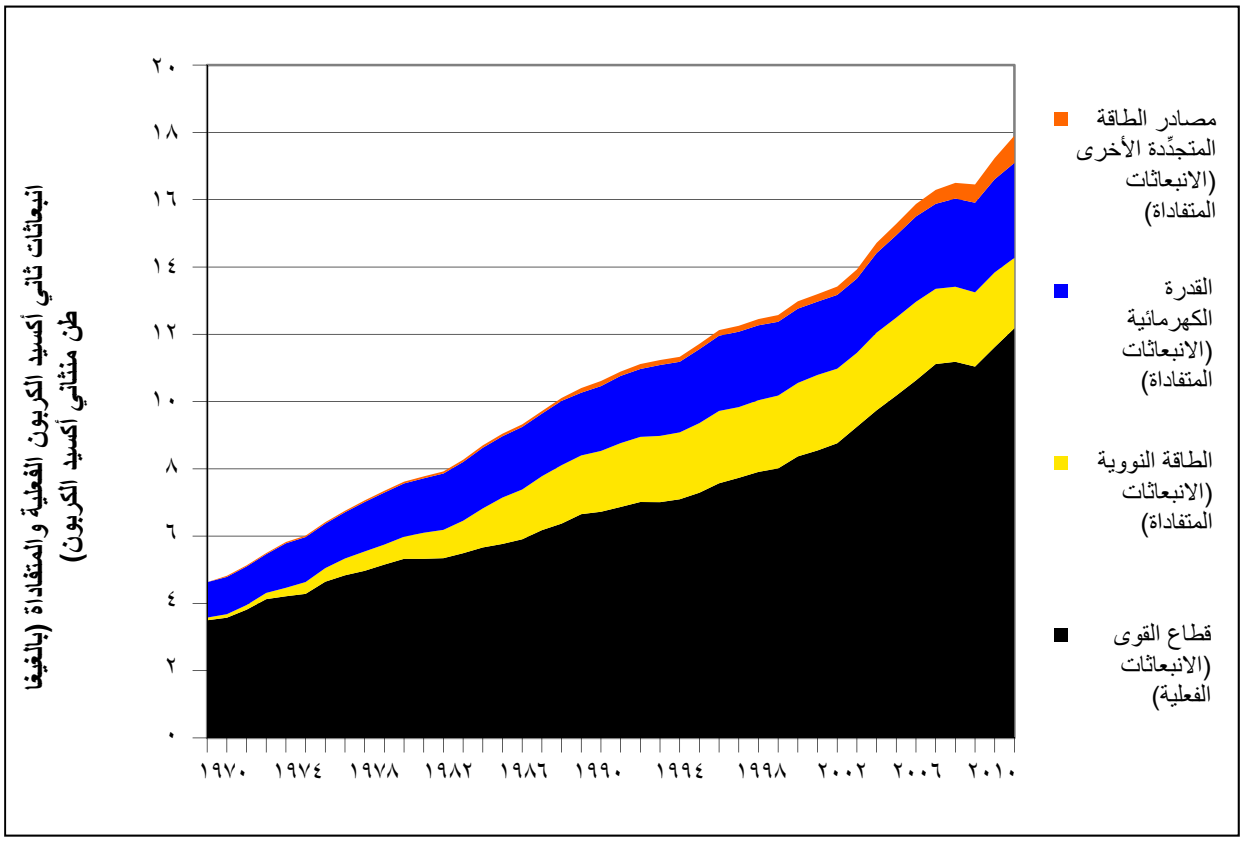
---

[٢] تتألَّف التوقُّعات من كل من القدرات المتاحة (أي القدرة على توريد الكهرباء في الوقت الراهن إلى الشبكة) والقدرة الاسمية المنشأة (أي القدرة المتاحة ولكنها لا تورّد الكهرباء في الوقت الراهن إلى الشبكة).

انبعاثات ثاني أكسيد الكربون التي تفادتها فعليا القوى النووية[٣]

ما فتئت القوى النووية تشكل جزءا من إمدادات الكهرباء في العالم على مدى أكثر من ٥٠ عامًا. وتنطوي الطاقة النووية على ميِّزة إضافية تتمثَّل في تفاديها انبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويظهر الشكل ألف-٤ الاتجاهات التاريخية لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون من قطاع الكهرباء العالمي والانبعاثات التي تم تفاديها عن طريق استخدام القدرة الكهرمائية والطاقة النووية وغيرها من مصادر الطاقة المتجدِّدة. ويبيِّن قطاع القوى الظاهر في أسفل الرسم البياني انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الفعلية المتولِّدة على مدى الـ٤٠ عامًا الماضية. والقيم الإضافية التي تظهر أعلى من المستويات الفعلية تمثِّل انبعاثات تم تفاديها عن طريق استخدام القوى النووية والقدرة الكهرمائية ومصادر الطاقة المتجدِّدة، التي بلغت ما يقارب ٦ غيغا طن (Gt) في عام ٢٠١١، أو وفرًا في شكل خفض في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بما يعادل ثلث إجمالي الانبعاثات التي كانت ستحدث لولا ذلك الاستخدام. ويُقدَّر أنَّ ما يزيد قليلًا عن ثلث هذا الوفر في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (٢,١ غيغا طن) جاء من القوى النووية.

وتعتمد هذه التقديرات للانبعاثات المتفاداة على افتراضات تستند إلى ماهية الكهرباء البديلة التي كانت ستُستخدم. وبالنسبة لتقديرات التفادي، فقد افتُرِض أن الكهرباء المتولِّدة كانت ستُنتج عن طريق زيادة التوليد باستخدام الفحم والنفط والغاز الطبيعي بنسبة حصة كل منها في مزيج مصادر توليد الكهرباء. ويُعدُّ ذلك نهجًا محافظا حيث إنه من الأرجح أنه كان سيُستعاض عن الطاقة النووية بالفحم بسبب وفرته محليًا.

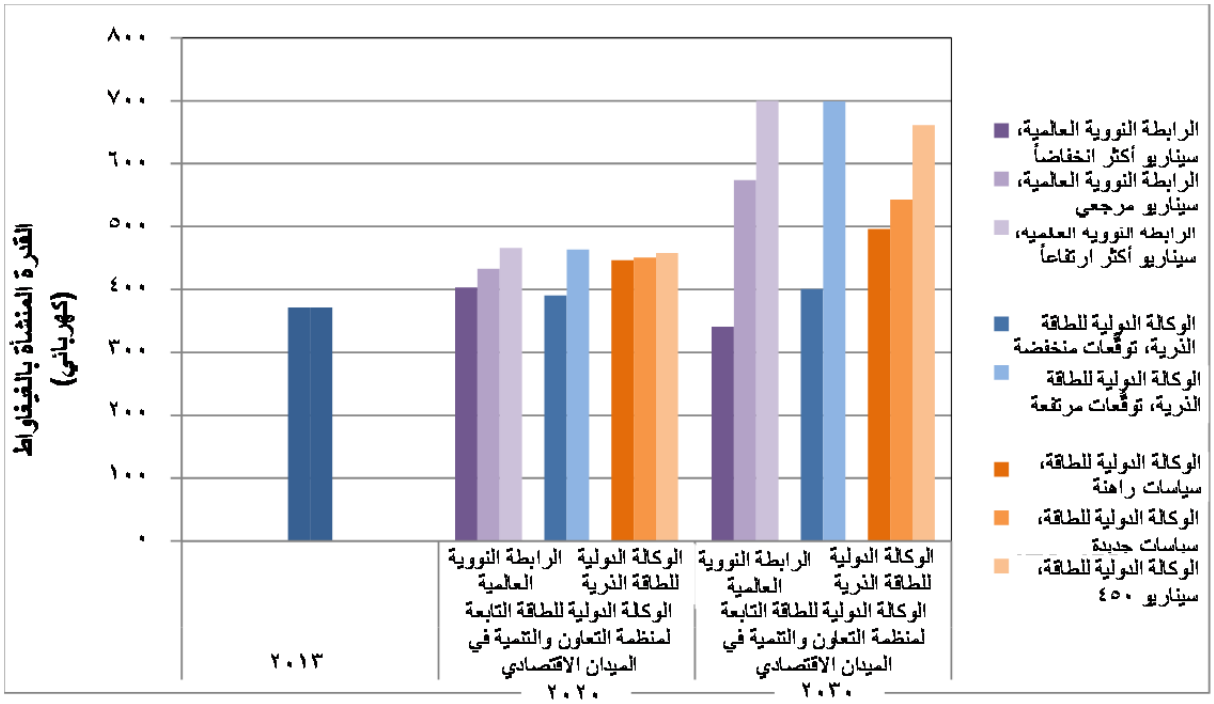


الشكل- ألف-٤- انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على الصعيد العالمي الناتجة عن قطاع الكهرباء وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون المتفاداة باستخدام ثلاث تكنولوجيات منخفضة الكربون. (مصدر البيانات: بالاستناد إلى إحصاءات وموازين

[٣] يُتاح مزيد من المعلومات عن القوى النووية وتغيُّر المناخ على الموقع الشبكي http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/publications.html

الطاقة العالمية (World Energy Statistics and Balances) الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي (٢٠١٤)، المتاحة على الموقع الشبكي (http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en)

٢٣- وتنشر أيضًا الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي توقُّعات بشأن النمو العالمي في مجال القوى النووية. ووفقاً لتوقعات الوكالة المذكورة الواردة في منشورها بعنوان *"استشراف الطاقة العالمية في عام ٢٠١٤" (World Energy Outlook 2014)*، ستصل القدرة العالمية على توليد الكهرباء نوويا، في إطار السيناريو المركزي لهذه الوكالة الذي يُشار إليه باسم "سيناريو السياسات الجديدة"، إلى ٥٤٣ ميغاواط (كهربائي) في عام ٢٠٣٠. ولا تنطوي هذه التوقُّعات على تغيير أساسي مقارنةً بالتوقُّعات منذ عام وهي تقارب متوسط توقُّعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية. ويورد الشكل ألف-٥ مقارنةً بين توقُّعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية في عام ٢٠١٤، وسيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي في عام ٢٠١٤،[٤] وتوقُّعات الرابطة النووية العالمية في عام ٢٠١٣. وتبرز السيناريوهات المرتفعة للمنظمات الثلاث لكل من عامَيْ ٢٠٢٠ و ٢٠٣٠ نتائج مماثلة، على الرغم من أن توقُّعات السيناريوهات المنخفضة لعام ٢٠٣٠ تظهر درجة عالية نسبيًا من الاختلاف.



الشكل ألف-٥- مقارنةً التوقُّعات بشأن القوى النووية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية والوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي في عام ٢٠١٤ (استنادًا إلى إجمالي غيغاواط (كهربائي)) والتوقُّعات بشأنها الصادرة عن الرابطة النووية العالمية في عام ٢٠١٣.

[٤] تستند الأرقام الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي إلى إجمالي غيغاواط (كهربائي).

ألف-٣- دورة الوقود

ألف-٣-١- موارد اليورانيوم وإنتاجه

٢٤- واصلت أسعار التسليم الفوري لليورانيوم انخفاضها من زهاء ٩٠ دولارًا للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم في بداية العام إلى ٧٠ دولارًا بحلول منتصف العام، وهو أدنى مستوى وصل إليه سعر الكيلوغرام الواحد من اليورانيوم على مدى عشر سنوات. بيد أنه بحلول آب/أغسطس ٢٠١٤، بدأت الأسعار تتعافى فوصلت إلى ١١٥ دولارًا للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم بحلول تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٤، وذلك قبل أن تشهد تراجعًا قليلاً بحلول نهاية العام. وعلى الرغم من الإبلاغ عن صرف قدر كبير من النفقات على عمليات الاستكشاف والتطوير، فثمة العديد من مشاريع التعدين الجديدة التي تم تأجيلها أو يُتوقَّع تأجيلها.

٢٥- وتزيد موارد اليورانيوم غير التقليدية من توسيع قاعدة الموارد. وتناهز ٨ ملايين طن من اليورانيوم التقديرات الحالية لليورانيوم الذي يُحتمل أن يكون قابلاً للاستخلاص كمنتج ثانوي غير مهم. وفي عام ٢٠١٤، أعلنت شركة فوس للطاقة (PhosEnergy) أن مواصلة التشغيل الموقعي لمحطتها الخاصة بإيضاح العمليات أظهرت بوضوح أن المعدلات المرتفعة لاستخلاص اليورانيوم (التي تفوق نسبتها ٩٢٪) قد تحقَّقت باستمرار خلال عمليات التشغيل في وضع مستقر. وما يزال مشروع الفوسفات/اليورانيوم البرازيلي، سانتا كيتيريا، قيد التطوير ومن المقرَّر أن يبدأ الإنتاج في عام ٢٠١٦.

٢٦- وقد أُجرِيت استقصاءات واسعة النطاق على مياه البحر كمصدر غير تقليدي لليورانيوم. ويذوب في محيطات العالم نحو ٤,٥ مليارات طن من اليورانيوم، عند مستويات تركيز منخفضة للغاية تبلغ نحو ٣,٣ أجزاء من المليار، وهو ما يمثل موردًا هائلاً من موارد الطاقة. وتتواصل البحوث في مكونات هذا المصدر المحتمل. وأفضت أوجه التقدُّم التي شهدتها الآونة الأخيرة في مجالات البحث والتطوير في وزارة الطاقة بالولايات المتحدة إلى خفض تكاليف استخلاص اليورانيوم بنحو ٥٠٪، أي من ١ ٢٣٠ دولارا إلى ٦١٠ دولارات للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم.

٢٧- وتُقدّر موارد الثوريوم في جميع أنحاء العالم بما يتراوح بين ستة ملايين وسبعة ملايين طن تقريباً. وبرغم أن الثوريوم يُستخدم وقودًا لأغراض إيضاحية، فما زال من الضروري القيام بكثير من العمل تمهيدًا لإمكانية استخدامه تجاريًا. وثمة بعض مشاريع العناصر الأرضية النادرة التي قد تنتج الثوريوم كمنتج ثانوي ومخلفات محتوية على الثوريوم، من المتوقع أن تبدأ مرحلة الإنتاج في المدى القريب، ولا سيما في كفانفيلد بغرينلاند (مملكة الدانمرك). وواصلت شركة ثور للطاقة (Thor Energy) برنامج اختبار وقود خليط أكسيد الثوريوم (موكس) ومدته خمس سنوات، في هالدن، بالنرويج.

٢٨- وتقدِّر الرابطة النووية العالمية أن حجم الإنتاج بلغ ٥٨ ٣٩٤ طنا من اليورانيوم في عام ٢٠١٢ و٥٩ ٣٧٠ طناً من اليورانيوم في عام ٢٠١٣. وفي عام ٢٠١٤، كان يتوقُّع أن تزداد الطاقة الإنتاجية بنحو ٧ ٥٣٠ طنًا من اليورانيوم مع افتتاح منجم سيجار ليك، في كندا، ومنجم فور مايل، في أستراليا، وكذلك مع الشروع في إنتاج اليورانيوم كمنتج ثانوي جرَّاء إنتاج النيكل في تلفيفارا، بفنلندا، وإدخال منجمين اثنين للنض الموقعي في الخدمة بالولايات المتحدة الأمريكية. بيد أن الزيادة الفعلية ستنخفض بسبب تأجيل تنفيذ مشروع تلفيفارا وإيقاف عمليات التعدين مؤقَّتًا في سيجار ليك لأسباب تكنولوجية.

٢٩- ويُتوقَّع أن تشهد نسبة الإنتاج باستخدام تقنية النض الموقعي، التي تظلُّ طريقة الإنتاج الغالبة، استمراراً في الزيادة في المدى المتوسط. وتفيد التقارير الصادرة عن الرابطة النووية العالمية بأن التعدين باستخدام تقنية النض الموقعي يشكِّل زهاء ٤٦٪ من حجم الإنتاج العالمي لعام ٢٠١٣، الذي هو أساسًا من كازاخستان (٣٨٪ من إجمالي الإنتاج العالمي في عام ٢٠١٣). وبسبب ظروف السوق غير المواتية، تم تأجيل العمل على استحداث مستودعات جديدة في كازاخستان وسيُحافظ على مستوى الإنتاج لعام ٢٠١٤ عند مستواه في عام ٢٠١٣ وهو ٢٢ ٥٠٠ طن من اليورانيوم.

٣٠- وبدأ منجم سيجار ليك في كندا عملية الإنتاج في آذار/مارس. بيد أنه بسبب مواجهة تحدِّيات تكنولوجية مستمرة، تم تعليق عمليات التعدين مؤقَّتا في تموز/يوليه ٢٠١٤. وتبلغ الطاقة الإنتاجية السنوية في الوقت الراهن ٥ ٠٠٠ طن من اليورانيوم سنويا ويُتوقَّع أن تزداد هذه الكمية إلى أكثر من ٨٠٠٠ طن سنويًا بدءًا من عام ٢٠١٨. وأنتجت في وحدة التجهيز بماكلين ليك، في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤، أول ركازة يورانيوم من خام اليورانيوم الذي تم تعدينه في عملية سيجار ليك (الشكل- ألف-٦). وتسعى وحدة التجهيز حاليًا إلى الحصول على موافقة لزيادة الطاقة الإنتاجية المرخص لها إلى ٢٠٠ ٩ طن من اليورانيوم. وتم رسميًا سحب طلب بناء وتشغيل منجم يورانيوم جديد تحت الارض كجزء من مشروع تعدين اليورانيوم للألفية في حوض أثاباسكا في شمال ساسكاتشوان، وقد بُرِّر ذلك بتردِّي ظروف الأسواق العالمية.

الشكل ألف-٦ - في كندا، أنتجت وحدة التجهيز بماكلين ليك أول ركازة يورانيوم من خام اليورانيوم الذي تم تعدينه في سيجار ليك. (الصورة من: شركة كاميكو)

٣١- وبسبب ظروف السوق، في ناميبيا، تقوم حاليًا جميع المناجم ووحدات التجهيز المنتِجة بخفض إنتاجها؛ وباستثناء مشروع تطوير منجم هوساب أوقِف تنفيذ مشاريع تطوير المناجم الأخرى جميعها بانتظار تطوُّر ظروف السوق على نحو أكثر مواتاة. ويتواصل تشييد منجم هوساب الذي يُتوقَّع أن يبدأ تشغيله بحلول عام ٢٠١٥ بطاقة كاملة يُحتمل أن تبلغ ٧٧٠ ٥ طنًا من اليورانيوم بحلول عام ٢٠١٧. واستُؤنِفت عمليات المعالجة في روسنغ بعد توقُّف لفترة قصيرة بسبب عطل في صهريج النض. واشترت الشركة الوطنية النووية الصينية ٢٥٪ من منجم لانغر هاينريتش لليورانيوم في ناميبيا.

٣٢- أما منجم إيمورارن، وهو منجم جديد في النيجر، طاقته الإنتاجية ٥ ٠٠٠ طن من اليورانيوم، الذي كان من المتوقع أن يبدأ العمل في عام ٢٠١٥، فيُحتمل تأجيل انطلاقته في الوقت الحاضر حتى عام ٢٠١٧ بسبب ظروف السوق. وقد يدخل مشروع مادويلا مرحلة الإنتاج في وقت مبكِّر وهو عام ٢٠١٧ بطاقة إنتاجية تبلغ ١ ٠٤٠ طنًا من اليورانيوم سنويًا تُستخلص من ٣٩ ٦٠٠ طن من اليورانيوم محتواة في شكل موارد ومن كمية إضافية تبلغ ١١ ٢٦٠ طنا من اليورانيوم مستمدَّة من مستودع مريام، يمكن تعدينها في منجم ذي حفر مفتوحة.

٣٣- وفي أيار/مايو ٢٠١٤، أفضى انخفاض أسعار السوق إلى وقف الإنتاج في منجم اليورانيوم، كايليكيرا بالادين، في ملاوي. وريثما تتحسَّن أسعار السوق، يمكن أن يُستأنف الانتاج في غضون مهلة إنجاز تدوم نحو تسعة أشهر. ويخضع حاليًا مستودع اليورانيوم في لتلهاكان ببوتسوانا لدراسة جدوى تفصيلية يُستهدف استكمالها في عام ٢٠١٥، ويُتوقَّع أن يتحقَّق أول إنتاج لهذا المستودع في عام ٢٠١٧. واستكملت دراسة استطلاعية تناولت مشروع اليورانيوم في الرقيبات بالجمهورية الإسلامية الموريتانية.

٣٤- وفي أستراليا، باشرت شركة كوازار للموارد عمليات التعدين باستخدام تقنية النض الموقعي في مستودعات فور مايل إيست. وأوصت هيئة حماية البيئة في غرب أستراليا بمنح موافقة الدولة على مشروع شركتي كاميكو-ميتسوبيشي المشترك في كينتير. وسيتوقَّف اتِّخاذ قرار بشأن عمليات التطوير على ظروف السوق مستقبلاً. واستُؤنِفت، في حزيران/يونيه ٢٠١٤، عمليات معالجة خام اليورانيوم المخزون في منجم رينجر الذي تعرَّض فيه صهريج النض لتصدُّع في نهاية عام ٢٠١٣. ويُستهدف البدء بالإنتاج من مستودعات رينجر-٣ ديبز في عام ٢٠١٥. ويعتزم مركز التعدين أولمبيك دام إجراء تجربة النض التكويمي لخام النحاس وخام اليورانيوم كبديل منخفض التكلفة لخطة التوسع الأصلية التي تم التخلِّي عنها في عام ٢٠١٢.

٣٥- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأ مشروع لوست كريك في ولاية وايومنغ عملية الإنتاج في عام ٢٠١٤.

٣٦- وتتوقَّع البرازيل أن تبدأ عملية تعدين جديدة في منجم ذي حفر مفتوحة بمستودعات إنغنهو في عام ٢٠١٥. ويُتوقَّع أن ينتج هذا المنجم نحو ٢٨٦ طنًا من اليورانيوم سنويًا. وستجري معالجة خام اليورانيوم في وحدة التجهيز، كايتيتيه، التي من المقرَّر أيضًا توسيعها لتنتج ما مجموعه ٦٧٠ طنا من اليورانيوم سنويًا بدءًا من عام ٢٠١٥.

٣٧- وفي تركيا، تم استكمال دراسات جدوى تمهيدية لمشروع تيمريزلي للنض الموقعي وتم أيضًا منح الرخص اللازمة لتطويره. ويُتوقَّع أن يبدأ فيه الإنتاج في عام ٢٠١٦ بكمية تبلغ ٣٨٥ طنًا من اليورانيوم سنويًا. وفي نيسان/أبريل ٢٠١٤، صدرت رخصة تعدين عامة لمنجم لليورانيوم في ريتوريللو بإسبانيا، مما قد يفضي إلى إصدار رخصة لمرفق دورة وقود نووي إذا تم التحقُّق من امتثاله للوائح النووية خلال عملية الترخيص. وتعتزم رومانيا فتح منجم يورانيوم جديد في شرق البلد، حيث إن موارد المنجم قيد التشغيل حاليًا في كروسيا قد استُنفدت.

٣٨- ويُخطِّط الأردن لاستثمار ١٤٠ مليون دولار في مشروع لتعدين اليورانيوم، بعد أن أعلِن عن إعادة تقييم موارد اليورانيوم في وسط البلد. وستكون لهذا المشروع طاقة إنتاجية أوَّلية تتراوح بين ٣٠٠ و٤٠٠ طن من اليورانيوم سنويًا، قابلة للتوسيع لتصل إلى ١ ٥٠٠ طن من اليورانيوم سنويا، ويُتوقَّع أن يغدو المشروع قيد التشغيل في غضون فترة تتراوح بين ٤ و٥ سنوات.

٣٩- وفي غرينلاند (مملكة الدنمارك)، تجري على قدم وساق دراسة جدوى لتقييم إنتاج اليورانيوم والعناصر الأرضية النادرة والزنك في كفانفيلد. وإذا مضى المشروع قدمًا كما هو مخطط له، فمن المتوقَّع أن ينتج ٤٢٥ طنًا من اليورانيوم سنويًا كمنتج ثانوي، ابتداء من عام ٢٠١٦.

٤٠- وأعلنت جمهورية إيران الإسلامية أن منجم ساغند لليورانيوم بات في المراحل النهائية من التطوير. وسيجري تعدين اليورانيوم في هذا المنجم باستخدام أساليب التعدين في حفرة مفتوحة والتعدين تحت الأرض وستتم معالجة خام اليورانيوم المعدَّن في وحدة التجهيز القائمة بالقرب من أرداكان.

٤١- وتقدِّر الرابطة النووية العالمية أن إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠١٤ غطَّى نحو ٩٢٪ من استهلاك اليورانيوم في المفاعلات الذي يُقدَّر بـ ٠١٥ ٧٠ طنًا من اليورانيوم. وهذا هو أعلى بكثير من حجم الاستهلاك في السنوات القليلة الماضية، ويرجع ذلك أساسًا إلى انتهاء مصدر العرض الثانوي ذي الحجم الكبير من المخزونات العسكرية، المعروف عمومًا باسم برنامج "صفقة اليورانيوم الشديد الإثراء" أو " برنامج تحويل الميغاطن إلى ميغاواط"، الذي انتهى في عام ٢٠١٣. أما نسبة الـ٨٪ الباقية من الاستهلاك فقد غُطِّيت من أربعة مصادر ثانوية، وهي: مخزونات اليورانيوم المثرى، واليورانيوم الذي أعيدت معالجته من الوقود المستهلك، ووقود موكس مع الاستعاضة جزئياً عن اليورانيوم-٢٣٥ بالبلوتونيوم المستخلص من الوقود المستهلك الذي أعيدت معالجته، وإعادة إثراء مخلفات اليورانيوم المستنفد. واستنادًا إلى معدل الاستهلاك التقديري لعام ٢٠١٣، سيدوم ٨٤ عامًا العمر التشغيلي للموارد الإجمالية التقديرية البالغة ٥,٩ ملايين طن من اليورانيوم التي هي مجدية اقتصاديًا بأسعار السوق الحالية.

