استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢١

تقرير من المدير العام

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

GC(65)/INF/2

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢١

تقرير من المدير العام

الوثيقة GC(65)/INF/2

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
أيلول/سبتمبر ٢٠٢١
IAEA/NTR/2021

المحتويات

تصدير ٥
موجز جامع ٧
ألف- القوى النووية ١١
ألف-١- التوقعات بشأن القوى النووية ١١
ألف-٢- محطات القوى العاملة ١٢
ألف-٣- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسِّعة ١٧
ألف-٤- تطوير تكنولوجيا القوى النووية ٢١
ألف-٤-١- المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء ٢١
ألف-٤-٢- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية والمفاعلات البالغة الصغر ٢١
ألف-٤-٣- النظم النيوترونية السريعة ٢٦
ألف-٤-٤- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية ٢٩
ألف-٤-٥- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل ٣٢
باء- دورة الوقود النووي ٣٥
باء-١- المرحلة الاستهلالية ٣٥
باء-٢- المرحلة الختامية ٣٩
جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة ٤٠
جيم-١- الإخراج من الخدمة ٤٠
جيم-٢- الاستصلاح البيئي ٤٤
جيم-٣- التصرُّف في النفايات المشعة ٤٦
دال- مفاعلات البحوث ومعجِّلات الجسيّمات ٥٠
دال-١- مفاعلات البحوث ٥٠
دال-٢- معجِّلات الجسيّمات والأجهزة ذات الصلة ٥٤
هاء- الأغذية والزراعة ٥٨
هاء-١- استخدام نُهج الوسم الإشعاعي والتقنيات النووية المتقدمة لقياس المخلفات الإشعاعية في الأغذية — تلبية الاحتياجات في مجالي الصحة العامة والتجارة الدولية ٥٨
واو- الصحة البشرية ٦١
واو-١- أوجه التقدُّم في قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى والنانوية ٦١
زاي- النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية ٦٣
زاي-١- دور المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في الكشف عن الأمراض المعدية وتشخيصها والتصدي لها ٦٣
حاء- البيئة ٦٧
حاء-١- استخدام التقنيات النووية والمستمدة من المجال النووي للنهوض بالمعارف المتعلقة بالكربون الأزرق عالميًّا والتصدي لآثار تغيُّر المناخ ٦٧
المرفق ٧١

تصدير

- تلبيةً لطلبات الدول الأعضاء، تُعدُّ الأمانة كلَّ عام استعراضاً شاملاً للتكنولوجيا النووية وتُصدره في تقرير بعنوان استعراض التكنولوجيا النووية.

- ويتناول *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢١* المجالات المختارة التالية: القوى النووية، ودورة الوقود النووي، والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة، ومفاعلات البحوث ومعجّلات الجسيّمات، واستخدام التقنيات النووية في مجال الأغذية والزراعة، والصحة البشرية، والنظائر المشعة والتكنولوجيات الإشعاعية، والبيئة.

- وقد قُدِّمت مسودة هذا الاستعراض إلى مجلس المحافظين خلال دورته المعقودة في آذار/مارس ٢٠٢١ ضمن الوثيقة GOV/2021/2. وأُعدَّت الصيغة النهائية الواردة في هذه الوثيقة في ضوء المناقشات التي جرت في مجلس المحافظين، وكذلك في ضوء التعليقات التي وردت من الدول الأعضاء.

موجز جامع

١- ظلَّت توقعات الوكالة لعام ٢٠٢٠ متسقة إلى حد كبير مع توقعات العام السابق. وتشير التوقعات في الحالة المرتفعة إلى أنَّ القدرة العالمية على توليد الكهرباء نوويًّا سوف ترتفع بنسبة ٨٢٪ لتبلغ ٧١٥ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠، بما يمثِّل ١١٪ من مجمل توليد الكهرباء في العالم، مقارنة بنحو ١٠٪ في عام ٢٠١٩. في حين يُتوقع في الحالة المنخفضة تراجُع هذه القدرة بنسبة ٧٪ وصولا إلى ٣٦٣ غيغاواط (كهربائي)، لتشكِّل نسبة قدرها ٦٪ من مجمل توليد الكهرباء في العالم.

٢- وفي نهاية عام ٢٠٢٠، كانت القدرة العالمية على توليد القوى النووية تبلغ ما مجموعه ٣٩٢,٦ غيغاواط (كهربائي) تولِّدها ٤٤٢ من مفاعلات القوى النووية العاملة في ٣٢ بلداً. وقد تكيَّف القطاع النووي مع المبادئ التوجيهية الوطنية بشأن جائحة مرض فيروس كورونا (كوفيد-١٩) عن طريق اتِّخاذ إجراءات فعالة في هذا الصدد. وفي بداية تفشي الجائحة في أوائل عام ٢٠٢٠، أنشأت الوكالة شبكة الخبرات المكتسبة في تشغيل محطات القوى النووية في ظل جائحة كوفيد-١٩، بغية المساعدة على تقاسم المعلومات بشأن التدابير المتخذة للتخفيف من حدَّة الجائحة وتأثيرها في تشغيل محطات القوى النووية. ولم يُفِد أيٌّ من البلدان التي لديها محطات قوى نووية عاملة، والبالغ عددها ٣٢ بلداً، بتعرُّض محطات القوى النووية لأي تأثير من حيث أمان التشغيل وموثوقيته بسبب الجائحة.

٣- تُعدُّ القوى النووية مصدراً نظيفاً وموثوقاً ومستداماً وحديثاً للطاقة، وهي بذلك تسهم إسهاماً كبيراً في الحد من انبعاثات غازات الدفيئة حول العالم، وفي الوقت نفسه تلبّي الطلب العالمي المتزايد على الطاقة وتدعم التنمية المستدامة والتعافي في مرحلة ما بعد جائحة كوفيد-١٩. وقد وفَّرت القوى النووية ٢٥٥٣,٢ تيراواط‒ساعة من الكهرباء في عام ٢٠٢٠، بما يمثل نحو ثلث الإنتاج العالمي من الكهرباء المنخفضة الكربون. ومن المسلَّم به على نطاق واسع أنَّه حتى يمكن التصدي للتحديات المرتبطة بالانتقال إلى الطاقة النظيفة، فسوف يكون على القوى النووية أن تؤدي دوراً كبيراً.

٤- ووُصِّل بالشبكة الكهربائية نحو ٥,٥ غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة المستمدة من خمسة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط في الاتحاد الروسي والإمارات العربية المتحدة وبيلاروس والصين. ويشكِّل تدشين المفاعلين Belarusian-1 في بيلاروس وبراكة-١ في الإمارات العربية المتحدة باكورة توليد الكهرباء نوويًّا في هذين البلدين.

٥- وتحقَّق تقدُّم ملموس في الأنشطة العالمية المتعلقة بتطوير تكنولوجيات المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية (المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، أو المفاعلات النمطية الصغيرة) لغرض نشرها في الأمد القريب. وبدأ التشغيل التجاري لأول مفاعل نمطي صغير متقدِّم ومحطة القوى النووية العائمة الوحيدة في العالم، وهي محطة أكاديميك لومونوسوف في الاتحاد الروسي. وكان هناك ما يزيد على ٧٠ تصميما من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة التي يجري تطويرها في إطار الخطوط التكنولوجية الرئيسية لتُستخدم في تطبيقات مختلفة حول العالم.

٦- وكان العمل جارياً على إعداد برامج للتشغيل الطويل الأجل وإدارة التقادم لعدد متزايد من مفاعلات القوى النووية على الصعيد العالمي، ولا سيما في أمريكا الشمالية وأوروبا. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تمَّ تجديد رخصتي تشغيل الوحدتين ٢ و٣ في محطة بيتش بوتوم للقوى النووية، ومن ثم تمديد فترة التشغيل المأمون والآمن من ٦٠ إلى ٨٠ عاماً.

٧- وكان هناك ما مجموعه ٢٧ دولة عضواً في مراحل مختلفة من إعداد بنيتها الأساسية الوطنية لاستهلال برنامج جديد للقوى النووية، ويُتوقع أنَّ ما بين ١٠ و١٢ من البلدان المستجدَّة سوف تأخذ بالقوى النووية بحلول عام ٢٠٣٥، لتُضيف إلى قدرة التوليد العالمية ما يُقدَّر بنحو ٢٦ غيغاواط (كهربائي).

٨- واحتفلت الأوساط المعنية بالاندماج ببدء تجميع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي ودمج مكوناته، بعد أكثر من عشر سنوات استغرقتها مراحل التشييد المعقدة. وسوف يوفِّر المفاعل، فور بدء تشغيله، جانباً كبيراً من الأساس العلمي والتكنولوجي اللازم لتطوير مفاعلات الاندماج وتصميمها لغرض إنتاج الطاقة في المستقبل.

٩- ونتيجةً لتفشّي جائحة كوفيد-١٩ على الصعيد العالمي، علَّق العديد من منتجي اليورانيوم الرئيسيين عمليات الإنتاج أو خفَّضوا إنتاجهم تخفيضاً كبيراً. وإجمالاً، انخفضت إمدادات اليورانيوم الأولية في عام ٢٠٢٠، مما شكَّل ضغطاً على إمدادات اليورانيوم الثانوية من أجل تلبية الطلب على اليورانيوم لاستخدامه وقوداً نوويًّا.

١٠- وأثناء جائحة كوفيد-١٩، أُعلن أنَّ مفاعلات البحوث التي تُنتج النظائر المشعة الطبية لأغراض الإمدادات العالمية تُعتبر من الجهات التي تقدِّم الخدمات الضرورية للتقليل إلى أدنى حدٍّ من تأثير القيود المرتبطة بالجائحة.

١١- ورغم الاهتمام الكبير والمتزايد بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، يُتوقَّع أنَّ المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء ذات الحجم الكبير سوف تستأثر بالجانب الأكبر من الإضافات الجديدة إلى قدرة التوليد خلال العقود الثلاثة المقبلة. ولكي تتحقق توقعات الوكالة في الحالة المرتفعة، سيلزم توصيل مصادر قدرة جديدة بالشبكة الكهربائية بمعدل ١٦ غيغاواط (كهربائي) سنويًّا أو أكثر حتى عام ٢٠٥٠. بيد أنَّ هناك عدداً من التحديات التي يتعيَّن التصدي لها من أجل تيسير مشاريع البناء الجديدة، بما في ذلك خفض التكاليف وزيادة التوحيد من أجل تحسين القدرة التنافسية، وتوفير فرص متكافئة للحصول على التمويل بالمقارنة مع سائر مصادر الطاقة المنخفضة الكربون.

١٢- وما فتئ استخدام الطاقة النووية في أغراض تتجاوز إنتاج الكهرباء يكتسب زخماً في قطاع الطاقة النووية بسبب تزايد حصة مصادر الطاقة المتجدِّدة المتقطِّعة من جملة المصادر المتصلة بالشبكة الكهربائية. فقد استُخدم ما مجموعه ٦٤ مفاعلاً من مفاعلات القوى النووية العاملة لتوليد كمية من الحرارة تعادل ٣٣٩٦,٤ غيغاواط-ساعة من الكهرباء، لاستخدامها في التطبيقات غير الكهربائية: حيث استُغلَّت الحرارة الناتجة من ٥٦ مفاعلاً في تدفئة الأحياء السكنية وتطبيقات المعالجة الصناعية، ومن ٨ مفاعلات في تحلية مياه البحر. وبالإضافة إلى الدور الذي يؤديه التوليد المشترك للطاقة النووية في إزالة الكربون من قطاعات الاستخدام النهائي للطاقة، مثل قطاعَي النقل والصناعة والقطاع السكني، يتزايد النظر إليه أيضاً على أنَّه يكفل فرصة لإقامة حجة اقتصادية ضد الإنهاء المبكر لخدمة بعض محطات القوى النووية التي لا تحقِّق أرباحاً. ومن المتوقع أنَّ إنتاج الهيدروجين نوويًّا باستخدام المفاعلات المنخفضة الحرارة المبرَّدة بالماء سوف يظلُّ محلَّ اهتمام حتى يصل إلى المرحلة التجارية.

١٣- ولوحظ إحراز أوجه تقدُّم كبيرة فيما يتعلق بمرافق التخلص الجيولوجي العميق اللازمة للتصرف في النفايات القوية الإشعاع والوقود المستهلك المعلن عنه باعتباره من النفايات. وأعلنت الهيئة الفنلندية للأمان الإشعاعي والنووي أنَّ فنلندا تعتزم بدء التخلص النهائي من الوقود النووي المستعمل في أواسط العشرينات من

هذا القرن. وفي السويد، صوَّت مجلس بلدية أوستهامار بتأييد خطة إنشاء مستودع للتخلص من الوقود النووي المستهلك في فورسمارك.

١٤- وفي حين كان التفكيك المؤجل هو الخيار الغالب بين مالكي المرافق خلال العقود السابقة فيما يتعلق بالاستراتيجية المعتمدة للإخراج من الخدمة، فقد بدأت الكفة تميل لصالح اتباع نهج قائم على التفكيك الفوري. وتزايد تقديم المواعيد المحدَّدة لبدء التفكيك النهائي للمحطات التي أُنهيت خدمتها، بدافع الرغبة في الحدِّ من أوجه عدم اليقين بشأن تكاليف الإخراج من الخدمة.

١٥- واستمر تزايد الاهتمام العالمي بمفاعلات البحوث. واستفادت بلدان عديدة من فرص الوصول إلى مفاعلات البحوث القائمة، بما في ذلك من خلال الدورات الدراسية الإقليمية التي تعقدها الوكالة لبناء القدرات في مجال مفاعلات البحوث، ومن خلال مخطَّط المراكز المعيَّنة من الوكالة باعتبارها مراكز امتياز دولية قائمة على مفاعلات البحوث (مراكز الامتياز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث). وفي عام ٢٠٢٠، التحق معهد البحوث النووية في بيتستي برومانيا للمرة الأولى بمراكز الامتياز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث، في حين جُدِّد تعيين المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة لفترة مدتها خمس سنوات.

١٦- وتُستخدم في عملية إنتاج الأغذية مواد كيميائية مثل العقاقير البيطرية ومبيدات الآفات من أجل الوقاية والعلاج من الآفات والأمراض التي تصيب الحيوانات والنباتات. ويمكن للبقايا التي تخلِّفها هذه المواد الكيميائية في الأغذية أن تشكِّل شواغل في مجالي الصحة العامة والتجارة الدولية، ومن ثم تخضع للتنظيم الرقابي عن طريق النصِّ على الحدود القصوى المسموح بها لتركيزات المخلفات داخل الأغذية وعليها. وتؤدي المركَّبات الموسومة إشعاعيًّا دوراً بالغ الأهمية في هذا الصدد، حيث تتيح تتبُّع ودراسة جميع المخلفات الكيميائية التي تعلق بأنسجة متعددة. ولهذه الدراسات أهمية حاسمة في وضع المعايير المقبولة. ومع تزايُد إنتاج العقاقير والمواد الكيميائية الجديدة، يتزايد أيضا الطلب على تنظيم هذه العقاقير والمواد باستخدام تقنيات تحليلية مبتكرة وفعالة من حيث التكلفة.

١٧- وقياس الجرعات الإشعاعية الصغرى هو المجال الفرعي من الفيزياء الإشعاعية الذي يتناول الدراسة المنهجية للتوزُّع المكاني للطاقة الممتصة في الهياكل المجهرية داخل المواد المشعَّعة. ورغم أنَّ نشأة قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى ترجع إلى ما يزيد على ٦٠ عاماً مضت، فلا يزال هذا التخصُّص يجذب الاهتمام في مجالات الطب الإشعاعي والوقاية من الإشعاعات والبيولوجيا الإشعاعية، وفي مجالات أخرى مثل بحوث الفضاء. وفي مجال الطب الإشعاعي، يُعدُّ قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى مفيداً بوجه خاص في العلاج باستخدام الحزم الأيونية، وهو تقنية متقدِّمة تنطوي على استخدام حُزم من البروتونات وأيونات الكربون لعلاج عدد من الأورام، مع التقليل إلى أدنى حدٍّ من الأضرار التي تلحق بالأنسجة السليمة.

١٨- وتشكِّل الأمراض المعدية خطراً يتهدد التجمُّعات البشرية. والآن ينصبُّ تركيز الجهود المبذولة في إطار التخصُّصات العلمية على تحسين فهم هذه الأمراض بالاستعانة بتكنولوجيات متقدِّمة تُستخدم فيها المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. وقد وصلت المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المستحدثة التي تُحضَّر باستخدام أجسام مضادة أحادية النسيلة وموجهة ضد كائنات دقيقة معيَّنة إلى مرحلة صار من الممكن فيها تصوير العمليات الخلوية والبيوكيميائية بطريقة غير اقتحامية، وهو ما يحسِّن من نُهُج التشخيص وكذلك من النُّهج العلاجية المحتملة فيما يتعلق بالتصدي للأمراض المعدية.

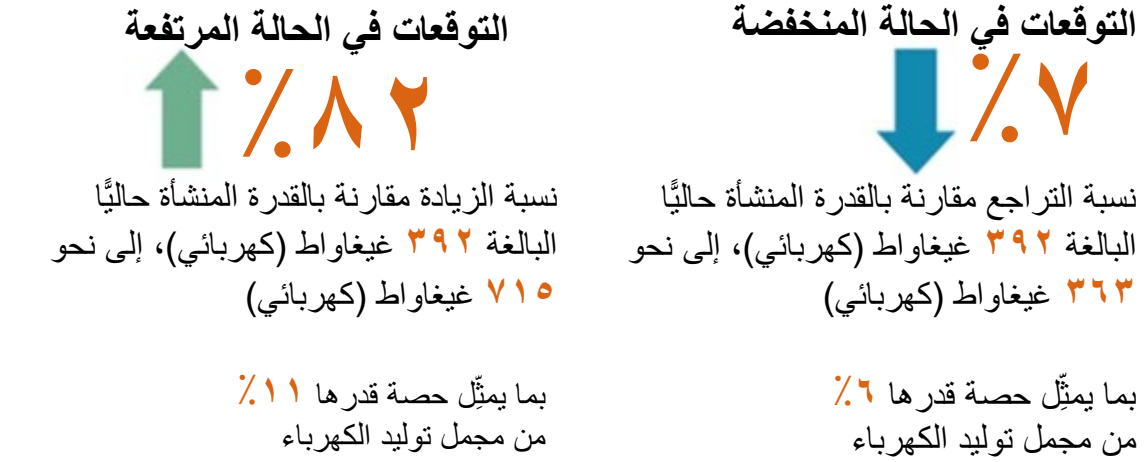
١٩- ومنذ أواخر القرن التاسع عشر، شهد الغلاف الجوي زيادة سريعة في محتواه من غازات الدفيئة، مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز، مما أسهم في الاحترار العالمي. وتنطوي النظم الإيكولوجية في المحيطات والمناطق الساحلية المغطاة بالنباتات على إمكانية كبيرة لاحتجاز الكربون العضوي، وذلك لما تتسم به من قدرة على امتصاص ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بعيدا عن الغلاف الجوي، ومن ثمَّ التقليل من معدَّل الاحترار العالمي. ويُعرف الكربون العضوي الذي تمتصه وتخزنه المحيطات باسم الكربون الأزرق. وللتقنيات النووية والتقنيات المستمدة من المجال النووي أهمية محورية في تقييم الدور الذي تؤديه الطحالب الكربونية والطحالب الكبيرة في دورة الكربون الأزرق، وتحديد منشأ الكربون، وفهم العوامل التي تؤثر في عملية احتجاز الكربون في النظم الإيكولوجية القائمة على الكربون الأزرق وفي ميزانية الكربون الخاصة بكلٍّ منها، وإجراءات التصرُّف التي تعزّز استراتيجيات الكربون الأزرق.

ألف- القوى النووية

ألف-١- التوقعات بشأن القوى النووية

الحالة

١- ظلَّت توقعات الوكالة[١] لعام ٢٠٢٠ متسقة إلى حد كبير مع توقعات العام السابق. حيث تشير التقديرات في الحالة المنخفضة إلى أنَّ القدرة العالمية على توليد الكهرباء نوويًّا سوف تتراجع بنسبة ٧٪ لتبلغ ٣٦٣ غيغاواط (كهربائي)[٢] بحلول عام ٢٠٥٠، بما يمثِّل حصة قدرها ٦٪ من مجمل توليد الكهرباء في العالم، مقارنة بنحو ١٠٪ في عام ٢٠١٩. أمَّا الحالة المرتفعة فيُتوقَّع فيها أن تزيد هذه القدرة بنسبة ٨٢٪ لتصل إلى ٧١٥ غيغاواط (كهربائي)، بما يمثِّل نسبة قدرها ١١٪ من مجمل توليد الكهرباء في العالم.



٢- وحتى يتسنى تحقيق التوقعات بحسب الحالة المرتفعة فسوف يلزم أن يتحقَّق أمران معاً، أولاً: تمديد التشغيل الطويل الأجل للأسطول القائم من مفاعلات القوى النووية، غالباً لفترة تشغيل تتجاوز ٤٠ عاماً، وثانياً: بذل جهد كبير لبناء مفاعلات جديدة ذات قدرة إضافية تصل إلى ٥٠٠ غيغاواط (كهربائي) على مدى ثلاثة عقود. وسوف يتطلب ذلك توصيل مصادر قدرة جديدة بالشبكة الكهربائية بمعدل يزيد على ١٦ غيغاواط (كهربائي) سنويا حتى عام ٢٠٥٠، وهو ما يعادل تقريباً ثلاثة أضعاف معدل التوصيل المتوسط بين عامي ٢٠١٠ و٢٠١٩. وفي حين أنَّ هذا يُعدُّ مطلباً طموحاً، فإنَّ ذلك المعدل المنشود لا يزيد على نصف معدَّل التوصيل القياسي الذي تحقَّق في أواسط الثمانينات من القرن العشرين، والذي تجاوز ٣٠ غيغاواط (كهربائي) سنويا.

---

[١] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، تقديرات الطاقة والكهرباء والقوى النووية للفترة الممتدة حتى عام ٢٠٥٠، العدد ١ من سلسلة البيانات المرجعية، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٢٠).

[٢] الغيغاواط (الكهربائي) الواحد هو مقدار من القوى الكهربائية يعادل ألف مليون واط.

الاتجاهات

٣- هناك اهتمام كبير ومتزايد بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية، ولا سيما في الأماكن النائية أو في البلدان التي لديها شبكات كهربائية صغيرة نسبيًّا. ومع ذلك، يُتوقَّع أنَّ المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء ذات الحجم الكبير سوف تستأثر بالجانب الأكبر من الإضافات الجديدة إلى قدرة التوليد خلال العقود الثلاثة المقبلة، من أجل التعجيل بزيادة القدرة على توليد الطاقة المنخفضة الكربون في إطار التصدي لتغيُّر المناخ. ويواجه القطاع النووي عدداً من التحديات في هذا الصدد، بما في ذلك خفض التكاليف وزيادة التوحيد من أجل تحسين القدرة التنافسية، وتوفير فرص متكافئة للحصول على التمويل بالمقارنة مع سائر مصادر الطاقة المنخفضة الكربون.

٤- وسوف يلزم توفير دعم قوي على صعيد السياسات بغية الاعتراف بمساهمة القوى النووية في توفير نظم قوى منخفضة الكربون[٣] تتسم بالقدرة على الصمود والموثوقية. ويمكن أيضاً جعل القوى النووية خياراً أكثر جاذبية للمستثمرين عن طريق تعزيز فرص مساهمة الطاقة النووية في إزالة الكربون من قطاعات الطاقة الأخرى، بما في ذلك من خلال إنتاج الهيدروجين النظيف.