ألف-٣-٢- التحويل والإثراء وتصنيع الوقود

٤٢- تقوم ستة بلدان (الاتحاد الروسي والصين وفرنسا وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية) بتشغيل محطات على نطاق تجاري لتحويل ثُماني أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8) إلى سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6)، كما توجد مرافق تحويل صغيرة قيد التشغيل في الأرجنتين وجمهورية إيران الإسلامية وباكستان والبرازيل واليابان. وتُستخدم في الولايات المتحدة الأمريكية عملية جافة لتطاير الفلوريد، فيما تستخدِم المحوِلاتُ الأخرى جميعها عملية رطبة. وقد ظلَّ إجمالي قدرة التحويل السنوية العالمية ثابتاً عند حوالي ٠٠٠ ٧٦ طن من اليورانيوم على شكل سادس فلوريد اليورانيوم سنوياً. ويتراوح إجمالي الطلب الحالي على خدمات التحويل (بافتراض أن نسبة إثراء المخلفات[٥] هي ٠,٢٥٪ من اليورانيوم-٢٣٥) بين ٠٠٠ ٦٠ و٠٠٠ ٦٤ طن سنوياً.

٤٣- وتستعيض شركة أريفا في فرنسا عن قدرتها الحالية على تحويل اليورانيوم التي توفِّرها الوحدة الأولى من محطة كوميوريكس المقَّرر إغلاقها في عام ٢٠١٥، بالمشروع الجديد الخاص بالوحدة الثانية من محطة كوميوريكس ذاتها، الذي يشتمل على مرافق تقع في مالفيسي وبيبيرلات. وتخطِّط شركة الوقود TVEL التابعة للاتحاد الروسي، من أجل الارتقاء بمستوى قدراتها على التحويل، للبدء بتشييد مركز جديد في المجمع الكيميائي السيبيري في عام ٢٠١٥، ويُتوقَّع إدخال المرحلة الأولى من هذا المركز في الخدمة في عام ٢٠١٨ وإدخال المرحلة الثانية منه في الخدمة في عام ٢٠٢٠.

٤٤- ويبلغ حالياً إجمالي قدرة الإثراء العالمية نحو ٦٥ مليون وحدة فصل سنوياً، مقارنةً بطلب إجمالي يبلغ زهاء ٤٩ مليون وحدة فصل سنوياً. وتضطلع بخدمات الإثراء التجارية خمس شركات، وهي: الشركة الوطنية

---

[٥] تُحدِّد نسبة إثراء المخلفات، أو معدل تركيز اليورانيوم-٢٣٥ في الجزء المستنفد، بشكل غير مباشر حجم العمل المطلوب القيام به بشأن كمية معيّنة من اليورانيوم من أجل ضمان إثراء مُنتَج بنسبة معيَّنة. وتؤدي أي زيادة في نسبة إثراء المخلفات مقترنةً بكمية ثابتة وبنسبة ثابتة من اليورانيوم المُثرّى داخل المنتَج إلى خفض كمية الإثراء اللازمة، ولكنها تزيد المتطلبات فيما يخص اليورانيوم الطبيعي والتحويل، والعكس بالعكس. ويمكن أن تتفاوت نسب إثراء المخلفات تفاوتا واسع النطاق مما يؤثر بالتالي على الطلب المتعلق بخدمات الإثراء.

النووية الصينية (الصين)، وشركة أريفا (فرنسا)، والشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" (الاتحاد الروسي)، وشركة يوسيك "شركة الولايات المتحدة للإثراء" (الولايات المتحدة الأمريكية)، وشركة يورينكو (في كل من أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية). وثمة أيضاً مرافق إثراء صغيرة في الأرجنتين وجمهورية إيران الإسلامية وباكستان والبرازيل والهند واليابان. وتعكف الأرجنتين على إعادة بناء قدراتها في مجال الانتشار الغازي في بيلكانيو.

٤٥- وأصبحت المرحلة الثانية من محطة يورينكو لإثراء اليورانيوم في نيو مكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية قيد التشغيل الكامل في عام ٢٠١٤، بقدرة تبلغ ٣,٧ ملايين وحدة فصل، مضيفةً بذلك قدرة إلى المرحلة الأولى من عمليات التشغيل التي بدأت في حزيران/يونيه ٢٠١٠ والتي بلغت كامل قدرتها وهي ١,٦ مليون وحدة فصل في عام ٢٠١٢. والعمل جار فعليًا على قدم وساق على تشييد المرحلة الثالثة من المحطة المعنية، التي عندما تنجز بحلول عام ٢٠٢٢، ستُوصل إجمالي قدرة المحطة إلى زهاء ٥,٧ ملايين وحدة فصل.

٤٦- ومحطة يورينكو في الولايات المتحدة هي محطة إثراء اليورانيوم الوحيدة قيد التشغيل في هذا البلد. ويُعتزم إنشاء ثلاث محطات إثراء إضافية. وتخطِّط شركة أريفا لبناء محطة طرد مركزي تبلغ قدرتها ٣,٣ ملايين وحدة فصل في إيجل روك بولاية إيداهو. كما تخطِّط "شركة الإثراء الشامل بالليزر" (Global Laser Enrichment) لإنشاء محطة إثراء بالليزر قدرتها ٦ ملايين وحدة فصل في ويلمنجتون بولاية كارولينا الشمالية. ويُتوقَّع أن تبدأ كلتا المحطتيْن عملياتهما قبل حلول عام ٢٠٢٠. أما محطة الطاردات المركزية الأمريكية التابعة لشركة يوسيك، التي كان قد أوقِف تنفيذ العمل فيها في عام ٢٠٠٩، فستبدأ برنامجًا جديدًا في مجال البحث والتطوير، وهو برنامج إيضاح وعمليات تكنولوجيا الطاردات المركزية الأمريكية، الذي سيجري تنفيذه حتى نهاية عام ٢٠١٥. والقصد من ذلك هو استيفاء مشروع تكنولوجيا الطاردات المركزية الأمريكية ومعالجة أوجه قصور تقنية معيَّنة تبدَّت في استخدام الطاردات المركزية الأمريكية في عام ٢٠١٤.

٤٧- وستوفِّر محطة ريزندي للإثراء، التي تديرها شركة الصناعات النووية البرازيلية، ما نسبته ٨٠٪ من اليورانيوم المثرَى اللازم لإعادة تزود محطة القوى النووية أنغرا-١ بالوقود في عام ٢٠١٥. وتخطِّط الشركة المذكورة لتوسيع نطاق هذا الإثراء تدريجيًا ليصل إلى نسبة ١٠٠٪. والعمل جارٍ على قدم وساق لإعداد دراسة عن تلبية الاحتياجات من الإثراء لجميع المفاعلات النووية البرازيلية.

٤٨- ويجري الاضطلاع في شكل أكثر استقرارا بإعادة تحويل[٦] سادس فلوريد اليورانيوم المستنفد إلى أكسيد اليورانيوم أو رابع فلوريد اليورانيوم لغرض الخزن الطويل الأجل لليورانيوم المستنفد. وظلَّ إجمالي القدرات العالمية الحالية على إعادة التحويل في عام ٢٠١٤ عند مستوى ٦٠ ٠٠٠ طن من سادس فلوريد اليورانيوم سنويًا تقريبًا. وفي الوقت الراهن، تتمثَّل المرافق الرئيسية قيد التشغيل في هذا الصدد، في محطة شركة أريفا القائمة في تريكاستن، بفرنسا، ومحطتين اثنتين لخدمات التصرُّف في اليورانيوم مقامتين في بورتسماوث وبادوكا، بالولايات المتحدة الأمريكية، ومحطة W-ECP لإعادة التحويل القائمة في موقع محطة زيلينوغورسك الكهروكيميائية في سيبيريا، بالاتحاد الروسي. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ثمة محطة قيد التشييد في نيو مكسيكو تديرها الشركة الدولية للنظائر. وتسلَّمت شركة كيمبلانتس التابعة لمجموعة يورينكو، بالمملكة المتحدة، في عام ٢٠١٠، موافقة الهيئة الرقابية والموافقة على التخطيط من أجل إقامة مرفق للتصرُّف في المخلَّفات،

---

[٦] من أجل تصنيع وقود اليورانيوم المثرى، يجب أن يُعاد تحويل سادس فلوريد اليورانيوم المثرى إلى مسحوق ثاني أكسيد اليورانيوم. ويشكِّل ذلك الخطوة الأولى في تصنيع الوقود المثرى. وتُسمَّى هذه العملية تحويل من جديد أو إعادة تحويل.

وتتوقَّع هذه الشركة أن يبدأ تشييد المرفق المذكور في عام ٢٠١٦. وسيتولَّى هذا المرفق معالجة الأرصدة الأوروبية من المنتجات الفرعية من اليورانيوم المستنفد وسيشمل محطة لإعادة تحويل سادس فلوريد اليورانيوم وعددًا من مرافق الخزن والصيانة ومعالجة المخلَّفات.

٤٩- وظلَّ الطلب السنوي الحالي على خدمات تصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف عند مستوى ٠٠٠ ٧ طن تقريبا من اليورانيوم المثرى في مجعات الوقود، ولكن يُتوقَّع أن يزداد إلى نحو ٠٠٠ ٨ طن من اليورانيوم سنوياً بحلول عام ٢٠١٥. وشكَّلت متطلبات مفاعلات الماء الثقيل المضغوط ٠٠٠ ٣ طن من اليورانيوم سنويًا. وثمة في الوقت الحاضر عديد من المورّدين الذي يتنافسون على معظم أنواع الوقود. وبقي إجمالي القدرة العالمية على صنع الوقود عند مستوى يقارب ٥٠٠ ١٣ طن من اليورانيوم سنويا (اليورانيوم المثرى) لغرض وقود مفاعلات الماء الخفيف، وعند مستوى يقارب ٠٠٠ ٤ طن من اليورانيوم سنويا (اليورانيوم الطبيعي) لغرض وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط. وفيما يخص وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط المصنوع من اليورانيوم الطبيعي، فإن اليورانيوم يُنقَّى ويُحوَّل من ثم إلى ثاني أكسيد اليورانيوم في كل من الأرجنتين ورومانيا والصين وكندا والهند.

٥٠- وبعد الحصول على موافقة الجهات الرقابية، بدأت الوحدة ١ في تيانوان الصين، وهي مفاعل قوى مبرَّد ومهدَّأ بالماء، باستخدام الوقود الجديد الذي أنتجته شركة الوقود TVEL، وهو الوقود TVS-2M، الذي يتيح استخداما لفترة ممتدة في قلب المفاعل تصل إلى ١٨ شهرًا. ويُستَخدم هذا النوع من الوقود فعليًا في مفاعليْ القوى النووية بالاكوفو وروستوف في الاتحاد الروسي. ومن المقرَّر أيضًا تحويل الوحدة ٢ من المفاعل تيانوان من أجل استخدام الوقود المذكور. وسيُصنَّع الوقود TVS-2M في محطة الوقود يبين بالصين من أجل استخدامه في الوحدتيْن ٣ و٤ من المفاعل تيانوان اللتين ما زالتا قيد التشييد.

٥١- وتقوم حاليا شركة ويستينغهاوس في الولايات المتحدة الأمريكية بتطوير أجهزة استشعار النيوترونات الحرارية الصوتية التي تُوضع داخل مجمعات قضبان الوقود لرصد قدرة قلب المفاعل وتوزُّع درجات الحرارة فيه. ويمكن لأجهزة الاستشعار هذه أن تساعد مشغلِّي المحطة على رصد قلب المفاعل بدقَّة أكثر بكثير مما هو جار حاليًا، الأمر الذي يتيح مزيدًا من الكفاءة في استخدام الوقود، كما يمكنها رصد العيوب وكذلك القضايا التي تمسُّ الأمان في قضبان الوقود. وسيتم اختبار النموذج الأولي لهذا الجهاز في عام ٢٠١٥، ويُتوقَّع استخدامه على نطاق تجاري أوسع بحلول عام ٢٠١٩.

٥٢- واستحدثت شركتا توشيبا وآيبيدن تكنولوجيا جديدة لصنع مكوِّنات الوقود النووي من كربيد السيليكون في اليابان بهدف تطوير وقود يتحمَّل الحوادث ليكون، في جملة أمور، بديلاً للكسوة المصنوعة من سبائك الزركونيوم المستخدمة في مفاعلات الماء الخفيف. واستُحدث نموذج أوَّلي لغلاف مجمعة الوقود وسيبدأ اختباره في مفاعل بحوث في عام ٢٠١٦.

٥٣- وتوفّر عمليات إعادة التدوير مصدراً ثانوياً للإمداد بالوقود النووي عن طريق استخدام اليورانيوم المعادة معالجته ووقود موكس. ويُنتج حاليًا نحو ١٠٠ طن من اليورانيوم المعادة معالجته سنويًا في شركة إيليكتروستال، بالاتحاد الروسي، لصالح شركة أريفا. ويتم في خط إنتاج واحد بالمحطة التابعة لشركة أريفا في رومان، بفرنسا، تحويل نحو ٨٠ طناً من الفلزات الثقيلة المستخلصة من اليورانيوم المعادة معالجته، إلى وقود سنوياً، لأغراض مفاعلات الماء الخفيف في فرنسا. وتبلغ القدرات العالمية الحالية على صنع وقود موكس نحو

٢٥٠ طنًا من الفلزات الثقيلة، ويقع المرفق الرئيسي في هذا الصدد في فرنسا، في حين تُوجد بعض المرافق الأصغر حجماً في الاتحاد الروسي والهند واليابان.

٥٤- ويصنِّع كل من الاتحاد الروسي والهند وقود موكس لاستخدامه في المفاعلات السريعة. والعمل جار على تشييد مرفق لصنع وقود موكس من أجل استخدامه في المفاعل السريع طراز BN-800 وذلك في زيليزنوغورسك، (Krasnoyarsk-26) بالاتحاد الروسي، حيث تُوجد أيضًا مرافق تجريبية في معهد بحوث المفاعلات الذرية بديميتروف غراد وفي محطة مایاك بأوزيرسك. وخضعت في الآونة الأخيرة محطة صنع وقود موكس القائمة في معهد بحوث المفاعلات الذرية لعملية تحديث وهي تنتج وقود موكس المُضغط بشكل اهتزازي. وتم إنتاج أول دفعة من أصل ٥٦ مجمعة من مجمعات وقود موكس من أجل الوحدة ٤ من المفاعل السريع طراز BN-800 القائم في بيلوياسك، وهي التي دخلت مرحلة الحرجية هذا العام. وقد استحدث وصنع معهد أتومستروي للبحوث والتصميم الخاص بتكنولوجيا التشييد النووي نظام لحام يُشغَّل عن بعد لإنتاج مجمعات وقود موكس. وسيُستخدم النظام الجديد في مرفق صنع وقود موكس الكائن في زيليزنوغورسك.

٥٥- وبدأ العمل على تشييد محطة تجريبية لإنتاج الوقود من أجل المفاعل السريع المأمون ضمنيا طراز BREST-300 الذي من المقرَّر بناؤه في المجمَّع الكيميائي السيبيري بالاتحاد الروسي. واستُكمل أيضًا اختبار مجمعة وقود TVS-5 بما فيها وقود خليط اليورانيوم ونتريد البلوتونيوم (الشكل- ألف-٧). ويُعتزم البدء بتشييد المفاعل طراز BREST-300 في عام ٢٠١٦ ويُتوقَّع أن يكتمل تشييده في عام ٢٠٢٠. والطراز BREST-300 نظام لمفاعل مبرَّد بالرصاص وضعه معهد البحث والتطوير في مجال هندسة القوى.

الشكل ألف-٧- مجمعة وقود TVS-5، النموذج الأوّلي لوقود المفاعل السريع المأمون ضمنياً المتقدِّم طراز BREST-300 (الصورة من: المجمَّع الكيميائي السيبيري)

٥٦- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تم تمديد رخصة تشييد مرفق صنع وقود موكس الذي كان قد بُنيَ جزئيا في موقع نهر سافانا في ولاية كارولينا الجنوبية، وذلك لمدة عشر سنوات ووافق مجلس الشيوخ الأمريكي على تمويل مواصلة أعمال التشييد.

ضمان الإمداد

٥٧- في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، وافق مجلس المحافظين على إنشاء مصرف لليورانيوم الضعيف الإثراء، تابع للوكالة، في كازخستان. ومنذ ذلك الحين، عملت أمانة الوكالة على وضع الترتيبات المالية والقانونية والتقنية لإنشاء هذا المصرف. وكان من بين هذه الترتيبات إجراء تقييم تقني شامل للمرفق المقترح أن يتضمَّن مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي عام ٢٠١٤، أجرِي تقييم للتأثير البرنامجي للأمان

الزلزالي على عموم أوجه مشروع مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء كان الغرض منه تحديد ما إذا كان من المحتمل أن يؤثِّر الصدع الجيولوجي القائم في المنطقة المجاورة تماماً للموقع المقترح أن يُقام عليه مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، على أمان هذا المصرف. وخلص "تقييم المخاطر البرنامجية" هذا، كما استعرضته بصورة مستقلة شركة استشارية دولية للهندسة الزلزالية، إلى استنتاج مفاده أنه يمكن ضمان الأمان الزلزالي لمصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء من خلال اتِّخاذ تدابير هندسية مناسبة، حتى في الحالة التي يُفترض فيها سيناريو ينطوي على حدث زلزالي شديد لغرض إجراء تقييم المخاطر البرنامجية. واستنادا إلى نتائج تقييم المخاطر البرنامجية المذكور، خلصت الوكالة وكازاخستان بثقة إلى أنه يمكن إنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في موقع محطة أولبا التعدينية. وبقيَ قيد التشغيل احتياطي من اليورانيوم الضعيف الإثراء في أنغارسك، كان قد أنشِئ عقب الاتفاق الذي تم التوصُّل إليه بين حكومة الاتحاد الروسي والوكالة في شباط/فبراير ٢٠١١.[٧]

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية من دورة الوقود النووي

٥٨- تُستخدم استراتيجيتان مختلفتان بشأن التصرُّف في الوقود المستهلك الناتج عن مفاعلات القوى. فإما أن يُخزن الوقود المستهلك وتُعاد معالجته بعد ذلك لاستخلاص مواد صالحة للاستعمال (من اليورانيوم والبلوتونيوم) من أجل صنع وقود جديد أو يُخزن إلى حين التخلُّص منه في مستودع جيولوجي عميق. وتمكِّن عمليات إعادة التدوير عبر إعادة المعالجة من تقليص كمية (حجم) النفايات القوية الإشعاع الواجب التخلص منها في نهاية المطاف، ومن زيادة استخدام المواد الانشطارية إلى أقصى قدر لإنتاج الطاقة. وفي الوقت الراهن، تقوم بلدان مثل الاتحاد الروسي والصين وفرنسا والهند والمملكة المتحدة بإعادة معالجة ما لديها من وقود مستهلك، في حين اختارت بلدان أخرى، مثل السويد وفنلندا، التخلُّص من الوقود المستهلك في إطار مجتمع محلي يقبل طوعًا استقبال مستودع لغرض التخلُّص. ولم تقرِّر بعدُ معظم البلدان أي من الاستراتيجيتين تتبنَّى؛ لذا فإنها تقوم حاليًا بخزن الوقود المستهلك ومواكبة المستجدَّات المرتبطة بكل من الاستراتيجيتين.

٥٩- ويُلزِم التوجيه الصادر عن مجلس الاتحاد الأوروبي، ذو الرقم 2011/70/Euratom، إلزامًا قانونيًا الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي بوضع واستيفاء سياسة بشأن التصرُّف في الوقود المستهلك والمواد المشعّة. وهو يبيِّن القواعد التي ينبغي أن تتبعها كل دولة عضو في الاتحاد الأوروبي فيما يتعلق بالإطار الوطني والهيئة الرقابية المختصة وحاملي الرخص والخبرات والمهارات والموارد المالية والشفافية وتقديم التقارير، من بين مسائل أخرى. وتتحمَّل كل دولة عضو في الاتحاد الأوروبي المسؤولية النهائية عن التصرف في الوقود المستهلك والنفايات المشعة التي تنتج فيها. وفي عام ٢٠١٤، أصدر المجلس الاستشاري للأكاديميات الأوروبية في مجال العلوم منشورا تناول فيه *التصرُّف في الوقود النووي المستهلك ونفاياته*، وهو تقرير يوفِّر معلومات لمقرِّري السياسات بشأن المسائل المهمَّة التي يتعيَّن أن تُؤخذ في الاعتبار عند وضع برامج وطنية ذات صلة. وخلص التقرير إلى استنتاج يفيد بأنه ينبغي لسياسة دورة الوقود أن تضع في اعتبارها المسائل التالية: '١' تحديد أطر زمنية طويلة (أكثر من ١٠٠ عام) لجميع دورات الوقود؛ وبأنه، بالتالي، من المفيد إيجاد حلول تقنية متقنة تشمل العملية برمِّتها، ولكن مع الاحتفاظ ببدائل تتيح استيعاب التغيُّرات التي تطرأ على السياسات والخطط ذات الصلة مستقبلا؛ '٢' والتحلِّي بالمرونة في الخيارات مستقبلاً؛ '٣' واحتمال إدخال تحسينات مستفادة من عمليات إعادة التدوير التي تُجرى في المفاعلات النيوترونية السريعة؛ '٤' ووضع حلول وطنية أو إقليمية لعمليات

[٧] يبيِّن *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* الآليات الأخرى المعمول بها في الوقت الراهن لضمان الإمداد.

التخلُّص الجيولوجي العميق؛ '٥' وتوفير التعليم والتدريب اللازمين لدعم التصرُّف المأمون الطويل الأجل في الوقود النووي المستهلك.

٦٠- وفي عام ٢٠١٤، أصدر مكتب الطاقة النووية التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة التقرير النهائي في إطار دراسة عن تقييم واستكشاف دورة الوقود النووي. وعرَّفت الدراسة التي دام إجراؤها ثلاث سنوات مصطلح "إطار" (بوصفه بنية منطقية وعملية إجرائية تشمل مجموعة من البيانات والأساليب والأدوات) من أجل دعم عملية صنع القرار في مجال البحث والتطوير المتصلين بدورة الوقود النووي. وحدَّدت الدراسة أكثر الخيارات الواعدة الأربعة – المتمثِّلة جميعها في استمرار إعادة تدوير الوقود باستخدام المفاعلات السريعة القائمة على وقود اليورانيوم – ومجال البحث والتطوير اللازمين لدورات الوقود هذه، بالإضافة إلى تحديدها ١٤ دورة أخرى من دورات الوقود التي يُحتمل أن تكون واعدة وربما تؤدِّي إلى تحسين الأداء.

٦١- وأقرَّت الولايات المتحدة لائحة جديدة في عام ٢٠١٤، وهي *قاعدة الخزن المستمر للوقود النووي المستهلك*، التي يمكن بموجبها خزن الوقود المستهلك على نحو مأمون في أحواض للوقود المستهلك وبراميل للخزن الجاف إلى ما بعد العمر التشغيلي المرخَّص به للمفاعل، وإلى أن يتم التصرُّف في هذا الوقود على نحو دائم في مستودع جيولوجي عميق. وتحلّ القاعدة الجديدة وما يرتبط بها من بيان الأثر البيئي العام لاستمرار خزن الوقود النووي المستهلك محل قرار استئمان النفايات وقاعدة خزنها المؤقَّت لعام ٢٠١٠. وستستأنف الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة ترخيص مفاعلات جديدة وتجديد رخص مفاعلات قديمة، وهما أمران بقيا معلقَّين لمدة عامين في انتظار صدور اللائحة الجديدة المذكورة.

٦٢- وفي جمهورية كوريا، قدم فريق مستقل من الخبراء تقريرًا إلى لجنة المشاركة العامة المعنية بالتصرُّف في الوقود النووي، يوصي فيه بإجراء بحوث بشأن أساليب متنوعة من التصرف في الوقود النووي المستهلك على المدى المتوسط والطويل، بما في ذلك التخلص النهائي منه وإعادة تدويره وإعادة معالجته وخزنه. وأوصى الفريق أيضا ببناء مرافق مؤقَّتة جديدة لخزن الوقود المستهلك باستخدام أسلوب الخزن الجاف وفق توقيت مناسب. وهذا الفريق هو كيان استشاري مؤقت أُنشئ في عام ٢٠١٣ للحصول على مشورة خبراء بشأن أفكار متنوعة حول التصرُّف في الوقود المستهلك ومن المزمع أن يقدِّم توصياته بشأن السياسة إلى الحكومة بحلول حزيران/يونيه ٢٠١٥.

٦٣- وفي عام ٢٠١٤، تم تفريغ نحو ١٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة كوقود مستهلك ناتج عن جميع مفاعلات القوى النووية. ويقدّر إجمالي الكمية التراكمية للوقود المستهلك التي تم تفريغها على مستوى العالم بزهاء ٣٨٠ ٥٠٠ طن من الفلزات الثقيلة، يُخزن نحو ٢٥٨ ٧٠٠ طن منها في مرافق قائمة في مواقع تقع في محيط المفاعلات أو بعيداً عنها. وقد أعيدت بالفعل معالجة ثلث الكمية التراكمية من الوقود المستهلك التي تم تفريغها عالمياً. وفي عام ٢٠١٤، بلغت القدرة العالمية على تصميم عمليات إعادة المعالجة التجارية، موزّعةً على خمسة بلدان (الاتحاد الروسي وفرنسا والمملكة المتحدة والهند واليابان)، نحو ٤٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنويًا. بيد أن هذه القدرة ليست كلها قيد التشغيل.