ألف-٢- محطات القوى العاملة

الحالة

٥- في نهاية عام ٢٠٢٠، كانت القدرة العالمية الإجمالية على توليد القوى النووية تبلغ ٣٩٢,٦ غيغاواط (كهربائي)[٤] تولِّدها ٤٤٢ من مفاعلات القوى النووية العاملة في ٣٢ بلداً (الجدول ألف-١ في المرفق). وقد أثبتت البلدان قدرتها على التكيُّف مع جائحة مرض فيروس كورونا (كوفيد-١٩) عن طريق اتخاذ تدابير فعالة تنمُّ عن ثقافة تنظيمية راسخة. وفي بداية تفشي الجائحة في أوائل عام ٢٠٢٠، أنشأت الوكالة شبكة الخبرات المكتسبة في مجال تشغيل محطات القوى النووية في ظل جائحة كوفيد-١٩ (شبكة COVID-19 NPP OPEX)، بغية تقاسم المعلومات بشأن التدابير المتخذة للتخفيف من حدَّة الجائحة وتأثيرها في تشغيل محطات القوى النووية. ولم يُفِد أيٌّ من البلدان التي لديها محطات قوى نووية عاملة، والبالغ عددها ٣٢ بلداً، بتسبُّب الجائحة في وقوع أيِّ حادث تشغيلي كان له تأثير في تشغيل محطات القوى النووية على نحو مأمون وموثوق.

---

[٣] يرجع الفضل إلى القوى النووية في تلافي إنتاج نحو ٢ غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون سنويًّا.

[٤] جميع البيانات المتعلقة بمفاعلات القوى النووية مستمدة من التقارير المقدمة إلى نظام المعلومات عن مفاعلات القوى الذي تتعهده للوكالة حتى ١ حزيران/يونيه ٢٠٢١.

القوى النووية تساعد الدول الأعضاء على خفض انبعاثات غازات الدفيئة

يجري توليد القوى النووية في ٣٢ بلداً، وتسهم بنحو ٣/١ إنتاج العالم من الكهرباء المنخفضة الكربون.

تسهم القوى النووية في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو ٢ غيغا طن سنويًّا.

بما يعادل تقليل عدد السيارات على الطرقات بمعدل يفوق ٤٠٠ مليون سيارة في كلِّ عام.

أدَّى استخدام القوى النووية إلى تلافي انبعاث ما يعادل ٥٥ غيغا طن من ثاني أكسيد الكربون على مدى أكثر من خمسة عقود مضت.

٦- تُعدُّ القوى النووية مصدراً نظيفاً وموثوقاً ومستداماً وحديثاً للطاقة، وهي بذلك تسهم إسهاماً كبيراً في الحد من انبعاثات غازات الدفيئة حول العالم، وفي الوقت نفسه تلبّي الطلب العالمي المتزايد على الطاقة وتدعم التنمية المستدامة والتعافي في مرحلة ما بعد جائحة كوفيد-١٩. وفي عام ٢٠٢٠، وفَّرت القوى النووية ما مجموعه ٢٥٥٣,٢ تيراواط–ساعة من الكهرباء المنتجة بلا انبعاثات من غازات الدفيئة، بما يمثل نحو ١٠٪ من إجمالي توليد الكهرباء على الصعيد العالمي وزهاء ثلث الإنتاج العالمي من الكهرباء المنخفضة الكربون.

٧- ووُصِّل بالشبكة الكهربائية نحو ٥,٥ غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة المستمدة من خمسة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط، كما يلي: ١١١٠ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل Belarusian-1 في بيلاروس، و١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل Tianwan-5 و١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) في المفاعل Fuqing-5 في الصين، و١٠٦٦ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل Leningrad 2-2 في الاتحاد الروسي، و١٣٤٥ ميغاواط (كهربائي) من المفاعل براكة-١ في الإمارات العربية المتحدة. ويشكِّل تدشين المفاعلين Belarusian-1 في بيلاروس وبراكة-١ في الإمارات العربية المتحدة باكورة توليد الكهرباء نوويًّا في هذين البلدين.

التوصيلات بالشبكة الكهربائية في عام ٢٠٢٠

المفاعل براكة-١
١٣٤٥ ميغاواط (كهربائي)

المفاعل Belarusian-1
١١١٠ ميغاواط (كهربائي)

المفاعل Leningrad 2-2
١٠٦٦ ميغاواط (كهربائي)

المفاعل Fuqing-5
١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي)

المفاعل Tianwan-5
١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي)

المفاعل Belarusian-1

النوع
مفاعل ماء مضغوط

القدرة الصافية
١١١٠ ميغاواط (كهربائي)

أول وصول لحالة الحرجية
١١ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠٢٠

بعثتا INIR 1+2
٢٠١٢

النموذج
VVER V-491

بدء التشييد
٨ كانون الثاني/نوفمبر ٢٠١٣

أول توصيل بالشبكة
٣ كانون الثاني/نوفمبر ٢٠٢٠

بعثة INIR 3
٢٠٢٠

المفاعل براكة-١

النوع
مفاعل ماء مضغوط

القدرة الصافية
١٣٤٥ ميغاواط (كهربائي)

أول وصول لحالة الحرجية
٣١ تموز/يوليه ٢٠٢٠

بعثة INIR 2
٢٠١١

النموذج
APR-1400

بدء التشييد
١٩ تموز/يوليه ٢٠١٢

أول توصيل بالشبكة
١٩ آب/أغسطس ٢٠٢٠

بعثة INIR 3
٢٠١٨

٨- وبدأ في عام ٢٠٢٠ التشغيل التجاري لأول مفاعل نمطي صغير متقدِّم ومحطة القوى النووية العائمة الوحيدة في العالم، وهي محطة أكاديميك لومونوسوف، التي تقع قبالة ساحل المحيط المتجمد الشمالي في الاتحاد الروسي وتضمُّ وحدتين تتألف كلٌّ منهما من مفاعل نمطي صغير من طراز KLT-40S بقدرة ٣٥ ميغاواط (كهربائي).

٩- واستأثرت المفاعلات من الأنواع المهدَّأة والمبرَّدة بالماء الخفيف بنحو ٨٩,٥٪ من قدرة القوى النووية العاملة؛ في حين بلغت حصة المفاعلات من الأنواع المهدَّأة والمبرَّدة بالماء الثقيل ٦٪؛ والمفاعلات من الأنواع المبرَّدة بالماء الخفيف والمهدَّأة بالغرافيت ٢٪؛ والمفاعلات من الأنواع المبرَّدة بالغاز ٢٪. وتُعزى النسبة المتبقية، وقدرها ٠,٥٪، إلى ثلاثة مفاعلات سريعة مبرَّدة بفلز سائل.

١٠- وكان العمل جارياً على إعداد برامج للتشغيل الطويل الأجل وإدارة التقادم لعدد متزايد من مفاعلات القوى النووية على الصعيد العالمي، ولا سيما في أمريكا الشمالية وأوروبا. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تمَّ تجديد رخصتي تشغيل الوحدتين ٢ و٣ في محطة بيتش بوتوم للقوى النووية، ومن ثم تمديد فترة التشغيل المأمون والآمن من ٦٠ إلى ٨٠ عاماً.

١١- واستمرَّ تنفيذ التجديدات ومشاريع التحسينات الكبرى رغم التحديات التي طرحتها جائحة كوفيد-١٩. وعلى سبيل المثال، فقد شهدت هذه الفترة اكتمال تجديد الوحدة ٢ في محطة دارلينغتون للقوى النووية في كندا وتحديث الوحدتين ١ و٢ في محطة دويل للقوى النووية في بلجيكا. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أُعيد توصيل الوحدة ١ في محطة غراند غالف بالشبكة الكهربائية بعد فترة انقطاع مقرَّرة لغرض إعادة التزويد بالوقود والصيانة، بما في ذلك إدخال تحسينات على المعدات وتحديث نظام التحكُّم في توربينات المحطة.

١٢- وخلال العام، أسفرت عمليات إنهاء الخدمة عن فقدان ٥,٢ غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية، إثر الإغلاق الدائم لستة من مفاعلات القوى النووية وهي: المفاعل Fessenheim-1 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٨٨٠ ميغاواط (كهربائي)) والمفاعل Fessenheim-2 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٨٨٠ ميغاواط (كهربائي)) في فرنسا، والمفاعل Leningrad-2 (وهو مفاعل مبرَّد بالماء الخفيف ومهدَّأ بالغرافيت بقدرة ٩٢٥ ميغاواط (كهربائي)) في الاتحاد الروسي، والمفاعل Duane Arnold (وهو مفاعل ماء مغلي بقدرة ٦٠١ ميغاواط (كهربائي)) والمفاعل Indian Point-2 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٩٩٨ ميغاواط (كهربائي)) في الولايات المتحدة الأمريكية. وأُغلق المفاعل Ringals-1 (وهو مفاعل ماء مغلي بقدرة ٨٨١ ميغاواط (كهربائي)) في السويد في آخر يوم من عام ٢٠٢٠، بعد أكثر من ٤٦ سنة قضاها في الخدمة.

الخبرة التراكمية المكتسبة في تشغيل المفاعلات النووية على الصعيد العالمي

الاتجاهات

١٣- على وجه الإجمال، شهد العقد الأخير اتجاهاً للنمو التدريجي في قدرة القوى النووية، بما في ذلك إضافة نحو ٢٣,٧ غيغاواط (كهربائي) من القدرة الجديدة بفعل إنشاء مفاعلات جديدة أو إدخال تحسينات على المفاعلات القائمة. وشهد توليد القوى النووية نموًّا مطرِّداً ليرتفع بنسبة تزيد على ٦٪ منذ عام ٢٠١١.

١٤- ويُعدُّ التشغيل الطويل الأجل عنصراً جوهريًّا لا في التحوُّل نحو نُظم الكهرباء المنخفضة الكربون وتحقيق الأهداف المتعلقة بالوصول بصافي انبعاثات الكربون إلى مستوى الصفر فحسب، وإنما أيضاً لإتاحة الوقت اللازم للتوسُّع في القدرة الجديدة على توليد الكهرباء المنخفضة الكربون، بما في ذلك إنشاء محطات جديدة للقوى النووية. وبالإضافة إلى ذلك، فإنَّ محطات القوى النووية القائمة هي أرخص مصدر لتوفير الكهرباء المنخفضة الكربون على نحو مأمون وآمن. بيد أنَّ العقد الماضي شهد أيضاً إغلاق بعض المفاعلات، ومن المرجح أنَّ بعضاً آخر سوف يُغلق لأسباب اقتصادية في الأجل القريب، رغم حصول المشغِّلين على رخص لتمديد التشغيل. وهذا هو الحال على وجه الخصوص في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث أُغلق نحو عشرة مفاعلات لأسباب اقتصادية في العقد الأخير، إثر عدم تمكُّنها من منافسة محطات التوليد التي تعمل بالغاز الصخري المنخفض التكلفة أو بمصادر الطاقة المتجدِّدة المدعومة ماليًّا. وقد أخذت بعض أجزاء البلاد بآليات قائمة على السوق، مثل المدفوعات مقابل الانبعاثات الصفرية، لتقدير قيمة مساهمة القوى النووية في إزالة الكربون من مزيج القوى، ولإبقاء المحطات القائمة مفتوحة. وفي أنحاء أخرى من العالم، قد يكون لاتخاذ القرارات السليمة على صعيد السياسات أهمية حاسمة في السماح بالتشغيل الطويل الأجل للمفاعلات القائمة.

١٥- وبالإضافة إلى ذلك، فلا تزال هناك بعض أوجه عدم اليقين المرتبطة بسلسلة الإمداد الخاصة بصناعة القوى النووية. فليس من المعروف بعدُ ما سيترتب على إغلاق الصناعات التي تُعتبر غير ضرورية في الأجل القصير من تأثير في استمرارية إمدادات المفاعلات النووية حول العالم في الأجلين المتوسط والبعيد. وفي حين

كانت سلاسل الإمداد القائمة تواجه تحديات يمكن أن تؤثِّر في استمرارية العمليات التشغيلية والمشاريع والتخطيط لانقطاع التشغيل، فهناك سلاسل إمداد جديدة ناشئة في البلدان المستجدة، وهو ما يمكن أن يؤدي إلى إضافة جهات فاعلة جديدة إلى الميدان.

ألف-٣- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسِّعة

الحالة

١٦- ظلَّت مشاريع تشييد القدرة المنشأة على توليد القوى النووية كما هي دون تغيُّر يُذكر في السنوات الأخيرة، مع تباطؤ نمو مشاريع التشييد الجديدة في عام ٢٠٢٠. ولا تزال منطقة آسيا تشهد توسُّعاً مطرِّداً في القدرة على توليد القوى النووية، حيث بلغت القدرة العاملة ٥٨,٥ غيغاواط (كهربائي) مستمدة من ٦٤ مفاعلاً موصَّلاً بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

١٧- ومن بين البلدان التي تستخدم القوى النووية، والبالغ عددها ٣٢ بلداً، كان لدى ١٩ بلداً مشاريع قائمة للتوسُّع في قدرتها النووية، وتشمل هذه البلدان الإمارات العربية المتحدة وبيلاروس، اللتين شهدت كلٌّ منهما توصيل مفاعل القوى النووية الأول لديها بالشبكة الكهربائية في عام ٢٠٢٠. وتنطوي هذه المشاريع على قدرة توليد مجموعها ٥٤,٤ غيغاواط (كهربائي) تُستمدُّ من ٥٢ مفاعلاً جديداً.

١٨- وأدَّت القيود المفروضة على السفر وحالات إغلاق الحدود المترتبة على جائحة كوفيد-١٩ إلى الحدِّ من قدرة المقاولين على دعم مشاريع البناء الجديدة، وهو ما أفضى إلى التوسُّع في استخدام التحقُّق عن بعد والتحقُّق عن طريق الأساليب المختلطة. وطبَّقت بعض الجهات الرقابية الوطنية نُهُجاً ابتكارية أثناء الجائحة أو عدَّلت نطاق عمليات التفتيش الرقابي بناءً على أهميتها من حيث الأمان.

١٩- ومن بين الدول الأعضاء التي أعربت عن اهتمامها بالأخذ بالقوى النووية، والبالغ عددها ٥٠ دولة عضواً، هناك ٢٣ دولة في مرحلة سابقة لاتِّخاذ القرار ولا تزال تنفِّذ أنشطة في مجال تخطيط الطاقة. أمَّا الدول السبع والعشرون المتبقية فتسعى إلى بدء الأخذ بالقوى النووية، وبيانها كما يلي:

— ١٧ دولة في مرحلة اتِّخاذ القرار، وهي الدول التي تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية، بما في ذلك الدول التي تعمل بالفعل على إعداد البنية الأساسية دون أن تكون قد اتَّخذت قراراً بعد (إثيوبيا، إندونيسيا، أوغندا، بوليفيا، تايلاند، تونس، الجزائر، زامبيا، سري لانكا، السلفادور، السنغال، السودان، شيلي، الفلبين، كازاخستان، المغرب، النيجر).

— ١٠ دول في مرحلة لاحقة لاتِّخاذ القرار، وهي الدول التي اتَّخذت قراراً بتطوير القوى النووية وتعمل على تشييد البنية الأساسية، أو وقَّعت عقداً وتستعد لبدء التشييد أو شرعت فيه بالفعل (الأردن، أوزبكستان، بنغلاديش، بولندا، تركيا، غانا، كينيا، مصر، المملكة العربية السعودية، نيجيريا).

٢٠- وبناءً على الخطط الوطنية الحالية لهذه الدول الأعضاء السبع والعشرين المذكورة أعلاه، يُتوقَّع أنَّ ما بين ١٠ و١٢ من البلدان المستجدَّة سوف تأخذ بالقوى النووية بحلول عام ٢٠٣٥، بما يمثِّل زيادة قدرها نحو

٣٠٪ في مجموعة الدول الأعضـــاء التي لديها محطات عاملة للقوى النووية والبالغ عددها حاليًّا ٣٢ بلداً. وتُقدَّر الإضافة التي ستقدِّمها هذه البلدان المستجدَّة إلى قدرة التوليد بنحو ٢٦ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٥.

بناءً على الخطط الوطنية الحالية لدى **٢٧** دولة عضواً

هناك ١٠-١٢ من البلدان المستجدَّة يُتوقَّع أن تبدأ في إنتاج القوى النووية بحلول عام

٢٠٣٥

مما يضيف إلى مجموعة الـ **٣٢** دولة عضواً التي لديها محطات قوى نووية عاملة زيادة قدرها نحو ٣٠٪

وتقدَّر الإضافة إلى قدرة التوليد في هذه البلدان المستجدَّة بنحو **٢٦ غيغاواط (كهربائي)**

٢١- ونتيجةً للقيود المفروضة بسبب جائحة كوفيد-١٩، لم توفد الوكالة في عام ٢٠٢٠ سوى بعثة واحدة من بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية، استضافتها بيلاروس (بعثة في إطار المرحلة الثالثة). وأُرجئت إلى عام ٢٠٢١ بعثاتٌ أخرى كانت مخططاً لها بناءً على طلب الحكومات التالية: أوغندا (المرحلة الأولى)، وأوزبكستان (المرحلة الثانية)، وسري لانكا (المرحلة الأولى)، وكينيا (بعثة متابعة في إطار المرحلة الأولى). وبالإضافة إلى ذلك، فقد كانت هناك ١٥ دولة عضواً لديها خطط عمل متكاملة سارية. وتمكَّنت بعض الدول الأعضاء من أن تخضع للاستعراضات السنوية لخطط العمل المتكاملة قبل فرض القيود على السفر بسبب جائحة كوفيد-١٩، في حين استُعرضت بقية خطط العمل المتكاملة من خلال اجتماعات افتراضية.

٢٢- وفي بنغلاديش، تمَّ تسليم بنود معدات رئيسية خاصة بمحطة روبور للقوى النووية، واكتمل صُنع وعاء ضغط المفاعل وخضع للاختبار في أوائل عام ٢٠٢٠. وخُطِّط لأن تكون مواعيد الإدخال في الخدمة في عام ٢٠٢٣. واستمر في عام ٢٠٢٠ تشييد وحدتين في محطة أكويو للقوى النووية في تركيا. وشُحن وعاء ضغط المفاعل الخاص بالوحدة ١ من مرفق الصُّنع وسُلِّمت للموقع أربعة مولِّدات بخار. ومن المتوقع إدخال الوحدة الأولى في الخدمة في عام ٢٠٢٣. وفي مصر، صدرت رخصة الموقع الخاصة بمحطة القوى النووية التي تضمُّ ٤ وحدات في الضبعة، واستمر تجهيز الموقع للتشييد. ومن المتوقع أن تبدأ أعمال تشييد الوحدة الأولى في النصف الثاني من عام ٢٠٢١، رهناً بالحصول على الموافقة الرقابية.

٢٣- وفي المملكة العربية السعودية، من المتوقع أن تبدأ قبل نهاية عام ٢٠٢١ عملية تقديم العطاءات الخاصة بأول وحدتين كبيرتين في محطة للقوى النووية، بقدرة بين ١٠٠٠ و١٦٠٠ ميغاواط (كهربائي) لكلِّ وحدة، ومن

المتوقع اختيار الجهة البائعة لتكنولوجيا محطة القوى النووية في عام ٢٠٢٤، مع التخطيط لإدخال الوحدة الأولى في الخدمة في عام ٢٠٣٦.

٢٤- وقرَّرت بولندا بناء محطات للقوى النووية بقدرة منشأة إجمالية تتراوح بين ٦,٠ و٩,٠ غيغاواط (كهربائي) باستخدام تكنولوجيا مفاعلات الماء المضغوط الكبيرة الحجم. ومن المزمع بدء تشييد أول محطة للقوى النووية في عام ٢٠٢٦ وبدء تشغيلها في عام ٢٠٣٣.

٢٥- ويمضي الأردن في مسارين متوازيين صوب إنشاء برنامج للقوى النووية، أولهما عن طريق المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، والثاني عن طريق محطة للقوى النووية من الحجم الكبير (١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) بنظام التشييد والتشغيل فنقل الملكية أو بنظام التشييد والامتلاك والتشغيل فنقل الملكية)، مع إيلاء الأولوية للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم. ويُتوقع استهلال أعمال التشييد في عام ٢٠٢٦، على أن يبدأ التشغيل التجاري في عام ٢٠٣١.

٢٦- وفي أوزبكستان، يُعتزم أن يبدأ قبل نهاية عام ٢٠٢٢ تشييد محطات للقوى النووية بمجموع قدرة نووية منشأة يبلغ ٢,٤٠٠ غيغاواط (كهربائي). وتخطِّط غانا لبدء تشييد أول محطة للقوى النووية لديها في عام ٢٠٢٣، على أن يكون إدخالها في الخدمة في عام ٢٠٢٩. وأنشأت كينيا هيئة جديدة تُسمى وكالة القوى النووية والطاقة، وأعدَّ تقرير التقييم البيئي الاستراتيجي وطُرح للمشاورات العامة، ويُتوخَّى نشر محطة القوى النووية بحلول عام ٢٠٣٥. وفي تموز/يوليه ٢٠٢٠، أصدرت الفلبين أمراً تنفيذيًّا بإنشاء اللجنة المشتركة بين الوكالات والمعنية ببرنامج الطاقة النووية لدراسة جدوى الأخذ بالقوى النووية. وطلبت سري لانكا رسميًّا استضافة بعثة من بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية.

الاتجاهات

٢٧- تواجه مشاريع البناء الجديدة، سواء في البلدان التي تستخدم القوى النووية بالفعل أو في البلدان المستجدَّة، تحديَيْن من الناحية الاقتصادية: يتعلق أولهما بالقدرة التنافسية للقوى النووية مقارنةً بتكنولوجيات الطاقة البديلة، وثانيهما بإمكانية الحصول على التمويل اللازم لتغطية الاستثمارات التي تتطلبها مشاريع القوى النووية.

٢٨- ومع قلَّة مشاريع البناء الجديدة نسبيًّا في العقد الأخير، لم يحقِّق القطاع النووي بعدُ وفورات كبيرة في التكاليف من النوع الذي شهدته تكنولوجيات مصادر الطاقة المتجدِّدة التي أدَّى الدعم السياساتي والمالي الكبير الذي تحظى به إلى تيسير نشرها. وقد أثَّر ذلك في القدرة التنافسية للقوى النووية من منظور التكاليف المتوسطة لمصادر الطاقة. ومع ذلك، فمن الواضح بصورة متزايدة أنَّ حساب تكاليف أي تكنولوجيا ينبغي أن يشمل تكلفة إدماج تلك التكنولوجيا في نظم الكهرباء في المستقبل، بما في ذلك تكاليف الشبكة الكهربائية، وكذلك تكاليف المصادر الاحتياطية وتخزين الطاقة. وعلى مستوى النظام ككلٍّ، يمكن للقوى النووية أن تنافس مصادر الطاقة المتجددة وحلول التخزين. وبالإضافة إلى ذلك، ترى الصناعة النووية إمكانية لخفض تكاليف التشييد عن طريق الأخذ بالتصاميم المبسَّطة، وتعزيز التوحيد، وتحسين الإشراف على سلسلة الإمداد، وتحقيق المنفعة الكاملة من الدروس المستفادة من المشاريع الأولى من نوعها.

٢٩- أمَّا التحدي الثاني فيتمثَّل في إمكانية الحصول على التمويل. وتتَّسم مشاريع البناء النووية الجديدة بأنَّها كثيفة رأس المال بطبيعتها، ولا توجد سوى قلَّة قليلة من هيئات المرافق العامة التي تقدر على تمويل هذه المشاريع من أصولها الخاصة. ويمكن للدعم على صعيد السياسات أن يساعد على توفير التمويل بعدَّة سبل، عن طريق التقليل من المخاطر التي يتحملها مطوّرو المشاريع، سواءً أثناء التشييد أو التشغيل، لضمان الإيرادات رغم تقلُّب ظروف السوق، على سبيل المثال من خلال اتفاقات شراء الكهرباء. (تنصُّ اتفاقات شراء الكهرباء

على قبول المشتري بالحصول على كمية متعاقد عليها من الكهرباء مقابل سعر ثابت يشمل كامل تكلفة المشروع بالإضافة إلى هامش ربح، أو يكون عليه أن يدفع غرامة إلى البائع).

٣٠- وأدرجت عدَّة بلدان مستجدة تصاميم لمفاعلاتٍ صغيرة أو متوسطة الحجم أو نمطية في تقييمات التكنولوجيا التي تجريها، ومن هذه البلدان الأردن وإستونيا والسودان وغانا وكينيا والمملكة العربية السعودية. وقد تكون للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم مزايا مقارنةً بالمفاعلات الكبيرة الحجم، ومن هذه المزايا أنَّ تكلفتها الرأسمالية الأولية أقل، وأنَّها قابلة للاستخدام في الشبكات الكهربائية الصغيرة، وأنَّها تنطوي على إمكانية توسيعها بإضافة وحدات نمطية إليها. ويمكن للنجاح في نشر المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية في العقد المقبل أن يشجِّع المزيد من البلدان المستهلَّة على النظر في الأخذ بها.

ألف-٤- تطوير تكنولوجيا القوى النووية

ألف-٤-١- المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء

الحالة

٣١- أدَّت المفاعلات المبرَّدة بالماء دوراً كبيراً في الصناعة النووية التجارية منذ ظهورها، والأغلبية الساحقة من المفاعلات النووية قيد التشييد في العالم هي مفاعلات مبرَّدة بالماء الخفيف.

٣٢- وتتزايد أيضاً في عدَّة بلدان الأنشطة المضطلع بها للنظر في الأخذ بالمفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء ودراستها وتنفيذها، بهدف النشر التدريجي لدورات وقود متقدِّمة مغلقة، سواء جزئيًّا أو بالكامل، تتسم بقدر أكبر من الكفاءة. وتُجري عدة دول أعضاء أنشطة بحث وتطوير بشأن المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج. واكتمل التصميم النظري لكلٍّ من المفاعل الكندي المبرَّد بالماء فوق الحرج، وهو مفاعل قائم على أنابيب الضغط ومهدَّأ بالماء الثقيل، والمفاعل الصيني CSR1000. وفي أوروبا، أُعدَّ المفهوم الخاص بمفاعل الماء الخفيف العالي الأداء، وأُنجزت بالتعاون مع الصين مراحل التخطيط والتصميم والتحليل الخاصة بمرفق لاختبار تأهيل الوقود داخل المفاعلات. وفي الاتحاد الروسي، هناك دراسات مفاهيمية جارية بشأن مفاعل قوى مبتكر مبرَّد ومهدَّأ بالماء، يُستخدم فيه مبرِّد ماء ذو بارامترات فوق حرجية، بما يشمل إمكانية أن يكون قلب المفاعل قائماً على طيف النيوترونات السريعة.

الاتجاهات

٣٣- تنطوي معظم المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء على قدرة أكبر على إنتاج الكهرباء، حيث تتراوح قدرة المفاعلات المشيَّدة مؤخراً بين ١٠٠٠ و١٧٠٠ ميغاواط (كهربائي) للوحدة الواحدة، ويُستهدف تحقيق زيادات أكبر في المفاعلات المتطوِّرة المبرَّدة بالماء الكبيرة الحجم التي لا تزال في مرحلة التصميم. وهناك اتجاه واضح نحو تعدُّد الوحدات في المواقع، بحيث يضمُّ الموقع الواحد عدَّة مفاعلات من نوع واحد أو من أنواع مختلفة، وهو ما يُبرز أهمية وفورات الحجم في سياق المفاعلات النووية التجارية. وفي البلدان المستجدَّة التي تنظر في بناء محطات للقوى النووية، يُتوخَّى أن تكون المفاعلات الأولى من نوع المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء.

ألف-٤-٢- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية والمفاعلات البالغة الصغر

الحالة

٣٤- في نهاية عام ٢٠٢٠، كانت هناك ١٦ دولة عضواً على الأقل لديها برامج وطنية نشطة بشأن تصميم المفاعلات النمطية الصغيرة أو تطوير التكنولوجيا الخاصة بها، يُضطلع بمعظمها في إطار التعاون الدولي. أُحرز تقدُّم ملموس في الأنشطة العالمية المضطلع بها في مجال تطوير المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو

النمطية لغرض نشـرها في الأمد القريب. وتحقَّقت معالم بارزة رئيسـية في مجال تشـغيل تكنولوجيا المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية.[٥]

٣٥- وفي الاتحاد الروسي، بدأ في أيار/مايو ٢٠٢٠ التشغيل التجاري لمحطة القوى النووية العائمة أكاديميك لومونوسوف التي تضمُّ وحدتين من طراز KLT-40S، وذلك عقب توصيل المحطة بالشبكة الكهربائية قبل ستة أشهر. وكان هناك ما يزيد على سبعين تصميما من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة التي يجري تطويرها في إطار الخطوط التكنولوجية الرئيسية لتُستخدم في تطبيقات مختلفة حول العالم. وفي الصين، كان المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع (الشكل ألف-١)، والذي سيُستخدم في إنتاج ٢١٠ ميغاواط (كهربائي) عن طريق وحدتين نمطيتين موصَّلتين بمولِّد توربيني بخاري، قيد الاختبارات الوظيفية لإدخاله في الخدمة بغية بدء تشغيله في عام ٢٠٢١. وفي الأرجنتين، وصل تشييد النموذج الأولي للمفاعل CAREM (الشكل ألف-٢) إلى مرحلة متقدِّمة، ومن المستهدف تحميله بالوقود وإدخاله في الخدمة لبدء تشغيله بحلول الربع الرابع من عام ٢٠٢٤، ليُنتج إجمالا ١٠٠ ميغاواط (حراري) و٣٠ ميغاواط (كهربائي). والمفاعل CAREM هو مفاعل نمطي صغير من النوع المتكامل الذي يعمل بالماء المضغوط، ومن المقرر تشغيله بنظام الدوران الطبيعي وبالاعتماد على سمات أمان كامنة. وقد وُضع تصميم المفاعل باستخدام التكنولوجيات المحلية، كما ساهمت الشركات الأرجنتينية بما لا يقلُّ عن ٧٠٪ من مكوناته ومن الخدمات ذات الصلة.

الشكل-ألف-١ - المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع في الصين أثناء خضوع نظمه للاختبارات الوظيفية الساخنة في إطار عملية إدخاله في الخدمة، بهدف بدء التشغيل التجاري في عام ٢٠٢٢ . (الصورة من: معهد تكنولوجيا الطاقة النووية ومصادر الطاقة الجديدة بجامعة شينغوا، الصين)

[٥] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, Vienna (2020).
(أوجه التقدُّم المحرز في تطوير تكنولوجيات المفاعلات النمطية الصغيرة: جزء تكميلي للإصدار الذي نشرته الوكالة بشأن نظام المعلومات الخاصة بالمفاعلات المتقدمة).

الشكل-ألف-٢ - وصل تشييد المفاعل CAREM إلى مرحلة متقدِّمة في موقع مجاور لمحطة Atucha II/Néstor Carlos Kirchner للقوى النووية في الأرجنتين، ويُتوخَّى أن يبدأ تشغيله بحلول عام ٢٠٢٤ وأن ينتج ٣٠ ميغاواط (كهربائي) في إطار إيضاح النموذج الأولي لذلك المفاعل. (الصورة من: الهيئة الوطنية للطاقة الذرية في الأرجنتين)

٣٦- وبدأت الصين تجهيز الموقع الخاص بالمفاعل ACP100 الذي تبلغ قدرته ١٢٥ ميغاواط (كهربائي)، والمعروف أيضاً باسم Linglong One، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل مصمَّم ليكون مفاعل قوي صغير متعدِّد الأغراض. وبعد نحو خمس سنوات من التشييد، من المتوخى الشروع في الإدخال في الخدمة لبدء التشغيل بحلول عام ٢٠٢٥، لأغراض توليد الكهرباء والحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية وتحلية مياه البحر. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أصدرت الهيئة الرقابية النووية موافقتها على اعتماد تصميم المفاعل النمطي الصغير الخاص بشركة NuScale Power الذي تبلغ قدرته ٥٠ ميغاواط (كهربائي)، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل قائم على نظام الدوران الطبيعي ويعتمد اعتماداً كاملاً على سمات أمان كامنة. ورفعت الشركة بعد ذلك قدرة وحدة NuScale Power النمطية ("وحدة نيوسكيل للقوى") إلى ٦٠ ميغاواط (كهربائي) قبل أن تعلن عن رفعها مجدداً إلى ٧٧ ميغاواط (كهربائي)، وهي تخطط لطلب الموافقة على اعتماد التصميم في عام ٢٠٢٢. وتُنتج وحدة نيوسكيل للقوى الكهرباء بمستويات تصاعدية من القدرة يمكن الوصول بها إلى ٩٢٤ ميغاواط (كهربائي) إجمالاً في إطار محطة قوى نووية واحدة. ومن المتوقع بدء تشييد أول وحدة من وحدات نيوسكيل للقوى في السنوات المقبلة، على أن يبدأ تشغيلها بحلول عام ٢٠٣٠ في مختبر أيداهو الوطني.

٣٧- وانتهت جمهورية كوريا والمملكة العربية السعودية سويًّا من الأعمال الهندسية السابقة لتنفيذ مشروع بشأن مفاعل نمطي متقدِّم متكامل النظم، وتمخضت تلك الأعمال عن تقرير تحليل الأمان الأولي لمفاعل ماء مضغوط متكامل بقدرة ١١٠ ميغاواط (كهربائي) (٣٦٥ ميغاواط (حراري)) يشترك البلدان في ملكية تصميمه. وتُلتمس الآن الموافقة على تغيير تصميم المفاعل النمطي المتقدِّم المتكامل النظم استعداداً لبدء التصميم الهندسي المفصَّل للأغراض المستقبلية. ونشرت اليابان "استراتيجية النمو الأخضر عن طريق تحقيق الحيادية الكربونية

في عام ٢٠٢٠"، والتي تضمَّنت تفاصيل بشأن الدعم النشط الذي تقدِّمه حكومة اليابان للتعاون الدولي في مجال إيضاح تكنولوجيات المفاعلات النمطية الصغيرة.

٣٨- وواصلت فرنسا تطوير المفاعل NUWARD، وهو مفاعل نمطي صغير بقدرة ٣٤٠ ميغاواط (كهربائي) يتألف من وحدتين نمطيتين من مفاعلات الماء المضغوط قدرة كلٌّ منهما ١٧٠ ميغاواط (كهربائي)، وذلك بغية إحلال هذه التكنولوجيا محلَّ محطات القوى المتقادمة التي تعمل بالفحم على مدى العقد المقبل. ويتميز المفاعل المذكور بأنَّه قائم على الحَمْل الحراري القسري ومزوَّد بنظم أمان متقدِّمة. وبالمثل، واصلت المملكة المتحدة العمل على تطوير التكنولوجيا الخاصة بالمفاعل النمطي الصغير البريطاني، وهو تصميم لمفاعل نمطي صغير ثلاثي الحلقات يعمل بالماء المضغوط، يُتوخَّى نشره محليًّا وعالميًّا بحلول عام ٢٠٣٠.

٣٩- وفي الاتحاد الروسي، يجري النظر في تشييد مفاعل نمطي صغير بريّ بالاستناد إلى المفاعل RITM-200، هو مفاعل ماء مضغوط متكامل بقدرة ٥٠ ميغاواط (كهربائي) كان الغرض الأصلي من تصميمه ونشره هو أن يُستعمل في كاسحات الجليد النووية.

٤٠- وتضمَّنت خريطة الطريق الكندية بشأن المفاعلات النمطية الصغيرة تطبيقات محتملة يمكن أن تحلَّ محلَّ محطات التوليد التي تعمل بالوقود الأحفوري والديزل، سواء داخل الشبكة الكهربائية أو خارجها، بما في ذلك المحطات المستخدمة في صناعات النفط والتعدين. وتَواصَل مع هيئة الأمان النووي الكندية عددٌ لا يقل عن ١٢ من مصمِّمي/بائعي المفاعلات النمطية الصغيرة من أجل إجراء عمليات استعراض تصاميم البائعين لمفاهيم مفاعلات مقترحة، بما في ذلك مفاعلات سريعة مبرَّدة بفلزات ومفاعلات أملاح مصهورة ومفاعلات مبرَّدة بالغاز ومفاعلات متكاملة مبرَّدة بالماء. وتقدَّمت شركة Global First Power بطلب للحصول على رخصة لتجهيز موقع لمرفق مفاعل نمطي صغير مبرَّد بالغاز بقدرة ١٥ ميغاواط (حراري) في مختبرات تشوك ريفر. ويأخذ المشروع في الحسبان كلًّا من توليد الكهرباء وتوفير الحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية. وأوضحت شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء مؤخراً أنها بصدد اختيار مفاعل نمطي صغير لنشره في موقع مشروع دارلينغتون النووي الجديد في كلارنغتون، أونتاريو؛ وتفكِّر الشركة، رهناً بالحصول على الموافقات اللازمة على مستوى المقاطعة، تقديم طلب للحصول على رخصة التشييد في عام ٢٠٢٢.

الاتجاهات

٤١- شهدت عدَّة بلدان تكثيف أنشطة التطوير الخاصة بمجموعة فرعية من المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم تُعرف باسم المفاعلات البالغة الصغر، ومن هذه البلدان الجمهورية التشيكية وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. وفي حين لا يوجد بعدُ توافق عالمي في الآراء بشأن تعريف المفاعلات النمطية البالغة الصغر ونطاق قدرتها، فهناك تفاهم عام على أنَّ هذه المفاعلات ستكون مناسبة للتوليد المشترك للحرارة والكهرباء في المناطق النائية أو الجزر الصغيرة، و/أو أن تحل محلَّ مولِّدات الديزل. ومن المفاهيم التي تخضع لعملية ترخيص التشييد التي تقودها الهيئة الرقابية النووية من أجل مشروع في موقع تابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة مفهوم المفاعل Aurora، وهو مفاعل قائم على طيف النيوترونات السريعة قدرته ١,٥ ميغاواط (كهربائي) تعمل على تطويره شركة Oklo، وهي شركة ناشئة في الولايات المتحدة الأمريكية. وفي كندا، اكتملت المرحلة الأولى وبدأت المرحلة الثانية من عملية استعراض تصاميم البائعين لدى هيئة الأمان النووي الكندية فيما يخصُّ المفاعل النمطي البالغ الصغر الخاص بمؤسسة Ultra Safe Nuclear Corporation (مؤسسة USNC)، وهو مفاعل مرتفع الحرارة مبرَّد بالغاز ذو قلب مصنوع من كتل منشورية الشكل ومصمَّم

لإنتاج ١٥ ميغاواط (حراري) أو قرابة ٥ ميغاواط (كهربائي)؛ ومن المعتزم أن تبدأ المرحلة الأولى من عملية استعراض تصاميم البائعين لدى هيئة الأمان النووي الكندية فيما يخصُّ المفاعل U-Battery الخاص بشركة Urenco، وهو مفاعل نمطي عالي الحرارة مبرَّد بالغاز مصمَّم ليكون مفاعل قوى متعدد الأغراض يولِّد ٤ ميغاواط (كهربائي) من ١٠ ميغاواط (حراري).

٤٢- وثمة اهتمام متزايد في الدول الأعضاء بمفاعلات الأملاح المصهورة، مع زيادة في عدد المشاريع المعنية بتطوير تلك المفاعلات. وتتيح تكنولوجيا مفاعلات الأملاح المصهورة قدراً كبيراً من المرونة للمصمِّم، ومن ثمَّ تفتح الباب أمام العديد من المفاهيم التصميمية، مثل المفاعلات الحرارية والمفاعلات السريعة. وتُصمَّم مفاعلات الأملاح المصهورة في شكل مفاعلات نمطية صغيرة وكذلك في شكل محطات قوى نووية من الحجم الكبير. وهناك بعض مطوِّري مفاعلات الأملاح المصهورة الذي يعتزمون نشر تصاميمهم في غضون العقد المقبل. وأُنجز التصميم الأساسي لمفاعل الأملاح المصهورة المضغوط الحجم الذي تطوِّره شركة Seaborg Technologies في الدانمرك، واستُكملت المرحلة الأولى من عملية الحصول على الموافقة الرقابية. وفي كندا هناك حاليًّا نوعان من تصاميم مفاعلات الأملاح المصهورة يخضعان لعملية استعراض تصاميم البائعين قبل الترخيص لدى هيئة الأمان النووي الكندية، وهما: مفاعل الأملاح المصهورة المتكامل الخاص بشركة Terrestrial Energy (طراز IMSR-400، وقدرته ١٩٥ ميغاواط (كهربائي))، ويخضع الآن للمرحلة الثانية من عملية استعراض تصاميم البائعين لدى هيئة الأمان النووي الكندية؛ ومفاعل الأملاح المستقر الحارق للنفايات الخاص بشركة Moltex Energy (طراز SSR-W300)، والذي صُمِّم في كندا والمملكة المتحدة، وهو في طور الانتقال من التصميم المفاهيمي إلى التصميم على مستوى النظم، ويخضع الآن للمرحلة الأولى من عملية استعراض تصاميم البائعين لدى هيئة الأمان النووي الكندية. وهناك عدَّة تصاميم أخرى لمفاعلات أملاح مصهورة في مراحل متفاوتة من عملية التطوير في بلدان أخرى، وقد يمكن نشرها في السنوات المقبلة.

٤٣- وهناك عدَّة بلدان تعكف على تطوير مفاعلات بحرية. حيث وضع الاتحاد الروسي أربعة تصاميم لمفاعلات نمطية صغيرة لتُستخدم في وحدات القوى العائمة، وتصميماً واحدا، باسم "SHELF"، ليُستخدم في وحدة مغمورة لتوليد القوى تحت سطح البحر. وكان لدى الصين تصميم واحد على الأقل، وهو المفاعل ACPR50S، لتزويد منصات استخراج النفط والغاز الموجودة في عرض البحر بالكهرباء. ومع اقتراب نهاية عام ٢٠٢٠، أعلنت جمهورية كوريا عن تطوير الوحدة BANDI 60، وهي وحدة عائمة لتوليد القوى قائمة على مفاعل ماء مضغوط.

٤٤- وتشترك الجهود الرامية إلى تطوير المفاعلات النمطية الصغيرة في هدف واحد، وهو إيضاح أنَّ التشييد باستخدام وحدات نمطية يمكن أن يؤدي إلى خفض التكاليف الرأسمالية الأولية بالاستفادة من الوفورات المتأتية من الإنتاج المتوالي، وأنَّ تبسيط التصميم وتقصير مدَّة التشييد يمكن أن يفضيا إلى إيجاد مخططات تمويل ميسورة التكلفة. وبغية مساعدة الدول الأعضاء على التوصُّل إلى فهم مشترك لاحتياجاتها وخصوصياتها فيما يتعلق بتكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة، استهلَّت الوكالة عملية لإعداد وثيقة بالمتطلبات والمعايير العامة التي يتعيَّن على المستخدمين مراعاتها فيما يتعلق بتصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة وتكنولوجياتها. وتهدف هذه الوثيقة إلى تقديم مجموعة من المتطلبات الرئيسية التقنية والاقتصادية والمتعلقة بالسياسات، لتيسِّر على البلدان المستهلَّة إجراء التقييمات لتكنولوجيا المفاعلات وإعداد وثائق المناقصات في نهاية المطاف. ومن المتوقَّع أنَّ النجاح في نشر المفاعلات النمطية الصغيرة في العقد المقبل سوف يشجِّع المزيد من البلدان المستهلَّة على النظر في الأخذ بها والمشاركة في جهود البحث والتطوير ذات الصلة.

٤٥- وعزَّزت الوكالة من جهودها الرامية إلى دعم الدول الأعضاء المهتمة بنظم الطاقة المختلطة الخالية من الكربون التي تجمع بين مصادر الطاقة المتجدِّدة المتقطِّعة والمفاعلات النمطية الصغيرة وتخزين الطاقة والتطبيقات غير الكهربائية. ورأت بلدان عديدة أنَّ المفاعلات النمطية الصغيرة، التي عادةً ما لا تزيد قدرتها على ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي)، يمكن أن تصبح مصدراً فعَّالاً للكهرباء الخالية من الكربون يحلُّ محلَّ المحطات المتقادمة التي تعمل بالوقود الأحفوري. وبالإضافة إلى ذلك، وبالنظر إلى تزايد حصة مصادر الطاقة المتجدِّدة المتقطِّعة من الكهرباء المولَّدة في جميع القارات، تُعدُّ المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم مصدراً مناسباً سواء لتوفير الحمل الأساسي أو للتشغيل المرن بالتآزر مع مصادر الطاقة المتجدِّدة ضماناً لأمن إمدادات الطاقة.

المبادرات الدولية بشأن نُظم الطاقة النووية الابتكارية

أنشئ المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود النووي الابتكارية (مشروع إنبرو) في عام ٢٠٠٠ ليكون قناة رئيسية للتعاون الدولي بشأن استدامة الطاقة والاستراتيجيات الطويلة الأجل والابتكارات المؤسسية والتقنية.

وفي عام ٢٠٠٠، أطلق مشروع إنبرو مجموعة من الأدوات لتزويد البلدان بقدرات متاحة عبر الإنترنت لتقييم دورات الوقود النووي، في إطار خدمة الدعم التحليلي لتعزيز استدامة الطاقة النووية، التابعة للمشروع.

وأعدَّ المشروع أيضاً دورة تعلّم إلكتروني جديدة لدعم الخبراء حول العالم في استخدام الأدوات والأساليب الخاصة بنمذجة سيناريوهات الطاقة النووية، والتقييم المقارن للنظم، ورسم خرائط الطريق من أجل استدامة الطاقة النووية. واستهلَّ مشروع إنبرو مشروعاً تعاونيًّا بالاستعانة بخدمة الدعم التحليلي لتعزيز استدامة الطاقة النووية لإعداد دراسات حالة حول سيناريوهات النشر المستدام المتعلقة خصيصاً بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية.

ألف-٤-٣- النظم النيوترونية السريعة

الحالة

٤٦- واصلت مجموعة متعدِّدة من البلدان التي لديها برامج متقدِّمة للقوى النووية العمل على تطوير النظم النيوترونية السريعة وفقاً لبرامجها الوطنية. واستمر تشغيل مفاعلين سريعين مبرَّدين بالصوديوم في الاتحاد الروسي، وهما: المفاعل BN-600 (منذ عام ١٩٨٠) والمفاعل المتقدِّم BN-800 (منذ عام ٢٠١٦). وسيأتي المفاعل BN-1200، الذي لا يزال قيد التصميم، في إطار سلسلة من المفاعلات الروسية السريعة المبرَّدة بالصوديوم التي تهدف إلى تحقيق المستوى المعزَّز من الأمان الذي وضعه المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات بشأن المفاعلات الابتكارية. وكانت الهند بصدد استكمال إدخال مفاعلها النموذجي السريع التوليد المبرَّد بالصوديوم في الخدمة. وتشغِّل الصين منذ عام ٢٠١٠ المفاعل التجريبي الصيني السريع المبرَّد بالصوديوم الذي تبلغ قدرته ٢٠ ميغاواط (كهربائي). ويجري العمل على تشييد المفاعل الابتكاري CFR-600، وهو من نوع المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم، منذ عام ٢٠١٧. بدأت أعمال تشييد المفاعل النيوتروني السريع الثاني من طراز CFR-600 الحوضي المبرَّد بالصوديوم، في مقاطعة زيابو، فوجيان، الصين. ويُعرف المفاعل CFR-600 أيضاً باسم مشروع زيابو لإيضاح المفاعلات السريعة، وهو يشكِّل جزءاً من خطة الصين لتحقيق دورة وقود نووي مغلقة. ورغم أنَّ فرنسا

لديها سجل حافل في مجال تطوير المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم وتشغيلها، فقد أجَّلت خطط بناء مفاعل ابتكاري نموذجي من هذا النوع من المفاعلات (المفاعل التكنولوجي المتقدِّم المبرَّد بالصوديوم لأغراض الإيضاح الصناعي (المفاعل ASTRID))، لتوجِّه تركيزها بدلا من ذلك إلى برنامج للبحث والتطوير. ورغم أنَّ فرنسا لديها سجل حافل في مجال تطوير المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم وتشغيلها، فقد أجَّلت خطط بناء مفاعل ابتكاري نموذجي من هذا النوع من المفاعلات (المفاعل التكنولوجي المتقدِّم المبرَّد بالصوديوم لأغراض الإيضاح الصناعي (المفاعل ASTRID))، لتوجِّه تركيزها بدلا من ذلك إلى برنامج للبحث والتطوير. وشجَّعت اليابان المنافسة فيما بين مجموعة متعددة من تكنولوجيات المفاعلات النيوترونية السريعة، بما في ذلك تكنولوجيات قائمة على المفاعلات النمطية الصغيرة، عن طريق إجراء دراسات جدوى ضمن برنامجها لتعزيز الابتكار في مجال الطاقة النووية (برنامج NEXIP) في إطار المرحلة الأولى من خريطة الطريق الاستراتيجية لتطوير المفاعلات السريعة. والهدف المقبل لخريطة الطريق هو إيضاح التكنولوجيا المنشودة في منتصف القرن الحادي والعشرين.