٦٤- وفي عام ٢٠١٤، احتفلت محطة ماغنوكس لإعادة المعالجة الكائنة في سيلافيلد، بالمملكة المتحدة، بمرور ٥٠ عاما على بدء عملياتها. لقد قامت هذه المحطة حتى الآن بإعادة معالجة أكثر من ٥٠ ٠٠٠ طن من اليورانيوم، أي بقدر ما أعادت معالجته من اليورانيوم سائر المحطات الأخرى جميعها مجتمعةً. ويُتوقَّع أن تُنهي عملياتها في عام ٢٠١٧ (الشكل-ألف-٨).

الشكل ألف-٨- أتمَّت محطة ماغنوكس لإعادة المعالجة الكائنة في سيلافيلد ٥٠ عاما من العمليات. (الصورة من: شركة سيلافيلد المحدودة، المملكة المتحدة)

٦٥- وسيُرجأ تشغيل محطة روكاشو لإعادة المعالجة في اليابان، المقَّرر إتمامها في عام ٢٠١٤، حتى عام ٢٠١٦، لاستيفاء متطلبات رقابية وطنية.

٦٦- ويجري حاليًا توسيع مرفق الخزن الجاف المركزي للوقود المستهلك في زيليزنوغورسك، بالاتحاد الروسي، الذي بدأ عملياته في عام ٢٠١٢. وبالإجمال، ستكون ثمة ثلاثة مباني تبلغ سعتها نحو ٣٠ ٠٠٠ طن من اليورانيوم لاستيعاب الوقود المستهلك في مفاعل عالي القدرة مزود بقنوات وفي مفاعل مبرد ومهدأ بالماء. ومن المقرَّر أن تُدخل في الخدمة، في عام ٢٠١٥، المرحلة الثانية من خزن الوقود المستهلك في مفاعل مبرد ومهدأ بالماء. ويُتوقَّع أن تغدو محطة RT-2 لإعادة المعالجة قيد التشغيل بحلول عام ٢٠٢١ من أجل إعادة معالجة وقود المفاعلات المبردة والمهدأ بالماء طراز WWER-1000.

٦٧- وتم التوقيع، في عام ٢٠١٤، على اتفاق إطاري لمشروع مشترك بين الشركة الوطنية النووية الصينية التابعة للصين وشركة كاندو للطاقة التابعة لكندا من أجل بناء مفاعلات كاندو ذات الوقود المتقدِّم. وسيُصمَّم مفاعل كاندو ذو الوقود المتقدِّم لاستخدام اليورانيوم المعاد تدويره أو الثوريوم كوقود، الأمر الذي يؤدِّي، بالتالي، إلى تقليص أرصدة الوقود المستهلك والحد بدرجة كبيرة من كميات اليورانيوم الطازج المطلوبة. ويمكن أن يتيح الوقود المستهلك في أربعة من مفاعلات الماء المضغوط التقليدية تزويد وحدة من مفاعل كاندو ذي الوقود المتقدِّم بشكل كامل بوقود معاد تدويره (بالإضافة إلى توفير بلوتونيوم معاد تدويره لصنع وقود موكس).

٦٨- وبدأت أوكرانيا تشييد مرفق خزن مركزي للوقود المستهلك، سيتيح خزنًا بعيدًا عن موقع المفاعل للوقود المستهلك الناتج عن المفاعل المبرَّد والمهدَّأ بالماء طراز WWER-1000 والمفاعل المماثل طراز WWER-440 المقامين في موقعيْ روفونو وخميلنتسكي، بجنوب أوكرانيا. وسيقع المرفق بين القرى المخصَّصة لإعادة توطين الأهالي في ستارا كرازنيتسيا وبورياكيفكا وشيستوهاليفكا وستيشنكا، ضمن منطقة تشرنوبل المحظورة، ومن شأنه أن ييسِّر إعادة التأهيل البيئي للمنطقة المحظورة وتجديد الأنشطة الاقتصادية على بعض الأراضي داخل هذه المنطقة. ويُتوقّع أن يغدو المرفق قيد التشغيل بحلول عام ٢٠١٧.

٦٩- واستُكملت، في ٥ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٤، عملية إخلاء كامل مجمعات الوقود المستهلك البالغ عددها ١ ٣٣١ مجمعة المخزونة في حوض الوقود المستهلك بالوحدة ٤ من محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية. وتم نقل هذا الوقود المستهلك إلى حوض الوقود المستهلك المشترك الواقع في موقع المفاعل، التي تُنقل منه المجمعات الأقدم إلى مرافق الخزن الجاف القائمة في موقع المفاعل داخل براميل معدنية.

ألف-٣-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح والتصرُّف في النفايات المشعّة

٧٠- ينطوي استخدام التكنولوجيات النووية من أي نوع – لأغراض إنتاج الطاقة وأنشطة البحوث والتطبيقات الطبية والصناعية – على التزام يقضي بالتصرُّف على نحو مأمون في النفايات المشعّة التي تنتج عن هذا الاستخدام، بالإضافة إلى تخطيط ما يرتبط بذلك من أنشطة متعلقة بالإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي مستقبلاً. ومن الأهمية البالغة فهم حالة الأرصدة الراهنة للنفايات المشعّة، أي أحجامها وأماكنها وظروفها وخصائصها، وكذلك فهم الاتجاهات التي يسلكها توليد النفايات مستقبلاً، وذلك من أجل القيام على نحو وافٍ بتخطيط المرافق والأنشطة التي يتطلَّبها التصرُّف في النفايات. ويتطلَّب التصرُّف في النفايات المشعّة على نحو مأمون إدارة وافية بالمراد تُعنى بدوافق النفايات وسبل معالجتها وتكييفها، فضلاً عن توفير قدرات تفي بالحاجة إلى خزن هذه النفايات ونقلها بين المرافق ومن ثم التخلُّص منها في نهاية المطاف.

٧١- لذا أكَّد المحفل العلمي، الذي عُقد خلال دورة مؤتمر الوكالة العام الثامنة والخمسين، ضرورة اتِّباع نهج شامل ومتكامل "من المهد إلى اللحد" حيال التصرُّف في النفايات المشعّة، وسلَّط الضوء على حقيقة وجود حلول للتنفيذ في هذا الصدد (الشكل- ألف-٩).

الشكل ألف-٩ - يتعيَّن عمليا على جميع الدول الأعضاء أن تتصرَّف بشكل ما في النفايات المشعّة.
اللون البرتقالي: الدول الأعضاء التي تنشأ أرصدتها في الغالب من إنتاج القوى النووية.
اللون الأزرق: الدول الأعضاء التي تنشأ أرصدتها في الغالب من مفاعلات البحوث.
اللون الأخضر: الدول الأعضاء التي تتألَّف إرصدتها في الغالب من مصادر مشعّة مختومة مهملة.

تقديرات الأرصدة العالمية من النفايات المشعّة

٧٢- تستند تقديرات الأرصدة العالمية من النفايات المشعّة إلى المعلومات التي تقدِّمها الدول الأعضاء طوعا إلى قاعدة بيانات الوكالة الخاصة بالتصرُّف في النفايات المتاحة على الشبكة (الجدول ألف-٢). واستهلَّت الوكالة مشروعا يتناول الحالة والاتجاهات في مجال التصرُّف في النفايات المشعّة، بالتعاون مع المفوضية الأوروبية ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، بهدف وضع إجراء وطني دقيق ومبسَّط لتقديم التقارير ذات الصلة يمكن للدول الأعضاء استخدامه فيما يتعلق بجميع التزاماتها بتقديم التقارير. ومن باب الاتِّساق مع هذا التوجُّه، يجري العمل حاليا على إدخال تحسينات على قاعدة بيانات الوكالة الآنفة الذكر بما يتيح إمكانية الخلوص إلى تقديرات للأرصدة العالمية على نحو أكثر دقَّة.

٧٣- وحتى كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤، كان ثمة ٤٦٧ مرفقاً لخزن النفايات و١٥٤ مرفقاً للتخلُّص من النفايات على نطاق العالم لغرض التصرُّف في تلك الأرصدة من النفايات، إما قيد التشغيل أو التعليق أو الإغلاق[٨].

الجدول ألف-٢- تقدير الأرصدة العالمية من النفايات المشعّة لعام ٢٠١٤ [٩]

فئة النفايات	الخزن[١٠] [أمتار مكعبة]	تخلُّص تراكمي [أمتار مكعبة]
نفايات ضعيفة الإشعاع جداً:	١٧٣ ٠٠٠	٢٧٣ ٠٠٠
نفايات ضعيفة الإشعاع:	٥٦ ٧٠٣ ٠٠٠	٦٥ ١٩٢ ٠٠٠
نفايات متوسطة الإشعاع:	٨ ٧٤٥ ٠٠٠	١٠ ٥٨٩ ٠٠٠
نفايات قوية الإشعاع	٢ ٧٤٥ ٠٠٠	٧٢ ٠٠٠

المصدر: قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة (٢٠١٣)، والتقارير الوطنية الرسمية، والبيانات المتاحة على نطاق عام.

الإخراج من الخدمة

٧٤- حتى ٣١ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤، كانت ثمة ٤٣٨ محطة قوى نووية قيد التشغيل في جميع أنحاء العالم، و١٤٩ محطة قوى نووية أخرى مغلقة أو تخضع لعمليات إخراج من الخدمة، بما في ذلك ١٧ محطة قوى نووية تم إخراجها من الخدمة بشكل كامل. ويُوجد أيضًا عدد كبير من مرافق دورة الوقود، وهي تتضمَّن: أكثر من ٣٠٠ مرفق قيد التشغيل، ونحو ١٧٠ مرفقا تم أغلاقها أو تخضع لعمليات إخراج من الخدمة، و١٢٥ مرفقًا تم إخراجها من الخدمة بشكل كامل. أما فيما يتعلق بمفاعلات البحوث، فثمة ٢٤٧ مفاعلا قيد التشغيل، وأكثر من ١٨٠ مفاعلاً تم إغلاقها أو تخضع لعمليات إخراج من الخدمة، وأكثر من ٣٠٠ مفاعل بحوث ومجمعات حرجة تم إخراجها من الخدمة بشكل كامل.

٧٥- وقد اكتُسِب قدر كبير من الخبرة في مجال الإخراج من الخدمة منذ مطلع هذا القرن، إلى جانب إحراز أكبر قدر من التقدُّم في البلدان التي لديها برامج قوى نووية عاملة منذ أمد طويل بشكل رئيسي، ولا سيما في الاتحاد الروسي وإسبانيا وألمانيا وفرنسا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية. ومن أمثلة البرامج التي أحرزت قدرًا كبيرًا من التقدُّم في مجال الإخراج من الخدمة في عام ٢٠١٤ ما يلي: التقدُّم المستمر في تفكيك الجيل الأول من محطات القوى النووية في فرنسا؛ والتقدُّم المستمر أيضا في تجزئة وتكييف النفايات المتولّدة من وحدة مفاعل ضمن محطة خوسيه كابريرا للقوى النووية بإسبانيا؛ وإزالة دهاليز المرشِّح من مدخنة الوحدة ١ في

[٨] استناداً إلى المعلومات المقدَّمة من الدول الأعضاء إلى قاعدة بيانات التصرُّف في النفايات المتاحة على الشبكة، في الموقع الشبكي http://newmdb.iaea.org/.

[٩] الأرقام الواردة في الجدول ألف-٢ هي تقديرية ولا تُعدُّ حصراً دقيقاً لكميات النفايات المشعّة التي يجري التصرُّف فيها حالياً على نطاق العالم. وتستند التحديثات الأخيرة إلى تقارير سابقة تضمَّنت كلاً من الأرصدة والمستجدَّات المتوقَّعة سنويا في إطار توليد النفايات. وثمة أيضا اختلافات كامنة في الكميات التقديرية قيد الخزن من سنة إلى أخرى عائدة إلى (أ) تغيُّرات في الكتلة والحجم أثناء عملية التصرُّف في النفايات؛ (ب) وتغيُّرات في تقديم التقارير وتغيُّرات أو تصويبات أدخلتها الدول الأعضاء على بياناتها الذاتية؛ (ج) وإضافة دول أعضاء جديدة إلى قاعدة البيانات.

[١٠] عادةً ما تُعالَج النفايات وتُكيّف وتُخضع لمختلف خطوات المناولة أثناء خزنها وقبل التخلُّص منها. لذا فإن كتلة وحجم النفايات المشعّة يتغيَّران باستمرار أثناء عملية التصرُّف في النفايات تمهيداً للتخلُّص منها. ويمكن أن يؤدي ذلك إلى أوجه تضارب في الكميات التقديرية قيد الخزن من سنة إلى أخرى.

مفاعل وندسكيل بايل بالمملكة المتحدة، التي تلوَّثت أثناء حريق كومة النفايات في عام ١٩٥٧ (الشكل ألف-١٠)؛ والبرامج الثلاثة النشطة الخاصة بإخراج مفاعلات قوى نووية من الخدمة في الولايات المتحدة الأمريكية. وثمة مشاريع مماثلة ماضية قدما أيضًا في بلغاريا وسلوفاكيا وليتوانيا، حيث تم إغلاق محطات قوى نووية قبل نهاية أعمارها التشغيلية المحدَّدة في تصاميمها.

٧٦- ونظرًا لكون العديد من المرافق النووية قيد التشغيل في الوقت الراهن قد أدخِلت في الخدمة خلال سبعينيات وثمانينيات القرن الماضي وستصل إلى نهاية أعمارها التشغيلية المحدَّدة في تصاميمها في غضون العقدين الاثنين المقبلين، فيُتوقَّع أن تُجرى أنشطة كبيرة لعدة عقود قادمة في مجال الإخراج من الخدمة.

الشكل ألف-١٠- إخراج دهاليز المرشِّح في مدخنة الوحدة ١ بمفاعل وندسكيل بايل، من الخدمة. (الصورة: شركة سيلافيلد المحدودة)

٧٧- وتشكِّل أنشطة الإخراج من الخدمة فيما يخص محطات القوى النووية التي تم إغلاقها بعد وقوع حادث نووي تحدِّيا لعدَّة بلدان، بما في ذلك اليابان (حادث فوكوشيما داييتشي – انظر النص المدرج في الإطار أدناه) وأوكرانيا (تشرنوبل). وأحرِز قدر كبير من التقدُّم في محطة تشرنوبل للقوى النووية نتيجة لتركيب مبنى خاص بنظام احتجاز مأمون جديد. وينبغي أن يتم، في عام ٢٠١٥، تركيب نظام الاحتجاز المأمون الجديد هذا بشكل كامل لتغطية الوحدة ٤ المتضرِّرة بحيث يكون الهدف الرئيسي من ذلك هو الحيلولة دون انتشار المواد المشعّة داخل البيئة وإتاحة إجراء هدم جزئي للهياكل القديمة مستقبلاً.

الاستصلاح

٧٨- تمضي حاليًا بعض البلدان قدمًا في تناول مسألة استصلاح الأراضي المتضرِّرة بممارسات وحوادث سابقة وقد بنت، تبعًا لذلك، موارد تقنية وخبرات فنية ملائمة في هذا السبيل. بيد أن العديد من البرامج الوطنية ما زال يواجه تحدِّيات كبيرة تعوق تنفيذ برامج الاستصلاح. وتم وضع الصيغة النهائية للتقرير الأساس في إطار "مشروع القيود التي تعوق تنفيذ مشروع الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي"، الذي استُهلَّ في عام ٢٠١٣، بهدف المساعدة على التغلُّب على تلك القيود. لقد حدَّد التقرير العوائق القائمة في أربع فئات رئيسية، وهي: '١' الإطار السياساتي والقانوني والرقابي الوطني؛ '٢' والقيود المالية، بما في ذلك الخدمات اللوجستية والموارد وإدارة الأموال المتاحة؛ '٣' والعوائق في مجال التكنولوجيا والبنية الأساسية ذات الصلة؛ '٤' وقضايا أصحاب المصلحة المعنيين التي من الضروري معالجتها والتشديد عليها في جميع مراحل دورة حياة تخطيط وتنفيذ مشاريع الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي. ومن أجل التغلُّب على بعض هذه العوائق، حدَّد التقرير الأساسي أيضًا استراتيجيات يمكن أن تستفيد من زيادة سبل التآزر بين البرامج. بيد أن من الضروري أيضًا إيجاد مزيد من الحلول المبتكرة في هذا الصدد.

٧٩- وكان أحد الإنجازات الكبيرة استحداث الوحدة المتنقِّلة لتحديد خصائص الموقع. ويتيح المفهوم الذي ينطوي عليه هذا المختبر المتنقل قدرة تفاعلية على إجراء تحديد خصائص الموقع على نحو سريع وفعَّال، بالتزامن مع التحديد الآني الفوري للمجالات موضع الاهتمام الشديد. ويمكن أن تكون وحدة من هذا القبيل موردًا نافعًا للدول الأعضاء التي لا تتوفَّر لديها بنية أساسية وافية لإقامة مختبرات تحليلية. ويمكنها أيضا أن تساعد الدول الأعضاء التي تتوفَّر لديها قدرات مختبرية تحليلية إنما قد تواجه تحدِّيات كبيرة غير متوقَّعة في إطار تحديد خصائص الموقع. ويشكِّل العمل على إتاحة الوحدة لأغراض الدول الأعضاء وسيلة فعَّالة لدعم تحديد خصائص المواقع الملوَّثة، باعتبار ذلك خطوة ذات تأثير بالغ في تنفيذ أي مشروع من مشاريع الاستصلاح.

معالجة العواقب المترتِّبة على حادث فوكوشيما داييتشي:
التصرف في النفايات المشعّة، والإخراج من الخدمة، والاستصلاح

تسبَّب حادث فوكوشيما داييتشي في نشوء تحدِّيات جسيمة متصلة بمجالات الإخراج من الخدمة، والاستصلاح، والتصرُّف في النفايات المشعّة، سواء في الموقع أو على امتداد مساحة شاسعة خارج الموقع. وقد أحرزت اليابان تقدُّمًا جيدًا في هذه المجالات، نتيجة لتعاونها مع المجتمع الدولي والتماسها المشورة من بعثات الاستعراض الدولية تحت رعاية الوكالة.

ويُعدُّ التصرُّف فيما تبقَّى من وقود طازج ووقود مستهلك أحد أهم الأنشطة في سبيل إخراج محطة القوى النووية المعنية من الخدمة. وشكَّلت عملية إزالة الوقود المستهلك والوقود الطازج من حوض الوقود في الوحدة ٤ من المفاعل ونقله إلى الحوض المشترك القائم في الموقع مهمَّة ذات أهمية تم تنفيذها في غضون العام.

ويَتَواصل إحراز تقدُّم بالتزامن مع انتشار استخدام تقنيات معالجة النفايات السائلة في إزالة الملوِّثات من النويدات المشعَّة من الكمية التي تقارب ٤٠٠ ٠٠٠ طن من المياه المشعّة والتي تم جمعها في المرفق المعني. وتتم إزالة السيزيوم حاليًا باستخدام نظامين اثنين مختلفين من نُظم التبادل الأيوني في حين أدخلت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية في الخدمة مؤخَّرًا نظامًا لإزالة السترُنشيوم جرى تنسيق مكوِّناته في شكل متحرِّك وقابل للنقل بحيث يمكن تركيبه مباشرة في الأماكن التي يجري فيها توليد النفايات أو خزنها. وأدخِلت تحسينات أيضًا على أداء نظام إزالة النويدات المشعّة المتعدِّدة، من أجل إزالة السترُنشيوم وسائر النويدات المشعّة التي تتبقَّى بعد إزالة السيزيوم. وعن طريق زيادة القدرة الحالية للنظام من ٧٥٠ مترًا مكعبًا/يوميًا إلى ٢٠٠٠ متر مكعب/يوميًا، تتوقَّع شركة طوكيو للطاقة الكهربائية تسريع العمل على إزالة التلوُّث من المياه الملوَّثة المتراكمة باستمرار. وفي هذا العام، تم تكليف معهد بحوث ميتسوبيشي باستكشاف تكنولوجيات موقعية متقدِّمة جديدة لإزالة التلوُّث بالسيزيوم و السترُنشيوم من مياه البحر في الموانئ.

وقد أظهرت أعمال الاستصلاح تقدُّمًا جيدًا. وجرى أيضًا تنسيق جيد بين أنشطة الاستصلاح من جهة والجهود المبذولة في مجاليْ الإعمار وتجديد النشاط من الجهة الأخرى. وتجري مراكمة الدروس المستفادة من أعمال الاستصلاح ويُعدُّ تقاسمها مع المجتمع الدولي ذا أهمية قصوى. وتشمل هذه الدروس تعزيز وقاية الجمهور من الإشعاعات، مع التركيز على معدلات الجرعة الفردية؛ وتحسين سبل الإبلاغ عن المخاطر عن طريق نقل رسائل واضحة وما يستجد من نتائج بشأن آثار إزالة التلوُّث؛ وإدخال تحسينات على كفاءة وفعَّالية أنشطة إزالة التلوُّث؛ وتعزيز العمل على وضع سياسات شاملة تتكفَّل بحماية الأفراد من الآثار المكروهة المترتِّبة على الإشعاعات المؤيِّنة مع مراعاة تبديد قلق الجمهور واستعادة إحساسه بالأمان.

ووافقت حكومة مقاطعة فوكوشيما على استضافة مرفق خزن مؤقت يُقام على موقع قريب تمامًا من موقع فوكوشيما داييتشي. وسيتيح ذلك نقل النفايات المشعّة وكذلك التربة الملوَّثة الناتجة عما يقارب ١ ٠٠٠ من مواقع الخزن المؤقتة إلى مكان واحد وتجميعها في هذا المكان.

النفايات المشعّة الموروثة

٨٠- ساهم فريق خبراء الاتصال المعني بالمبادرات الدولية للإرث النووي في الاتحاد الروسي، التابع للوكالة، في إنجاح تنفيذ البرامج الدولية في هذا المجال. وقام الاتحاد الروسي وشركاؤه الدوليون، حتى الآن، بإفراغ وقود ١٩٧ غواصة نووية كانت قد أخرِجت من الخدمة وبتفكيك هذه الغواصات. ويجري العمل حالياً على ختم وحدات مفاعلات الغواصات التي أُفرِغ وقودها وثمة ٧٦ منها وُضِعت في مرافق الخزن الطويل الأجل في شمال غرب البلد وشرقه الأقصى. وأنجِز، في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤، تشييد مركز إقليمي لتكييف وخزن جميع النفايات المشعّة الموروثة، في المنطقة الشمالية الغربية، بمساعدة من ألمانيا (الشكل- ألف-١١). واستُحدثت تكنولوجيات لضمان أمان تفريغ وقود قلوب المفاعلات المحتوية على مبرِّدات معدنية سائلة وضمان خزنها بعد ذلك. وأدخِلت في الخدمة في مرافق مایاك، بمساعدة من فرنسا، خلية ساخنة لمعالجة علب الوقود النووي المستهلك المعطوبة. وتشارف على الانتهاء بنجاح الجهود الدولية المشتركة الرامية إلى إخراج مولّدات كهربائية حرارية قوية تعمل بالنظائر المشعة من الخدمة وقد كانت هذه المولِّدات تُستخدَم في المنارات البحرية على طول ساحل الاتحاد الروسي. ويتوقع استعراض أجري في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤ بين الوكالة وفريق خبراء الاتصال المعني بالمبادرات الدولية للإرث النووي في الاتحاد الروسي أن تنتهي أنشطة الفريق المذكور بحلول صيف ٢٠١٥.

الشكل ألف-١١ - المركز الإقليمي لتكييف النفايات المشعّة وخزنها الطويل الأجل في الجزء الشمالي الغربي من الاتحاد الروسي (الظاهر إلى اليسار) ومنصَّة خزن وحدات المفاعلات (الظاهرة إلى اليمين). (الصورة من: شركة إنيرجي ويرك نورد المحدودة)

معالجة وتكييف النفايات المشعّة

٨١- حالما تتولَّد النفايات، يجب تقليصها من حيث الحجم ومن ثم تحويلها إلى شكل يكون مقبولاً لغرض خزنها والتخلُّص منها، ويتيح مناولتها ونقلها.

٨٢- وباتت تكنولوجيات معالجة النفايات الصلبة والسائلة والغازية راسخة وقيد التشغيل في العديد من الدول الأعضاء. وثمة تكنولوجيا مبتكرة تستخدم المعالجة بالطبقة المميَّعة في عمليات إعادة التشكيل بالبخار تمرُّ حاليًا بمرحلة الإدخال في الخدمة في موقع مختبر أيداهو الوطني التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة من أجل معالجة زهاء ٣ ٣٠٠ ٠٠٠ لتر من النفايات السائلة القوية الإشعاع الناتجة عن إعادة معالجة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء. أما استخدام معالجة النفايات الصلبة بالبلازما، الذي يفضي إلى ارتفاع عامل تخفيض الحجم، فقد أخذ يتَّسع نطاق انتشاره أكثر فأكثر، وثمة حاليًا مرفق معالجة بالبلازما قيد التشييد في محطة كوزلودوي للقوى النووية ببلغاريا.

٨٣- ويشمل تكييف النفايات شل حركة النويدات المشعّة، ووضع النفايات داخل حاويات، وتوفير تعبئة وتغليف إضافيين. وتواصل مصفوفات البوليمرات الجيولوجية إظهار بشائر واعدة فيما يتعلق بشل حركة دوافق النفايات الصعبة مثل راتنجات التبادل الأيوني العضوية المستهلكة، وذلك في محطة بوهيونيس لمعالجة النفايات بسلوفاكيا. ومن الضروري أن تكون أشكال النفايات القوية الإشعاع متينة للغاية وعادةً ما تكون مزجَّجة. بيد أنه يُوصى باستخدام تقنية تكييف بديلة، وهي تقنية كبس متوازن التضاغط على الساخن، من أجل إنتاج شكل النفايات الملائم للتخلُّص من كمية الـ ٤٤٠٠ متر مكعب من النفايات القوية الإشعاع المؤكسدة حراريًا المخزونة حاليًا في موقع مختبر أيداهو الوطني. وفي أستراليا، يجري على قدم وساق إعداد خطط لتشييد مرفق لمعالجة النفايات الناشئة، ماضيًا وحاليًا ومستقبلاً، من صنع الموليبدينوم-٩٩ والنظائر الأخرى التي تُستخدم في التطبيقات الطبية. وستعمل المحطة المذكورة على أكسدة السوائل حراريًا وشل حركة النفايات المشعّة في شكل مادة صلبة متينة مثل الصخرة بما يناسب خزنها والتخلُّص منها.

٨٤- وفي مرافق النفايات الموروثة، أحرِز تقدُّم ملحوظ في سيلافيلد، بالمملكة المتحدة، تضمَّن الشروع في إعادة تعبئة وتغليف الوقود المُعلَّب الموروث الوارد من حوض خزن الوقود في مفاعل بايل، وإعادة تعليق العمل بشأن الحمأة المشعّة الموجودة في حوض الخزن التابع لمفاعل الجيل الأول ماغنوكس، وافتتاح المخزن ٣ الجديد للمنتجات المُعلَّبة لغرض خزن النفايات المتوسطة الإشعاع.

التخلُّص من النفايات المشعّة

٨٥- العمل جار على نطاق العالم في مرافق التخلُّص من جميع فئات النفايات المشعّة، باستثناء النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك. وتشمل هذه المرافق التخلُّص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في خنادق (على سبيل المثال، في إسبانيا والسويد وفرنسا والولايات المتحدة الأمريكية)، والتخلُّص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مناطق قاحلة (على سبيل المثال، في الأرجنتين وجنوب أفريقيا والهند والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصمّمة هندسياً بالقرب من سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال، في إسبانيا وبولندا والجمهورية التشيكية وسلوفاكيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند واليابان)؛ والمرافق المصمّمة هندسياً تحت سطح الأرض للتخلُّص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (على سبيل المثال، في السويد وفنلندا)؛ والتخلص في حُفَر لدفن النفايات الضعيفة الإشعاع كما يجري في الولايات المتحدة الأمريكية؛ والمرافق الجيولوجية المخصّصة لاستقبال النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (على سبيل المثال، في الولايات المتحدة الأمريكية وهنغاريا). وتتفاوت خيارات التخلُّص من النفايات الناشئة من المواد المشعّة الطبيعية المنشأ تبعاً للوائح التنظيمية الوطنية، حيث تتراوح بين مرافق التخلُّص في خنادق إلى المرافق المصمّمة هندسياً تحت سطح الأرض (على سبيل المثال، في النرويج).

٨٦- وقد اتُّخِذت خطوات نحو ترخيص مرافق للتخلُّص الجيولوجي من النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك في السويد وفرنسا وفنلندا.

٨٧- وتتقدَّم كندا في عملها على استحداث مستودعين جيولوجيين عميقين. وتقترح شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء، وهي أكبر مرفق نووي في كندا، إنشاء مستودع جيولوجي عميق للنفايات الضعيفة الإشعاع والنفايات المتوسطة الإشعاع في موقع بروس النووي في كينكاردين بأونتاريو. ويخضع هذا المشروع حاليًا لعملية استعراض رقابي فدرالي. وهيئة التصرف في النفايات النووية، وهي هيئة تابعة للمرافق النووية الكندية أُنشِئت بمقتضى قانون نفايات الوقود النووي لعام ٢٠٠٢، تعمل حاليًا مع ١١ من المجتمعات المحلية المهتمة من خلال

عملية تحديد مواقع لتحديد مجتمع به موقع مأمون ومناسب ومستعد لاستقبال مستودع جيولوجي عميق للتصرف على المدى الطويل في نفايات الوقود النووي الذي تنتجه الدولة.

٨٨- وتتوقَّع الصين احتياجاتها من التخلُّص الجيولوجي الناشئ من إعادة معالجة ١٤٠ ٠٠٠ طن من الوقود المستهلك في مجموعة مفاعلات يبلغ عددها ٤٨ مفاعلاً. ويتعيَّن اختيار مواقع للتخلُّص من هذا الوقود إما في شكل تكوين بلُّوري أو تكوين رسوبي ذي طبقة عائلة؛ كما يُعتزم إنشاء أول مرفق بحثي مقام تحت الأرض في منطقة بيشان. وستساهم النتائج المنشودة من المرفق البحثي المقام تحت الأرض في إنارة الطريق أمام القرارات التي ستُتَّخذ مستقبلاً بشأن تنفيذ عمليات التخلُّص الجيولوجي العميق.

٨٩- وأجرت الوكالة الوطنية الفرنسية للتصرُّف في النفايات المشعّة (وكالة "أندرا") تقييمًا لنتائج عملية إشراك أصحاب المصلحة العامين الوطنيين ذات الطابع الرسمي التي تم الاضطلاع بها في عام ٢٠١٣، فضلاً عن التعقيبات التي تم الحصول عليها من الجهة الرقابية التابعة لها. وتعتزم أن تقدِّم طلب رخصة في عام ٢٠١٧، كما تعتزم زيادة مشاركة أصحاب المصلحة المعنيين في قراراتها، ولا سيما في إطار الخطة الرئيسية لعملياتها.

٩٠- وأنشأت ألمانيا هيئة جديدة في عام ٢٠١٤ من أجل تنفيذ قانون اختيار مواقع المستودعات الصادر في حزيران/يونيه ٢٠١٣ للتخلُّص من النفايات المشعّة الباعثة للحرارة. ومن المفترض أن تتضمَّن توصياتها، التي يُتوقَّع تقديمها بحلول عام ٢٠١٦، معايير اختيار المواقع والمتطلبات المتعلقة بمشاركة أصحاب المصلحة المعنيين.

٩١- وفي عام ٢٠١٤، أصدرت حكومة المملكة المتحدة البيان الأبيض بعنوان *تنفيذ عمليات التخلُّص الجيولوجي*، الذي يبيِّن إطارًا للتصرُّف الطويل الأجل في النفايات المشعّة الأقوى إشعاعًا. ويبيِّن أيضًا نهجًا لتحديد مواقع محتملة لمرفق تخلص جيولوجي يقوم على أساس العمل مع المجتمعات المحلية المهتمَّة، بدءًا من عامين تُتَّخذ خلالهما إجراءات لمعالجة قضايا أفاد أصحاب المصلحة المعنيين أنها ذات أهمية بالنسبة إليهم.

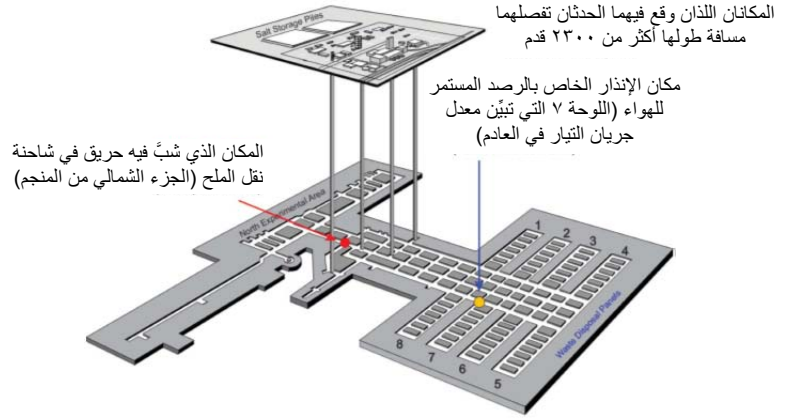
٩٢- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تم الإبلاغ في عام ٢٠١٤ عن عدَّة مستجدَّات مهمَّة في مجال التخلُّص الجيولوجي. وخلُصت الهيئة الرقابية النووية للولايات المتحدة، في *تقييمها حالة الأمان*[١١]، وفق توقُّعات معقولة، إلى أن وزارة الطاقة في الولايات المتحدة أظهرت بوضوح امتثالها للمتطلبات الرقابية الصادرة عن الهيئة بشأن مراعاة الأمان ما بعد الإغلاق.

٩٣- وأقرَّت لجنة الشريط الأزرق المعنية بالمستقبل النووي لأمريكا بالدور المحتمل الذي يمكن أن يؤدِّيه مفهوم التخلُّص داخل حُفَر دفن عميقة في مجال التخلُّص من المواد النووية على نحو مأمون وفعَّال. ويتوخَّى هذا المفهوم إحداث حفرة دفن (أو مصفوفة من حفر الدفن) داخل الطبقة السفلية للصخور البلورية تصل إلى عمق ٥٠٠٠ متر تقريبًا تحت سطح الأرض. وتقترح حاليًا وزارة الطاقة في الولايات المتحدة إجراء عرض إرشادي لهذا المفهوم.

---

[١١] تقرير تقييم الأمان المتصل بالتخلُّص من النفايات القوية الإشعاع في مستودع جيولوجي قائم في جبل يوكا، بنيفادا: أمان المستودع بعد الإغلاق الدائم (بيان الأثر البيئي العام للخزن المستمر للوقود النووي المستهلك-١٩٤٩، المجلد ٣).

٩٤- وبالإضافة إلى ذلك، تم وضع المحطة التجريبية لعزل النفايات التابعة لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة تحت المجهر من قِبل الجهة الرقابية المعنية بها، وهي وكالة حماية البيئة، بعد وقوع حدثين اثنين لا صلة بينهما (الشكل A-12). وكان الحدث الأول حريقًا شبَّ في شاحنة ولم تترتَّب عليه أي عواقب إشعاعية. وأبان التحقيق في هذا الصدد أنه لم تكن تُجرى صيانة روتينية ولم تكن تُتَّبع ثقافة أمان مناسبة بشأن العمل تحت سطح الأرض كما أبان الحاجة إلى اتِّخاذ إجراءات تصحيحية متصلة بأمان التشغيل. ويُعتقد أن حدثًا ثانيًا نجم عن مزيج غير متوافق من النفايات أدَّى إلى انبعاثات مشعّة بسبب تفاعل طارد للحرارة في حاوية نفايات كان قد تم التخلُّص منها. وكانت حالات التعرُّض الناجمة عن ذلك أدنى بكثير من الحدّ الرقابي المنصوص عليه في قانون الهواء النقي الصادر عن وكالة حماية البيئة. ونشرت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة خطة إنعاش المحطة التجريبية لعزل النفايات بهدف استئناف عمليات تخلّص من النفايات على نطاق محدود في الربع الأول من عام ٢٠١٦.



الشكل ألف- ١٢ - المكانان اللذان وقع فيهما الحدثان في المحطة التجريبية لعزل النفايات في عام ٢٠١٤ . (الرسم البياني: المحطة التجريبية لعزل النفايات، وزارة الطاقة في الولايات المتحدة)

التصرُّف في المصادر المشعّة المختومة المهمَلة

٩٥- تنظر حاليًا عدّة بلدان، بما فيها جنوب أفريقيا وغانا والفلبين وماليزيا، بجدِّية في خيارات التخلُّص من المصادر المشعّة المختومة المهمَلة، من ضمنها التخلُّص المشترك مع نفايات أخرى في مرافق مناسبة، أو زيادة عدد خيارات إعادة التدوير والإعادة إلى بلد المنشأ، أو التخلص داخل حُفَر مخصّصة للدفن. وثمة بيان لحالة أمان عامة وُضع بشأن التخلُّص داخل حفر من مصادر مندرجة في الفئات ٣ إلى ٥، وثمة بيان آخر لحالة أمان عامة يجري إعداده للتخلُّص من مصادر مندرجة في الفئتين ١ و٢.

٩٦- وقد أُجرِي في عام ٢٠١٤ عدد من العمليات الناجحة لإزالة مصادر مشعّة مختومة مهمَلة من المباني الخاصة بالمستخدمين ووضعها تحت السيطرة، وذلك عن طريق نقلها إما إلى مرفق وطني لخزن النفايات المشعّة أو إلى مؤسسة أخرى تتوفّر فيها ظروف خزن مناسبة. وتم نشر الخلية الساخنة المتنقِّلة في كوستاريكا لتكييف وإزالة خمسة مصادر مشعّة مختومة مهملة ذات نشاط إشعاعي قوي بغرض إعادة تدويرها. وتم أيضًا تجميع خمسة مصادر مشعّة مختومة مهملة ذات نشاط إشعاعي قوي في المغرب مندرجة في الفئتين ١ و٢ وإعادتها إلى بلد المنشأ، فرنسا. واستهلَّت في عدّة دول أعضاء، بما فيها الكاميرون ولبنان، حالات من المقرِّر

إجراؤها في النصف الأول من عام ٢٠١٥ لإعادة مصادر مهملة مدرجة في الفئتين ١ و٢ فرنسية الصنع إلى بلد المنشأ.

٩٧- وأحرِز تقدُّم جيد في ربط الخلية الساخنة المتنقِّلة بمفهوم تصميمي للتخلُّص داخل حفر مخصَّصة للدفن، بقصد التقليل إلى أدنى حدّ من مناولة المصادر ومنع نقلها على نحو لا ضرورة له.

٩٨- وأنجزت في الجبل الأسود وفيجي وماليزيا عمليات اشتملت على تكييف تلك المصادر، وتم تدريب عاملين محليين وإقليميين في هذا الصدد.

٩٩- ووسَّعت الوكالة نطاق الوصول إلى الفهرس الدولي للمصادر والأجهزة المشعّة المختومة للعديد من فرادى مرشَّحي البلدان، الأمر الذي يسَّر تحديد هوية المصادر المشعّة المختومة المهملة التي عُثِر عليها في هذا المجال. وفي عام ٢٠١٤، استُهلَّت جهود في سبيل إضافة مزيد من التفاصيل عن المصادر والأجهزة، بهدف تحسين جدوى الفهرس.

ألف-٤- الأمان

١٠٠- تَواصل العمل على إدخال تحسينات على حالة الأمان في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. وكان من بين هذه التحسينات تحديد وتطبيق الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي؛ وتحسين فعَّالية الدفاع في العمق؛ وتعزيز قدرات التأهُّب والتصدِّي للطوارئ؛ وتعهُّد وتحسين أوجه بناء القدرات؛ وحماية الناس والبيئة من الإشعاعات المؤيِّنة. وجرى أيضًا استعراض الإجراءات التي نفَّذتها الدول الأعضاء في ضوء الحادث المذكور وذلك خلال الاجتماع الاستعراضي السادس للأطراف المتعاقدة في اتفاقية الأمان النووي، الذي عُقد في فيينا، في الفترة من ٢٤ آذار/مارس إلى ٤ نيسان/أبريل ٢٠١٤.

١٠١- وظلَّت خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي في صميم الإجراءات التي اتَّخذتها الدول الأعضاء والأمانة وسائر أصحاب المصلحة المعنيون في سبيل تعزيز إطار الأمان النووي. وواصلت الوكالة تقاسم وتعميم الدروس المستفادة من الحادث المعني من خلال تحليل الجوانب التقنية ذات الصلة. ونظَّمت اجتماعات دولية للخبراء بشأن الوقاية من الإشعاعات بعد حادث فوكوشيما داييتشي (في الفترة من ١٧ إلى ٢١ شباط/فبراير) وبشأن التصدِّي للحوادث العنيفة (في الفترة من ١٧ إلى ٢٠ آذار/مارس). وبالإضافة إلى ذلك، عقدت الوكالة المؤتمر الدولي المعني بالتحدِّيات التي تواجهها منظمات الدعم التقني والعلمي في مجال تعزيز الأمان والأمن النوويين (في الفترة من ٢٧ إلى ٣١ تشرين الأول/أكتوبر). وفي عام ٢٠١٤، نُشر كل من *تقرير الوكالة عن العوامل البشرية والتنظيمية في الأمان النووي على ضوء الحادث الذي تعرضت له محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية*[١٢] و*تقرير الوكالة عن الوقاية من الإشعاعات في أعقاب حادث فوكوشيما داييتشي: تعزيز الثقة والفهم*[١٣].

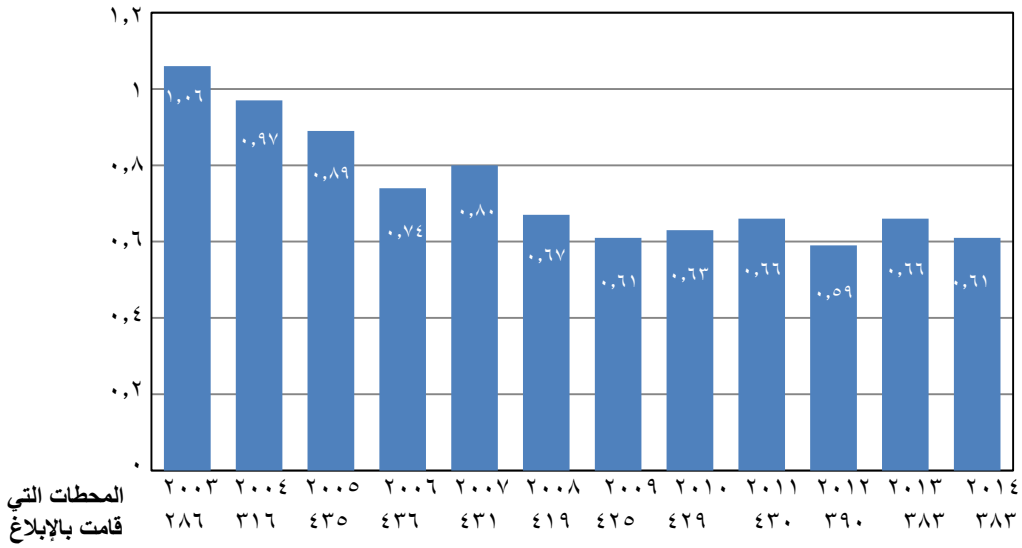
١٠٢- وما يزال أمان تشغيل محطات القوى النووية عالي المستوى، كما يتضِّح من مؤشرات الأمان التي جمعتها الوكالة والرابطة العالمية للمشغِّلين النوويين. ويُظهر الشكل ألف-١٣ عدد حالات الإيقاف الفوري أو الإغلاقات اليدوية والآلية غير المخطط لها لكل ٧٠٠٠ ساعة (زهاء عام) من التشغيل. وما حالات الإيقاف

---

[١٢] الموقع الشبكي: http://www.iaea.org/sites/default/files/humanfactors0914.pdf

[١٣] الموقع الشبكي: http://www.iaea.org/sites/default/files/radprotection0914.pdf

الفوري سوى مؤشِّر واحد يدلِّل على أداء الأمان إلا أنه من الشائع استخدام هذا النهج كمؤشر يبيِّن النجاح في تحسين أمان المحطات عن طريق الحدّ من عدد الحالات التفاعلية العابرة الحرارية-الهيدروليكية غير المرغوب فيها وغير المخطط لها التي تقتضي إيقاف فوري للمفاعل. وكما هو مبيَّن، يتواصل إدخال تحسينات مطَّردة مترافقة مع اتِّجاه صعودي طفيف إلى حد ما في هذا الصدد، في عام ٢٠١٣.



الشكل ألف-١٣ - متوسط معدَّل حالات الإيقاف الفوري: متوسط العدد السنوي لحالات الإيقاف الفوري الآلية واليدوية. (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى التابع للوكالة، المتاح على الموقع الشبكي http://www.iaea.org/pris *)*

١٠٣- وترد معلومات إضافية عن الأمان النووي في وثيقة *استعراض الأمان النووي لعام ٢٠١٥*.

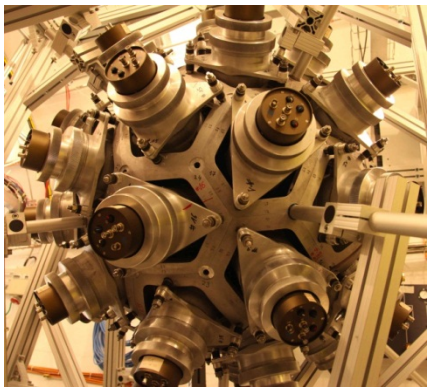
باء- البيانات الذرية والنووية

١٠٤- تشكل الملفات التي يتم تحديثها باستمرار الموجودة في المراكز الأساسية الأربعة في العالم للبيانات النووية أساس كل العلوم والتكنولوجيا النووية لأغراض تطبيقات الطاقة وغير الطاقة على حد سواء. وهذه المراكز هي قسم البيانات النووية بالوكالة، والمركز الوطني للبيانات النووية بمختبر بروكهافن الوطني في الولايات المتحدة، ومصرف بيانات وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومركز البيانات النووية الروسي. وينسق قسم البيانات النووية شبكتين مرتبطتين بهذه المراكز وغيرها من المراكز المتخصصة، وهما: الشبكة الدولية لمراكز بيانات المفاعلات النووية، التي تتعامل في المقام الأول مع قواعد البيانات التابعة لقاعدة بيانات التفاعلات النووية التجريبية، والشبكة الدولية لمقيِّمي بيانات الهيكل والاضمحلال النوويين، التي تشرف على ملف البيانات المقيَّمة للهيكل النووي.

١٠٥- ومن الأمثلة على الطابع التعاوني للعمل المتعلق بالبيانات النووية الفريق العامل المعني بالتعاون الدولي بشأن تقييم البيانات النووية، الذي أنشأته وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي. وقد استخدم الفريق المذكور، لمدة ٢٥ عامًا، أفرقة فرعية لمعالجة قضايا محددة مثل التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة. ويجمع مشروع التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة بين خبراء من مختلف الأوساط الدولية المعنية ببيانات التفاعلات النووية، من أجل تحديد وتوثيق التناقضات بين مكتبات البيانات المقيَّمة الموجودة والبيانات المقاسة وتفسيرات حسابات النماذج، ويهدف إلى إحراز تقدم في التوفيق بين

هذه التناقضات لإيجاد تقييمات أكثر دقة من أجل جميع التطبيقات. وينصب التركيز الأوليّ على عدد صغير من النَّوى التي لها أعلى الأولوية، وهي نوى الهيدروجين والأكسجين والحديد والأكتينيات الرئيسية. ويتعامل فريق فرعي آخر، تابع للفريق العامل المعني بالتعاون الدولي بشأن تقييم البيانات النووية، مع اقتراح بشأن شكل جديد حديث للبيانات المنظَّمة، بلغة الترميز الموسَّعة (XML).

١٠٦- والمرافق التجريبية مجال آخر للتعاون الدولي. فقد قام المصدر النيوتروني النبضي الموجود في مرفق زمن تحليق النيوترونات التابع للمنظمة الأوروبية للبحوث النووية بقياس مقاطع عرضية عديدة، على نطاق واسع للطاقة، لازمة للتخليق النووي النجمي، وآثار عدم التماثل في النَّوى المركَّبة، وأبحاث الكثافة على المستوى النووي، وتطبيقات التكنولوجيا النووية، مثل التحويل النووي للنفايات النووية، والأنظمة التي تعمل بواسطة المعجلات، وأبحاث دورة الوقود النووي (الشكل باء-١). وشرع اتحاد للدول الأوروبية في تشييد واحد من أكبر المشاريع النشطة للبنية التحتية في أوروبا، وهو مصدر التشظية الأوروبي. وقد وُضع حجر أساس هذا المصدر في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤ في لوند بالسويد، ومن المتوقع توليد النيوترونات الأولى في عام ٢٠١٩.



الشكل باء-١ - أجهزة كشف في مرفق زمن تحليق النيوترونات في المنظمة الأوروبية للبحوث النووية. (الصورة من: المنظمة الأوروبية للبحوث النووية)

١٠٧- وتتيح مرافق الحزم الأيونية المشعة قياس العديد من النويدات التي لا يمكن دراستها في المرافق التقليدية. ويمكن باستخدام هذه الحزم بحث العديد من المجالات في ميدان الفيزياء النووية عند حدود الاستقرار، بما في ذلك دراسة النَّوى التي تنشأ من عمليتي الأسر السريع للبروتونات (r-process وrp-process)، وإغلاق أغلفة النَّوى عند الاقتراب من الأرقام السحرية، وكذلك دراسة العناصر البالغة الثقل. وسيمكِّن المرفق سبيرال-٢ الذي يجري بناؤه في مركز بحوث المعجِّل الوطني الكبير للأيونات الثقيلة في فرنسا عددًا كبيرًا من الباحثين الدوليين من استخدام الحزم الأيونية المشعة. ومن المقرر إجراء التجارب الأولى في عام ٢٠١٥.

١٠٨- وقد نُشرت وقائع المؤتمر الدولي بشأن البيانات النووية لأغراض العلوم والتكنولوجيا، الذي عقد في عام ٢٠١٣ في نيويورك بالولايات المتحدة الأمريكية، في مجلة يستعرضها النظراء (*Nuclear Data Sheets* 118–120) في عام ٢٠١٤. وسلط هذا المؤتمر، الذي يعقد كل ثلاث سنوات، الضوء على عمل عدة مئات من العلماء والمهندسين الضالعين في إنتاج البيانات النووية أو استخدامها فيما يخص العديد من التطبيقات.

١٠٩- والتطبيقات التي تعتمد اعتمادًا كبيرًا على البيانات النووية هي المفاعلات الانشطارية، التي هي مجال تركيز مشروع التنظيم التعاوني الدولي للمكتبات المقيَّمة؛ وبحوث الاندماج، لا سيما في إطار المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي؛ والاحتياجات الطبية، لا سيما إنتاج النظائر وقياس الجرعات، حيث يمكن قياس خصائص طيف النيوترونات باستخدام مجموعة من المقاطع المستعرضة، المحددة الخصائص تحديدًا جيدًا جدًا، للتفاعلات النووية.