٤٧- وفي الاتحاد الروسي، كان كلٌّ من المفاعل المبرَّد بالرصاص BREST-OD-300 والمفاعل السريع المُبرَّد بالرصاص والبزموث SMR SVBR-100 قيد الترخيص. وكانت بعض بلدان الاتحاد الأوروبي تعمل سويًّا من أجل تطوير المفاعل الأوروبي السريع المتقدم المبرَّد بالرصاص لأغراض الإيضاح (المفاعل ALFRED)، الذي عرضت رومانيا تشييده في موقع ميوفيني. وفي المملكة المتحدة، كان تصميم المحطة SEALER-UK، القائمة على المفاعل السويدي السريع المتقدم المبرَّد بالرصاص (المفاعل SEALER) والتي تبلغ قدرتها ٥٥ ميغاواط (كهربائي)، قيد الاستعراض لدى وزارة الأعمال والطاقة والاستراتيجية الصناعية.

٤٨- وفي عام ٢٠٢٠، أعلنت شركة General Atomics وشركة Framatome عن تصميم مفاهيمي مشترك لمفاعل سريع نمطي مبرَّد بالهليوم بقدرة ٥٠ ميغاواط (كهربائي). وواصل الاتحاد الأوروبي تطوير المفاعل ALLEGRO، وهو مفاعل سريع تجريبي مبرَّد بالهليوم. وأعلنت شركة TerraPower وشركة GE Hitachi للطاقة النووية عن تكنولوجيا Natrium (الشكل ألف-٣)، وهي تكنولوجيا مختلطة متقدمة تجمع بين مفاعل سريع مبرَّد بالصوديوم بقدرة ٣٤٥ ميغاواط (كهربائي) ونظام طاقة قائم على الأملاح المصهورة يمكن استخدامه للوصول بالقدرة الإجمالية إلى ٥٠٠ ميغاواط (كهربائي).

الشكل-ألف-٣- تكنولوجيا Natrium المختلطة المتقدِّمة التي طورتها شركة TerraPower وشركة GE Hitachi للطاقة النووية. (المصدر: شركة TerraPower)

الاتجاهات

٤٩- في جميع الحالات تقريباً، اتَّخذت الاقتراحات بمفاهيم جديدة وتصاميم ابتكارية في مجال النظم النيوترونية السريعة شكل مفاعلات نمطية صغيرة. وإلى جانب التكنولوجيا القائمة على التبريد بالصوديوم التي بلغت مرحلة النضج، فهناك تصاميم ومفاهيم جديدة يجري تطويرها في مجال المفاعلات السريعة. وبالإضافة إلى ذلك، فثمَّ اهتمام متزايد بالمفاعلات السريعة المبرَّدة بالفلزات السائلة الثقيلة، مثل الرصاص وخليط الرصاص والبزموث المنصهرين. ويُنظر أيضاً في استخدام الهليوم كمبرِّد بديل في النظم النيوترونية السريعة. ورغم أن النظم النيوترونية السريعة تواجه بعض التحديات التكنولوجية، فلا يزال من المسلم به أنَّ افتقارها للقدرة التنافسية الاقتصادية هو العقبة الرئيسية أمام نشرها. ومع ذلك، يتواصل العمل على تطوير التكنولوجيا الخاصة بهذه النظم مدفوعاً بما تنطوي عليه من إمكانية التقليل كثيراً من كمية النفايات المشعة وسميَّتها وطول عمرها، وإمكانية الاستفادة من الوقود بكفاءة أكبر، بالاقتران مع ظهور المفاهيم الجديدة.

ألف-٤-٤- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

الحالة

٥٠- استُخدم ما مجموعه ٦٤ مفاعلاً من مفاعلات القوى النووية العاملة لتوليد كمية من الحرارة تعادل ٣٣٩٦,٤ غيغاواط-ساعة من الكهرباء، لاستخدامها في التطبيقات غير الكهربائية. حيث استُغلَّت الحرارة الناتجة من ٥٦ مفاعلاً في تدفئة الأحياء السكنية وتطبيقات المعالجة الصناعية، ومن ٨ مفاعلات في تحلية مياه البحر.

إنتاج الهيدروجين

٥١- وأُحرزت أوجه تقدُّم كبيرة في مجال إنتاج الهيدروجين نوويًّا.

٥٢- وفيما يخصُّ إنتاج الهيدروجين نوويًّا، زادت عدَّة دول أعضاء من تركيزها على استخدام القوى التي تولِّدها مفاعلات الماء الخفيف في غير ساعات الذروة لإنتاج الهيدروجين. وتعاقدت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة مع شركات المرافق العامة Energy Harbor و Xcel Energy و Arizona Public Service لإيضاح إنتاج الهيدروجين في ثلاث من محطات القوى النووية في عامي ٢٠٢٠ و٢٠٢١، في إطار مشاريع تشارك فيها عدَّة مختبرات وطنية. وفي المملكة المتحدة، تقود شركة EDF Energy المشروع المعنون Hydrogen to Heysham أو اختصاراً H2H لإنتاج الهيدروجين المنخفض الكربون باستخدام القوى النووية.

٥٣- وفي الصين، تحقَّقت أوجه تقدُّم في جهود البحث والتطوير المتعلقة بإنتاج الهيدروجين نوويًّا. حيث انتهى معهد شنغهاي للفيزياء التطبيقية من اختبارات السلوك الطويل الأجل لمصفوفة خلايا التحليل الكهربائي القائمة على أكسدة الوقود الصلب (خلايا SOEC)، وتبيَّن أنَّ أداء المصفوفة مستقر، كما أنشأ المعهد محطة هيدروجين بقدرة ٢٠ كيلوواط تُستخدم فيها تكنولوجيا التحليل الكهربائي بالبخار المرتفع الحرارة. وركَّز المعهد في أهدافه الجديدة على صُنع خلايا SOEC ومصفوفات الخلايا، وكذلك على مشاريع إيضاحية للمحطات في نطاق

٢٠٠ كيلوواط وفي نطاق الميغاواط، بالاقتران مع مفاعل أملاح مصـــهورة يعمل بوقود الثوريوم للوصـــول إلى إنتاج الهيدروجين على نطاق واسع.

٥٤- وواصـلت المختبرات النووية الكندية تطوير التكنولوجيا الكيميائية الحرارية المختلطة القائمة على دورة النحاس-الكلور لإنتاج الهيدروجين نوويًّا. والهدف المنشـــود هو اســـتحداث نظام متكامل على النطاق المختبري لغرض الإيضـاح، مع العمل صـوب التوسُّـع وصـولاً إلى إنشـاء محطة نموذجية أولية. ونجحت اليابان في إنتاج الهيدروجين بطريقة آلية متواصـلة في حلقة مغلقة، عن طريق عملية التكسـير الحراري الكيميائي لجزيئات الماء باسـتخدام دورة اليود-الكبريت، بمعدلات تصـل إلى ٣٠ لتر في السـاعة ولفترات زمنية تصـل إلى ١٥٠ سـاعة، وهو ما سـوف يؤدي في نهاية المطاف إلى إنتاج الهيدروجين باسـتخدام الحرارة التي تتجاوز ٩٠٠ درجة مئوية والتي سـتنتجها المفاعلات الفائقة الحرارة المبرَّدة بالغاز في المسـتقبل. واسـتُخلصـت بيانات مهمَّة لدراسـة أداء المواد والمكونـات وموثوقيتهـا، ولتحســـين تقنيـات التحكُّم في الموائع وفي التفاعل الكيميـائي على النحو اللازم لتحقيق عمليات تمتدُّ لفترات زمنية أطول.

يمكن الجمع بين
مفاعلات القوى النووية

ومحطات إنتاج الهيدروجين

في إطار نظام للتوليد المشترك ينتج كلًّا من الطاقة والهيدروجين بكفاءة.

H_2

إذا أمكن استخدام الطاقة النووية لتحقيق مستويات إنتاج الهيدروجين الحالية، فإن ذلك سوف يؤدي إلى

استئصال نحو

٥٠٠

مليون طن من انبعاثات **ثاني أكسيد الكربون** سنويًّا.

٥٥- وفيما يخصُّ تدفئة الأحياء السـكنية بالاسـتعانة بمحطات القوى النووية، حقَّق الاتحاد الروسـي طفرة في هذا المجال بإطلاق محطة القوى النووية العائمة أكاديميك لومونوسـوف. وبوسـع هذه المحطة أن توفِّر الكهرباء لمنصـات النفط الموجودة في المحيط المتجمد الشـمالي قبالة سـاحل الاتحاد الروسـي، ولمحطةٍ لتحلية مياه البحر تُنتج المياه العذبة وكذلك الحرارة اللازمة لتدفئة الأحياء السكنية، حسب الاقتضـاء. وسوف تحلُّ محطة أكاديميك لومونوسوف للقوى النووية تدريجيًّا محلَّ محطة بيليبينو للقوى النووية (الشكل ألف-٤)، التي حصلت على تمديد رخصـــة تشـــغيلها لخمس ســـنوات إضـــافية. وتُعدُّ محطة بيليبينو للقوى النووية واحدة من أقدم محطات التوليد المشـترك في العالم، وهي توفِّر الكهرباء والحرارة لمدينة بيليبينو. وأعلنت بلدان أخرى، مثل الصـين وجمهورية كوريا، عن خطط لإنشاء محطات عائمة للقوى النووية لديها.

الشكل-ألف-٤- محطة بيلِيبينو للقوى النووية، التي تُستخدم في التوليد المشترك للحرارة والكهرباء في الاتحاد الروسي (الصورة من: هيئة روزاينيرغوأتوم "ROSENERGOATOM")

الاتجاهات

٥٦- ما فتئ استخدام الطاقة النووية في أغراض تتجاوز إنتاج الكهرباء يكتسب زخماً غير مسبوق حول العالم. وبالإضافة إلى الدور الذي يؤديه التوليد المشترك للطاقة النووية في إزالة الكربون من قطاعات الاستخدام النهائي للطاقة، مثل قطاعَي النقل والصناعة والقطاع السكني، يتزايد النظر إليه أيضاً على أنَّه يكفل فرصة لإقامة حجة اقتصادية ضد الإنهاء المبكّر لخدمة محطات القوى النووية التي لا تحقِّق أرباحاً، ولا سيما في ضوء تزايُد حصص نظم الطاقة المتجدِّدة المتقطِّعة في الشبكات الكهربائية. ومن المتوقع أنَّ إنتاج الهيدروجين نوويًّا باستخدام المفاعلات المنخفضة الحرارة المبرَّدة بالماء سوف يظلُّ محلَّ اهتمام حتى يصل إلى المرحلة التجارية، ولا سيما إذا تكلَّلت المشاريع الإيضاحية بالنجاح.

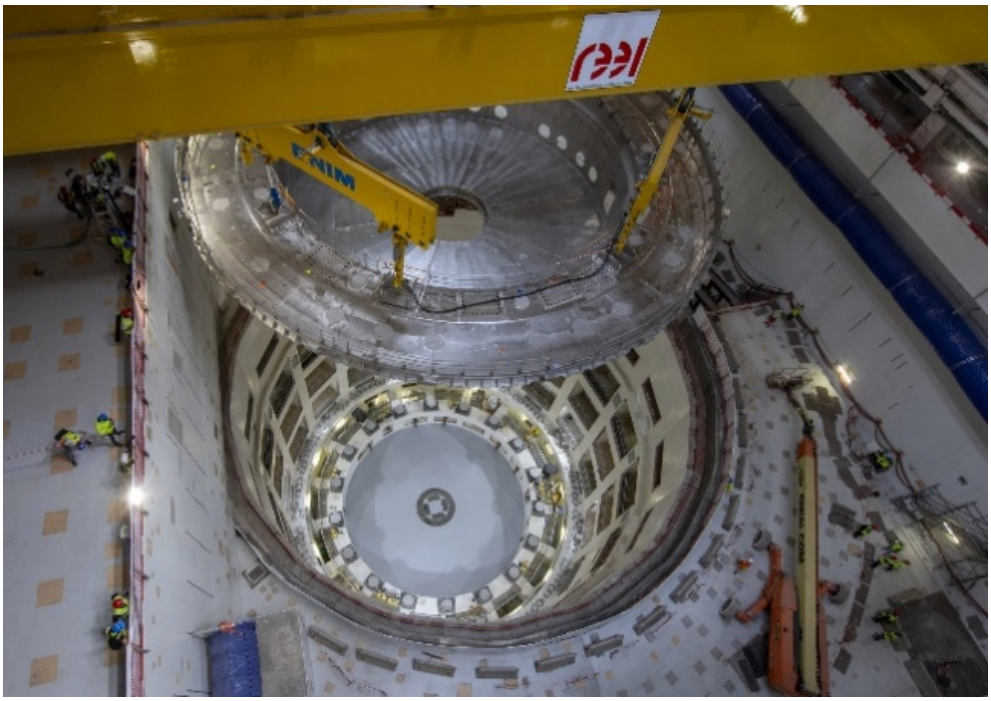
٥٧- بيد أنَّه سيلزم أولاً التصدي للتحديات المتعلقة بمسائل البنية الأساسية المتصلة بتخزين الهيدروجين ونقله. ومن المتوقع أنَّ الدروس المستفادة من المشاريع الجاري تنفيذها في بلدان مختلفة سوف تعجِّل بالتوسُّع في إنتاج الهيدروجين نوويًّا باستخدام التحليل الكهربائي التقليدي. ومن المرجَّح أيضاً أن يتواصل العمل على تطوير عمليات عالية الكفاءة لإنتاج الهيدروجين نوويًّا. ويُتوقَّع أنَّ مفهوم استخدام الطاقة النووية في التطبيقات غير الكهربائية، سواء في إطار محطات مستقلة بذتها أو عبر التوليد المشترك أو ضمن نظم الطاقة المتكاملة التي تجمع بين الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة في تطبيقات متعدِّدة الأعراض، سوف يشكِّل اتِّجاهاً جديراً بالمتابعة في السنوات المقبلة. وتشمل هذه التطبيقات إنتاج المياه العذبة، وإنتاج الهيدروجين لاستخدامه كوقود وكناقل للطاقة، وتدفئة الأحياء السكنية، والتبريد في المباني السكنية والتجارية وكذلك لخدمة العديد من الصناعات الأخرى، بما في ذلك صناعة الصلب وتكرير المنتجات البتروكيميائية وإنتاج أنواع الوقود الاصطناعية.

٥٨- وأنشأت الوكالة برنامج التقييم الاقتصادي للهيدروجين وأعدَّت برامجية حساب الهيدروجين HydCalc ووضعت مجموعة أدوات بشأن إنتاج الهيدروجين نوويًّا، لدعم الدول الأعضاء في التقييمات التقنية-الاقتصادية التي تجريها للمقارنة بين إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة النووية وباستخدام البدائل الأخرى.

ألف-٤-٥- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل

الحالة

٥٩- احتفلت الأوساط المعنية بالاندماج النووي ببدء تجميع آلات المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي ودمج مكوناتها (الشكلان ألف-٥ وألف-٦)، بعد أكثر من عشر سنوات استغرقتها مراحل التشييد المعقدة، بما في ذلك تجهيز الموقع وتصميم النظم والمكونات الرئيسية وصنعها. وفي نهاية عام ٢٠٢٠، كان الإعداد لتنفيذ عمليات البلازما في مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، المقرَّر أن تبدأ في كانون الأول/ديسمبر ٢٠٢٥، قد اكتمل بنسبة ٧٠٪. وسوف يوفِّر المفاعل، فور بدء تشغيله، جانباً كبيراً من الأساس العلمي والتكنولوجي اللازم لتطوير وتصميم مفاعلات قوى اندماجية قادرة على إنتاج الطاقة في المستقبل.



الشكل-ألف-٥- كانت قاعدة وعاء المحافظة على البرودة (الكريوستات)، التي تزن ١٢٥٠ طناً، هي أول مكوّن يتمّ تركيبه في قاع حفرة تجميع جهاز التوكاماك التي يبلغ عمقها ٣٠ متراً. (الصورة من: المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

الشكل-ألف-٦ - بعد تركيب قاعدة وعاء المحافظة على البرودة (الكريوستات)، أُنزلت الاسطوانة السفلية من الوعاء، البالغ وزنها ٣٧٥ طناً، إلى قاع حفرة التجميع وثُبِّتت بالقاعدة عن طريق اللحام. (الصورة من: المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

٦٠- وكانت الطارة الأوروبية المشـــتركة، وهي جهاز توكاماك معزَّز القوى الحرارية ومزوَّد بجدار مماثل لجدار المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، بصـــدد الاســتعداد للاضــطلاع بحملة تجارب التريتيوم، التي تهدف لإجراء الاختبارات والتحضـير للتجارب المقبلة بخليط من كميتين متسـاويتين من الديوتيريوم والتريتيوم. والغرض من حملة تجارب الديوتيريوم والتريتيوم، المقرَّر أن تبدأ في صـــيف عام ٢٠٢١، هو توفير أســـاس فيزيائي وتكنولوجي فريد من نوعه لتشـغيل المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي. وأحد الأهداف الرئيسـية المتوخَّى تحقيقها في الحملـة فيمـا يتعلق بـالأداء هو توليـد ١٥ ميغـاواط من القوى الحراريـة لنحو ٥ ثوانٍ في ظروف ثابتة، من أجل دراسة أهم الجوانب الفيزيائية في عملية إنتاج الطاقة الاندماجية.

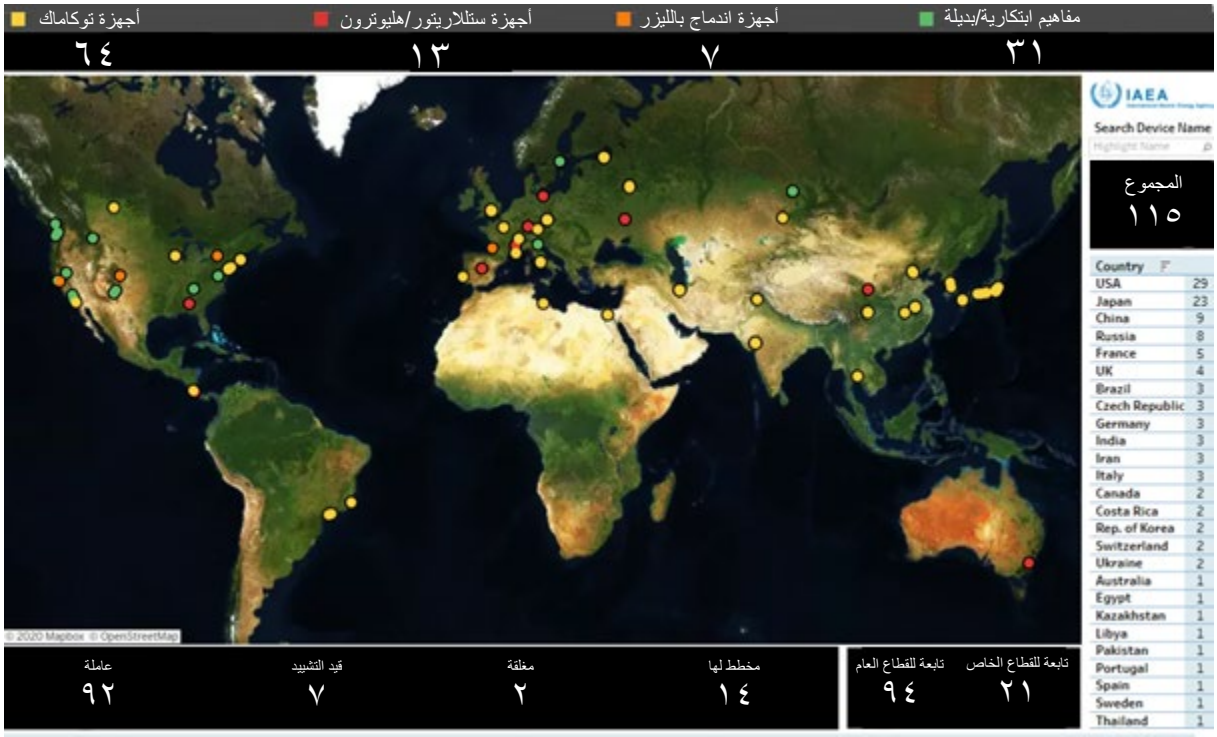
٦١- وفي مجال احتواء الاندماج بالقصـــور الذاتي بالاســـتعانة بأجهزة الليزر العالية الطاقة، واصـــل مرفق الإشـعال الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية تحسين أداء التجارب عن طريق زيادة الكفاءة في وصـلة الطاقة بين طاقة الليزر والطاقة التي تمتصها كبسولة الوقود، من خلال الوقوف على عدَّة مصادر لتسرُّب الطاقة ووضع تقنيات للتخفيف من ذلك التسـرُّب بغية التمكين من إجراء التجارب بمسـتوى أعلى من الأداء. ومن شـأن تعزيز كفاءة وصلة الطاقة أن يكون مفيداً في تحسين آفاق إنتاج الطاقة.

الاتجاهات

٦٢- لا يزال الاسـتثمار في بحوث وتكنولوجيا الاندماج، الممولة من القطاع العام أو من القطاع الخاص على السـواء، يشـهد زيادة مسـتمرة. ويبلغ عدد أجهزة الاندماج الممولة من القطاع العام ما يزيد على ٩٠ جهازاً، منها ما هو عامل وما هو قيد التشـييد وما لا يزال قيد التخطيط (الشـكل ألف-٧). وبالإضـافة إلى ذلك، فهناك أكثر من ٢٠ شـركة من شـركات القطاع الخاص العاملة في مجال الاندماج النووي تجري أنشـطة بحث وتطوير بشـأن

طائفة متنوعة من الأجهزة والنُّهج الأصغر نطاقاً بالاستناد إلى أنواع مختلفة من الوقود وأنساق هندسية بديلة للاحتواء وتكنولوجيات جديدة مثل المغناطيسات الفائقة التوصيل العالية الحرارة.

٦٣- واشتركت وزارة الطاقة والهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة ورابطة صناعات الاندماج النووي في استضافة منتدى عام افتراضي بشأن الإطار الرقابي للاندماج النووي. وكان الغرض من عقد المنتدى هو بدء الحوار حول وضع إطار رقابي يتناول خطط تطوير وإنشاء نظم لإنتاج الطاقة باستخدام مفاعلات الاندماج في المستقبل، سواء بدعم من القطاع العام أو من القطاع الخاص وبالتعاون مع الهيئة الرقابية في الولايات المتحدة ومع سائر الهيئات الرقابية الوطنية.