١١٠- وعادة ما تُعتبر البيانات الذرية مجال عمل منفصلاً، ولكن موضوع العزوم النووية هو موضوع تتفاعل فيه البيانات الذرية والبيانات النووية على نطاق واسع. ويوفر القياس الطيفي التجريبي للبنية الدقيقة الذرية، مقترنًا بحسابات دقيقة للبنية الذرية، وسيلة لاستكشاف بارامترات البنية النووية، بما في ذلك نصف قطر دائرة احتواء الشحنة، وعزم ثنائي القطب المغنطيسي، والعزم الكهرستاتيكي رباعي الأقطاب. وبفضل الحسابات التفصيلية للديناميكا الكهربائية الكمِّية، وذلك عمومًا فيما يتعلق بالأيونات الثقيلة المماثلة للهيليوم، يمكن الآن الفصل بين المفعول المجالي-النظري ومفعول بور-فايسكوبف على البنية الفائقة الدقة. وقد وُصف العديد من التطبيقات من هذا النوع في المؤتمر الدولي التاسع المعني بالبيانات الذرية والجزيئية وتطبيقاتها الذي عقد في جينا بألمانيا من ٢١ إلى ٢٥ أيلول/سبتمبر ٢٠١٤.

١١١- وقد توسع علم القياس الكمي لعدم اليقين توسعًا سريعًا في التطبيقات الخاصة بمحاكاة الأنظمة المعقدة، مثل الطقس والمناخ. وعُقدت في عامي ٢٠١٣ و٢٠١٤ عدة اجتماعات تناولت التطبيق الذي تم تطويره حديثًا لهذا القياس على البيانات الذرية والجزيئية المحسوبة، كما حدث فيما يتعلق بالتجارب. ويُعنى هذا التطبيق بالنظم الفيزيائية البسيطة التي تشكل الحسابات الدقيقة اللازمة لها مهمة صعبة للغاية، كما يمثل، إلى حد ما، فرعًا جديدًا من علم القياس الكمي لعدم اليقين.

الشكل باء-٢ - يوجد مرفق ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية الأوروبي (European XFEL) في هامبورغ بألمانيا. (الصورة من: مرفق ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية الأوروبي)

١١٢- وقد أخذت تدخل في الخدمة في جميع أنحاء العالم مرافق جديدة لمستخدمي ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية القوية والضعيفة. وهناك مرفقان عاملان لليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية القوية، وهما: المعجل الخطي الباعث للأضواء المترابطة، في ستانفورد بالولايات المتحدة الأمريكية، الذي دخل في الخدمة في عام ٢٠٠٩، ومرفق SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser facility في هاريما باليابان، الذي دخل في الخدمة في عام ٢٠١١. وقيد الإنشاء المرافق التالية العاملة بالأشعة السينية القوية: مرفق ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية PAL-XFEL في مختبر معجِّل بوهانغ في بوهانغ

بجمهورية كوريا، ومرفق ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية الأوروبي (European XFEL) في هامبورغ بألمانيا (الشكل باء-٢) ومرفق SwissFEL في فيليغين بسويسرا. ومن المتوقع أن ينتج المرفقان الأولان أول ضوء ليزر في عام ٢٠١٦. وجرى استعراض حالة هذه المرافق وغيرها من مرافق ليزر الإلكترونات الطليقة الموجودة في جميع أنحاء العالم في المؤتمر الدولي السادس والثلاثين المعني بليزر الإلكترونات الطليقة الذي عقد في بازل بسويسرا في آب/أغسطس ٢٠١٤. وتُستخدم مرافق ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية هذه لدراسة الخصائص الإلكترونية للذرات والجزيئات والمواد، بما في ذلك دراسة العمليات السريعة التي تجري في الجزيئات البيولوجية المعقدة، مثل الحمض الريبي النووي المنزوع الأكسجين (DNA).

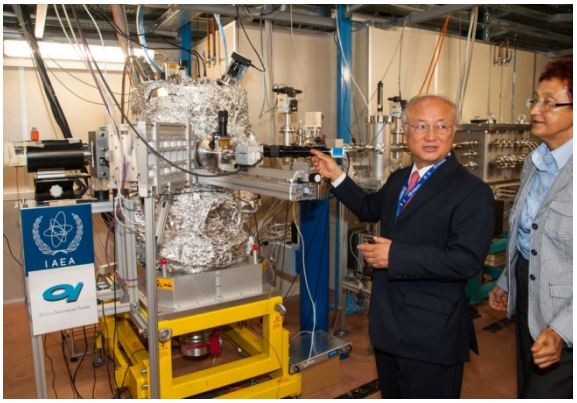
جيم- التطبيقات الخاصة بالمعجلات ومفاعلات البحوث

جيم-١- المُعجّلات

١١٣- بدأ في عام ٢٠١٤ مشروعان طموحان وواسعا النطاق لمعجِّلين من المقرر أن يبدأ تشغيلهما خلال الفترة ٢٠٢٠-٢٠٢٢. وبدأ المرفق الأوروبي لإشعاع السنكروترون، في غرونوبل بفرنسا، ترقية مصدره الفوتوني الحالي القائم على المعجِّل. وسيكون المصدر الجديد، الذي يُعتبر الجيل الرابع من نوعه، أكثر سطوعًا (تعزيز الأداء بمليون مرة) مقارنة بالمصدر الحالي، مع خفض استهلاك الطاقة بنسبة ٢٠٪. والهدف منه هو توفير مجموعة متنوعة من القدرات للباحثين في مجموعة واسعة من التخصصات، مثل الفيزياء والكيمياء وعلم المواد وعلم الأحياء. وبدأ أيضًا إنشاء معجِّل الجسيمات الخاص بمصدر التشظية الأوروبي، الذي سيوفِّر للبحث العلمي أشد الحزم النيوترونية النبضية قوة في العالم. وسيكون مصدر التشظية الأوروبي مرفقًا قائمًا على معجِّل، لإجراء بحوث علم المواد باستخدام تشتت النيوترونات. وسيوفر حزما نيوترونية أكثر سطوعًا بما يصل إلى ٣٠ مرة من الحزم التي يصدرها أي مصدر نيوتروني حالي. وهو موجود في لوند بالسويد، بجوار المختبر MAX IV، الذي سيكون مكملا لمصدر التشظية الأوروبي في مجال بحوث علم المواد.

١١٤- ومرافق السنكروترون أدوات بحثية هامة، وذات قيمة في تيسير التطوير التكنولوجي. وعادة ما يكون وقت الحزم الإشعاعية المطلوب الحصول عليه في مرافق السنكروترون أكثر من الوقت المتاح بمعامل ضعفين إلى ثلاثة أضعاف، أي أن ما بين الثلث إلى النصف فقط من جميع مقترحات البحوث يمكن الموافقة عليها وتنفيذها. وهذا المعامل أعلى من ذلك في خطوط الحزم الإشعاعية الحديثة بوجه خاص، مثل ليزر الإلكترونات الطليقة، ويبلغ حوالي ٥ أضعاف الوقت المتاح. وهذا يجعل من الصعب، إن لم يكن من المستحيل، على الأفرقة البحثية المستجدة في هذا المجال والمنتمية إلى الدول الأعضاء النامية أن تحصل على وقت الحزم الإشعاعية في أي سنكروترون.

١١٥- ولمعالجة هذا الوضع والتمكن من إتاحة الاستفادة من مرفق سنكروتروني مطابق لأحدث المواصفات لأفرقة البحوث المنتمية إلى أي دولة عضو، أنشأت الوكالة مرفقًا تجريبيًا متعدد التقنيات بصفة محطة نهائية لخط الحزم الإشعاعية العامل بتألق الأشعة السينية والكائن في مرفق مختبر إليترا في تريستا بإيطاليا (الشكل جيم-١). وتم تنفيذ المشروع بالتعاون مع المعهد الاتحادي للفيزياء والتكنولوجيا بألمانيا وجامعة برلين التقنية.



الشكل جيم-١ - يوكيا أمانو المدير العام للوكالة ومايا كيسكينوفا منسقة بحوث مختبر إليترا إلى جانب الحجرة الفائقة الفراغ خلال افتتاح خط الحزم الإشعاعية العامل بتألق الأشعة السينية الجديد في ٦ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤. (الصورة من: مختبر إليترا)

١١٦- وبفضل المحطة النهائية التابعة للوكالة لخط الحزم الإشعاعية، والموجودة في الحجرة الفائقة الفراغ، يتسنى التطبيق المتآزر لمنهجيات شتى لتألق الأشعة السينية وقياس الطيف، توفر تحديدًا كاملاً للخصائص العنصرية والكيميائية والهيكلية للمواد. وتحتوي الحجرة الفائقة الفراغ على جهاز مناولة عينات متقدم ذي سبعة محاور يعمل بمحرك، يستخدم لنقل/تدوير العينة المراد دراستها وأجهزة كشف الأشعة السينية في مختلف الاتجاهات بالنسبة إلى الحزمة الإشعاعية السنكروترونية. وتشمل السمات المثلى لخط الحزم الإشعاعية لتألق الأشعة السينية القابلية الموسعة لموالفة الطاقة (٢-١٤ كيلو الكترون فلط)، والتدفق (٥١٠٩ فوتونات في الثانية عند ٥,٥ كيلو الكترون فلط، ووضع الجهاز ٢,٤ غيغا الكترون فلط)، وقدرة استبانة قدرها 1.5×10^{-4}، وصغر مقدار انفراج الحزمة الإشعاعية (٠,١٥ ملي راد)،وحجم حزم إشعاعية عند شقوق الخروج قدره ٢٢٠ ميكرومتر × ٩٠ ميكرومتر.

١١٧- وفي عام ٢٠١٤ أطلقت الوكالة أيضا بوابة معارف المعجلات[١٤]، وهي موقع إلكتروني جديد يهدف إلى تجميع الأوساط المعنية بالمعجِّلات وتوفير المراجع لأصحاب المصلحة، مثل مقرري السياسات ومجالس البحوث العلمية والمنظمات الحكومية التي تتعامل مع البنى التحتية البشرية والعلمية للبحوث. وتشتمل البوابة على قاعدة بيانات بشأن ١٩٦ مرفقًا عاملاً منخفض الطاقة ومتوسط الطاقة لتعجيل الجسيمات في شتى أنحاء العالم. والموقع مصمم ليكون منصة جذابة للتعاون والتشبيك العلميين، ويقوم بجمع الوصلات الرابطة للبرمجيات وقواعد البيانات، والوثائق العلمية والتعليمية، وأحدث تطورات البحوث القائمة على المعجلات، وإعلانات المؤتمرات وحلقات العمل والدورات الدراسية، كما يتيح للمستخدمين المسجلين تحميل مساهماتهم.

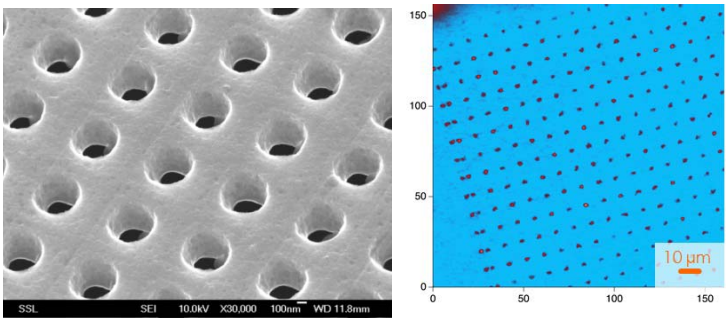
١١٨- وتنطوي إدارة أي مرفق معجِّلات على عدد من التحديات التي تختلف عن التحديات التي تواجه المرافق البحثية الأخرى. ويمكن بسهولة إغفال هذه الجوانب لأن المعجلات تكون في كثر من الأحيان أدوات البحوث وموضوعها معًا. ولمساعدة الدول الأعضاء على التصدي بكفاءة للتحديات الاقتصادية والتقنية الحالية، نظمت الوكالة، بالاشتراك مع مرفق السنكروترون الفرنسي SOLEIL، اجتماعًا تقنيًا حول استراتيجيات إدارة مرافق المعجِّلات، عقد من ١٥ إلى ١٩ أيلول/سبتمبر ٢٠١٤ في سانت أوبين بفرنسا.

---

[١٤] يمكن الوصول إلى بوابة معارف المعجلات على العنوان الإلكتروني التالي: http://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx.

١١٩- وقد أصبحت مؤخرًا مصادر الأيونات المنفردة، ذات الدقة النانومترية، تشكل القوة الدافعة لعدد من مجالات البحوث ومن احتمالات تطوير تكنولوجيات جديدة. وفي إطار مشروع بحثي منسق من مشاريع الوكالة بشأن العيوب الناجمة من الإشعاعات في أشباه الموصلات والعوازل، استُخدم التشعيع بالأيونات المنفردة لتقييم خاصيات النقل التي تتسم بها العيوب الناجمة عن الشحنات في الأجهزة الإلكترونية المتضررة من الإشعاعات. وتنعكس خصائص المواد، وكذلك بنية الجهاز، في ظواهر التيار العابرة الناجمة عن الأيونات المنفردة، وتتوقف هذه الظواهر أيضًا على نوع الأيون. ويمكن أيضًا أن تعدل الأيونات المنفردة الخصائص الكهربائية والبصرية والهيكلية لأي مادة عند نقطة دخول الأيون في المادة وعلى طول مسار الأيون. وتنطوي تكنولوجيا التشعيع القطعي بأيون واحد أو الغرس القطعي لأيون واحد على صعوبات، ولكنها مهمة ويمكن أن تفتح الباب أمام التعديل الدقيق للمواد باستخدام تثبيت الموقع.

١٢٠- ويظهر في الصورتين المعروضتين في الشكل جيم-٢ مثالان لهذه المواد المعدلة. ففي الصورة اليسرى تظهر عملية يمكن استخدامها في التشكيل المجهري للسيليكون بمقاسات خاصة تنخفض إلى عشرات النانومترات، بما يتيح صنع مجموعة من الهياكل الجديدة ذات الأبعاد النانوية لاستخدامها في مجالات مثل الموائعيات المجهرية/النانوية والطباعة الحجرية النانوية[١٥]. وتظهر في الصورة اليمنى الكيفية التي يمكن بها استخدام زرع الأيونات المنفردة لمعالجة عيوب الألماس بغية تكوين مراكز شغور من النيتروجين، من المتوقع أن يكون لها تطبيق واعد في مجالات الحساب الكمِّي، أو أجهزة الاستشعار المغناطيسية ذات الاستبانة البالغة العلو، أو الضوئيات ذات المستوى النانوي[١٦]. وبما أنه يمكن تعديل خصائص المواد على مسار الأيون فإن تقنية التشعيع بأيون منفرد مع التحكم في الموضع بدقة نانومترية تمثل تكنولوجيا رئيسية لتعديل الخصائص الكهربائية والبصرية والهيكلية للمواد.



الشكل جيم-٢ - إلى اليسار: صورة ملتقطة بواسطة مجهر المسح الالكتروني لمصفوفة منتظمة من الثقوب، يبلغ قطر كل منها بضع مئات من النانومترات، على السيليكون. (الصورة من: M.B.H. Breese/National University of Singapore). إلى اليمين: صورة ملتقطة بواسطة مجهر متحد البؤرة لشبكة من مراكز شغور النيتروجين التي تم تكوينها بزرع الأيونات في الألماس. وقد تم عن طريق التشعيع زرع عدد قليل من أيونات النيتروجين-١٥ في كل بقعة تشعيعية. (الصورة من: T. Ohshima/Japan Atomic Energy Commission).

١٢١- وإلى جانب استخدام معجِّلات الجسيمات في البحوث الأساسية والتطبيقية، تمثل هذه المعجلات أدوات بالغة الأهمية للتطبيقات الصناعية. وقد أدى تطوير تكنولوجيات معجِّلات قادرة على إصدار تيارات من الحزم الإشعاعية ذات درجة عالية من الاستقرار والتسديد تتراوح بين بضعة ميكرو أمبيرات و١٠٠ ميكرو أمبير،

---

[١٥] AZIMI, S., et al., Nanoscale lithography of $LaAlO_3/SrTiO_3$ wires using silicon stencil masks, Nanotechnology 25 (2014) 445301.

[١٦] Takashi Yamamoto et al. Strongly coupled diamond spin qubits by molecular nitrogen implantation, PHYSICAL REVIEW B 88, 201201(R) (2013).

وطاقات أيونية واردة تتراوح بين ١٠٠ إلكترون فولت و~ ١٠ ميغا إلكترون فولت، إلى توفير تكنولوجيا واسعة النطاق وقادرة على صنع الدوائر المتكاملة الخاصة بعمليات المنطق والذاكرة والعمليات التماثلية، فضلاً عن مجموعة متزايدة التنوع من أجهزة الاستشعار البصرية وأجهزة التصوير. ويُستخدم زرع الأيونات هذه الأيام على نطاق واسع في صناعة أشباه الموصلات لاستحداث المواد الإلكترونية والضوئية وتعديلها[١٧]. ويقدر العلماء أنه هناك الآن أكثر من ١٧ ٠٠٠ معجل عامل في شتى أنحاء العالم، في مؤسسات البحوث والمستشفيات والصناعة[١٨].

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٢٢- تستخدم مفاعلات البحوث أساساً كمصدر نيوتروني للبحوث ومختلف التطبيقات، وترد في الجدول جيم-١ أكثر التطبيقات تواترًا. ويمكن أن تتراوح قدرة هذه المفاعلات بين الصفر (على سبيل المثال، المجمعات الحرجة أو دون الحرجة) وما يقرب من ٢٠٠ ميغاواط (حراري)، وهي قدرة تظل صغيرة مقارنة بالقدرة البالغة ٣ ٠٠٠ ميغاواط (حراري) لمحطة القوى النووية النمطية. وتصميم مفاعلات البحوث أكثر تنوعًا بكثير من تنوع مفاعلات القوى، ولها أيضًا أوضاع تشغيل مختلفة، يمكن أن تكون مستمرة أو نبضية.

الجدول جيم-١- الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم[١٩].

نوع التطبيقات (أ)	عدد مفاعلات البحوث المشمولة (ب)	عدد الدول الأعضاء التي توجد بها مرافق مستخدمة
التدريس/التدريب	١٧٨	٥٥
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١٢٩	٥٣
إنتاج النظائر المشعّة	١٠٠	٤٤
تشعيع المواد/الوقود	٨٥	٣٠
التصوير الإشعاعي النيوتروني	٧٤	٤١
التشتت النيوتروني	٥٣	٣٥
التحويل (إشابة السليكون)	٣١	٢٠
التقويم الجيولوجي	٢٦	٢٢
التحويل (الأحجار الكريمة)	٢٢	١٣
العلاج النيوتروني، أساسا البحوث والتطوير	١٩	١٣
استخدامات أخرى (ج)	١٤١	٣٨

(أ) يرد وصف لهذه التطبيقات بمزيد من التفاصيل في المنشور الذي صدر مؤخرًا من الوكالة بعنوان *تطبيقات مفاعلات البحوث* (العدد NP-T-5.3 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، ٢٠١٤).

(ب) من بين ٢٨٤ مفاعل بحوث تمت دراستها (٢٤٧ عاملة، و١٩ في حالة إغلاق مؤقت، و٦ قيد الإنشاء، و١٢ مخطّط لها؛ ٣١ آب/أغسطس ٢٠١٤)

(ج) تشمل التطبيقات الأخرى معايرة الأجهزة واختبارها وقياس الجرعات، وتجارب التدريع، وتجارب فيزياء المفاعلات، وقياسات البيانات النووية، والجولات والحلقات الدراسية في مجال العلاقات العامة.

[١٧] FELCH, S.B et al.: Ion Implantation for Semiconductor devices: the largest use of industrial accelerators, Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA USA, Page 740, http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/papers/weyb2.pdf

[١٨] Industrial Accelerators and their applications, Eds: Robert W Hamm and Marianne E. Hamm; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2012

[١٩] المصدر: قاعدة بيانات الوكالة بشأن مفاعلات البحوث (http://nucleus.iaea.org/RRDB)

١٢٣- ووفقًا لقاعدة بيانات مفاعلات البحوث في الوكالة، تم حتى الآن بناء ٧٤٧ مفاعل أبحاث، كان ٢٤٧ منها عاملا في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤. ولدى الاتحاد الروسي أكبر عدد من مفاعلات البحوث العاملة (تشمل مرافق حرجة)، وهو ٤٩ مفاعلاً، تليه الولايات المتحدة الأمريكية (٤١)، والصين (١٥) وفرنسا (١٢). ولدى العديد من البلدان النامية مفاعلات بحوث أيضًا (على سبيل المثال، هناك ثمانية مرافق تعمل في أفريقيا). وعلى نطاق العالم، يعمل ٥٧ مفاعل بحوث على مستويات قدرة أعلى من ٥ ميغاواط، وبذلك توفر تدفقات نيوترونية عالية تدعم التطبيقات التي تحتاج إلى سعة عالية.

١٢٤- وما زالت أغلبية مفاعلات البحوث العاملة منقوصة الاستغلال إلى حدّ بعيد، وتبلغ في المتوسط أكثر من ٤٥ عامًا من العمر. لذلك، يحتاج كثير منها إلى عناية مستمرة من حيث إدارة التقادم، والتحديث، والتجديد. ولا يزال الاهتمام بالاستغلال الاستراتيجي وتخطيط الأعمال يتزايد من أجل تحسين الاستغلال، وإدرار إيرادات إضافية. وفي العامين الماضيين، قام ٣٧ مرفقًا من مرافق مفاعلات البحوث بإعداد خطط استراتيجية وتقديمها إلى الوكالة لاستعراضها. وقد نظمت الوكالة حلقة عمل للمتابعة في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٤ لتعميم الدروس المستفادة وتبادل الممارسات الجيدة بين الدول الأعضاء في الوكالة نتيجة لعملية الاستعراض هذه. ويستمر التعاون الدولي على ترويج وتعزيز استخدام مفاعلات البحوث في التعليم والتدريب. ومن الأمثلة على ذلك مشروع مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت في أمريكا اللاتينية وأوروبا، الذي يهدف إلى ربط الجامعات بمفاعلات البحوث العاملة المخصصة للتعليم والتدريب.

الشكل جيم-٣. منحت الهيئة الرقابية النووية في الأرجنتين رخصة بناء لمفاعل الأبحاث RA-10، الذي سيُستخدم لزيادة إنتاج البلد من النظائر المشعة اللازمة لاختبار المواد/الوقود، وإشابة السيليكون، وكذلك البحث والتطوير. (الصورة من: الهيئة الوطنية للطاقة الذرية).

١٢٥- وهناك عدة بلدان تمر بمراحل مختلفة من بناء مفاعلات بحوث جديدة باعتبارها مرافق وطنية رئيسية لتطوير البنية التحتية للعلوم والتكنولوجيا النووية وبرامجها، بما في ذلك القوى النووية. ويجري تشييد مفاعلات بحوث جديدة في الاتحاد الروسي والأرجنتين (الشكل جيم-٣) والأردن وجمهورية كوريا وفرنسا والمملكة العربية السعودية. ولدى العديد من الدول الأعضاء خطط رسمية لبناء مفاعلات بحوث جديدة، ومن بين هذه البلدان البرازيل وبلجيكا وفيتنام والهند وهولندا والولايات المتحدة. وتنظر بلدان أخرى، مثل أذربيجان وبنغلاديش وبوليفيا وبيلاروس وتايلند وتونس وجمهورية تنزانيا المتحدة وجنوب أفريقيا والسودان والكويت ومنغوليا ونيجيريا، في بناء مفاعلات بحوث جديدة[٢٠].

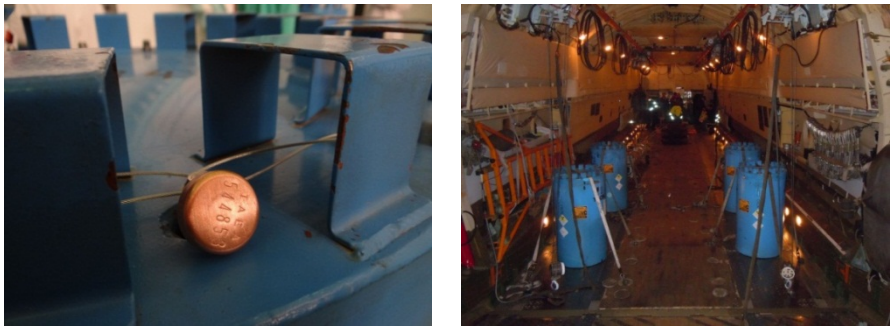
---

[٢٠] يهدف منشور الوكالة *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (العدد NP-T-5.1 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة) إلى مساعدة الدول الأعضاء في هذا المجال.

١٢٦- ومن المتوقع أن يستمر انخفاض عدد مفاعلات البحوث الوطنية العاملة، حيث يجري إخراج المفاعلات القديمة من الخدمة والاستعاضة عنها بمفاعلات بحوث تتشارك فيها عدة بلدان. وسيلزم المزيد من التعاون الدولي لضمان إمكانية الاستفادة من هذه المرافق على نطاق واسع واستخدامها بكفاءة. وفي هذا السياق، تساعد الشبكات والائتلافات الإقليمية المعنية بمفاعلات البحوث، التي تيسِّرها الوكالة[٢١]، على تعزيز التعاون الدولي، وتمكِّن مفاعلات البحوث من توسيع نطاق أوساط أصحاب المصلحة فيها ومستخدميها. وعلاوة على ذلك، استهلت الوكالة في عام ٢٠١٤ مخططًا جديدًا للتعاون، وهو المركز الدولي القائم على مفاعل بحوث والمختار من الوكالة.