الشكل-ألف-٧- يوجد حاليًّا ما يزيد على ١٠٠ من أجهزة الاندماج (التابعة للقطاع العام وللقطاع الخاص)، إمَّا قيد التشييد أو قيد التخطيط. (المصدر: نظام المعلومات عن أجهزة الاندماج).

٦٤- ويجري الاضطلاع ببعض التجارب المحدَّدة لمعالجة المسائل المتعلقة بسلوك المواد عند التعرُّض للبلازما، وكذلك المسائل المتعلقة بالتآكل، وذلك في إطار الخطط المتعلقة بالمواد والتكنولوجيات المستحدثة مؤخراً، ومن هذه التجارب تجربة تعرُّض المواد للبلازما في المختبر الوطني في أوك ريدج في الولايات المتحدة الأمريكية، والتجارب المضطلع بها في إطار برنامج MAT الذي يتعهَّده اتحاد مختبرات الاندماج الأوروبية في أوروبا. وبالإضافة إلى ذلك، وفي ظل عدم وجود مرافق تشعيع مكرَّسة لبحوث المواد لأغراض الاندماج، يجري استخلاص النتائج الرئيسية من حملات التشعيع المضطلع بها في مفاعلات بحوث مثل المفاعل النظيري العالي الفيض التابع للمختبر الوطني في أوك ريدج، في إطار جهد تعاوني بين الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة الأمريكية واليابان.

٦٥- وقدَّم المكتب المعني بعلوم طاقة الاندماج والتابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة تمويلاً قدره ١٨ مليون دولار للعمليات ودعم المستعملين في مرافق الليزر الشديد القوة في الولايات المتحدة الأمريكية وكندا، وذلك من خلال مبادرة LaserNetUS التي أُنشئت في عام ٢٠١٨ لتزيد من إمكانية وصول العلماء في الجامعات والمختبرات الوطنية إلى هذه المرافق. وفي اليابان، تنظر اللجنة المعنية باستراتيجية الاندماج بالليزر، التي تضمُّ

نحو ٤٠ عضواً من ٢٠ مؤسسة، في تطوير نظام قائم على الليزر العالي التواتر لإجراء تحليل بالاستناد إلى البيانات لبلازما الاندماج، وكذلك اختبار التصميم الهندسي لمفاعلات الاندماج بالليزر باستخدام مصدر نيوتروني قائم على الاندماج. وفي كندا، أعلنت شركة General Fusion عن خطط لإنشاء مرفق لإيضاح تكنولوجيا الاندماج القائمة على المستهدفات الممغنطة، والتي عكفت الشركة على تطويرها على مدى السنوات العشر الماضية. وقد خاطبت الشركة هيئة الأمان النووي الكندية لطلب بدء أنشطة التواصل السابقة للترخيص لفهم الكيفية التي ستمضي بها عملية الترخيص. وتعمل هيئة الأمان النووي الكندية أيضاً على عقد مناقشات سابقة للترخيص مع الشركات الناشئة التي تسعى لإجراء أنشطة بحث وتطوير في مجال الاندماج في إطار جهود تطوير التكنولوجيا.

باء- دورة الوقود النووي

باء-١- المرحلة الاستهلالية

الحالة

٦٦- نتيجةً لتفشّي جائحة كوفيد-١٩ على الصعيد العالمي، علَّق العديد من منتجي اليورانيوم الرئيسيين عمليات الإنتاج أو خفَّضوا إنتاجهم تخفيضاً كبيراً. و يتركَّز ما يزيد على ٩٠٪ من إنتاج العالم من اليورانيوم في الاتحاد الروسي وأستراليا وأوزبكستان وكازاخستان وكندا وناميبيا (الشكل باء-١) والنيجر. ومع تراجع الإنتاج العالمي من اليورانيوم، أسفر نقص الإمداد — أي العجز الذي جرى تعويضه من الإمدادات الثانوية — عن ارتفاع سعر التسليم الفوري بنسبة ٤١٪ في الربع الأول من عام ٢٠٢٠. ورغم هذه الزيادة، فقد ظلَّ السعر دون المستوى المطلوب لإعادة تشغيل المناجم المعطَّلة أو لفتح مناجم يورانيوم جديدة. وتراجع سعر التسليم الفوري لليورانيوم بنسبة ١٥٪ تقريباً في الربع الثالث من عام ٢٠٢٠، مع استئناف أنشطة التعدين في منجم سيجار ليك الكندي (أكبر مُنتِج لليورانيوم في العالم) في أيلول/سبتمبر، عقب فترة إغلاق امتدت لخمسة أشهر بسبب الجائحة العالمية.

الشكل-باء-١ - منظر جوي لمنجم ذي حفرة مفتوحة في منجم هوساب لليورانيوم في ناميبيا.
(الصورة من: شركة Swakop Uranium)

٦٧- وفي بعض الأحيان تتطلب أنواع الوقود المتحمِّلة للحوادث أو اللازمة للتكنولوجيات المتقدمة قيد التطوير في أوروبا والاتحاد الروسي والولايات المتحدة الأمريكية واليابان مستويات مرتفعة من إثراء اليورانيوم-٢٣٥ لتعويض التراجع في الشفافية النيوترونية لمادة الكسوة المستخدمة في تلك الأنواع من الوقود. ولذلك يجري اختبار أنواع وقود قائمة على اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز، أي اليورانيوم المثرى بنسبة أكبر من ٥٪ ولكن أقل من ٢٠٪.

٦٨- وتمَّ للمرة الأولى تحميل مجمِّعات الوقود المتحمِّل للحوادث الذي أنتجته شركة Global Nuclear Fuel في مفاعل في الولايات المتحدة. ورُكِّبت مجمِّعات اختبارات أولية مزوَّدة بحلَّيْن من ابتكار الشركة في مجال الوقود المتحمِّل للحوادث، وهما كسوة الوقود المطلية بالزركونيوم المسمَّاة ARMOR وكسوة الوقود المسمَّاة IronClad، في محطة كلينتون للقوى النووية التابعة لشركة Exelon، في الولايات المتحدة الأمريكية.

٦٩- وأُنتجت أول مجمِّعات وقود نووي روسية الصنع تحتوي على قضبان وقود متحمِّلة للحوادث لأغراض المفاعلات التجارية، واجتازت هذه المجمِّعات فحص القبول في مصنع نوفوسيبيرسك للمركزات الكيميائية، وهو مرفق تصنيع خاص بشركة تصنيع الوقود TVEL التابعة للشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم". وحُمِّلت قضبان الوقود في إحدى الوحدات من طراز VVER-1000 في محطة روستوف للقوى النووية في الاتحاد الروسي.

٧٠- وبعد تركيب مجمِّعات اختبارات أولية محتوية على وقود متحمِّل للحوادث في أوائل عام ٢٠١٨ في الوحدة ١ في محطة Edwin I. Hatch للقوى النووية التابعة لشركة Southern Nuclear، أتمَّت هذه المجمِّعات دورة وقود مدتها ٢٤ شهراً، وستخضع قضبان الاختبارات الأولية الآن للاختبار. وقد خضعت القضبان لعملية فحص أولية انتهت بالفعل، وستخضع موادها وكسوتها لمزيد من التقييم في المختبر الوطني في أوك ريدج التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة.

٧١- ورُكِّبت مجمِّعات اختبارات أولية تحتوي على وقود متحمِّل للحوادث من نوع EnCore في الوحدة ٤ من محطة دويل للقوى النووية التابعة لشركة ENGIE Electrabel في بلجيكا. وتُعدُّ هذه الوحدة المفاعل التجاري الثاني في العالم، والأول في أوروبا، الذي تُركَّب فيه مجمِّعات من نوع EnCore.

٧٢- وأعلنت شركة TerraPower عن خطط للاشتراك مع شركة Centrus Energy العاملة في مجال الوقود النووي والخدمات النووية لإرساء القدرات اللازمة لإنتاج اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز محليًّا وعلى نطاق تجاري. وسيكون ذلك لازماً لتوفير الوقود للعديد من تصاميم المفاعلات من الجيل المقبل، بما في ذلك نظام Natrium لتخزين القوى الذي صمَّمته شركة TerraPower وشركة GE Hitachi للطاقة النووية.

٧٣- وانتهى المجمع التعديني والكيميائي في زيليزنوغورسك بالاتحاد الروسي من صنع أول دُفعة من وقود خليط أكسيدي اليورانيوم والبلوتونيوم (وقود موكس) (الشكل باء-٢) لإجراء عملية إعادة تحميل كاملة للوحدة ٤ في محطة ببلويارسك للقوى النووية في الاتحاد الروسي. وقد قبلت الجهة المشغلة، وهي هيئة "روزإينيرغوأتوم"، والجهة المفوَّضة بتمثيلها، وهي شركة ZAES، هذه الدفعة المؤلَّفة من ١٦٩ من مجمِّعات الوقود.

الشكل-باء-٢ - مجمّعة وقود موكس معَّدة للاستخدام في المفاعل السريع BN-800. (الصورة من: المجمع التعديني والكيميائي، الاتحاد الروسي)

٧٤- وأبرمت المختبرات النووية الكندية أربعة اتفاقات تعاون مع مطوّري تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة في إطار مبادرة البحوث النووية الكندية التي أطلقتها. وأُبرم الاتفاق الأول مع شركة USNC-Power، وهي شركة فرعية تابعة لمؤسسة USNC، بشأن إجراء بحوث لدعم المفاعل النمطي البالغ الصغر الذي تطوّره المؤسسة. وسوف يشمل المشروع إجراء بحوث تتعلق بصنع وقود مؤسسة USNC المغلف بالكامل بكبسولات خزفية دقيقة. وأُبرم الاتفاق الثاني مع شركة Moltex Energy الكائنة في المملكة المتحدة، بشأن الاضطلاع بأعمال لدعم جوانب من البرنامج الذي تتعَّهده الشركة لتطوير الوقود النووي من أجل مفاعل الأملاح المستقر الخاص بها، وهو مفاعل نمطي صغير بقدرة ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي). وأُبرم الاتفاق الثالث مع شركة Power Kairos الكائنة في الولايات المتحدة، لإجراء بحوث وتصميم تكنولوجيات من أجل تحسين فصل وتحليل وخزن التريتيوم الناتج من تشغيل المفاعل النمطي الصغير الذي اقترحت الشركة تصميمه. وأُبرم الاتفاق الرابع مع شركة Terrestrial Energy من أجل تطوير واختبار تقنيات لتتبُّع سلوك الوقود السائل المقترح الذي سيُستخدم في مفاعل الأملاح المصهورة المتكامل الذي صمَّمته الشركة.

٧٥- واختارت شركة Holtec International شركة Framatome لتوفير الوقود النووي لمفاعلها من طراز SMR-160. وأبرمت الشركتان اتفاقاً يكفل الانتهاء من جميع الأعمال الهندسية اللازمة لتشغيل المفاعل SMR-160 باستخدام وقود شركة Framatome المتاح تجاريًّا ومجمِّعة الوقود المجرَّبة جيّدا من نوع GAIA بمصفوفة 17x17.

٧٦- وبدأ تشعيع الوقود النظيري الثلاثي الهيكل الخاص بشركة X-Energy، والمسمَّى TRISO-X، في مفاعل البحوث الموجود في مختبر المفاعلات النووية التابع لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. وسوف تُستخدم البيانات التي تخلص إليها اختبارات التشعيع لدعم ترخيص مفاعل الشركة المسمَّى Xe-100 وغيره من المفاعلات القائمة على الوقود النظيري الثلاثي الهيكل.

٧٧- وأنشأت مؤسسة USNC في سولت ليك سيتي بولاية يوتاه بالولايات المتحدة الأمريكية مرفقاً جديداً لدعم تطوير تصميم من ابتكار الشركة لوقود يُسمَّى بالوقود المغلف بالكامل بكبسولات خزفية دقيقة، وهو وقود من الجيل المقبل قائم على جزيئات نظيرية ثلاثية الهيكل من أكسي كربيد اليورانيوم، يُستعاض فيه عن مصفوفات الغرافيت المستخدمة في الأنواع التقليدية من الوقود النظيري الثلاثي الهيكل بكربيد السليكون. وستُستخدم المواد التي سيستحدثها المرفق الجديد في المفاعل النمطي البالغ الصغر الذي تطوِّره المؤسسة وفي أنواع أخرى من المفاعلات النووية، بما في ذلك المفاعلات المبرَّدة بالغاز، ومفاعلات الماء الخفيف، ومفاعلات كاندو، والمفاعلات المبرَّدة بالأملاح المصهورة.

٧٨- ووُقِّع عقد مع هيئة صناعة الطاقة النووية الصينية بشأن نقل اليورانيوم الضعيف الإثراء و/أو المعدات اللازمة لتشغيل مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، مما يتيح طريقاً ثانيًا للنقل من المصرف وإليه. وقد بدأ العمل في مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، الكائن في كازاخستان، منذ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩. ويبيّن *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢* (الوثيقة GC(56)/INF/3) الآليات الأخرى المعمول بها لضمان الإمداد.

الاتجاهات

٧٩- على وجه الإجمال، انخفضت إمدادات اليورانيوم الأولية في عام ٢٠٢٠، مع توقُّع أن تبلغ كمية الإنتاج نحو ٥٠٠ ٤٦ طن. ويمثِّل ذلك نحو ٦٩٪ من الطلب العالمي على اليورانيوم، وهو ما شكَّل مزيداً من الضغط على إمدادات اليورانيوم الثانوية من أجل تلبية الطلب على اليورانيوم لاستخدامه وقوداً نوويًّا.

٨٠- وحتى يتسنَّى ضمان توفير إمدادات مستدامة من الوقود النووي لمحطات القوى النووية الموجودة حاليًّا والتي ستوجد في المستقبل، سيحتاج العالم إلى المزيد من مناجم اليورانيوم. وبناءً على السجلات التاريخية، فإنَّ قلَّة قليلة من مكامن اليورانيوم المكتشفة هي التي يُتوقَّع أن تصل إلى مرحلة التعدين والإنتاج بسبب وجود قيود اقتصادية أو تقنية أو بيئية أو اجتماعية. ومن ثمَّ فلا بدَّ من الابتكار لبدء مرحلة الإنتاج في مكامن اليورانيوم القريبة من تلك المرحلة. وكان أحد أمثلة ذلك الابتكار في صناعة تعدين اليورانيوم في عام ٢٠٢٠ التقييم الجاري لتكنولوجيات الاستخراج الموقعي للخام العالي الجودة من المكامن المكونة من رواسب من النوع الناشئ عن عدم توافق طبقات الأرض.

٨١- ومن الابتكارات المهمة الأخرى أساليب النضِّ البيولوجي التي يجري تطويرها لتُستخدم في الاستخراج الموقعي لليورانيوم من مكامنه المكونة من رواسب من نوع الحجر الرملي. وتعكف الصين على إجراء بحوث بشأن هذه التكنولوجيا على مدى العقد الماضي من أجل تحسين الاستخراج والاستصلاح في هذا النوع من مكامن اليورانيوم.

٨٢- ويُعتبر استخدام الوقود القابل للحرق بمعدلات عالية في أسطول محطات القوى النووية القائمة خياراً لتحسين استدامة دورة الوقود النووي، بالنظر إلى أنَّ الاستهلاك السنوي من اليورانيوم الطبيعي ينخفض كلما ارتفع معدَّل الحرق الذي يتمُّ عنده تفريغ الوقود.

باء-٢- المرحلة الختامية

الحالة

٨٣- بحسب التعقيبات الواردة من شبكة الخبرات المكتسبة في مجال تشغيل محطات القوى النووية في ظل جائحة كوفيد-١٩، التي أنشأتها الوكالة، فإنَّ تشغيل مرافق خزن الوقود المستهلك لم يتأثر كثيراً بالجائحة، إلا فيما يتعلق بفترات انقطاع التشغيل المتصلة بالوقود التي أدَّت إلى حدوث تأخير في بعض الحالات. وتتراكم كميات الوقود المستهلك المخزَّنة حول العالم بمعدل يقارب ٠٠٠ ٧ طن من الفلزات الثقيلة سنويًّا، في حين يقترب الرصيد المخزون من ٠٠٠ ٣٠٠ طن من الفلزات الثقيلة.

٨٤- وأُزيل وقود موكس المستهلك من محطة إيكاتا للقوى النووية، في أول عملية من نوعها تُجرى في اليابان، وأُزيل بعدها بشهر من محطة تاكاهاما للقوى النووية. وسوف تُخزَّن قضبان وقود موكس مؤقتاً في حوض تبريد. وتضطلع حكومة اليابان بأنشطة بحث وتطوير فيما يتعلق بإعادة معالجة هذا الوقود المستهلك، وفقاً لسياستها في مجال الطاقة.

٨٥- والتحدي الرئيسي الذي تواجهه البلدان التي لديها برامج راسخة للقوى النووية والتي تسعى إلى الأخذ باستراتيجيات قائمة على دورات الوقود المفتوحة هو تناقص السعة المتاحة لخزن الوقود النووي المستهلك في الموقع وتزايد مدَّة التخزين (أكثر من ١٠٠ سنة).

٨٦- وصدرت في كانون الثاني/يناير ٢٠٢٠ الموافقة على زيادة سعة الخزن الجاف في محطة ولسونغ للقوى النووية في جمهورية كوريا، وهو ما مثَّل خطوة مهمة، بالنظر إلى أنَّ السعة التخزينية القائمة كانت قد أوشكت على النفاد.

٨٧- وأصدرت الهيئة الرقابية النووية مسودة لتقييم الأثر البيئي لمرفق الخزن المؤقَّت المركزي المعتزم إنشاؤه في ولاية نيومكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية.

٨٨- وشهدت محطة القوى النووية المغلقة في إغنالينا في ليتوانيا تسليم آخر براميل الخزن الجاف للوقود النووي المستهلك، قبل الموعد المقرَّر بسنة واحدة، وبذلك تكون المحطة قد بلغت طاقتها الكاملة فيما يتعلق بالتصرُّف في الوقود النووي المستهلك وخزنه في الموقع، بما يشمل كلَّ الوقود المستهلك المتأتي من مفاعلَي المحطة من طراز RBMK-1500.

الاتجاهات

٨٩- تنسِّق الوكالة أنشطة بحوث تهدف إلى تحسين فهم تطوُّر سلوك الوقود النووي المستهلك في سياق نظم خزن متعدِّدة، وكذلك فهم الآليات التي تؤدي إلى التقادم والتدهور في نظم الخزن نفسها. وسوف يساعد ذلك على ضمان إمكانية الاستمرار في تخزين الوقود النووي المستهلك بطريقة مأمونة إلى حين نقله إلى مرافقة أخرى للتخلُّص منه أو إعادة معالجته.

٩٠- وبمرور الوقت، أدَّت مكاسب الكفاءة التي تحقَّقت في مجال إدارة المفاعلات النووية إلى تقليل كمية الوقود النووي المستهلك التي تُفرَّغ من المفاعلات النووية. بيد أنَّ ذلك يتطلب استخدام أنواع وقود مُثراة إلى مستويات مبدئية أعلى وذات معدلات حرق أعلى، بما يؤدي إلى ارتفاع الحرارة المتبقية وزيادة مخاطر تقصُّف الكسوة، وقد يكون لذلك تأثير في خطوات التصرُّف في الوقود النووي المستهلك.

٩١- وسوف تُنشر في المستقبل القريب تصاميم وقود جديدة تنطوي على مستويات إثراء أعلى تصل إلى ٨٪ وعلى استخدام مواد كسوة مطلية، وهو ما يمكن أن يطرح تحديات محتملة على نظم الخزن القائمة، حيث سيتعيَّن فهم سلوك هذه التصاميم الجديدة في الأجل الطويل حتى يتسنى إجراء تحليل سليم لأمان جميع خطوات التصرُّف في الوقود النووي المستهلك، بما في ذلك خزنه ونقله والتخلُّص منه.

٩٢- ويُعتبر الوقود المستهلك من الموارد القيّمة للطاقة في بعض البلدان، والتطورات في مجال تكنولوجيات إعادة التدوير جارية على قدم وساق. وتخضع للإيضاح حاليًّا عمليات متقدِّمة لإعادة تدوير البلوتونيوم لعدَّة مرات (العمليتان CORAIL وMIX في فرنسا، والعملية REMIX في الاتحاد الروسي) في مفاعلات الماء الخفيف، بهدف التمكين من التحوُّل إلى استراتيجيات لإعادة تدوير البلوتونيوم لعدَّة مرات في المفاعلات السريعة. ومن المتوقع أن يؤدي استخدام الوقود المعاد تدويره إلى زيادة الفعالية في استخدام الموارد الطبيعية، والتقليل من كمية النفايات النووية الناتجة ومن سميَّتها الإشعاعية، وخفض مخاطر الانتشار.

جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة

جيم-١- الإخراج من الخدمة

الحالة

٩٣- في عام ٢٠٢٠، خضعت ستة من مفاعلات القوى النووية للإغلاق الدائم، وهي: الوحدتان ١ و٢ في محطة فاسينهايم في فرنسا، والمفاعل Leningrad-2 في الاتحاد الروسي، والمفاعل Ringhals 1 (وهو مفاعل ماء مغلي بقدرة ٨٨١ ميغاواط (كهربائي)) في السويد والمفاعل Duane Arnold-1 والمفاعل Indian Point 2 في الولايات المتحدة الأمريكية. وهذا العدد أقلُّ من عدد المفاعلات التي أُنهي تشغيلها في عام ٢٠١٩ البالغ ١٣ مفاعلاً. وفي نهاية عام ٢٠٢٠، كان مجموع عدد المفاعلات التي أُغلقت أو كانت قيد الإخراج من الخدمة قد بلغ ١٧١ مفاعلاً. ومن بين هذه المفاعلات، كان عدد المفاعلات التي اكتمل إخراجها من الخدمة ٢٠ مفاعلاً. وكان هناك أيضاً ١٥٨ من مرافق دورة الوقود النووي و١٢٥ من مفاعلات البحوث قيد الإغلاق الدائم أو الإخراج من الخدمة حول العالم. في حين كان هناك ١٣١ من مرافق دورة الوقود و٤٤٦ من مفاعلات البحوث التي اكتمل إخراجها من الخدمة.

٩٤- وتوجد في ألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية واليابان أكبر برامج جارية لإخراج محطات القوى النووية من الخدمة. حيث يوجد لدى ألمانيا ٢٦ محطة قوى نووية قيد الإخراج من الخدمة، في حين ستخضع محطات القوى النووية العاملة المتبقية، البالغ عددها ٦ محطات، للإغلاق الدائم بحلول نهاية عام ٢٠٢٢. وبدأت عمليات الإخراج من الخدمة في الوحدة B في محطة غوندرمينغن والوحدة ٢ في محطة فيليبسبورغ، عقب الحصول على رخصتي الإخراج من الخدمة خلال عام ٢٠١٩. وقد أسفرت الهزة الأرضية والتسونامي الكبيرين اللذين ضربا شرق اليابان في عام ٢٠١١ عن إخضاع نسبة كبيرة من أسطول اليابان النووي للإغلاق الدائم. وفي عام ٢٠٢٠، ومن بين محطات القوى النووية التجارية الموجودة في اليابان والبالغ عددها ٦٠ محطة، كانت ٢٤ محطة إمَّا قد خضعت للإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة بالفعل. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، حيث خضعت عدَّة مفاعلات للإغلاق الدائم خلال العقد الماضي لأسباب تتعلق بعدم تحقيق أرباح، توجد برامج جارية لإخراج ١٨ مرفقاً من الخدمة. ومن بين هذه المرافق، كانت هناك سبعة مرافق تتبع استراتيجية قائمة على التفكيك الفوري، وسبعة قيد التطويق المأمون، وأربعة في طور الانتقال من التطويق المأمون إلى التفكيك الفوري. وهناك ثلاث محطات في الولايات المتحدة من المقرَّر أن يكتمل إخراجها من الخدمة في عام ٢٠٢٠، وهي: محطة لا كروس (بولاية ويسكونسين)، ومحطة همبولدت باي (بولاية كاليفورنيا)، ومحطة زايون (بولاية إلينوي).