١٢٧- وواصلت المبادرة العالمية للولايات المتحدة لتقليص التهديدات، طوال عام ٢٠١٤، تنفيذ مهمتها المتمثلة في الحد من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع النووي المدني. وبنهاية عام ٢٠١٤ كان قد تم تحويل ٩٢ من ٢٠٠ مفاعل أبحاث في نطاق تنفيذ هذه المبادرة إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تم تأكيد إغلاقها، بما في ذلك مرفق واحد لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ يستخدم اليورانيوم الشديد الإثراء. وتشمل حالات النجاح الرئيسية قيام الاتحاد الروسي بإعداد قلب المفاعل الذي يعمل بوقود اليورانيوم المنخفض الإثراء وتحميله في المفاعل أرغوس، الذي وصل إلى حرجيته الأولى في تموز/يوليه، وتصريف وقود اليورانيوم الشديد الإثراء السائل من المفاعل فوتون الذي تم إغلاقه في أوزبكستان. وخلال عام ٢٠١٤، وقعّت الصين وغانا والوكالة اتفاقًا لدعم تحويل مفاعل البحوث GHARR-1 من خلال نقل وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وتم توضيح الشروط التقنية واعتماد خطة عمل لتنفيذ التحويل وإعادة اليورانيوم الشديد الاثراء.

١٢٨- وتشمل أنشطة الحد من اليورانيوم الشديد الإثراء إعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستخدم في مفاعلات البحوث إلى بلد المنشأ الذي تم إثراؤه فيه. وبنهاية عام ٢٠١٤ كان برنامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الناشئ في الولايات المتحدة قد أنجز ٧٦٪ من أهدافه بإزالة ما يقرب من ١٣٠٠ كغم من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلك المستخدم في مفاعلات البحوث. واكتمل بنسبة ٨٦٪ برنامج استرداد اليورانيوم الشديد الإثراء الروسي المنشأ، بإزالة ٢١٦٠ كغم من وقود اليورانيوم الشديد الاثراء المستخدم في مفاعلات البحوث. وبعد تحويل مفاعل البحوث البولندي ماريا إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، أعيد شحن ٥٣ كيلوغرامًا من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستهلك إلى الاتحاد الروسي في أيلول/سبتمبر. وفي كازاخستان، أعيدت إلى الاتحاد الروسي ١٠,٢ كغم من اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج و٣٧,٣ كغم من مرفق WWR-K في آلاتاو (في إطار التحويل من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء) (الشكل جيم-٤).



الشكل جيم-٤- ختم الوكالة الخاص بالضمانات على حاوية نقل من الطراز TK-S16 (إلى اليسار). ويتم إعداد حاويات النقل لترحيلها بالطائرة إلى الاتحاد الروسي من ألماتي، كازاخستان (إلى اليمين).

[٢١] قد شكّلت الوكالة عدة ائتلافات مختلفة لمفاعلات البحوث في منطقة البلطيق، ومنطقة الكاريبي، ووسط أفريقيا، وآسيا الوسطى، وأوروبا الشرقية، ومنطقة البحر الأبيض المتوسط، وكذلك في رابطة الدول المستقلة.

١٢٩- وكثيراً ما تجرى بعد التحول إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء وإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى بلد منشئه عمليات كبيرة للارتقاء بالبنية الأساسية. فمثلاً تمول مبادرة الوكالة للاستخدامات السلمية برنامجاً شاملاً للتحديث في مفاعل البحوث TRIGA Mark III المكسيكي.

١٣٠- والأنواع المتقدمة ذات الكثافة العالية للغاية من وقود اليورانيوم-الموليبدينوم التي يجري تطويرها في الوقت الراهن مطلوبة لتحويل مفاعلات البحوث العالية الأداء العالية الفيض. وعلى الرغم من إحراز تقدّم كبير في هذا الميدان، يلزم بذل المزيد من الجهود وإجراء المزيد من الاختبارات، وخصوصًا في سياق برامج فحوص التشعيع وما بعد التشعيع، وكذلك في مجال تقنيات الصنع، لتحقيق التوافر التجاري لأنواع وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء المعتمدة. وفي تشرين الثاني/نوفمبر، وقعت شركة الوقود TVEL التابعة للاتحاد الروسي عقدا لبدء توريد وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء إلى المفاعل العالي الفيض الكائن في هولندا.

١٣١- وفي حين لم تكن هناك أي حالات عجز كبرى في توافر الموليبدينوم-٩٩ خلال عام ٢٠١٤، لازالت توجد تحديات تشغيلية في مرافق المعالجة وفي مفاعلات البحوث القديمة. ونتيجة للتغيّرات في الطلب، والكفاءة المكتسبة، فضلاً عن بعض التنويع في الإمدادات، لم تسفر حالات العجز الطفيفة هذه عن أزمة على النطاق الذي شوهد بين عامي ٢٠٠٧ و٢٠١٠. ويستمر تحويل عمليات إنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، وظلت المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين وشركة NTP للنظائر المشعة في جنوب أفريقيا هما الموردين الرئيسيين للموليبدينوم-٩٩ غير القائم على اليورانيوم الشديد الإثراء. وفي عام ٢٠١٤، استهلت المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين الأعمال الأولية لإنشاء مرفق إنتاج الموليبدينوم-٩٩ التابع لها، الذي من المتوقع أن يزيد الإنتاج الأسبوعي من ١ ٠٠٠ كوري إلى ٣ ٠٠٠ كوري من الموليبدينوم-٩٩ القائم على اليورانيوم الضعيف الإثراء، معايرا بعد ٦ أيام من مغادرة المرفق. وتواصل شركة NTP للنظائر المشعة تحويل عملياتها إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء حصرًا. واستهل منتجان رئيسيان آخران للنظائر الطبية، هما معهد العناصر الإشعاعية في بلجيكا وشركة مالينكرودت في هولندا، جهودا لدعم تحويل عملياتهما الخاصة بالإنتاج على نطاق تجاري من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء.

دال- استخدام التقنيات النووية لتحسين صحة الحيوان

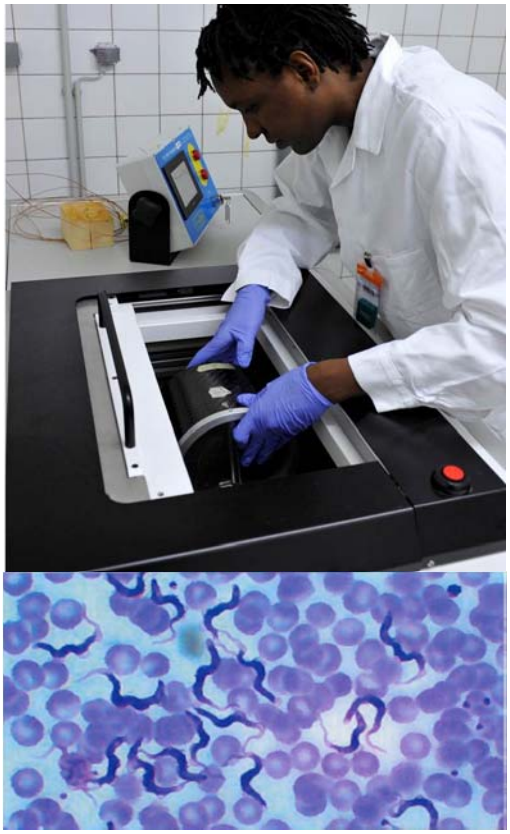
١٣٢- تؤدي التكنولوجيات النووية والتكنولوجيات المتصلة بالمجال النووي دورًا مهما في ميدان صحة الحيوان، وخصوصًا فيما يتعلق بتشخيص الأمراض وتحديد خصائص الكائنات العضوية المسببة للأمراض. ويركز هذا الاستعراض على مسألة كيف وأين أحدثت التكنولوجيات النووية، بأساليبها النظيرية وغير النظيرية على السواء، أثرا في الماضي، والمجالات التي يمكن أن يُتوقَّع أن يكون لها أثر فيها في المستقبل.

دال-١- استخدام اللقاحات المشعَّعة لوقاية الحيوانات الزراعية من الأمراض الحيوانية العابرة للحدود

١٣٣- التطعيم أداة حاسمة الأهمية لحماية الحيوانات والبشر من الأمراض التي تهدد الحياة. ويعتمد معظم اللقاحات على شكل ما من أشكال توهين مسببات الأمراض أو تعطيل نشاطها، باستخدام الأساليب الكيميائية أو الفيزيائية، مع الحفاظ في الحالتين كلتيهما على قدرة اللقاح على توليد المناعة، وبالتالي حفز الاستجابات المناعية

الواقية. وبصفة عامة، تستحث اللقاحات الحية الموهَّنة وقاية أفضل وأقوى من اللقاحات المعطَّلة النشاط، لأن عملية قتل اللقاح تدمر بعض البروتينات التي لها أهمية في استحثاث مناعة جيدة.

١٣٤- والتشعيع بديل للمعالجة الكيميائية أو الفيزيائية في صنع اللقاحات. ويمكن تطبيقه بطريقة تدمر الحمض النووي الجينومي لمسبب المرض أو توهنه تدريجيًا، مع الحفاظ على خصائصه كمستضد وبالتالي إحداث استجابة مناعية أفضل لدى الكائن المضيف. وقد أثبتت التطورات الأخيرة في تطوير اللقاحات المشعة أنه يمكن الحصول على كائنات عضوية مجهرية نشطة من حيث الأيض ولكن غير متناسخة، يمكن أن تحفز الاستجابة المناعية مثلما يحفزها التعرض لمسببات الأمراض الحية. وتوضع مزرعة منقَّاة لمسبب المرض الحي، مبردة أو مجمدة، في جهاز تشعيع، وتعرَّض للإشعاع وفقا لبرنامج يحدد فترة زمنية معيَّنة ومستوى معينًا من الطاقة. وعلى سبيل المثال، يستخدم للكائن العضوي الدقيق الذي يسبب داء المثقبيات مستوى تشعيع قدره ~ ١٠٠ غراي. ثم يُخلط المحلول المشعَّع لمسبب المرض بمواد واقية من التلف بالتجمُّد، بغية تحقيق استقرار المحلول أثناء عملية التجفيف بالتجميد قبل استخدامه كلقاح مرشح[٢٢].



الشكل دال-١ - تشعيع مزارع المثقبيات (T. evansi) في المختبر باستخدام مصدر أشعة سينية

١٣٥- وتستخدم مصادر الكوبالت-٦٠ عادة لتشعيع مسببات الأمراض؛ بيد أنه يمكن أيضًا استخدام الأشعة السينية والحزم الإلكترونية. وتختلف الجرعة تبعا لمسبب المرض. وقد أظهرت الدراسات أن يرقات المرحلة الثالثة من الطفيليات *Haemonchus contortus* و*Strongylus colubriformis* الموهنة بالتعرض لمقدار ٦٠٠

٢٢ Duxbury RE, Anderson JS, Wellde BT, Sadun EH, Muriithi IE (1972a). *Trypanosoma congolense*: Immunization of mice, dogs, and cattle with gamma-irradiated parasites. Experimental Parasitology, 32:527-533.

غراي و٧٠٠ غراي، على التوالي، تحمي الضأن من هذين النوعين من العدوى الطفيلية[٢٣]. وتتطلب دودة الرئة *Dictyocaulus viviparous* جرعة أقل (٤٠٠ غراي)، وإلا فإن المثقوبة لا يمكن أن تهاجر إلى الرئتين لتبدأ في حفز المناعة الوقائية[٢٤]. ويمكن توهين بكتيريا مثل البروسيلا بواسطة ٣ ٠٠٠ غراي[٢٥]، والباستوريلا بواسطة ٦ ٠٠٠ غراي[٢٦]، وعُصيَّات الجمرة الخبيثة بواسطة ٢٠ ٠٠٠ غراي[٢٧]. وتتطلب الفيروسات جرعات أعلى للتأثير على بروتيناتها وبنيتها. ففيروس داء الحمى القلاعية يتم تعطيل نشاطه بواسطة ٤٠ ٠٠٠ غراي،[٢٨] ويتطلب فيروس مرض ازرقاق اللسان ٦٠ ٠٠٠ غراي إلى ١٠٠ ٠٠٠ غراي[٢٩].

دال-٢- استخدام التقنيات النووية للتشخيص المبكر والسريع للأمراض الحيوانية وذات المصدر الحيواني العابرة للحدود

١٣٦- التشخيص المبكِّر والسريع حاسم الأهمية لمكافحة الأمراض العابرة للحدود. وتجرى فحوص تشخيصية على عينات المضيف (الدم والمصل والأنسجة والإفرازات) للكشف عن مسببات الأمراض أو الأجسام المضادة. وقد كان للوسم الإشعاعي دور فعال في تحسين فحوص تشخيص الأمراض لتحديد مسببات الأمراض أو مستضداتها أو الأجسام المضادة لها (البروتينات التي تنتج من التعرض لمستضدات مسبب المرض).

١٣٧- وللكشف عن المرض في عيّنة، كان يُستخدم في عمليات القياس المناعي في الماضي الحمض الريبي النووي المنزوع الأكسجين الموسوم إشعاعيا لمسبب المرض المعيَّن أو بروتيناته الموسومة إشعاعيا كمستضد من أجل استثارة الاستجابة المناعية. وكانت عمليات القياس هذه تجرى أساسًا في المختبرات المؤهلة، ولكن مع حلول الانزيمات والأصباغ الفلورية محل الوسم النظيري أصبحت الفحوص تجرى على نطاق واسع في الميدان. وعلى الرغم من أن استخدام الانزيمات والأصباغ الفلورية أسلوب عملي فإنه لم يحقق قط المستوى العالي من التخصص والحساسية الملاحظ في حالة استعمال النظائر المشعة. وحيثما تكون هناك حاجة إلى مستويات عالية من الحساسية والتخصص (على سبيل المثال، لتشخيص إنفلونزا الطيور من الفصيلة H5N1، أو الحمى القلاعية، أو حمى وادي الصدع، أو حمى الخنازير الأفريقية)، يكون الوسم النظيري أسلوبًا يمكن الاعتماد عليه دائمًا للتشخيص المبكر والسريع. وقد كانت الوكالة رائدة في تطوير أساليب قياس مؤكدة الجودة ومعقولة التكلفة

---

٢٣ Sivanathan S, Duncan JL, Urquhart GM (1984). Some factors influencing the immunisation of sheep with irradiated Haemonchus contortus larvae.Veterinary Parasitology, 16:313-23.

٢٤ Winter MD, Wright C, Lee DL (2000). Vaccination of young lambs against infection with Nematodirus battus using gamma irradiated larvae, International Journal of Parasitology, 30: 1173–1176.

٢٥ Dabral N, Martha-Moreno-Lafont, Sriranganathan N, Vemulapalli R (2014) Oral Immunization of Mice with Gamma-Irradiated Brucella neotomae Induces protection against Intraperitoneal and Intranasal Challenge with Virulent B. abortus 2308. PLoS One 9(9): e107180. doi:10.1371/journal.pone.0107180.

٢٦ Dauphin LA, Newton BR, Rasmussen MV, Meyer RF, Bowen MD (2008). Gamma Irradiation Can Be Used To Inactivate Bacillus anthracis Spores without Compromising the Sensitivity of Diagnostic Assays. Applied and Environmental Microbiology 74, 4427-4433.

٢٧ Aloni-Grinstein R, Gat O, Altboum Z, Velan B, Cohen S, Shafferman A (2005). Oral Spore Vaccine Based on Live Attenuated Nontoxinogenic Bacillus anthracis Expressing Recombinant Mutant Protective Antigen. Infection and Immunity 4043-4053 .

٢٨ Motamedi Sedeh F, Khorasani A, Shafaee K, Fatolahi H, Arbabi K (2008). Preparation of FMD type A87/IRN inactivated vaccine by gamma irradiation and the immune response on guinea pig. Indian J. Microbiol., 48:326–330.

٢٩ Campbell CH (1985). Immunogenicity of bluetongue virus inactivated by gamma irradiation. Vaccine, 3: p401.

لتشخيص عدد من الأمراض المعدية والطفيلية، مثل الحمى القلاعية وداء البروسيلات والطاعون البقري وداء المثقبيات.

الشكل دال-٢ - قام الموظفون المدربون المنتمون إلى العديد من المختبرات الوطنية لتشخيص الأمراض بتنفيذ التقنيات النووية والجزيئية في بلدانهم لمكافحة الأمراض الحيوانية وذات المصدر الحيواني

١٣٨- وبظهور تكنولوجيات منصة تضخيم الحمض النووي (مثل التفاعل البوليميري المتسلسل) حدث تحسُّن كبير في تشخيص الأمراض المعدية. وأتاح ذلك التشخيص المبكر والسريع والمؤكد للأنواع المعدية للغاية بوجه خاص من مسببات الأمراض أو التي كان من الصعب عزلها وتكثيرها في المختبر. وكان الكشف عن الحمض النووي يبدأ بوسم الحمض الريبي النووي المنزوع الأكسجين/الحمض النووي الريبي بمقتفيات مثل الكبريت-٣٥ وميثيونين الكبريت-٣٥ والفوسفور-٣٥ والفوسفور-٣٢. والمزية الرئيسية هي أنه يمكن الكشف عن مستويات منخفضة إلى أقصى حد من العدوى في الحيوان (على سبيل المثال، أمكن باستخدام مسابير الحمض الريبي النووي التي تم إعدادها من الطفيليات *Haemonchus placei* و *Ostertagia ostertagi* و *Cooperia oncophora* و *Oesophagostomum radiatum* الكشف عن عدد قليل من البيض لا يزيد على ٢٥ بيضة في عينات من براز الماعز والضأن والبقر المصابة)[٣٠]. وبذلك تسنى الكشف عن مسببات الأمراض قبل بداية المرض.

١٣٩- وتؤدي التقنيات المستمدة من المجال النووي دورا في مكافحة حالات تفشي مرض فيروس الإيبولا الحالية في غرب أفريقيا. وقد استهلت الوكالة مشروعا من ثلاثة عناصر يهدف إلى دعم بناء القدرات والوقاية والكشف المبكر، وتحسين أدوات التشخيص الحالية في هذا الصدد. ويتألف العنصر الأول من تقديم الدعم التقني والدعم بالمعدات وبالكواشف/المستهلكات لفرق التشخيص التي أنشئت بالفعل في الميدان. وسيستهدف العنصر الثاني طابع المصدر الحيواني لمرض فيروس الإيبولا، فيرصد الصلة بين الحيوانات (البرية) والإنسان من أجل منع انتقال الفيروس من حاملات الفيروس الطبيعية الحيوانية إلى السكان البشر أو التمكين من الكشف المبكر عن انتقال الفيروس. أما العنصر الثالث فسيستهدف شبكات مختبرات التشخيص الرسمية التي تعمل تحت إمرة السلطات البيطرية و/أو سلطات الصحة العامة. وسيتطلب ذلك تكييف استخدام أدوات التشخيص الحالية أو تحسينها لضمان الكشف المؤكد الجودة والمبكر والسريع والحساس والمتخصص عن مرض فيروس الإيبولا

---

٣٠ Höglund J, Engström A, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Tydén E (2013). Real-time PCR detection for quantification of infection levels with Ostertagia ostertagi and Cooperia oncophora in cattle faeces. Veterinary Parasitology, 197: 251– 257.

وتتبُّع هذا المرض. وستساعد هذه الحزمة الشاملة البلدان المعرضة للخطر على معالجة حالات تفشي مرض فيروس الإيبولا الجارية، وكذلك على التصدي السريع في حال وجود أي احتمالات لتفشي هذا المرض في المستقبل.

دال-٣- استخدام التقنيات النووية لاقتفاء ورصد الأمراض الحيوانية وذات المصدر الحيواني العابرة للحدود

١٤٠- في هذا العالم الذي تشيع فيه حركة الحيوانات أو منتجاتها، ويمكن فيه أن تؤثر التغيرات التي تحدث في البيئة من جرّاء تغير المناخ على انتشار الأمراض المعدية ونواقلها، توجد حاجة ماسة إلى التكنولوجيات التي تتيح تحديد المنشأ الجغرافي لهذه الأمراض، وعند الاقتضاء توفير معلومات عن العادات التغذوية لنواقلها وما يرتبط بهذه العادات من تحركات النواقل. ويمكن استخدام تقنية تحليل النظائر المستقرَّة لتوفير الوسائل اللازمة لفهم وبائيات الأمراض. والنظائر المستقرة هي الأشكال الموجودة في الطبيعة للعناصر التي لا تخضع للاضمحلال الإشعاعي. ويوجد منها أكثر من ٢٥٠ نظيرًا؛ غير أنه لا يشارك سوى عدد قليل منها في العمليات البيولوجية والإيكولوجية الهامة. وتقاس النظائر عن طريق قياس الطيف الكتلي بصفتها اختلافات نظيرية مقارنة بالمعايير الدولية، ويفاد عنها كنسب بوحدات دلتا (δ) كأجزاء في الألف. وتستند قيمة تحليل النظائر المستقرَّة إلى وجود ارتباط قوي بين مستويات نظائر معيَّنة في البيئة وتركّزات نفس النظائر في الأنسجة الحيوانية.

١٤١- وتُستخدم نسبتا الهيدروجين (δ^2H) والأكسجين ($\delta^{18}O$) في أنسجة الحيوانات لدراسة حركة الحيوانات، لأن هاتين النسبين تعكسان بدقة تحركات الحيوانات بين الموائل الغذائية المختلفة، مثل البحيرات والأنهار والمحيطات والمياه الجوفية. وينطوي استخدام النظائر المستقرَّة لتحديد خصائص أي مجموعة سكانية حيوانية على فحص البصمات النظيرية لعدد قليل من أفراد المجموعة الذين يمثلون المجموعة بأسرها. وتجري دراسات منذ عدة سنوات باستخدام النظائر المستقرة لتحديد خصائص المجتمعات السكانية الحيوانية (ولا سيما الطيور) والتفريق بينها، باستخدام قيم $\delta^{13}C$ و$\delta^{15}N$ في الأنسجة النشطة أيضياً (الدم والعضلات)، ولكن يبدو أن أكثر المقتفيات فعالية في الوقت الحاضر هي نظائر الهيدروجين التي توجد في الأنسجة الخاملة أيضياً التي تنمو موسميا، مثل الريش والمناقير والمخالب. ويحتفظ الريش بهذه المعلومات حتى يستبدل أو يتساقط، وذلك عادة مرة واحدة في السنة. وعلى العكس من ذلك، تنمو المخالب باستمرار ويمكن نظريا أن توفر صورة متكاملة زمنيا، رهنا بمعدلات نمو المخالب. وعند معرفة الصورة النظيرية لمجتمع معيَّن من الطيور، يمكن أن يوفر أي أفراد منه معلومات عن الهجرة العالمية لهذا النوع.

الشكل دال-٣- يساعد تحليل النظائر المستقرة على تحديد دور الطيور المهاجرة في نشر فيروس انفلونزا الطيور عبر القارات.

الشكل دال-٤- تطعيم دجاجة باستخدام قطرة العيون.

هاء- أوجه التقدم في قياس الجرعات الإشعاعية الطبية

١٤٢- استخدام الإشعاعات المؤينة في الأغراض الطبية راسخ تمامًا. وفي العلاج الإشعاعي، يستخدم الإشعاع لتدمير الخلايا الخبيثة، وبذلك يكون تسديد الجرعة الإشعاعية إلى الكتلة المستهدفة هو الأداة لعلاج المرضى. وفي التصوير الطبي، تستخدم الإشعاعات لإنتاج صورة تشخيصية، بحيث تكون أي جرعة يتلقاها المريض مجرد أثر جانبي لا مفر منه. وعلى الرغم من أن المبادئ والأهداف الأساسية للعلاج والتشخيص الإشعاعيين تختلف اختلافا كبيرا فإن معرفة الجرعة الإشعاعية ذات أهمية قصوى في جميع الحالات، إما للتحقق من أن العلاج ينفذ على النحو المقرر أو لتقدير مدى الخطر المرتبط بتعرض المريض للإشعاعات أثناء تنفيذ إجراء التصوير الطبي.

هاء-١- التصوير الطبي

هاء-١-١- قياس الجرعات الإشعاعية التي يتلقاها المرضى في التصوير الإشعاعي التشخيصي

١٤٣- شددت لجنة الأمم المتحدة العلمية المعنية بآثار الإشعاع الذري على أن التعرض الطبي، ولا سيما التصوير الإشعاعي التشخيصي هو، بفارق كبير، أكبر مصدر من صنع الإنسان للتعرض للإشعاع المؤين، ويواصل نموه بمعدل كبير[٣١]. والأسباب الرئيسية هي كبر عدد فحوص الأشعة السينية المنفذة، والاستخدام، غير الملائم أحيانا، لتقنيات معقدة عالية الجرعات، مثل التصوير المقطعي الحاسوبي.

١٤٤- ولذلك توجد حاجة إلى رصد ومراقبة الجرعات التي يتلقاها المرضى وتحسين تصميم وأداء نظم التصوير بالأشعة السينية إلى المستوى الأمثل. وقياس الجرعات التي يتلقاها المرضى هو المسؤولية الأساسية للفيزيائي الطبي المتخصص في الأشعة التشخيصية، وقد أُدرج في التشريعات واللوائح الوطنية في العديد من البلدان. وقياسات الجرعات في الأشعة التشخيصية ضروري لتحديد المستويات الإرشادية واستخدامها، ولتقييم أداء المعدات، ولتقييم المخاطر المقارن.

---

[٣١] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report: Sources and effects of ionizing radiation, UN, New York, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html.

١٤٥- ويُستخدم التصوير التشخيصي بالأشعة السينية في طائفة متنوِّعة من أنواع الفحوص، بدءًا من التصوير الإشعاعي الإسقاطي البسيط وانتهاءً بالتصوير المقطعي العرضي الديناميكي المتقدِّم. وقد أفضى ذلك إلى استحداث طائفة واسعة من كميات وأجهزة وتقنيات قياس الجرعات، تشكل جميعها تحدِّيات أمام العاملين في الوسط الإكلينيكي.