٩٥- وأُحرز تقدُّم مهم في مشروعي الإخراج من الخدمة في تشرنوبل وفوكوشيما. وبدأت في أيلول/سبتمبر ٢٠٢٠ الاختبارات الساخنة في مرفق خزن الوقود النووي المستهلك المؤقت الجديد (الشكل جيم-١) الملاصق

لمحطة تشـرنوبل للقوى النووية، في حين بدأ تشـغيل مرفق رفع الرقابة عن النفايات، والذي تبلغ قدرته عشـرة أطنان يوميًّا.

الشكل-جيم-١ - أول عبوة مدرَّعة بجدار مزدوج ومعبَّأة بـ٩٣ من مجمِّعات الوقود المحتوية على وقود مستهلك، أثناء مغادرتها مرفق معالجة الوقود المستهلك لوضعها في مرافق للتخزين لمدَّة مائة سنة. (الصورة من: المؤسسة الحكومية المتخصِّصة المعنية بإدارة محطة تشرنوبل للقوى النووية)

٩٦- وأفادت اليابان بالانتهاء تماماً في آب/أغسـطس ٢٠٢٠ من معالجة المياه ذات المحتوى المخفَّض من السـترنشـيوم، التي كانت مخزنة في السـابق في صـهاريج إلى حين معالجتها باسـتخدام النظام المتقدم لمعالجة السوائل، وأنَّ الصهاريج سيُعاد استخدامها لتخزين تلك المياه بعد معالجتها. ولا تزال حكومة اليابان تنظر في عدَّة خيارات للتصـرف في المياه بعد معالجتها باسـتخدام النظام المذكور، بما في ذلك إطلاقها في شـكل بخار أو تصريفها في البحر، بيد أنَّ الحكومة لم تتَّخذ قراراً نهائيًّا بعد.

٩٧- وفي فرنسـا، تقدَّمت جهود الإخراج من الخدمة في موقع لاهاغ (الشـكل جيم-٢)، حيث يجري تفكيك محطة UP2-400 لإعادة المعالجة، التابعة لشـركة أورانو. وبدأت أفرقة العمليات اسـترجاع ٦٠٠ طن من نفايات الغرافيت والمغنسيوم القديمة المخزَّنة في صوامع خرسانية، بالاستعانة بنظام فرز يستخدم تكنولوجيا قائمة على الذكاء الاصطناعي، في حين تواصلت أنشطة التفكيك في المحطة الرئيسية. واكتملت عملية تفكيك ورشة الإعداد النهائي للبلوتونيوم. واسـتُهلت عمليتان أُخريان لتفكيك وعاء الإذابة الثاني في مبنى الإذابة والاسـتخلاص سـابقاً، ولتفكيك الخلايا السـاخنة الميكانيكية في ورشـة صـنع مصـادر السـيزيوم سـابقاً. وكانت الخلايا الكيميائية في هذه الورشة قد تمَّ تفكيكها خلال السنوات الثلاث السابقة باستخدام معدات يجري تشغيلها عن بُعد.

الشكل- جيم-٢ - منظر جوي لموقع شركة أورانو في لا هاغ بمنطقة نورماندي في فرنسا. (الصورة من: شركة أورانو)

٩٨- وبدأت هيئة كهرباء فرنسا تشييد مرفق إيضاحي لعملية إخراج مفاعلات الغرافيت من الخدمة. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل ذلك المرفق بحلول عام ٢٠٢٢ لتيسير اختبار التكنولوجيات المستعملة في تفكيك المفاعلات المهدَّأة بالغرافيت. وفي الاتحاد الروسي، كانت الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" تخطِّط للأخذ بخيار الإقبار كاستراتيجية للإخراج من الخدمة فيما يخصُّ ما لديها من مفاعلات اليورانيوم المبكِّرة المهدَّأة بالغرافيت على سبيل الاستثناء، وهي بصدد تشييد مركز إيضاحي لاختبار هذا النهج. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل ذلك المرفق بحلول عام ٢٠٢١.

٩٩- وبدأت شركة سوغين، المملوكة للحكومة الإيطالية والمسؤولة عن أنشطة الإخراج من الخدمة، الأنشطة الأولية لإخراج مفاعل البحوث ISPRA-1 من الخدمة في موقع مركز البحوث المشترك التابع للمفوضية الأوروبية.

الاتجاهات

١٠٠- في حين كان التفكيك المؤجل هو الخيار الغالب بين مالكي المرافق خلال العقود السابقة فيما يتعلق بالاستراتيجية المعتمدة للإخراج من الخدمة، فقد بدأت الكفة تميل لصالح اتباع نهج قائم على التفكيك الفوري. وبالإضافة إلى ذلك، يتزايد تقديم المواعيد المحدَّدة لبدء التفكيك النهائي للمحطات التي أُنهيت خدمتها، مع تغيير الاستراتيجية المعتمدة في عدد من الحالات من التفكيك المؤجل إلى التفكيك الفوري. ويرجع هذا التغيير إلى الرغبة في الحدِّ من أوجه عدم اليقين بشأن تكاليف الإخراج من الخدمة.

١٠١- وثمَّ حضور متزايد للاتحادات المتخصِّصة في الإخراج من الخدمة والتصرُّف في النفايات، والتي تسعى إلى تنفيذ مشاريع الإخراج من الخدمة بالكامل. وعلى سبيل المثال، فهناك حالات حديثة في الولايات المتحدة

الأمريكية جرى فيها نقل المسؤولية عن الحصول على الرُّخص وكامل الأموال المخصَّصة للإخراج من الخدمة من شركة المرافق العامة إلى اتحاد متخصِّص في الإخراج من الخدمة يتحمَّل، بدوره، المسؤولية الكاملة عن تنفيذ المشروع.

١٠٢- ومن الاتجاهات الأخرى تزايُد استخدام الرقمنة والروبوتيات والأتمتة، لأغراض منها التخطيط والمحاكاة وإدارة أنساق المحطات وإدارة المعارف، وكذلك لدعم تنفيذ عمليات استعادة النفايات المشعة وتحديد الخصائص والتفكيك.

١٠٣- وفي حالات عديدة، يؤدي عدم توافر حل للتخلص النهائي من الوقود النووي المستهلك أو عدم وجود مستودع للنفايات المشعة إلى إيجاد عقبة أمام التقدُّم في عملية الإخراج من الخدمة. ونتيجةً لذلك، فقد صار من التدابير التي تُستخدم على نطاق واسع تشييد مرافق لخزن الوقود المستهلك والنفايات المشعة داخل مواقع المرافق المقرَّر إخراجها من الخدمة أو على مقربة منها، للتمكين من المضي قدماً في عملية الإخراج من الخدمة حتى في الأحوال التي لا تتوفر فيها مرافق للتخلص النهائي من هذه المواد. وعلى سبيل المثال، تتولى شركة BGZ للخزن المؤقت في ألمانيا المسؤولية الكاملة عن الخزن الطويل الأجل للوقود المستهلك والنفايات المشعة، بحيث يمكن تفكيك المرافق في أقرب وقت ممكن عمليًّا.

جيم-٢- الاستصلاح البيئي

الحالة

١٠٤- لم يشهد عام ٢٠٢٠ سوى أنشطة استصلاح محدودة بسبب جائحة كوفيد-١٩. ومع ذلك، فقد تواصلت أعمال الاستصلاح في المواقع التي تشكِّل مخاطر كبيرة على البشر أو البيئة، أو في الحالات المنطوية على إمكانية إعادة استغلال الموقع اقتصاديًّا.

١٠٥- وبدأت أعمال الاستصلاح في موقع شيكافتار في قيرغيزستان، بعد إغلاق ستة مَهاوٍ ونقل خمسة مواقع مخصَّصة لصخور النفايات إلى موقع قائم مخصَّص لصخور النفايات في مكان أبعد. ومن المقرَّر إزالة ما يقرب من ٧٠٠ ٠٠٠ متر مكعَّب من النفايات الناتجة عن عمليات التعدين والموجودة في أماكن حول القرية المحلية، ووضعها في حالة مستقرة في موقع جديد لضمان حماية الناس والبيئة. وهذه الأعمال ممولَّة من خلال حساب الاستصلاح البيئي لآسيا الوسطى لدى المصرف الأوروبي للإنشاء والتعمير، وهي تشكِّل جزءاً من إطار أوسع نطاقاً هو الخطة الرئيسية الاستراتيجية للاستصلاح البيئي لمواقع إنتاج اليورانيوم القديمة في آسيا الوسطى. وخلال عام ٢٠٢٠، تواصل على النحو المقرَّر تنفيذ مشاريع الاستصلاح في طاجيكستان (التل الأصفر وأكوام المخلفات من ١ إلى ٤ في منطقة استقلال) وقيرغيزستان (موقع مين-كوش)، والجاري تنفيذها في إطار برنامج الاستصلاح الحكومي الدولي لرابطة الدول المستقلة.

١٠٦- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، اكتملت إزالة الألواح المتبقية من المباني في موقع محطة أوك ريدج للانتشار الغازي سابقاً (الشكل جيم-٣)، وهو ما سيمكِّن من إجراء عملية الموافقة الرقابية اللازمة لرفع الرقابة عن الموقع وتركه للمجتمع المحلي للاستفادة منه في التنمية الاقتصادية. وسوف يؤدي الانتهاء من هذه الأعمال إلى رفع الرقابة عن مساحة تزيد على ٥٠٠ هكتار من الأرض ليُعاد استخدامها في إطار مشروع حديقة مشروع مانهاتن التاريخية الوطنية.

الشكل- جيم-٣ - أعمال الإصلاح الجارية في الموقع الذي كان معروفاً باسم محطة أوك ريدج للانتشار الغازي في أوك ريدج بولاية تينيسي بالولايات المتحدة الأمريكية. (الصورة من: وزارة الطاقة في الولايات المتحدة)

الاتجاهات

١٠٧- استمر التركيز على تكنولوجيات تحديد الخصائص والرصد لدعم الانتقال إلى الإدارة والرقابة في الأجل الطويل، باعتبار أن ذلك هو الحلُّ الأمثل فيما يخصُّ العديد من المواقع.

١٠٨- وكان الاتجاه الرئيسي الذي لوحظ في عام ٢٠٢٠ هو تزايد تطبيق مفهوم الاقتصاد الدائري في مجال إدارة مخلفات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية. وينصبُّ التركيز في هذا السياق على المصادر الثانوية القابلة لإعادة الاستخدام بهدف المحافظة على المصادر الأولية. ومن الأمثلة المهمة لهذا الاتجاه الإذن الذي أصدرته مؤخراً وكالة حماية البيئة بالولايات المتحدة للسماح باستخدام الجص الفوسفوري في المشاريع الحكومية لإنشاء الطرق. وسوف يتطلب التوسُّع في استخدام النُّهج المشابهة إقامة شراكات بنَّاءة يمكن أن تتمخَّض عن حلول ابتكارية تعالج أيضاً الأبعاد الاجتماعية والرقابية.

١٠٩- ونُفِّذت أول عملية تحليق تجريبية في إطار مشروع استكشاف ورصد مواقع اليورانيوم القديمة عن طريق قياس طيف أشعة غاما باستخدام مركبة جوية بلا طيار. وهذا المشروع البحثي ممولٌ من الوزارة الاتحادية للتعليم والبحوث في ألمانيا، وهو يهدف إلى دعم تحديد خصائص مواقع إنتاج اليورانيوم القديمة في آسيا الوسطى. وعموماً، فقد انصبَّ التركيز في استخدام الطائرات الصغيرة بلا طيار المحمَّلة بأجهزة صغيرة نسبيًّا لقياس طيف أشعة غاما على مسح المناطق الملوَّثة. بيد أن هناك بحوثاً جارية لاستخدام هذه التوليفة لدراسة المستويات المنخفضة من التلوث الإشعاعي. ولأغراض النظم الجديدة، سوف يُستكشف استخدام كاشفات أكبر حجماً، وطائرات بلا طيار قادرة على التحليق بأوزان أثقل تصل إلى ٢٥ كيلوغراماً، وبلورات وميض مصنوعة من مواد جديدة مثل بروميد السيريوم. وسوف يؤدي تطوير هذه التكنولوجيا إلى تيسير المسح السريع للتلوث الإشعاعي في المناطق الجبلية التي قد يصعب الوصول إليها وعبورها، أو في المناطق الشاسعة، التي يمكن أن يستغرق مسحها وقتاً طويلاً في الأحوال العادية.

١١٠- ويُسترشد بالخبرات المكتسبة في الصناعة النووية بشأن التعامل مع المواد الملوثة في توجيه جهود الصناعات الأخرى للتعامل مع المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية. وعلى سبيل المثال، يُعدُّ مجال إخراج منصات استخراج النفط والغاز من الخدمة من التطورات الرئيسية في نطاق الأنشطة الصناعية المتعلقة بالمواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية. وهناك نحو ١٨٨٥ منصة إنتاج عاملة في الجرف القاري الخارجي للولايات المتحدة الأمريكية، منها ما يزيد على ٦٠٪ يتجاوز عمرها ٢٥ عاماً. ومن المقدَّر أنَّه في غضون الفترة بين عامي ٢٠١٦ و٢٠٢١، سيكون نحو ٦٠٠ من الأصول الموجودة في عرض البحر على الصعيد العالمي قد أُخرج من الخدمة .

جيم-٣- التصرُّف في النفايات المشعة

الحالة

١١١- استمر إحراز أوجه تقدُّم كبيرة فيما يتعلق بتطوير مرافق التخلُّص الجيولوجي العميق اللازمة للتصرف في النفايات القوية الإشعاع والوقود المستهلك المعلن عنه باعتباره من النفايات. وشمل ذلك تحسين الإلمام بالموارد المطلوبة والتخطيط لها مبكراً، مثل تصميم نُهج تحديد المواقع وتنفيذها بالاستناد إلى التطورات العلمية والتقنية، وإشراك الجهات المعنية، وتوفير هذه الموارد بصورة مستدامة.

١١٢- وأنشأت الإمارات العربية المتحدة صندوقاً استئمانيًّا مكرَّساً لمسؤوليات التصرف في النفايات في المستقبل، لتكون أول بلد يضع ترتيبات تمويل من هذا القبيل قبل توصيل أول محطة للقوى النووية بشبكته الكهربائية.

١١٣- وأعلنت حكومة أستراليا عن إنشاء الوكالة الأسترالية المعنية بالنفايات المشعة، مما يمثِّل الخطوة المهمة التالية في إرساء قدرات أستراليا في مجال التصرف في النفايات المشعة. وسوف تعمل الوكالة الأسترالية المعنية بالنفايات المشعة مع الجهات المعنية مثل قطاع الصناعة والمجتمع المحلي والوكالات الحكومية من أجل التصرف في النفايات المشعة على الوجه الأمثل. وأوصت اللجنة الدائمة للشؤون الاقتصادية في مجلس الشيوخ في أستراليا بأن يقرَّ البرلمان الأسترالي مشروع التعديل المتعلق بالتصرُّف في النفايات المشعة على المستوى الوطني (تحديد مواصفات المواقع، وصندوق المجتمعات المحلية، وتدابير أخرى) لسنة ٢٠٢٠. وينصُّ ذلك التشريع على اتِّخاذ ناباندي في جنوب أستراليا موقعاً لمرفق يُنشأ في المستقبل للتصرُّف في النفايات الضعيفة الإشعاع والمتوسطة الإشعاع.

١١٤- وأجرت الوكالة البلجيكية للنفايات المشعة والمواد الانشطارية المثراة مشاورة عامة بشأن الخطة الوطنية المقترحة للتخلُّص النهائي من النفايات المشعة القوية النشاط و/أو الطويلة العمر، والتي توصي باستخدام التخلُّص الجيولوجي.

١١٥- وأبلغت الهيئة الفنلندية للأمان الإشعاعي والنووي السلطات في البلدان التي ورَّدت اليورانيوم إلى محطات القوى النووية الفنلندية بأنَّ فنلندا تعتزم بدء التخلص النهائي من الوقود النووي المستعمل في أواسط العشرينات من هذا القرن. وحيث إنَّه لا يمكن إجراء عمليات التفتيش العادية على المواد النووية بعد التخلص منها، يجب تحديد الإجراءات المتعلقة بتلك العمليات قبل بدء التخلص النهائي. ومن المقرر أن تبدأ في عام ٢٠٢٤ عمليات التخلُّص في مرفق أونكالو للتخلُّص في فنلندا، الجاري تشييده على عمق ٤٠٠ متر تحت الأرض (الشكل جيم ٤). وتعكف السويد وفرنسا على إجراء عملية الترخيص للتخلص الجيولوجي العميق في المواقع

المحددة لذلك الغرض. وهناك عدَّة بلدان أخرى تحرز تقدُّما تدريجيًّا فيما لديها من مشـــاريع التخلص الجيولوجي العميق، ومن هذه البلدان سويسرا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان.

الشكل-جيم-٤- من المزمع أن تبدأ في عام ٢٠٢٤ عملية التخلُّص في مرفق أونكالو للتخلُّص في فنلندا. وقد قام المدير العام للوكالة السيد رافائيل ماريانو غروسي بزيارة إلى أونكالو في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠٢٠.
(الصورة من: شركة TVO، تاباني كاريانلاهتي)

١١٦- وفي المملكة المتحدة، نشـرت الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة مسـودة اسـتراتيجية بشـأن التصـرف في النفايات المشـعة والإخراج من الخدمة والاسـتصـلاح البيئي في جميع المواقع القديمة. وعلى مدى ١٢ أسـبوعا من المشـاورات العامة، دُعيت جميع الجهات المعنية لتقديم تعليقاتها وأسـئلتها وتعقيباتها بشـأن المسوَّدة. وأعلنت الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة أيضاً عن إنشاء فريق عامل في كوبلاند في مقاطعة كمبريا، لمناقشة التطورات والفرص المتعلقة بمرفق التخلص الجيولوجي مع المجتمعات المحلية، في خطوة أولى من عملية متعدِّدة السـنوات لتحديد موقع المرفق بناء على قبول الجمهور. وبالإضـافة إلى ذلك، بدأ تشـييد مرفق مرن في موقع وينفريث التابع لشركة Tradebe Inutec لمعالجة النفايات ذات الإشعاع الضعيف والمتوسط القريب من الضعيف.

١١٧- وأوصـت الجمعية التعاونية الوطنية للتخلص من النفايات المشـعة في سـويسـرا بتشـييد محطة لتغليف الوقود المسـتهلك إمَّا في المسـتودع الوطني المزمع إنشـاؤه في المسـتقبل أو في مرفق تسـفيلاغ للخزن المؤقت الكائن في فيورنلنغن (مرفق تسفيلاغ) (الشكل جيم-٥).

الشكل-جيم-٥- تُستخدم قاعة خزن البراميل في مرفق تسفيلاغ في سويسرا لتخزين النفايات القوية الإشعاع المزجَّجة الناشئة من محطات إعادة المعالجة ومكونات الوقود المستهلك الناشئة من محطات القوى النووية السويسرية. (الصورة من: مرفق تسفيلاغ)

١١٨- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، وافقت وزارة الطاقة على بدء العمليات التشغيلية في مرفق إعادة معالجة نفايات الأملاح في موقع سافانا ريفر، من أجل معالجة النفايات السائلة العالية النشاط المخزَّنة في صهاريج.

١١٩- واتَّخذت ألمانيا الخطوة الأولى في إطار عملية وطنية لاختيار موقع للتخلص من النفايات القوية الإشعاع، حيث نشرت قائمة بالمناطق التي يمكن أن تكون مناسبة لذلك الغرض. وأعدَّت الشركة الاتحادية للتخلص من النفايات المشعة هذه القائمة كما أعدَّت إجراءات عملية الفرز، ومن ثمَّ حدَّدت ٩٠ منطقة تغطي نحو ٥٤٪ من مساحة البلاد الإجمالية ويُعتبر أنَّها يمكن أن تكون مناسبة من الناحية الجيولوجية، بحسب معايير اختيار المواقع والنهج المستند إلى المعارف العلمية الذي نصَّ عليه قانون ألماني صدر في عام ٢٠١٧.

١٢٠- واستهلت هيئة التصرف في النفايات النووية باليابان استقصاء للأدبيات فيما يخصُّ بلديتين في هوكايدو، وهما بلدة سوتو وقرية كاموياناي، لتقييم ما إذا كان يوجد فيهما موقع يمكن أن يكون مناسباً لمستودع جيولوجي عميق، بما يمثِّل الخطوة الأولى في عملية تحديد موقع ذلك المرفق. واتَّخذت بلدة سوتو قراراً بطلب إجراء استقصاء الأدبيات، وقبلت قرية كاموياناي اقتراح الاستقصاء الذي قدَّمته الحكومة الوطنية.

١٢١- وحصلت هيئة التصرف في النفايات النووية في كندا على مساحة تزيد قليلاً على ٦٠٠ هكتار من الأرض لإجراء دراساتها في بلدية ساوث بروس، أونتاريو، وهي إحدى منطقتين محتملتين مشمولتين بعملية تحديد المواقع التي تجريها كندا لاختيار الموقع الذي سيستضيف مستودع جيولوجي عميق للتخلُّص من الوقود النووي المستعمل في البلاد. واستهلت الحكومة الاتحادية أيضاً عملية تواصل شاملة للجميع من أجل تحديث السياسة المعمول بها في كندا بشأن النفايات المشعة.

الاتجاهات

١٢٢- يشهد مجال التعاون الدولي تركيزاً متزايداً على أنشطة البحث والتطوير والإيضاح العملي التي تتناول مواضيع متصلة بالتصرف في النفايات المشعة. وقد أُحرز تقدُّم في هذا الميدان في عدد كبير من بلدان الاتحاد الأوروبي بفضل الالتزام الواقع على هذه البلدان بالامتثال للتوجيه الأوروبي بشأن النفايات.

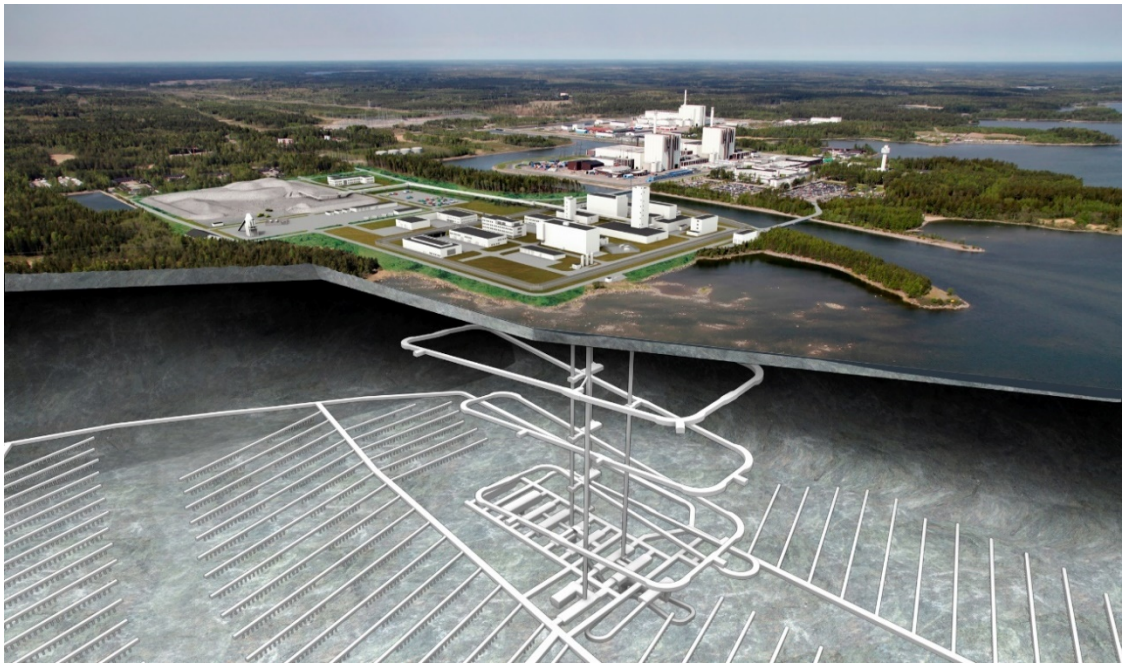
١٢٣- وأصدرت المنصة التكنولوجية لتنفيذ التخلص الجيولوجي من النفايات المشعة، وهي اتحاد مموَّل ذاتيًّا يضمُّ مجموعة من المنظمات المعنية بالتصرف في النفايات المشعة والتي تتعاون بشأن مواضيع البحث والتطوير والإيضاح العملي ذات الاهتمام المشترك، صيغةً محدَّثة من خطتها البحثية الاستراتيجية، تركِّز فيها على تحقيق الكفاءة في تنفيذ مستودعات التخلص الجيولوجي العميق في المستقبل وتحويله إلى عملية صناعية، وكذلك على تطوير مفاهيم إضافية قابلة للتطبيق على مخزونات النفايات الأصغر حجماً.

١٢٤- وأعدَّ البرنامج الأوروبي المشترك بشأن التصرف في النفايات المشعة (برنامج EURAD) خريطة طريق شاملة وعرضها على المستعملين النهائيين المهتمين. وتُرسي خريطة الطريق نهجاً منظَّماً لتحقيق مجموعة من المقاصد النهائية في سياق التصرف في النفايات المشعة، بما في ذلك تحليل الثغرات والاحتياجات الإضافية من أنشطة البحث والتطوير والإيضاح العملي، وإجراء الدراسات الاستراتيجية مع التركيز على التصرف في المخزونات الأصغر حجماً، وإدارة المعارف، كما تسلِّط الضوء على أهمية التدريب ونقل المعارف.

١٢٥- وأطلق الاتحاد الأوروبي مشروع التصرف في النفايات المشعة تمهيداً للتخلص منها (مشروع PREDIS)، الذي يركِّز على أنشطة البحث والتطوير والإيضاح العملي اللازمة في سياق المعالجة والتكييف تمهيداً للتخلص فيما يتعلق بتدفقُّات النفايات التي ليست وقوداً نوويًّا ولا نفايات قوية الإشعاع.

١٢٦- وأطلق الفريق العامل المعني بإنشاء منظمة أوروبية لتطوير المستودعات مشروعاً تعاونيًّا بمشاركة الدانمرك وسلوفينيا وكرواتيا والنرويج وهولندا لتنسيق الجهود المبذولة من أجل تقييم إمكانية التطبيق العملي للتخلُّص داخل حُفر السبر من مخزونات النفايات القوية الإشعاع.

١٢٧- ويشكِّل العدد المتزايد من قصص النجاح اتجاهاً تمكينيًّا في مجال التصرف في النفايات. وفي السويد، صوَّت مجلس بلدية أوستهامار بتأييد خطة إنشاء مستودع للتخلص من الوقود النووي المستهلك في فورسمارك (الشكل جيم-٦)، ستتولى تشييده الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية (SKB). والقرار النهائي بشأن الإذن بتنفيذ هذا المشروع في يد الحكومة السويدية.



الشكل-جيم-٦ - رسم من إعداد فنان لمرفق التخلص من النفايات تحت الأرض في فورسمارك. (المصدر: الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية SKB)

١٢٨- وفي فرنسا، حصلت هيئة كهرباء فرنسا على رخصة تشغيل مرفق تكييف وخزن النفايات النشطة، مما يمكِّنها من تكييف النفايات المشعة وخزنها تمهيداً للتخلص منها في المستقبل عن طريق المجموعة الشاملة من حلول التخلص التي يجري إعدادها في البلاد.

١٢٩- ورشح ما يقرب من ٤٢ دولة عضواً منسقاً قطريًّا لنظام المعلومات عن الوقود المستهلك والنفايات المشعة، في حين بلغ عدد الدول الأعضاء التي كانت في آخر عام ٢٠٢٠ أطرافاً متعاقدة في الاتفاقية المشتركة بشأن أمان التصرف في الوقود المستهلك وأمان التصرف في النفايات المشعة ٨٣ دولة عضواً.

دال- مفاعلات البحوث ومعجِّلات الجسيّمات

دال-١- مفاعلات البحوث

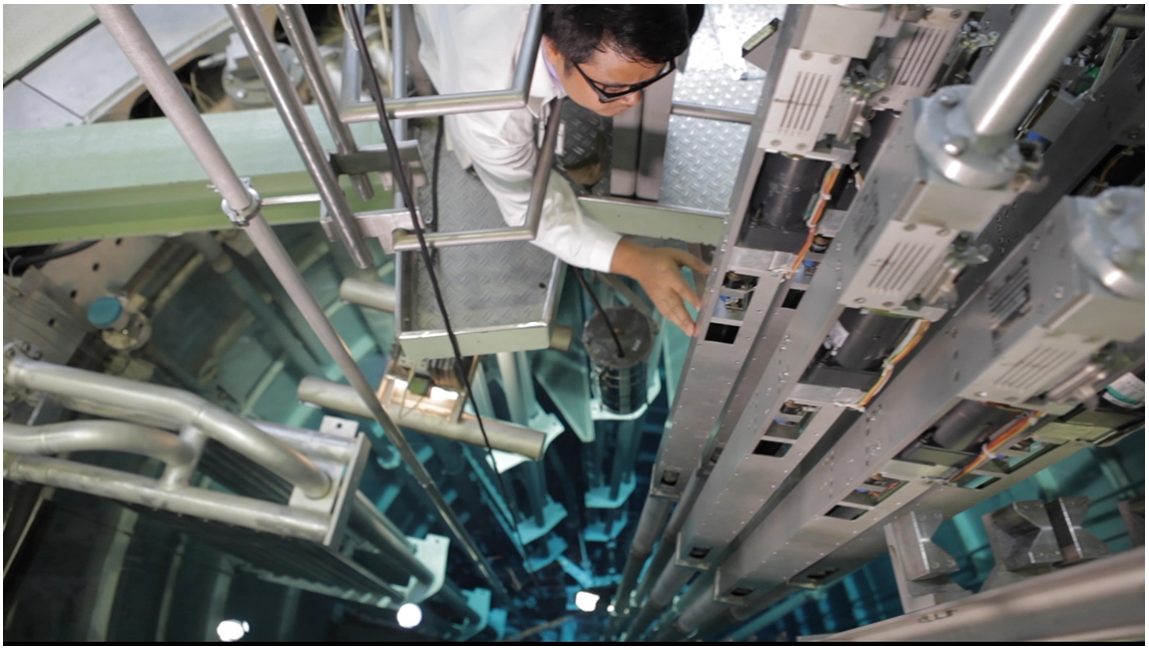
الحالة

١٣٠- أثناء جائحة كوفيد-١٩، أُعلن أنَّ مفاعلات البحوث التي تُنتج النظائر المشعة الطبية لأغراض الإمدادات العالمية تُعتبر من الجهات التي تقدِّم الخدمات الضرورية للتقليل إلى أدنى حدٍّ من تأثير القيود المرتبطة بالجائحة. واتَّخذت جميع المنظِّمات المشغِّلة للمفاعلات تدابير استباقية لضمان أمان المرافق والعاملين خلال الجائحة. وعمدت بعض المؤسسات البحثية والجامعات التي تشغِّل مفاعلات بحوث لأغراض التعليم والتدريب والبحث إلى إغلاق المرافق التابعة لها وأبقتها في حالة إغلاق مأمون وأصبح نقل النظائر المشعة صعباً بحكم القيود المفروضة بسبب جائحة كوفيد-١٩، كما يتبيَّن من الاستقصاء الذي أجرته الوكالة للجهات الرئيسية التي تُنتج النظائر المشعة الطبية باستخدام المفاعلات، والذي قيَّم تأثير الجائحة في استمرارية سلسلة الإمداد. ونظَّمت الأمانة جلسة إحاطة تقنية غير رسمية للدول الأعضاء بشأن إنتاج النظائر المشعة في مفاعلات البحوث، وكذلك

بشأن استخدام السيكلوترونات الطبية، ونقل المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية وإنتاجها، وطلب المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية أثناء جائحة كوفيد-١٩.

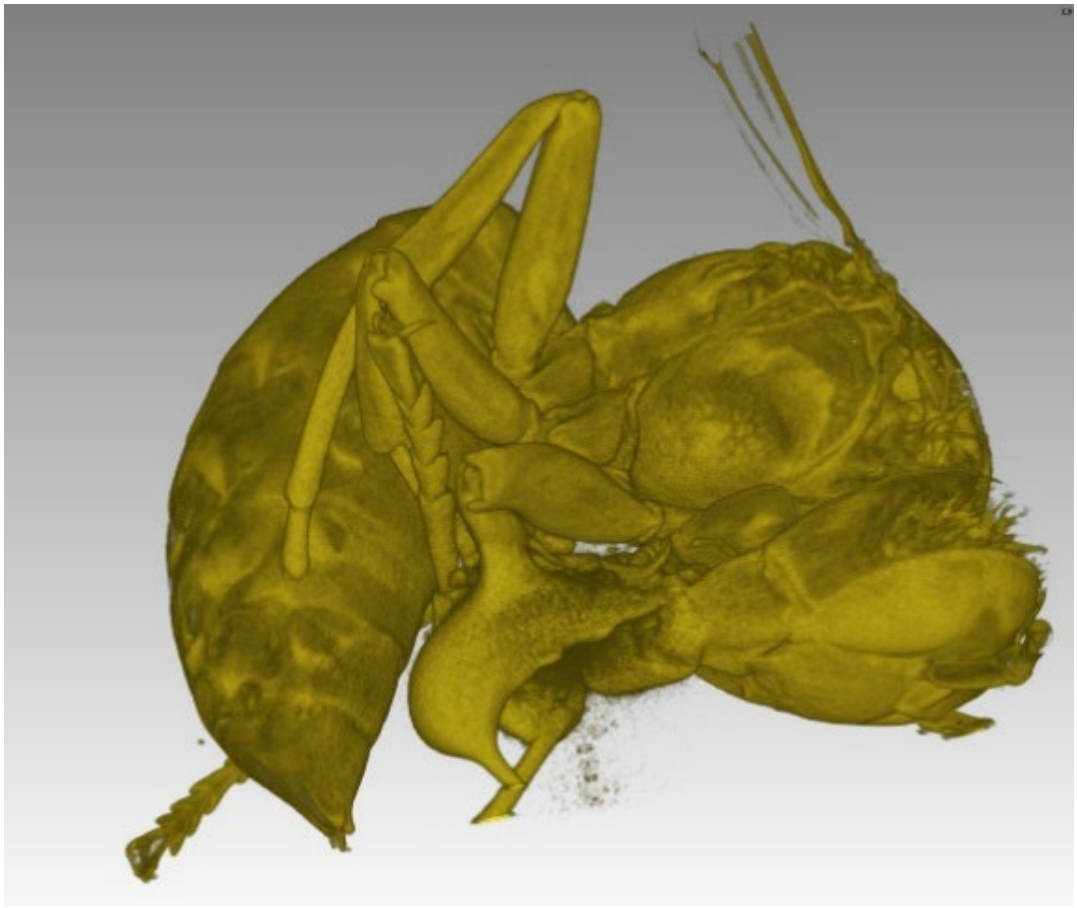
١٣١- وهناك أحد عشر مفاعل بحوث جديد قيد الإنشاء في ثمانية بلدان هي: الاتحاد الروسي، والأرجنتين، وأوكرانيا (نظام قائم على المعجلات)، والبرازيل، وجمهورية كوريا، وفرنسا، والمملكة العربية السعودية، والهند. وكانت هناك عدة دول أعضاء لديها خطط رسمية لتشييد مفاعلات جديدة، بما في ذلك بلجيكا، وبنغلاديش، وبولیفیا، وبیلاروس، وتايلند، وزامبيا، والصين، وطاجيكستان (استكمال المفاعل Argus-FTI)، وفييت نام، ونيجيريا، وهولندا، والولايات المتحدة الأمريكية. وتنظر دول أعضاء أخرى في تشييد مرافق جديدة، ومن هذه الدول إثيوبيا، وأذربيجان، وتونس، وجمهورية تنزانيا المتحدة، وجنوب أفريقيا، والسنغال، والسودان، وغانا، والفلبين، وكينيا، وماليزيا، ومنغوليا، وميانمار، والنيجر.

١٣٢- وظلَّت مفاعلات البحوث تؤدي دوراً لا غني عنه في توفير النظائر المشعة لقطاعَي الطب والصناعة، وتوفير الحُزم النيوترونية اللازمة لإجراء بحوث المواد والاختبارات غير المتلفة، وتقديم الخدمات التحليلية وخدمات التشعيع لكلٍّ من القطاعين الخاص والعام، وتقديم الخدمات الخاصة بدراسات الإرث الثقافي والدراسات البيئية (الشكل دال-١). كما أنَّها تقدِّم إسهاماً استراتيجيًّا في جهود التعليم والتدريب. ويبيِّن الجدول دال-١ في المرفق التطبيقات الأشيع لمفاعلات البحوث.



الشكل-دال-١ - تُستعمل مفاعلات البحوث في طائفة من الاستخدامات، بداية بالتعليم والتدريب وحتى التطبيقات الصناعية والطبية وغيرها. (الصورة من: الوكالة)

١٣٣- وفي حين أنَّ التصوير النيوتروني الرقمي عادةً ما يُجرى باستخدام مصادر نيوترونية عالية الشدَّة، فقد صار من الممكن الآن أيضاً إجراء التصوير النيوتروني العادي، كما في حالة التصوير الإشعاعي والتصوير المقطعي الحاسوبي، باستخدام مصادر نيوترونية أقل شدَّة، بمستوى فيض داخل قلب المصدر يبلغ نحو $^{12}10$ ثانية$^{-1}$ سنتيمتر$^{-2}$. وقد صار ذلك ممكناً بفضل التقدُّم الذي تحقَّق مؤخراً في الكاميرات الفلكية والذي أدَّى إلى تطوير نظم تصوير نيوتروني رقمية بسيطة نسبيًّا ومنخفضة التكلفة. وتوفِّر هذه النظم صوراً بجودة تجعلها قادرة على المنافسة في سياق التطبيقات العادية، وبما يكفي لتحقيق الغرض في نحو ٨٠٪ من جميع تطبيقات التصوير الطبي (الشكل دال-٢). ومن شأن هذا التطوُّر أن يتيح التوسُّع في التصوير النووي مع استخدام مصادر نيوترونية أقل شدَّة، سواء كانت تلك المصادر قائمة على مفاعلات البحوث أو على المعجِّلات. وفي عام ٢٠٢٠، أطلقت الوكالة دورة للتعلُّم الإلكتروني بشأن التصوير النيوتروني، بما في ذلك التوسُّع المذكور.



الشكل-دال-٢ - صورة ثلاثية الأبعاد عالية الدقة مأخوذة بالتصوير المقطعي الحاسوبي لحشرة دبُّور. (الصورة من: بوركهارد شيلينجر، جامعة ميونيخ التقنية، ألمانيا)

١٣٤- وحتى اليوم، هناك ١٠٧ مفاعلات بحوث و٤ مرافق لإنتاج النظائر الطبية إمَّا تم تحويلها من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تأكَّد أنَّها في حالة إغلاق. وفي عام ٢٠٢٠، تخلَّصت كازاخستان من آخر ما تبقى لديها من اليورانيوم الشديد الإثراء غير المشعع، بتخفيف درجة إثراءه إلى ما دون ٢٠٪، وواصلت عمليات التحضير لإزالة وقود اليورانيوم الشديد الاثراء المشعع والتخلص منه. وإجمالاً، بلغت كمية اليورانيوم الشديد الاثراء الذي يعود منشؤه إلى الصين وروسيا والولايات المتحدة وبلدان أخرى والذي تمَّت إزالته أو توكيد التخلص منه في إطار البرامج المعنية بذلك على الصعيد العالمي ما يقرب من ٦٨١٥ كيلوغراماً.

١٣٥- واستمرت الجهود الدولية الرامية إلى تحويل منتجي النظائر المشعة الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في المستهدفات والاستعاضة عنه باليورانيوم الضعيف الإثراء. وبدأ المعهد الوطني للعناصر الإشعاعية في بلجيكا في توفير الإمدادات التجارية من الموليبدينوم-٩٩ المنتَج باستخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، لينضم إلى غيره من الرواد على الصعيد العالمي في مجال إنتاج هذا النظير المشع المطلوب بشدَّة للأغراض الطبية، ويعتزم المعهد مواصلة زيادة إنتاجه من الموليبدينوم-٩٩ المنتج دون استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء وأن يصل إلى التحوُّل الكامل إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء بحلول عام ٢٠٢٢.

الاتجاهات

١٣٦- استمر تزايد الاهتمام العالمي بمفاعلات البحوث. وتستفيد بلدان عديدة من فرص الوصول إلى مفاعلات البحوث القائمة، بما في ذلك من خلال الدورات الدراسية الإقليمية التي تعقدها الوكالة لبناء القدرات في مجال مفاعلات البحوث، ومن خلال مخطَّط مراكز الامتياز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث. وفي عام ٢٠٢٠، التحق معهد البحوث النووية، الكائن في بيتستي برومانيا، للمرة الأولى بمراكز الامتياز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث، في حين جُدِّد تعيين المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة لفترة مدتها خمس سنوات. وازدادت أهمية استخدام أدوات التعلُّم الإلكتروني وبناء القدرات، مثل مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت التابع للوكالة، مع تزايد الاهتمام والدعم من الأمانة ومن الدول الأعضاء على السواء.

١٣٧- وأكثر من ٦٠٪ من المفاعلات العاملة في العالم يزيد عمرها على ٤٠ عاماً. ويمكن إطالة دورة حياة تلك المفاعلات ليصل عمرها إلى ٦٠ عاماً أو أكثر، لكن من المهم للغاية أن توضع لها في الوقت المناسب برامج ملائمة بشأن إدارة التقادم والتجديد والتحديث. وبالنظر للاتجاه العام إلى تخفيض تمويل مثل هذه المرافق ومحدودية التخطيط لتعاقب الموظفين فيها، فهناك أهمية حيوية لوجود نظم إدارية سليمة وبرامج ملائمة للتشغيل والصيانة وإدارة الأعمار التشغيلية، حتى تتمكَّن مفاعلات البحوث من أداء مهامها على نحو فعال من حيث التكلفة.

دال-٢- معجِّلات الجسيّمات والأجهزة ذات الصلة

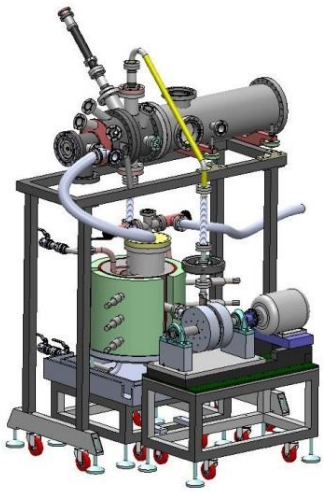
الحالة

١٣٨- شهد العقد الماضي تزايد الاهتمام بين العديد من الدول الأعضاء بتطوير المصادر النيوترونية المضغوطة الحجم القائمة على المعجلات (المصادر النيوترونية المضغوطة الحجم) لتكون بديلاً للأسطول المتقادم من مفاعلات البحوث المنخفضة والمتوسطة القدرة، حيث يوجد نحو ٥٠ من المشاريع الجارية ذات الصلة في نحو ٢٠ بلداً حول العالم. وتضمُّ المصادر النيوترونية المضغوطة الحجم العديد من فئات المعجِّلات التي يتمثل الغرض منها في توفير مستوى فيض نيوتروني يتراوح بين 10^{11} و 10^{13} ثانية$^{-1}$ سم$^{-2}$ لطائفة متنوعة من الأغراض. وفي عام ٢٠٢٠، انتهى مركز هيلمهولتز في يوليخ بألمانيا من إعداد تصميم نظري لجهاز مصدر نيوتروني مضغوط الحجم قائم على معجل خطي بروتوني عالي التيار ليكون بمثابة مرفق وطني للتشتيت النيوتروني. ويتسم هذا المصدر النيوتروني المضغوط الحجم برخص تكلفته نسبيًّا وبأنَّه لا يتطلب سوى بنية أساسية خفيفة، ومن شأنه أن يكون قادراً على خدمة عدد من الأجهزة للأغراض التحليلية، وسيكون مناسباً للجامعات وللصناعات التابعة للقطاع الخاص، مما يمكن أن يزيد من توافر التقنيات القائمة على الحزم النيوترونية ومن قابليتها للتطبيق.

١٣٩- ويبيِّن الشكل دال-٣ مثالا آخر لمعجل خطي جديد فائق التوصيل عالي الشدَّة والقاعات التجريبية الملحقة به. وهذا المرفق، الذي يحمل اسم SPIRAL2 (سبيرال-٢)، هو حاليًّا قيد الإدخال في الخدمة، وهو موجود في مركز بحوث المعجِّل الوطني الكبير للأيونات الثقيلة (GANIL) في فرنسا، وسوف يُعنى بفحص النوى الثقيلة القصيرة العمر ويتناول تطبيقات في مجالي الانشطار والاندماج، كما سيعالج علوم المواد باستخدام حزم الجسيمات المشحونة والنيوترونات. وسوف ينتج المعجل الخطي أيضاً حُزم أيونات خفيفة، بما في ذلك جسيمات ألفا وأيونات الليثيوم-٦ أو الليثيوم-٧ التي تصطدم بمستهدفات من الرصاص والبزموث، وسوف تُستخدم هذه الحزم لاستكشاف أساليب أكثر كفاءة لإنتاج بعض النظائر المشعة المستخدمة في علاج السرطان.

الشكل-دال-٣- مرفق SPIRAL2، القائم على معجل خطي فائق التوصيل عالي الطاقة (٢٠٠ كيلوواط) وسيوفّر خط الحزم النيوترونية المسمَّى Neutrons for Science ("تسخير النيوترونات للأغراض العلمية") حزماً نيترونية بمستويات شدَّة غير مسبوقة ضمن نطاق طاقة يتراوح بين ١ و٤٠ مليون إلكترون فلط — وهو ما يمثِّل نحو مائة ضعف مقارنة بالمنشآت الأخرى المشابهة. (الصورة من: ألاهاري نافين، المعجل الوطني الكبير للأيونات الثقيلة GANIL، فرنسا)

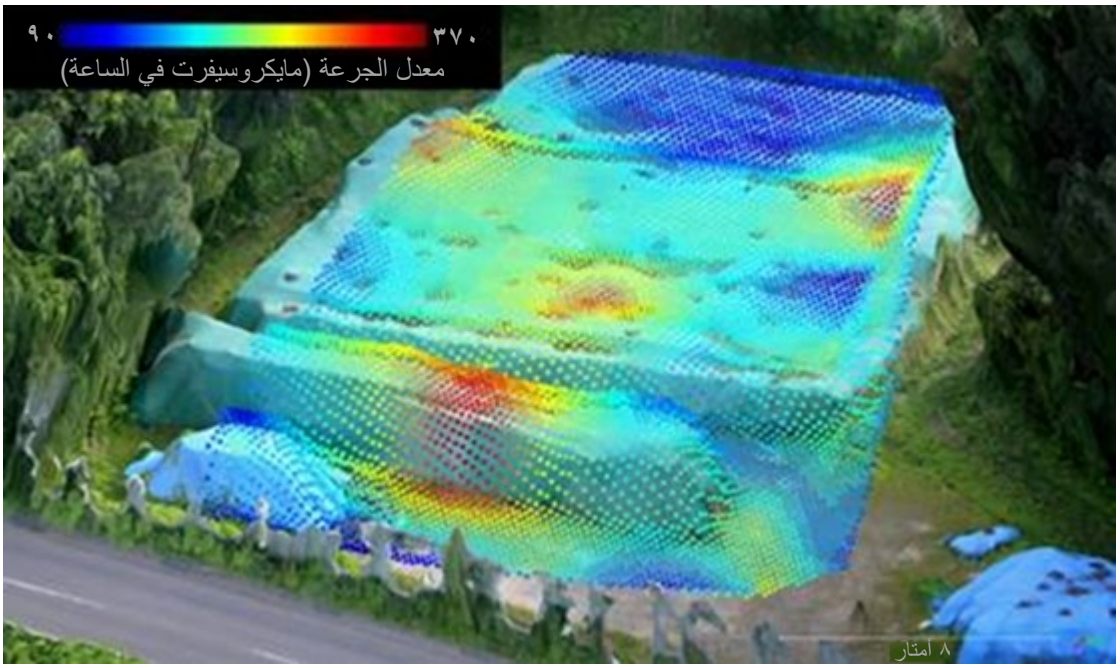
١٤٠- ويوضِّح الشكل دال-٤ مشروعاً آخر يستخدم معجِّل بروتونات/ديوترونات خطي فائق التوصيل عالي الطاقة (٢٠٠ كيلوواط)، وهو الآن بصدد الدخول في المرحلة الثانية، أي زيادة الطاقة من ٥ إلى ٤٠ مليون إلكترون فلط، ويُتوقَّع أن تبلغ شدَّة المصدر النيوتروني ما يصل إلى 10^{15} نيوترون في الثانية لأغراض تطبيقات متعددة، بما في ذلك إجراء البحوث العلمية الأساسية بشأن النيوترونات.