١٤٦- وبصفة عامة، يمكن تقسيم الكميات المستخدمة لقياس الجرعات في التصوير الإشعاعي التشخيصي إلى فئتين رئيسيتين:

'١' الكميات الخاصة بتطبيقات معيَّنة، وهي كميات للقياس العملي للجرعات يمكن قياسها مباشرة ويمكن تصميمها خصيصا لتلائم حالات أو أساليب محددة. وتشمل هذه الكميات كيرما الهواء الساقطة، التي هي حاصل ضرب كيرما الهواء في مساحة المقطع العرضي للحزمة الإشعاعية (وتستخدم أساسًا للتصوير الإسقاطي)، ومؤشرات كيرما الهواء الخاصة بالتصوير المقطعي الحاسوبي، التي تستخدم للتصوير المقطعي العرضي (الشكل هاء-١).

'٢' الكميات المتعلقة بالمخاطر، والتي يمكن استخدامها لتقدير الضرر الإشعاعي أو الخطر الإشعاعي، وبالتالي فهي مقاييس للجرعة الممتصة. ولا يمكن قياس هذه الكميات مباشرة، ولا تستنتج إلا بالحساب من الكميات الخاصة بالتطبيقات أو بالحساب عن طريق النماذج المناسبة.

الشكل هاء-١ - قياس الجرعة في التصوير المقطعي الحاسوبي، في نموذج نمطي لجسم الإنسان مصنوع من البولي ميثيل ميثاكريلات، وفي الهواء.

١٤٧- وتبعًا لطريقة التشخيص ونوع قياس الجرعات المطلوب، يمكن استخدام عدة أنواع من أجهزة قياس الجرعات، بشرط أن تكون ذات حساسية مناسبة واستجابة طاقوية مناسبة، ولكن في العادة تُستخدم غرف تأين يبلغ حجمها بضع سنتيمترات مكعبة، أو كواشف صلبة الحالة مصممة خصيصا لإجراء هذه القياسات. والأنواع الأخرى من مقاييس الجرعات التي يكثر استخدامها في التصوير الإشعاعي التشخيصي هي الأفلام (الخاصة بالتصوير الإشعاعي العادي أو التصوير الإشعاعي الملون)، ومقاييس الجرعات بالوميض الحراري، ومقاييس الجرعات التي تعمل بالوميض المستحث ضوئياً.

١٤٨- وقد تركز عمل الوكالة في هذا المجال على تنسيق وتوحيد المعايير الخاصة بالمرضى لتنفيذها في المستشفيات.

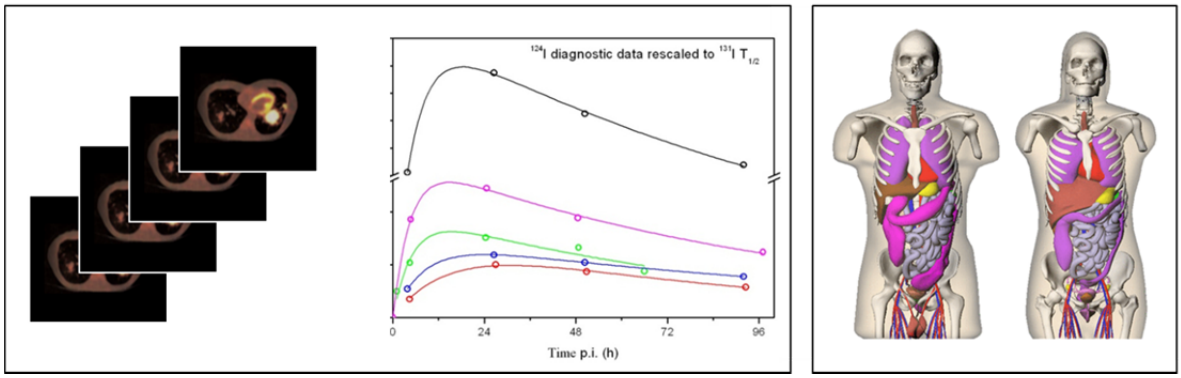
هاء-١-٢- قياس الجرعات الداخلية في الطب النووي

١٤٩- تشمل التطبيقات الإكلينيكية للطب النووي التصوير التشخيصي والمعالجات العلاجية عل حد سواء. ويهدف قياس الجرعات الداخلي في الطب النووي التشخيصي إلى قياس الجرعات التي تتلقاها الأعضاء السليمة، في حين يُستخدم في العلاج الإشعاعي الجزيئي كأداة لتحديد الجرعات التي تمتصها الأورام والأعضاء المعرضة للخطر.

١٥٠- وتسمح الإجراءات التشخيصية الخاصة بالطب النووي بالتصوير الوظيفي للأنسجة الطبيعية والمريضة، وأكثر التطبيقات شيوعا هو تحديد أماكن الأنسجة المصابة بمرض خبيث وتقييم نضح عضلة القلب. وتكون كمية النشاط الإشعاعي الذي يعطى للمرضى منخفضة عادة، وتكون الفائدة التشخيصية من الإجراء التصويري أكبر كثيرا المخاطر. ومع ذلك، ينبغي قياس كميات الجرعات التي تتلقاها الأنسجة والمخاطر العشوائية لتلك المخاطر لكل مريض على حدة، ووضعها في سياق القيم التراكمية التي تلقَّاها المريض خلال جلسات التصوير المتعددة أو تلقَّاها نتيجة لإجراءات تصوير تشخيصي أخرى (مثل التصوير المقطعي الحاسوبي، والكشف الفلوري). ولذلك يتعين إعطاء المريض كمية النشاط الإشعاعي المثلى من أجل تحقيق أقصى قدر من الجودة التشخيصية للصورة، مع التقليل إلى الحد الأدنى من المخاطر التي يتعرض لها المريض. وهذا مهم بصفة خاصة فيما يتعلق بالأطفال المرضى، بسبب علو حساسية أعضائهم للإشعاعات وكبر عدد السنوات التي يمكن أن تتجسد خلالها أي آثار عشوائية عليهم.

١٥١- وفي الطب النووي العلاجي، تستخدم عوامل مشعة لعلاج مختلف أشكال السرطان وغيره من الأمراض. وفي حين أنه في العلاج الإشعاعي الخارجي تقرَّر الجرعة الإشعاعية الموجهة إلى العضو المستهدف أو النسيج المستهدف ويستخدم نظام تخطيط علاجي للتخطيط الدقيق للجرعة المقررة لكل مريض على حدة، لا تستخدم هذه العملية ذات الطابع الشخصي في الطب النووي العلاجي. وبدلاً من ذلك، يحدَّد النشاط الإشعاعي الذي يعطى للمريض حسب نوع الورم المعالج (على سبيل المثال ١٥٠ ملي كوري من اليود-١٣١ لسرطان الغدة الدرقية). وكثيرًا ما لا يجرى أي تقييم سابق للمعالجة، ولا يحدد المقدار الأمثل للجرعات التي تتلقاها الأنسجة والأعضاء المستهدفة المعرضة للخطر، فيؤدي ذلك، في غالبية الحالات، إلى نقص علاج المرضى. ومن أسباب ذلك نقص التدريب والموارد والأساليب الموحدة القائمة على تسديد جرعة مقررة إلى الورم، ونقص البيانات عن علاقات استجابة الأورام للجرعات. وقد أخذ هذا الحال في التغير ببطء، وأصبح المجتمع العلمي على وعي متزايد بأن قياس الجرعات لكل مريض على حدة ضروري للفعالية المثلى وسلامة المرضى.

١٥٢- وفي قياس الجرعات الداخلية، يجري بصفة عامة تقييم الجرعات التي تمتصها الأنسجة (كمية الطاقة المستمدة من الإشعاعات المؤينة والممتصة لكل وحدة كتلة من الأنسجة) وفقا لطريقة الجرعة الإشعاعية الطبية الداخلية. وتتطلب هذه الطريقة حساب النشاط الإشعاعي التراكمي (العدد الإجمالي للتحللات الإشعاعية التي حدثت على مر الزمن) لكل عضو مصدري يمتص المستحضر الصيدلاني الإشعاعي. وتتطلب هذه الطريقة أيضًا تعيين 'قيم S' (الجرعة الممتصة في الأنسجة المستهدفة لكل اضمحلال إشعاعي في كل نسيج مصدري على حدة)، استنادًا إلى النماذج التشريحية المرجعية المقبولة دوليًا (الشكل هاء-٢).



الشكل هاء-٢ - إلى اليسار: سلسلة من الصور ومن منحنيات الوقت-النشاط المستنتجة لأعضاء مصدرية مختلفة. إلى اليمين: مثال على النماذج الرياضية لجسم الإنسان المستخدمة لحساب قيم S.

هاء-٢- العلاج بالأشعة

١٥٣- من المتطلبات الرئيسية في عملية العلاج الإشعاعي ضرورة وجود معايير وإجراءات مرجعية متسِّقة لقياس الجرعات. وفيما يتعلق بقياس جرعات الحزم الإشعاعية الخارجية، تم، على نطاق عالمي تقريبا، اعتماد معايير للجرعة الممتصة في الماء، وذلك من خلال مدونات لقواعد الممارسات مثل المنشور المعنون *"تحديد الجرعات الممتصة في مجال العلاج الاشعاعي بالحزم الإشعاعية الخارجية: مدونة قواعد تنفيذية دولية لقياس الجرعات على أساس معايير الجرعات الممتصة المنقولة إلى المياه"* (العدد ٣٩٨ من سلسلة التقارير التقنية الصادرة عن الوكالة، ٢٠٠٠)، وذلك في مجال قياس جرعات الأشعة السينية الميغافولطية للمعجلات الخطية الطبية وأجهزة الكوبالت-٦٠. إلا أنه كانت هناك زيادة مؤخرًا في تقنيات العلاج الإشعاعي التي تستخدم الحقول الصغيرة، مثل مختلف أشكال العلاج بالأشعة المجسمة، والعلاج الإشعاعي الجسدي المجسّم، والجراحة الإشعاعية المجسمة، والعلاج الإشعاعي المعدَّل الكثافة. وقد زادت هذه التطورات من عدم يقين قياس الجرعات الإكلينيكية، وشككت في مدى ملاءمة أن تطبَّق في هذا المجال البروتوكولات الحالية الخاصة بقياس الجرعات المرجعية لأغراض العلاج الإشعاعي التقليدي، مثل العدد ٣٩٨ من سلسلة التقارير التقنية. وفي بعض الحالات وقعت حوادث مؤسفة بسبب استخدام أساليب وإجراءات ملائمة للحقول الكبيرة ولكن غير ملائمة للحقول الصغيرة. ولذلك يجري وضع مدونة قواعد لقياس الجرعات الخاصة بالحقول الفوتونية السكونية الصغيرة، ستوحِّد قياس الجرعات للحقول الصغيرة.

١٥٤- ومنذ نشر العدد ٣٩٨ من سلسلة التقارير التقنية، تم تطوير العديد من مختلف نظم تسديد الحزم الجزيئية لأغراض العلاج الإشعاعي، مثل حزم البروتونات وحزم الأيونات الثقيلة. وتتيح هذه الأنظمة تحسين علاج الأورام، دون زيادة الأضرار التي تلحق بالأنسجة الطبيعية. ويجري وضع مدونات لقواعد الممارسات لدعم القياس الدقيق للجرعات لهذه الحزم.

١٥٥- والحجيرات المعايرة المجوَّفة في شكل بئر هي مقياس الجرعات المفضل في معايرة المصادر المشعة المستخدمة في العلاج الإشعاعي الداخلي. بيد أن هناك افتقار إلى المبادئ التوجيهية المواءمة دوليا لتوكيد الجودة/مراقبة الجودة لجميع المصادر المستخدمة في العلاج الإشعاعي الداخلي، وأيضًا إلى ما يرتبط بذلك من أجهزة مُوصى بها لقياس الجرعات. ولا يمتلك العديد من العيادات معدات تمت معايرتها أو إجراءات للاستحاطة الداخلية أو إمكانية الاطلاع بسهولة على المقارنات المستقلة. ونتيجة لذلك، تُستخدم مجموعة من المنهجيات لتحديد قوة المصدر. ويجري بذل جهود لوضع معايير للجرعات الممتصة في الماء من أجل تحقيق مواءمتها مع

مدونات قواعد ممارسات قياس الجرعات في العلاج الإشعاعي بالأشعة الخارجية، بما في ذلك العدد ٣٩٨ من سلسلة المنشورات التقنية.

واو- التطورات في مجال المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية

١٥٦- يعتمد التقدم في الطب النووي على تطوير أساليب كفؤة لإنتاج النويدات المشعة الجديدة. وقد أُحراز تقدم مثير للإعجاب في تطوير تكنولوجيات إنتاج النظائر المشعة، كما يتبين من البدء مؤخرًا في استخدام السيكلوترونات العالية الطاقة والعالية التيار. وقد أتاح ذلك توسيع نطاق إمكانية الحصول على عدد من النويدات المشعة الجديدة، بما في ذلك الغاليوم-٦٨، والنحاس-٦٤، والزركونيوم-٨٩، والزنك-٦٣وسهَّل تطوير تكنولوجيات قائمة على المعجِّلات للإنتاج التجاري للتكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر الذي لايزال النويدة المشعة التشخيصية الأكثر استخدامًا. وقد يؤدِّي توفُّر النظائر المشعة الجديدة للتطبيقات الطبية إلى حل مشاكل إكلينيكية غير متوقَّعة حتى الآن. وأخذت أوجه التقدُّم هذه تحدث تغييرًا كبيرًا على ساحة الطب النووي.

واو-١- أوجه التقدم في تكنولوجيات الإنتاج

١٥٧- تزيد التحسينات التكنولوجية الأخيرة في تكنولوجيا السيكلوترونات من غلة النويدات المشعة الطبية الرئيسية، وبذلك تتيح الاستخدام الإكلينيكي الواسع النطاق لهذه النويدات. وتتمثل مشكلة رئيسية للتطبيقات الطبية للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في ضمان إمدادات ثابتة من النظائر المشعة الرئيسية، التي هي مكونات أساسية لهذه العوامل التشخيصية والعلاجية. وكما هو مبين أدناه فإن المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الجديدة، المتحصل عليها من عدد من النويدات المشعة المختلفة، تتسم بخصائص واعدة للغاية لتشخيص السرطان وعلاجه. بيد أن توافر هذه النظائر المشعة المهمة محدود حاليًا بغلة إنتاجها المنخفضة عندما تنتج باستخدام السيكلوترونات الطبية المنخفضة الطاقة والمنخفضة التيار. ويتمثل تحد آخر في توقع اغلاق المفاعلات النووية التي توفر في جميع أنحاء العالم إمدادات التكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر، الذي لا يزال يؤدي دورًا أساسيًا في التصوير النووي التشخيصي.

١٥٨- وقد أصبحت تكنولوجيا السيكلوترونات المطبقة في إنتاج النظائر المشعة الطبية ناضجة الآن. وحاليًا تتراوح الطاقات البروتونية المتاحة من السيكلوترونات التجارية بين ٦ ميغا إلكترون فولت و٧٠ ميغا إلكترون فولت. وتحققت أوجه تقدم هامة بالزيادة المستمرة في التيار البروتوني الذي يمكن أن يصل إلى ٧٥٠-٨٠٠ ميكرو أمبير. وتتغلب تدفقات التيارات العالية على القيود التي تحد من غلة إنتاج النويدات المشعة والناجمة عن القيم المنخفضة للمقاطع العرضية لتفاعل البروتونات. وحفز توافر تدفقات التيارات العالية تحقيق أوجه تقدم هامة في التكنولوجيا الخاصة بتجميع أهداف صلبة قادرة على أن تقوم بكفاءة بتبديد الحرارة الكبيرة التي تولدها هذه التيارات العالية. وبهذه الإنجازات التكنولوجية الجديدة، سيكون بالوسع إنتاج بعض النويدات المشعة الحاسمة الأهمية، مثل الغاليوم-٦٨، والسترُنشيوم-٨٢، والتكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر، الخ، بكميات أكبر، وضمان توسيع نطاق امداداتها.

١٥٩- وأدت حالات الانقطاع العالمية في إمدادات الموليبدينوم-٩٩، الذي هو النويدة المشعة الأم التي تنتج منها أكثر النويدات المشعة استخدامًا في التشخيص، وهي النويدة المشعة التكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر، إلي تعجيل البحث عن مصادر بديلة للتكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر. وتشمل البدائل استخدام المعجلات الخطية والسيكلوترون.

وخلافًا لعملية الانشطار النموذجية لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ في المفاعل باستخدام أهداف اليورانيوم، تستخدم هذه التكنولوجيات أهداف الموليبدينوم-١٠٠. ويمكن استخدام معجِّل خطي لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ من خلال تحويل الموليبدينوم-١٠٠ المثرى بينما يمكن استخدام السيكلوترونات لإنتاج التكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر مباشرة عن طريق تشعيع الموليبدينوم-١٠٠. وتكمن الفوائد البيئة والاقتصادية الكبيرة لهذه التكنولوجيات في توليد القليل من النفايات، كما أنَّ المشاريع أثبتت وجود كفاءة عند حدود نسبة ٩٠% فيما يتعلق بإعادة تدوير الموليبدينوم-١٠٠.

واو-٢- النويدات المشعة الجديدة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الجديدة

١٦٠- يبين هذا القسم التطبيقات الواعدة للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تم اكتشافها مؤخرًا لتشخيص السرطان ولعلاجه.

واو-٢-١- الغاليوم-٦٨

١٦١- في مجال التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، لازالت أهمية النويدة المشعة الغاليوم-٦٨ تتزايد باستمرار، لا سيما بسبب سهولة الحصول عليها من خلال مولِّد الجرمانيوم-٦٨/الغاليوم-٦٨. والغاليوم-٦٨ هو باعث بوزيترونات نقية يبلغ عمرها النصفي ٦٧ دقيقة. وفي السنوات القليلة الماضية، وُصفت في مختلف الدراسات بعض المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الموسومة بالغاليوم-٦٨ والقائمة على وسم الببتيدات المناظرة للسوماتوستاتين، ووصلت إلى وضعية عامل معترف به لتشخيص أورام الأعصاب والغدد الصماء. وعلى الرغم من أن هذه الفئة من مقتفيات أورام الأعصاب والغدد الصماء ما زالت المثال الوحيد المقبول إكلينيكيًا للمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الموسومة بالغاليوم-٦٨، يوجد العديد من الدراسات حول تطوير عوامل جديدة لتشخيص أنواع أخرى من السرطانات. فمثلا تم مؤخرا وصف مقتفٍ لتصوير أورام البروستاتا. وبنية هذا المستحضر الصيدلاني الإشعاعي بسيطة للغاية. فهو يتألف من أيون الغاليوم-٦٨ مربوطًا بلجين يحمل مثبطا للمستضد البروستاتي الغشائي. وهذا اللجين الجديد الذي يستهدف المستضد البروستاتي الغشائي جرى بحثه أولا بالاقتران مع النويدة المشعة التكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر، ثم جرى تعديله مرة أخرى لتحضير مشتق الغاليوم-٦٨ المناظر. وتم الحصول على نتائج واعدة للغاية في عدد من التجارب الإكلينيكية على مرضى سرطان البروستاتا، هي الآن في سبيلها نحو الإثبات التام للكفاءة والحساسية التشخيصيتين لهذا المستحضر الصيدلاني الإشعاعي الجديد. والبيانات المتاحة تشير بقوة إلى أن هذا العامل الجديد يمكن أن يكشف عن انتكاسات سرطان البروستاتا وانبثاثاته مع تحسن كبير في التباين مقارنة بالكولين الموسوم بالفلور-١٨، الذي هو المقتفي التقليدي المستخدم عادة لتصوير أورام البروستاتا.

واو-٢-٢- النحاس-٦٤

١٦٢- من الصعب العثور على مستحضرات صيدلانية إشعاعية تشخيصية وعلاجية جديدة وفعالة، بسبب تعقُّد النظام البيولوجي البشري. إلا أنه في بعض الأحيان يتم التوصل إلى استنباطات غير متوقعة، كما في حالة اكتشاف أن مجموعة متنوعة من الأورام، بما في ذلك سرطانات البروستاتا والجلد والثدي والدماغ، تقوم بمراكمة كميات من النحاس-٦٤ في أبسط شكل كيميائي له، وهو أيونات النحاس (II). فيمكن أن تستهدف أيونات النحاس-٦٤ البسيطة الخلايا السرطانية بطريقة انتقائية دون حاجة إلى ربطها بناقل بيولوجي ما.

١٦٣- والنحاس عنصر نزر أساسي ضروري لنشاط عدد من الإنزيمات الفلزية. وقد جرى الربط بين عدد من تشوهات الأنسجة والحالات المرضية في البشر بالمستويات المنخفضة أو المرتفعة من النحاس. وتكون مستويات

النحاس في مصل الدم مرتفعة لدى مرضى السرطان، ولهذه المستويات ارتباط بشدة المرض والاستجابة للعلاج. وتوضح الأدلة التجريبية أن مستويات النحاس المتوفر بيولوجيا تعدِّل نمو الأورام، على الرغم من أن الآليات الجزيئية والخلوية التي تعدِّل بها أيونات النحاس تكوُّن الأورام في أنواع السرطان المختلفة لا تزال غير واضحة[٣٢]. ونتيجة لهذا الدور الأساسي الذي تؤديه أيونات النحاس في استنساخ الخلايا السرطانية، تتجمع أيونات النحاس داخل نواة الخلية، حيث تكون على اتصال وثيق بالمادة الوراثية، في حين أنها، في الخلايا الطبيعية، تبقى مخزنة في السيتوبلازم. وبما أن نويدة النحاس-٦٤ تضمحل من خلال الانبعاثات المتزامن لجسيمات بيتا (β+ وβ-)، بعمر نصفي قدره ١٢,٧ ساعة، فيمكن استخدامها كنويدة مشعة تشخيصية وعلاجية على حد سواء بالاستفادة من امتصاص الأورام المعزَّز لها. وهذا الاستخدام المزدوج لنفس النويدة المشعة مثال ممتاز لمفهوم "العلاج-التشخيص"[٣٣]، حيث يتم الجمع بين القدرات العلاجية والقدرات التشخيصية في عامل واحد. ويمكن أن يُنتج النحاس-٦٤ بسهولة باستخدام سيكلوترون طبي تقليدي منخفض الطاقة، بواسطة التشعيع ببروتونات هدف صلب من النيكل-٦٤. وقد تم مؤخرًا اعتماد محاليل ملح كلوريد النحاس-٦٤ المائية المعقَّمة كسلائف مستحضرات صيدلانية لإعداد المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المحتوية على النحاس-٦٤. وبعد اكتشاف الاستهداف الانتقائي غير المتوقع لخلايا السرطان من جانب أيونات النحاس-٦٤، تُستخدم هذه المحاليل حاليًا في مختلف التجارب الإكلينيكية الهادفة إلى تقييم الفعالية التشخيصية والعلاجية لكلوريد النحاس-٦٤ في علاج مختلف أنواع الأورام، ولا سيما علاج سرطان الجلد وسرطان الثدي وسرطان البروستاتا.

واو-٢-٣- الزركونيوم-٨٩

١٦٤- كان دائما من المجالات الواعدة في التصوير الجزيئي استخدام الأجسام المضادة الموسومة إشعاعيا كمسابير لتصوير الأورام. وعلى وجه الخصوص فإن التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني باستخدام الأجسام المضادة الوحيدة النسيلة الموسومة بالنظائر هو وسيلة جذابة للكشف غير الاقتحامي عن الأورام وتخطيط العلاج. ومن بين النويدات المشعة المستخدمة عادة في التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، لا يوجد سوى عدد قليل ملائم لوسم الأجسام المضادة، لأن التصوير باستخدام الأجسام المضادة يتطلب ربط النظير المشع بالجسم المضاد الوحيد النسيلة ربطا جيد الاستقرار في الجسم الحي، وينبغي أن يكون العمر النصفي للنظير المشع مناسبًا للحركية الدوائية للجسم المضاد الوحيد النسيلة. وحاليًا، يجتذب النظير المشع الزركونيوم-

---

[٣٢] Ishidaa S., Andreux P., Poitry-Yamatec C., Auwerx J., Hanahana D. (2013) Bioavailable copper modulates oxidative phosphorylation and growth of tumors, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. vol 110 no. 48. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318431110

[٣٣] يستخدِم نهج 'العلاج-التشخيص' اختبارا تشخيصيا لتحديد ما إن كان المريض قد يستفيد من عقار علاجي محدد. وينشأ الابتهاج الحالي بشأن 'العلاج-التشخيص' من نهجه الثوري الذي قد يتيح تحسين اختيار العلاج على أساس السمات الجزيئية المحددة للمرض، بحيث يتيح سبلاً جديدة للرصد الموضوعي للاستجابة للعلاج. ويستخدم المصورون أساليب تسمح بالتصوير غير الاقتحامي لوظائف الأعضاء باستخدام مختلف الأساليب لتحديد الخصائص التشريحية، والكيميائية البيولوجية، والمرضية الوظيفية. ويمارِس الطب النووي منذ عدة عقود هذا النوع من الإجراءات العلاجية-التشخيصية المجتمعة، مستفيدا من الاستخدام الأصلي لليود المشع الذي يمكن يقال إنه أول عامل استخدم في 'العلاج-التشخيص' الجزيئي القائم على التصوير. وقد كان التصوير باستخدام اليود-١٢٣ الباعث لجسيمات غاما، والمعالجة المشتركة باليود-١٣١ الباعث لجزيئات بيتا، حجر الزاوية في العلاج المساعد للسرطانات المتمايزة التي تصيب الغدة الدرقية. وهناك العديد من الأمثلة على تقنيات التصوير-العلاج الجزيئي المقترن، باستخدام مستحضرات صيدلانية إشعاعية انتقائية للعمليات الكيميائية البيولوجية، مثل تكاثر الخلايا، أو توليف الستيرويدات، أو تعبير مستقبلات عوامل النمو، أو إنتاج الكاتيكولامين، أو التعبير الجيني الذي يستحثه نقص الأكسجة، أو استماتة الخلايا. وخلاصة القول أن نهج 'العلاج-التشخيص' يمكن أن يوفر نموذجا جذابا لتطوير التطبيقات الطبية للنويدات المشعة في المستقبل، بسبب قدرته الذاتية على الاستفادة من التصوير في الجسم الحي، الذي يمكن أن يُنتج معلومات مفيدة عن الحراك الدوائي والتوزيع البيولوجي فيما يتعلق بوجود أهداف جزيئية مناسبة من أجل علاج أكثر جوهرية وفعالية.

٨٩ اهتمامًا كبيرًا لوسم الأجسام المضادة، لأن عمره النصفي الفيزيائي البالغ ٣,٣ أيام متوافق مع الوقت اللازم لتحقيق التركيز الأمثل للمتقفي في كتلة الورم فيما يخص الأجسام المضادة الوحيدة النسيلة السليمة (وهذا الوقت هو عادة بضعة أيام).

١٦٥- ويضمحل الزركونيوم-٨٩ عن طريق انبعاث البوزيترونات وأسر الإلكترونات، ويؤدي استخدام طاقته القصوى لانبعاث البوزيترونات إلى إنتاج صور مقطعية بالانبعاث البوزيتروني ذات استبانة حيزية جيدة. ويمكن إنتاج الزركونيوم-٨٩ في سيكلوترون طبي بقصف رقيقة يتريوم طبيعي زهيدة التكلفة، مركبة على قرص من الألومنيوم/النحاس، بحزمة بروتونات بطاقة تتراوح بين ١٤ و١٤,٥ ميغا إلكترون فولت.

١٦٦- وحتى الآن وُسمت بالزركونيوم-٨٩ مجموعة واسعة التنوع من الأجسام المضادة الوحيدة النسيلة، ودخل عدد منها مجال البحث الإكلينيكي بنتائج واعدة. ومن هذه الفئة الترازتوزوماب (هيرسيبتين) المستخدم لتصوير النوع ٢ من مستقبلات عامل نمو البشرة البشري، والسيتوكسيماب المستخدم لتصوير مستقبلات عامل نمو البشرة، والبيفاسيزوماب المستخدم لاستهداف مستقبلات عامل نمو الأوعية الدموية البُطانية، والجسم المضاد J591 المستخدم لرصد مستقبلات المستضد البروستاتي الغشائي[٣٤].

واو-٢-٤- باعثات جسيمات ألفا

١٦٧- في الآونة الأخيرة، كان أول مستحضر صيدلاني إشعاعي باعث لجسيمات ألفا تتم الموافقة على استخدامه إكلينيكيا في علاج مرض العظام الانبثاثي هو محلولٌ ثنائيُّ الكلوريد للراديوم-٢٢٣، صالح للاستخدام الصيدلاني (العقار Xofigo الذي تنتجه شركة باير). وهناك نويدات مشعة أخرى باعثة لجسيمات ألفا وذات جدوى طبية ومتاحة حاليا للاستخدام العلاجي المحتمل، وهي الأستاتين-٢١١، والبزموت-٢١٢، والبزموت-٢١٣، والأكتينيوم-٢٢٥، والراديوم-٢٢٣ والرصاص-٢١٢، والثوريوم-٢٢٧، والتربيوم-١٤٩. وتمتد تكنولوجيات إنتاج هذه النويدات المشعة من المفاعلات النووية إلى السيكلوترونات ونظم المولدات. ويُبذل جهد متواصل لتطوير أساليب أبسط وأكفأ لإنتاج النويدات المشعة الباعثة لجسيمات ألفا، بغية جعلها متاحة على نطاق واسع لأغراض الفحوص. ويتمثل جانب رئيسي آخر من البحوث حول العلاج بجسيمات ألفا في الحاجة إلى وضع إجراءات كيميائية تتسم بالكفاءة لربط النويدة المشعة الباعثة لجسيمات ألفا بجزيء ناقل محدد. والواقع أن كبر كتلة جسيمات ألفا، على عكس جسيمات بيتا الأخف وزنا، قد يكون له تأثير أكبر على استقرار المعالج الإشعاعي المقترن الناتج في المحلول، ولذلك يدل على أنه ينبغي تطبيق نهج كيميائية قوية لتحقيق درجة مرضية من الاستقرار.

زاي- النظائر في الدراسات المناخية والهيدرولوجية: التطورات والاتجاهات الأخيرة

١٦٨- الماء مورد بالغ الأهمية لتحقيق التنمية المستدامة، لأن توافره يؤثر في قطاعات النشاط الاجتماعي والاقتصادي كلها تقريبا. ويشكِّل ضمان الحصول على مياه الشرب المأمونة، فضلا عن إمدادات المياه العذبة الكافية لأغراض الإصحاح وإنتاج الأغذية وتوليد الطاقة، تحدِّيا مستمرا للعديد من البلدان، يؤثر في حياة

---

٣٤ Zhang Y1, Hong H, Cai W. (2011) PET tracers based on Zirconium-89. Current Radiopharmaceuticals Apr 4(2):131-9.

المليارات من الناس. بيد أن الاختلافات في توافر المياه العذبة ليست مفهومة جيدًا، وتتباين تقديرات الكميات الإجمالية من المياه المتوفرة في الأنهار والبحيرات ومستودعات المياه الجوفية، فضلاً عن تقديرات تخزينها وتدفقها. ومن المتوقع أن يؤثر تغير المناخ على دورات المياه المحلية والإقليمية، ومن ثم يتطلب إجراء تقييم أفضل للموارد المتاحة في مختلف النطاقات الزمانية والمكانية. وتلزم معلومات هيدرولوجية موثوقة لاعتماد سياسات سليمة لإدارة إمدادات المياه بنجاح في ضوء تغير المناخ وانخفاض نصيب الفرد من المياه.

١٦٩- ويتطلب تقييم الموارد المائية وإدارتها اتباع نهج متعددة التخصصات قائمة على العلم، تستند إلى العلوم الطبيعية والاجتماعية التي يجب أن تكون مدعومة دعما قويا بالبيانات العلمية عن وجود المياه السطحية والجوفية وتوزُّعها وحركتها. وتشكل نظائر الماء الطبيعية المستقرة والمشعة ومكوناتها الذائبة أدوات قوية لتعقب عمليات دورة المياه، بما في ذلك منشأ ومسارات هطول الأمطار والثلوج الذائبة التي تتدفق إلى مستودعات المياه الجوفية والبحيرات والأنهار والتفاعلات الهيدروليكية بين هذه الأجسام المائية. وتساعد 'بصمات' النظائر في الماء على تقييم الموارد المائية وإدارتها بسرعة وبفعالية من حيث التكلفة وتوضيح الكيفية التي يؤدي بها الماء دورا في تغير المناخ ويتأثر به.

زاي-١- دورة المياه وتغير المناخ

١٧٠- يمثل الفهم والتوصيف السليمان لعمليات الغلاف الجوي التي تؤدي إلى تغير المناخ، إلى جانب تحسين تقدير تدفقات المياه في إطار دورة المياه، أمرا حاسم الأهمية لتقييم توافر المياه. وقد استُخدمت منذ عقود من الزمن النظائر المستقرة الموجودة في مياه الأمطار والمياه السطحية لفهم العمليات الهيدرولوجية وقياسها، ودراسة دوران الغلاف الجوي، والتحقق من صحة النماذج المناخية، ومحاكاة الظروف المناخية الحالية والماضية. وفي البداية، أتاحت الحاجة إلى فهم النزوح الجوي للغبار النووي الناتج من التجارب النووية في الخمسينات والستينات معارف لم يسبق لها مثيل عن العمليات الهيدرولوجية لتي تجري في الغلاف الجوي. وأُطلقت في عام ١٩٦١ الشبكة العالمية لاستخدام النظائر المشعة في دراسة الأمطار، وتقوم بتشغيلها الوكالة بالتعاون مع المنظمة العالمية للأرصاد الجوية، وتوفر البيانات النظيرية الرئيسية للدراسات في مجال علوم الغلاف الجوي والهيدرولوجيا وغير ذلك من المجالات.

١٧١- ولكي نفهم تأثير تغير المناخ على هطول الأمطار في المستقبل، من الضروري أن نفهم تأثيرها خلال الماضي الجيولوجي. والعلاقات النظيرية في مياه الأمطار في العصر الحديث، المستمدة من بيانات الشبكة العالمية لاستخدام النظائر المشعة في دراسة الأمطار، هي أهم وسيلة لتحديد خصائص تغيرات دورة المياه في المناخات القديمة، باستخدام محفوظات بيئية مثل الجليد القطبي والقاري، وحلقات جذوع الأشجار، والرواسب الموجودة في البحيرات والبحار، والمياه الجوفية. وتتيح التطورات الأخيرة في مجال التحليل الحصول بطريقة أسهل على بيانات النظائر المستقرة الموجودة في مياه الأمطار ومياه الأنهار، ما أدى إلى إنشاء العديد من مواقع الرصد الجديدة، فيسَّر التوسع في رصد النظائر على نطاقات زمانية ومكانية أدق. وتساهم الأجهزة الليزرية الأبسط والأرخص وذات تكاليف الصيانة المنخفضة مساهمة كبيرة في توسيع نطاق التطبيقات القائمة على النظائر المستقرة، وقد أصبح العديد من علماء المياه معتمدين على أنفسهم في إجراء قياساتهم النظيرية.

١٧٢- ويتضمن العديد من التخصصات العلمية التي تتعامل مع القضايا البيئية استخدام النظائر المستقرة لتعقّب المصادر والعمليات والتفاعلات الموجودة في الطبيعة. ولزيادة تعزيز القدرة على كشف ورصد آثار المناخ على دورة المياه، تقوم الوكالة حاليًا بتطوير شبكة عالمية لمراقبة النظائر في مياه الأنهار. كما أن بيانات النظائر

الموجودة في مياه الأمطار التي هطلت في العصر الحديث وفي العصور الماضية توفر معاً وسيلة لتحسين النماذج المناخية العالمية المستخدمة للتنبؤ بآثار التغير المناخي الذي سيحدث في المستقبل.

زاي-٢- تقييم الموارد المائية وإدارتها

١٧٣- تلزم للإدارة المتكاملة للموارد المائية تقديرات أكثر دقة للموارد المائية المتاحة في الأنهار والبحيرات ولمدى ترابطها بالمياه الجوفية على نطاق مستجمعات المياه. وعلى الرغم من أن المياه الجوفية تساهم حاليًا بأكثر من نصف جميع المياه العذبة المستخدمة عالميًا، لا يوجد سوى قدر محدود من المعلومات الموثوقة عن المياه الجوفية المتاحة في مستودعات المياه الجوفية الضحلة والعميقة على نطاق العالم. واستخدام النظائر المشعة لتقدير مصدر المياه الجوفية وعمرها أمر حاسم الأهمية، وفريد في بعض الحالات، لتقييم موارد المياه الجوفية ومدى قابليتها للتجديد. وقد استُخدم لسنوات عديدة التريتيوم الموجود في المياه الجوفية باعتباره المقتفي الهيدرولوجي الرئيسي في حالة المياه الجوفية التي تجددت مؤخرا، ولكن المستويات الراهنة الموجودة في هذه المياه تكون في كثر من الأحيان منخفضة للغاية، بحيث تجعل التفسير الكمي صعبًا. إلا أنه عند الجمع بين قياسات التريتيوم وقياسات ناتج اضمحلاله الإشعاعي، وهو الغاز الخامل الهليوم-٣، تساعد هذه المجموعة من النظائر على القياس الكمي للتجديد الحديث للمياه. وهذه المعلومات ضرورية أيضًا لحماية موارد المياه الجوفية من التلوث.

١٧٤- ونظرًا لندرة المياه، الأمر الذي يمثل مشكلة ليس فقط في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، يتعين استكشاف مصادر جديدة للمياه العذبة في مستودعات المياه الجوفية الواقعة على أعماق أكبر. وفي كثير من الحالات تُستخرج المياه الجوفية، التي تجددت في الماضي في ظل ظروف مناخية مختلفة، دون أن يُعرف سوى القليل عن كمية وتدفق هذه المياه الجوفية العميقة، وربما الأحفورية، التي يمتد سنها من مستوى عشرات الآلاف من السنين إلى مستوى أكثر من مليون سنة. وفي مثل مستودعات المياه الجوفية هذه، تكون الوسيلة الوحيدة التي يمكن بها تقييم موارد المياه الجوفية هذه هو تحديد تاريخ النظائر بواسطة عدد من مؤشرات السن، وهي أساسا النويدات المشعة الطويلة العمر ونظائر الغازات الخاملة، مثل الكربون-١٤ والهليوم-٤ والكريبتون-٨١. وفي حين أن الكربون-١٤ يُستخدم منذ عدة عقود كمؤشر لسن المياه الجوفية فإن استخدامه محدود بعمره النصفي (حوالي ٥٧٠٠ سنة) وبتعقّد الكيمياء الجيولوجية للكربون في العديد من مستودعات المياه الجوفية. أما الغازات الخاملة، مثل الكربتون-٨١، فهي، نظرا لطبيعتها الخاملة كيميائيا، تتيح مزايا عند استخدامها كمؤشرات للسن، لأن هذه النظائر لا تتفاعل مع المصفوفة الجيولوجية لمستودع المياه الجوفية. وتسمح التطورات الأخيرة في مجال التحليل بالتحديد الدقيق لبضع ذرات من هذه النظائر النادرة في المياه الجوفية القديمة، وبذلك تتيح تقدير سن المياه الجوفية إلى ما يصل إلى مليون سنة.

زاي-٣- اتجاهات المستقبل

١٧٥- في السنوات الأخيرة، ساهمت الأدوات والنُهُجْ النظيرية الجديدة، مصحوبة بالتطورات الابتكارية في مجال التحليل، في التوسُّع الكبير في استخدام النظائر البيئية في العديد من العلوم الطبيعية، الممتدة من العلوم الهيدرولوجية وعلوم الفضاء الجوي إلى الإيكولوجيا وعلم المناخ القديم. ولهذه التطورات الأخيرة أهمية حاسمة لفهم ورصد وتقييم أثر تغير المناخ على المياه وسائر الموارد الطبيعية. وفضلاً عن ذلك فلعمليات التقييم الشاملة القائمة على أسس علمية لموارد المياه أهمية حاسمة للتنمية المستدامة. وتساهم الأدوات الليزرية الأبسط والأرخص وذات تكاليف الصيانة المنخفضة مساهمة كبيرة في توسيع نطاق التطبيقات القائمة على النظائر

المستقرة، وقد أصبح العديد من علماء المياه معتمدين على أنفسهم في إجراء قياساتهم النظيرية. وعلاوة على ذلك فمن المتوقع أن يتواصل على مدى المستقبل القريب الطلب على الأدوات النظيرية المستجدَّة الخاصة بتحديد تاريخ المياه الجوفية، والتي تتطلَّب أساليب تحليلية أكثر تطورا لقياس نظائر الغازات الخاملة والنويدات المشعة الطويلة العمر.

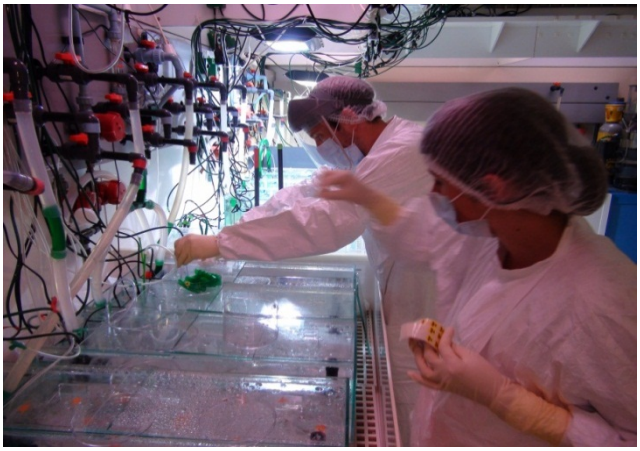
حاء- فهم التغيرات في البيئة البحرية باستخدام التقنيات النووية

حاء-١- استخدام التقنيات النووية لدراسة التغيرات العالمية النطاق

١٧٦- تستخدم التقنيات النووية لدراسة الكربون الموجود في البيئة البحرية في شكل ثاني أكسيد الكربون. وتؤثر الزيادات في ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي تأثيرا تدريجيا على البيئة البحرية، ولا سيما حموضة مياه البحر. وتوفِّر النويدات المشعة أدوات قوية لفهم تغيُّر دورة الكربون وكيفية تأثير هذا التغيُّر على الكائنات الحية. ويمكن أيضًا استخدام هذه النويدات لإعادة تكوين صورة للتغيُّرات القديمة في كيمياء مياه البحر، من أجل فهم التغيُّرات الحالية والكيفية التي قد تؤثِّر بها هذه التغيُّرات الحالية على المحيطات مستقبلاً.

١٧٧- وتمتص محيطات الأرض حوالي ٢٥٪ من جميع انبعاثات ثاني أكسد الكربون ذات المنشأ البشري، ولذلك تؤدي دورًا هامًا في الحد من ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وبعد ذلك يستوعب النشاط البيولوجي جزءا من ثاني أكسيد الكربون المذكور في جسيمات الكربون وكربونات الكالسيوم العضوية، التي تغطس في نهاية المطاف في عملية تعرف باسم "المضخة البيولوجية". ويمكن استخدام نويدة الثوريوم-٢٣٤ المشعة الطبيعية المنشأ لقياس هذا المعدل الخاص بالإزالة البيولوجية لثاني أكسيد الكربون من الطبقات العليا للمحيطات. وفهم حجم ومعدل هذه العملية ضروري لاستكمال الصورة التي لدينا عن دورة الكربون، وسيساعدنا على إيجاد سبل لخفض حموضة المحيطات.

١٧٨- وعندما يمتص ثاني أكسيد الكربون في المحيطات فأنه يُحمِّض المياه، الأمر الذي يؤثِّر، بدوره، في الكائنات البحرية. وتُستخدم النظائر المشعة لبحث التغيرات التي تحدث في العمليات التي تجري في الكائنات البحرية، مثل التكلس (الكالسيوم-٤٥)، أو التمعدن الحيوي (السترنتيوم-٨٥)، أو التمثيل الغذائي (الزنك-٦٥)، أو التراكم البيولوجي للعناصر النزرة (مثل الكوبلت-٥٧ أو الكوبلت-٦٠ أو المنغنيز-٥٤ أو السلينيوم-٧٥) استجابة لهذه الحموضة المتزايدة. وتجري أيضا دراسة إعادة تشكيل صورة الرقم الهيدروجيني لمياه البحر القديمة، باستخدام التركيب النظيري للبورون-١٠ والبورون-١١ في الشعاب المرجانية الضخمة المعمِّرة، الذي يمكن أن يستخدم بدوره في النماذج المناخية التطلعية من أجل تقدير الآثار المستقبلية على الشعاب المرجانية.



الشكل هاء-١ - العمل التجريبي باستخدام المقتفيات الإشعاعية (الكالسيوم-٤٥) لفهم تأثير تحمض المحيطات على الكائنات البحرية.

١٧٩- وثاني أكسيد الكربون والميثان (CH_4) هما غازا دفيئة قويان يتم تدويرهما عبر الغلاف الجوي عن طريق مجموعة متنوعة من المصادر والبالوعات. ويمكن تعقب هذه المصادر والبالوعات باستخدام واسمات النظائر المستقرة، أو "البصمات"، التي تحتوي عليها بصمات النظائر المستقرة للكربون ($\delta^{13}C$) والأكسجين ($\delta^{18}O$) لجزيئات ثاني أكسيد الكربون والميثان. وقد شهدت السنوات الأخيرة تطوير أجهزة بصرية لتحليل النظائر قادرة على إجراء القياسات البالغة الدقة والضبط اللازمة لدراسة تغيرات الغلاف الجوي الصغيرة ولكنها ديناميكية في ثاني أكسيد الكربون والميثان. ولا يمكن تحقيق ذلك إلا باستخدام مخاليط ثاني أكسيد الكربون أو الميثان الغازية المرجعية 'الملائمة للغرض' في الهواء، المعايرة باستخدام المواد المرجعية الدولية للنظائر المستقرة التي توفرها الوكالة.

حاء-٢- استخدام التقنيات النووية لدراسة التغيرات البيئية المحلية

١٨٠- هناك مجموعة واسعة من التقنيات النووية وتقنيات النظائر المستقرة متاحة لدراسة التغيرات البيئية وعمليات التلوث. وهذه التقنيات هي أدوات رئيسية لإعادة تشكيل صورة أحداث التلوث الماضية، فضلاً عن تتبع اتجاهات التلوث ومدى فعالية تدابير مكافحته. كما أنها تُستخدم لدراسة مصادر التلوُّث البري الناتج عن المغذيات التي تسبب إتخام السواحل بالمغذيات، من أجل التمييز بين التركيزات البشرية المنشأ والتركيزات الطبيعية للملوِّثات، وتحديد مصادر التلوُّث لأغراض دراسات الأدلة الشرعية بشأن التلوُّث، والتعرُّف على السموم البيولوجية المتصلة بالتكاثر الطحلبي الضار الموجودة في الأغذية البحرية، من أجل حماية صحة البشر.

١٨١- فكثيرًا ما تترسب الملوثات الثابتة (مثل المعادن الثقيلة والملوثات العضوية) في الرواسب البحرية في مصبات الأنهار والمناطق الساحلية والبحيرات الشاطئية، التي كثيرًا ما تكون قريبة من المناطق الحضرية ومصائد الأسماك وأماكن الترفيه. ويمكن استخدام الرصاص-٢١٠ لقياس معدل الترسيب، وبالتالي معدَّلات تراكم الملوثات. وبما أن عمر النصف للرصاص-٢١٠ يبلغ ٢٢,٣ سنة، فيمكن تشكيل صورة للتاريخ الجيولوجي تمتد إلى حوالي ١٠٠ إلى ١٥٠ سنة إلى الوراء وربطها بأحداث تلوث مثل الحوادث النووية أو الاختبارات النووية، أو بأحداث متصلة بالبيئة مثل الاتخام بالمغذيات أو التكاثر الطحلبي الضار.

١٨٢- والاتخام بالمغذيات ذو الصلة بالبشر في المناطق الساحلية، الذي ينجم أساسًا عن الجريان السطحي من الدوافق الحضرية والأراضي الزراعية، هو مشكلة واسعة الانتشار في عدد كبير من مصبات الأنهار والمناطق

الساحلية. ومن أعراض التدهور ارتفاع تركيزات العوالق النباتية، وانخفاض شفافية المياه، ونضوب الأكسجين المذاب، وفي بعض الحالات حدوث التكاثر الطحلبي الضار. وتُستخدم نسب النظير المستقر للنيتروجين ($\delta^{15}N$) كمؤشرات للاتخام بالمغذيات البشري المنشأ في النظم الإيكولوجية المائية، لأن ارتفاع قيم $\delta^{15}N$ في المواد العضوية الرسوبية وفي الكائنات الحية يدل على صرف النتروجين البشري المنشأ إلى المياه الساحلية. وعلاوة على ذلك فبما أن الاتخام بالمغذيات يؤدي إلى رفع قيم $\delta^{13}C$ بسبب ازدياد إنتاج العوالق النباتية البحرية فإن التحليل النظيري الكربوني الخاص بالمرُكَّبات للواسمات البيولوجية الدهنية يوضح مدى قوة إحداث الاتخام بالمغذيات في المياه الساحلية.

الشكل هاء-٢ - مطياف كتلي لتحديد نسبة النظائر، يستخدم لقياس نسب النظائر المستقرة للكربون والنتروجين من أجل دراسة عمليات الاتخام بالمغذيات في السواحل

١٨٣- وتحديد مصادر الملوثات في البيئة البحرية الساحلية مهم ليس فقط لفهم عمليات التغير البيئي بل أيضًا للتخطيط لتدابير مكافحة التلوث. ومن ثم فإن التقنيات النووية الخاصة بتعقب مصادر التلوث هي أدوات قيِّمة لحماية البيئة وتعزيز التوفير المستدام لخدمات النظم الإيكولوجية.

١٨٤- ويمثل تلوُّث المياه الساحلية بالنفط مشكلة بيئية عالمية ناجمة عن عمليات التصريف التشغيلي أو العرضي أو غير المشروع للمواد الهيدروكربونية البترولية. وهناك حاجة متزايدة لأساليب حسَّاسة وموثوقة لرصد التلوَّث النفطي وأثره، ولوضع أساليب تحدِّد منشأ التلوث النفطي للأغراض الرقابية. وتستند أكثر منهجية تطورا لتحديد خصائص الانسكابات النفطية إلى نهج تحديد البصمات الكيميائية، الذي يمكن من خلاله تحديد ملامح سلسلة من المكونات النفطية عن طريق الفصل الكروماتوغرافي الغازي-قياس الطيف الكتلي. غير أنه يمكن أيضا استخدام تحليل نسب النظائر المستقرة للكربون ($\delta^{13}C$) في الهيدروكربونات النفطية كأداة إضافية في مجال الأدلة الشرعية من أجل الضبط الدقيق لتحديد بصمات البقع النفطية بهدف اقتفاء أثر مصادر وجود النفط في البيئة البحرية.

١٨٥- والرصاص عنصر سام غير أساسي يمكن أيضًا اقتفاء أثره باستخدام النسب النظيرية من أجل الكشف عن مختلف مصادر تلوث البيئة البحرية. وفي العادة تكون لترسبات خام الرصاص تركيبات نظيرية متميزة، تعكس السن والمصدر وعمليات التشكيل. ويمكن استخدام الاختلافات في نسب نظائر الرصاص المستقرة والإشعاعية، ولا سيما النسب الخاصة بالنظير الطبيعي الوحيد للرصاص (وهو الرصاص-٢٠٤)، لاقتفاء أثر مصادر ومسارات التلوث بالرصاص.

الشكل هاء-٣- مطياف كتلي بلازمي مقرون بالحث وعالي الدقة يُستخدم لتحليل النظائر المستقرة للرصاص في العينات البيئية