الشكل-دال-٤- معجِّل البروتونات/الديوترونات الخطي الفائق التوصيل العالي الطاقة (٢٠٠ كيلوواط) (يساراً)، مقترناً بتكنولوجيا ابتكارية تستخدم مستهدفات من الليثيوم السائل لإنتاج النيوترونات (يميناً). (الصورة من: دان بيركويتز، مركز سوريك للبحوث النووية، إسرائيل)

١٤١- ووصلت فنلندا، من خلال مستشفى جامعة هلسنكي، إلى نهاية مرحلة الإدخال في الخدمة لمصدر نيوتروني قائم على معجِّل بروتونات مضغوط الحجم (معجِّل إلكتروستاتي بطاقة ٢,٦ مليون إلكترون فلط مصمَّم للتشغيل بتيار ٣٠ مللي أمبير) في بيئة المستشفى، والهدف الرئيسي من ذلك المصدر هو بدء تجارب العلاج بتقنية أسر النيوترونات بالبورون والانتقال بعد ذلك إلى علاج المرضى. وسيجري إنتاج النيوترونات باستخدام مستهدَفَة دوَّارة من الليثيوم.

١٤٢- وتحقَّق تطوُّر ملحوظ في مجال أجهزة استشعار الإشعاعات، فيما يخصُّ استخدام هذه الأجهزة في تطبيقات المركبات الجوية بلا طيار. ويتزايد تفضيل نظم قياس طيف أشعة غاما القائمة على الكاشفات الوميضية، مثل الكاشفات المصنوعة من ثالث بروميد اللنثانوم ($LaBr_3$) وثالث بروميد السيريوم ($CeBr_3$)، مقارنة بعدَّادات غايغر-مولر التقليدية. ومن قصص النجاح التي تحقَّقت مؤخراً في مجال الكشف عن الإشعاعات، وتحديداً رسم الخرائط الإشعاعية باستخدام المركبات الجوية بلا طيار، الإتاحة التجارية للكاشفات الوميضية القائمة على المضاعفات الضوئية المصنوعة من السليكون والمعزَّزة بنظام مدمج يتألف من دائرة توليد تيار انحياز مصحَّحة الحرارة ومضخِّم أولي. ويتيح ذلك المعالجة الرقمية السريعة للإشارات الواردة من الكاشف، بما يكفل معالجة جميع البيانات المقيسة آنيًّا مع إسنادها جغرافيًّا بدقة باستخدام النظم العالمية لسواتل الملاحة (GNSS) لإنتاج خرائط عالية الدقة تبيّن مستويات الإشعاع وتحدِّد أنواع النظائر المشعة (الشكل دال-٥).



الشكل-دال-٥- خريطة إشعاعية عالية الدقة (اللون الأحمر يشير إلى ارتفاع معدلات الجرعة) مقترنة بمسح تصويري جوي ثلاثي الأبعاد. وقد رُسمت الخريطة بالاستعانة بطائرة واحدة بلا طيار في رحلتين جويتين متعاقبتين. (الصورة من: الوكالة)

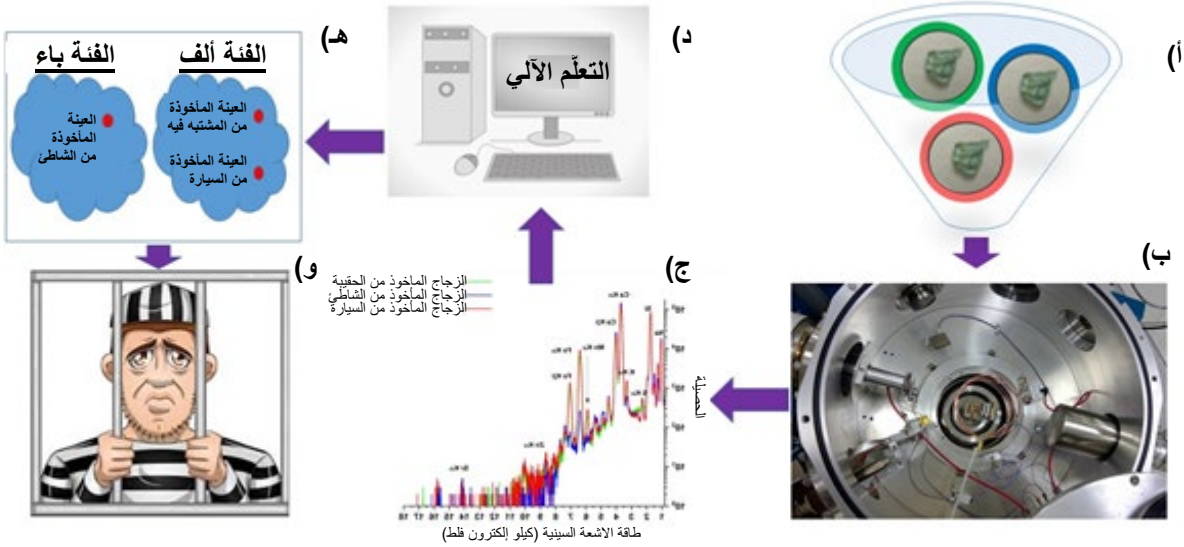
الاتجاهات

١٤٣- ثمَّة تطوُّرات متسارعة في مجال نظم رصد الإشعاعات القائمة على استخدام المركبات الجوية/الطائرات بلا طيار، ويرجع ذلك إلى التوسُّع في تكنولوجيا المركبات الجوية بلا طيار وتصميم نماذج مصغَّرة من كاشفات

الإشعاعات، بالاقتران مع الاستعانة بالنظم العالمية لسواتل الملاحة وخوارزميات المعالجة السريعة للبيانات. وهناك طلب متزايد على نظم رصد متنقلة تتَّسم بالمرونة وسهولة التشغيل، وهو ما يعني إيلاء الأولوية للحلول القائمة على المركبات الجوية بلا طيار في المناطق الخطرة أو التي لا يمكن للأفراد الوصول إليها لأغراض رسم الخرائط الإشعاعية والبحث عن المصادر الإشعاعية والتصدي السريع للطوارئ في أعقاب الحادثات أو الحوادث الإشعاعية. وقد صارت المركبات الجوية بلا طيار تتَّسم بمزيد من الصلابة والمتانة من حيث قدرتها على تحمُّل الظروف التشغيلية مثل الحرارة والرطوبة ومقاومة المياه والأتربة. وبالإضافة إلى ذلك، فقد صارت تتَّسم أيضاً بمزيد من الاستقلالية بفضل تزويدها بخيارات أفضل فيما يتعلق بالقدرة على التحليق لفترات ممتدَّة واستشعار البيئة ورسم الخرائط المتقدِّمة وكذلك بفضل خوارزميات معالجة البيانات المحسَّنة باستخدام الذكاء الاصطناعي.

١٤٤- وتنطوي النُّهج المستندة إلى التعلُّم الآلي على إمكانات كبيرة للنهوض بالعلوم والتطبيقات النووية في عدد من المواضيع، مثل تحديد مراحل السرطان في مجال الطب النووي ومعالجة السرطان باستخدام العلاج الإشعاعي؛ وللتعجيل بالتقدُّم في بحوث الاندماج النووي؛ وللمساعدة على حماية البيئة، ولا سيما موارد المياه العالمية، من الاستغلال المفرط والتلوث. وهناك أمثلة متعدِّدة حديثة للغاية أثبتت نجاعة الاستخبارات المستمدة من التحليل الجنائي في توفير حلول تكنولوجية لمكافحة الجريمة في بلدان مختلفة. ويشكِّل تحليل الأدلة النزرة جزءاً رئيسيًّا من التحقيقات الجنائية. ويتزايد تطبيق خوارزميات التعلُّم الآلي في علوم التحليل الجنائي للمساعدة على التصدي لتحديات كانت مستعصية على الحل فيما سبق. ويمكن لآليات التعلُّم الآلي أن تُستخدم أيضاً كأداة للوقوف على الأنماط وتصنيف العينات المتعدِّدة، وبذلك توفِّر وسيلة قيِّمة لمجابهة هذه التحديات.

١٤٥- وعلى سبيل المثال، ففي التحليل الجنائي للزجاج، عادةً ما تُقارن العينات بناءً على نسب كثافة العناصر فيها. وحين تكون شظايا الزجاج كبيرة الحجم بالقدر الكافي، يمكن للأخصائيين الممارسين في مجال التحليل الجنائي اقتفاء أثرها وصولاً إلى شكلها الأصلي ومصدرها. بيد أنَّه يستحيل تحقيق هذه المهمة بالوسائل التقليدية إذا كانت الشظايا صغيرة الحجم. وفي تلك الحالات، يمكن استخدام التقنيات التحليلية النووية مثل انبعاث الأشعة السينية المستحث بالجسيمات والتحليل بالتنشيط النيوتروني، بالاقتران مع أدوات التعلُّم الآلي وقواعد البيانات المتعلقة بصنع أنواع الزجاج المحدَّدة (حصر أنواع الزجاج)، لإثبات وجود المشتبه به في مسرح الجريمة (الشكل دال-٦).



أ) شظايا الزجاج
ب) انبعاث الأشعة السينية المستحث بالجسيمات
ج) الأطياف
د) خوارزمية التعلّم الآلي
هـ) تطابق شظايا الزجاج المأخوذة من حقيبة المشتبه فيه ومن السيارة
و) دحض حجة الغياب

الشكل- دال-٦ - تسلسل سير العمل القائم على التعلُّم الآلي. في البداية تُؤخذ عينات من مسرح الجريمة (أ) وتُرسل لتخضع لتحليل العناصر باستخدام تقنية انبعاث الأشعة السينية المستحث بالجسيمات (ب). وبعد تحليل القياسات الناتجة (ج) تُحال إلى نماذج التعلُّم الآلي (د) التي تنتج تصنيفاً للعينات (هـ). وبناءً على هذه المعلومات، يمكن لمحقِّقي الشرطة التأكُّد من حجة الغياب أو دحضها. ويتضح من التصنيف (هـ) في هذه القضية المنطوية على هروب السائق بعد حادث اصطدام، أنَّ شظايا الزجاج التي عُثر عليها في متعلقات المشتبه فيه والشظايا المأخوذة من السيارة الضالعة في الحادث لهما نفس التصنيف، في حين أنَّ الشظايا المأخوذة من الشاطئ لها تصنيف مختلف، وهو ما يشير إلى وجود صلة بين المشتبه فيه وبين السيارة الضالعة في الحادث. (الصورة من: جامعة بار-إيلان ومعهد التكنولوجيا النانوية والمواد المتقدمة التابع لها، إسرائيل)

هاء- الأغذية والزراعة

هاء-١- استخدام نُهج الوسم الإشعاعي والتقنيات النووية المتقدمة لقياس المخلفات الإشعاعية في الأغذية — تلبية الاحتياجات في مجالي الصحة العامة والتجارة الدولية

الحالة

١٤٦- تُستخدم في عملية إنتاج الأغذية حول العالم مواد كيميائية مثل العقاقير البيطرية ومبيدات الآفات، بما في ذلك مبيدات الأعشاب. بيد أن البقايا التي تخلِّفها هذه المواد الكيميائية في الأغذية تشكِّل شواغل في مجالي الصحة العامة والتجارة الدولية، ومن ثم لا بد من إخضاعها للتنظيم الرقابي باستخدام معايير يُطلق عليها اسم الحدود القصوى لمستويات المخلفات، تُحدَّد بموجبها أعلى مستويات مسموح بها لتركيزات المخلفات داخل الأغذية وعليها. وللحدود القصوى لمستويات المخلفات تأثير في التجارة الدولية، ويحيل اتفاق تطبيق التدابير الصحية

وتدابير الصحة النباتية المبرم في إطار منظمة التجارة العالمية إلى الحدود القصوى التي وضعتها هيئة الدستور الغذائي. وتستفيد الحكومات والمزارعون والتجار وعموم الجمهور من توافق الحدود القصوى لمستويات المخلفات فيما بين البلدان، في حين يؤدي عدم وجود حدود قصوى لمستويات المخلفات إلى وضع عراقيل كبيرة أمام التجارة الدولية[٦]. وهناك العديد من المركَّبات التي تُستخدم في إنتاج الأغذية والتي لا توجد بشأنها حاليًّا حدود قصوى لمستويات المخلفات.

١٤٧- وحتى يتسنى تحديد الحدود القصوى لمستويات المخلفات في العقاقير البيطرية، ومن ثمَّ سد الفجوة في المعايير الغذائية، يلزم الحصول على معلومات من دراسات تتناول عملية الأيض في الحيوانات (دراسات بشأن استنفاد المخلفات) تُجرى باستخدام مواد الوسم الإشعاعي. ويمكن للتقنيات النووية، من بين تقنيات أخرى، أن تكفل ما تتطلبه دراسات الأيض من حيث القدرة على الاقتفاء وإجراء القياسات الدقيقة.

١٤٨- وتُجرى هذه الدراسات بإعطاء حيوانات اللحوم المستهدفة العقاقير أو المركَّبات ذات الصلة بعد وسمها بنظائر مثل الكربون-١٤ والكبريت-٣٥ والفسفور-٣٢ والهيدروجين-٣، ثمَّ تتبُّع توزُّع تلك العقاقير أو المركَّبات وانقسامها إلى مخلفات ونواتج رئيسية لعملية الأيض، ولا سيما في الأنسجة القابلة للأكل (مثل العضلات والكبد والكُلى والأنسجة الدهنية). وتُعتبر الدراسات القائمة على الوسم الإشعاعي بمثابة "المعيار الذهبي" في مجال دراسات الأيض، وتُستخدم في قطاعات المستحضرات الصيدلانية البشرية والبيطرية والمواد الكيميائية الزراعية، وتُستخدم البيانات المستمدة منها في تيسير تقييم الأمان، ومن ثمَّ حماية المستهلكين في نهاية المطاف. وينطوي تحديد مستويات النشاط الإشعاعي في الأنسجة الحيوانية حاليًّا على حرق الأنسجة وإذابتها في محاليل، وهو ما يتطلب تقنيات قياس دقيقة وموثوقة للتأكد من نوع المخلفات ومستوى تركيزها.

الاتجاهات

١٤٩- ما فتئ استخدام المواد الكيميائية في إنتاج الأغذية يتغيَّر حول العالم، حيث تُستحدث كلَّ عام عقاقير/مواد كيميائية للتصدي للتحديات الجديدة. ويتزايد الطلب على إخضاع هذه المواد الكيميائية للتنظيم الرقابي، مما يتطلب إجراء الدراسات القائمة على الوسم الإشعاعي التي لا يمكن الاستعاضة عنها بأي تقنية بديلة. وتؤدي المركَّبات الموسومة إشعاعيًّا دوراً بالغ الأهمية في هذا الصدد، حيث تتيح تتبُّع ودراسة جميع المخلفات الكيميائية عبر مختلف الأنسجة.

١٥٠- ويلزم استخدام أدوات وتقنيات مثل الرنين المغنطيسي النووي القائم على الهيدروجين-٣ والكربون-١٣، والعد الوميضي بالسوائل، وقياس ارتباط المواد الموسومة إشعاعيًّا بالمستقبلات/بالجهاز المناعي، من أجل تحليل المركَّبات الموسومة إشعاعيًّا وتحديد خصائصها في الأنسجة الحيوانية خلال دراسات الأيض. وبغية إنتاج بيانات دقيقة، يتطلب الأمر أيضاً تقنيات/أساليب تحليلية نووية مبتكرة وفعالة من حيث التكلفة مثل تقنية تحليل الارتباط التنافسي للمستقبلات باللجينات المشعة، والمدعومة، من بين تقنيات أخرى، بقياس الطيف الكتلي الدقيق العالي الاستبانة. وهناك تكنولوجيات جديدة ناشئة أيضاً في مجال التصوير الإشعاعي الذاتي يمكن أن تكون أداة إضافية للدراسة، حيث تيسِّر التقدير الكمي والعرض البصري للنشاط الإشعاعي في الأنسجة والأعضاء السليمة.

---

[٦] التحالف من أجل تعزيز الدستور الغذائي؛ متاح عبر الرابط: https://agrifood.net/iafn-codex-coalition.

١٥١- وتشير التقارير الصادرة مؤخراً إلى أنَّ هناك عقاقير بيطرية تُعطى للحيوانات المستخدمة في إنتاج الأغذية ويمكن أن تتسبب أيضاً في بعض المخلفات التي ليس من السهل استخراجها من الأنسجة، ومن ثمَّ لا تُكتشف أثناء التحليل المختبري للأغذية لأغراض الاستهلاك البشري. وقد تشكِّل هذه المخلفات شواغل من حيث سميَّتها للمستهلكين. ولذلك يلزم استحداث أساليب تحليلية مبتكرة للكشف عن هذه الأخطار "الخفية".

١٥٢- وهناك شاغل آخر ناشئ في مجال سلامة الأغذية في بعض المناطق، وهو الحاجة إلى بيانات علمية لتيسير وضع المعايير والحدود القصوى للمخلفات فيما يخصُّ أغذية قد تكون لها أهمية محلية وإقليمية، مثل أحشاء الذبائح (الأعضاء الداخلية في الحيوانات). وسوف تخضع هذه الأنواع من الأغذية لدراسات جديدة للأيض الحيواني باستخدام الوسم الإشعاعي. وفي الوقت الراهن، تستهدف الدراسات الحيوانية القائمة على الوسم الإشعاعي عقاراً واحداً و/أو مادة كيميائية واحدة، رغم أنَّ إنتاج الأغذية تُستخدم فيه توليفات من عدَّة عقاقير. ولذلك فإن المعلومات المستمدة من الدراسات التي تتناول عقاراً واحداً هي معلومات غير كاملة. ومن ثم فسوف يبدأ من الآن فصاعداً إجراء دراسات قائمة على الوسم الإشعاعي تُعطى فيها توليفات من المواد الكيميائية.

١٥٣- ومن مجالات الاهتمام الناشئة في هذا الصدد، والتي يمكن أن تسهم فيها أيضاً الدراسات القائمة على الوسم الإشعاعي، الدعوة العالمية الموجَّهة إلى الجهات المعنية بإدارة المخاطر لتوحيد المعايير والحدود القصوى للمخلفات المعمول بها فيما يخصُّ المركبات المستخدمة في إنتاج كلٍّ من الأغذية الحيوانية والأغذية النباتية، خلافاً للممارسة المتبعة حاليًّا، حيث توضع معايير منفصلة للمنتجات الحيوانية والنباتية، وهو ما لا يساعد على تكوين صورة واضحة لمستويات الأخطار في الأغذية المستهلكة.

١٥٤- وتشهد البلدان النامية اهتماماً متزايداً بالمشاركة في الدراسات الحيوانية القائمة على الوسم الإشعاعي وفي إنتاج البيانات العلمية اللازمة لوضع المعايير، بالنظر إلى تأثير عدم وجود حدود قصوى للمخلفات في اقتصادات تلك البلدان وفي احتياجات المستهلكين فيها. وفي هذا الصدد، استهلَّت الوكالة مؤخراً مشروعاً بحثياً منسَّقاً جديداً بشأن استنفاد المستحضرات الصيدلانية البيطرية والمواد ذات الصلة المستخدمة في الإنتاج الحيواني، مما استرعى اهتمام عدَّة دول أعضاء. وتنطوي الأنشطة البحثية المخطط لها في إطار المشروع على استخدام أنواع من الحيوانات مثل الماشية والخيول والأسماك والماعز والأغنام (الشكل هاء-١)، مع إمكانية توسيع نطاق المشروع ليشمل بعض المحاصيل، لا سيما فيما يتعلق بتلوُّث العلف. ومن المتوقع أن يسهم هذا المشروع البحثي المنسق في التقليل من اعتماد الدول النامية على المرافق والمؤسسات الخارجية في إجراء الدراسات القائمة على الوسم الإشعاعي لأغراض إنتاج البيانات اللازمة لتقييم المخاطر ووضع الحدود القصوى للمخلفات بهدف تيسير التجارة الدولية وحماية المستهلكين.

الشكل-هاء-١ - بعض الحيوانات المستهدفة في دراسات استنفاد الوسم الإشعاعي في السودان. (الصورة من: الوكالة)

واو- الصحة البشرية

واو-١- أوجه التقدُّم في قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى والنانوية

الحالة

١٥٥- قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى هو المجال الفرعي من الفيزياء الإشعاعية الذي يتناول الدراسة المنهجية للتوزُّع المكاني للطاقة الممتصة في الهياكل المجهرية داخل المواد المشعَّعة. ورغم أنَّ نشأة قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى ترجع إلى ما يزيد على ٦٠ عاماً مضت، فلا يزال هذا التخصُّص يجتذب اهتماماً كبيراً في مجالات الطب الإشعاعي والوقاية من الإشعاعات والبيولوجيا الإشعاعية، وفي مجالات أخرى مثل بحوث الفضاء.

١٥٦- وفي مجال الطب الإشعاعي، يُعدُّ قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى مفيداً بوجه خاص في العلاج باستخدام الحزم الأيونية، وهو تقنية متقدِّمة تنطوي على الاستعاضة عن التشعيع التقليدي عن طريق الفوتونات بحُزم من البروتونات وأيونات الكربون لعلاج الأورام، مع التقليل إلى أدنى حدٍّ من الأضرار التي تلحق بالأنسجة السليمة. وفي سياق هذا التطبيق، لا يكون قياس الجرعة الممتصة بالطرق النمطية كافياً لتفسير النتائج المترتبة على الإشعاع، حيث تتفاوت الفعالية البيولوجية الإشعاعية على طول مسار الشعاع الأيوني الدقيق داخل الجسم البشري.

١٥٧- ولذلك، ففي مجال الوقاية من الإشعاعات وفي عدد من الطرائق المستخدمة في الطب الإشعاعي، تُعدَّل

قيمة الجرعة الممتصة بعوامل تثقيل على المستوى المجمَّع (الماكروسكوبي) بحيث يمكن تفسير الفعالية البيولوجية لنوعية الإشعاع المحدَّدة المستخدمة (العدد النسبي من الجسيمات وفقا للنوع ومستوى الطاقة في الأماكن ذات الأهمية في المادة المستهدفة). ومن أمثلة ذلك حزم البروتونات والأيونات، والنيوترونات، والأشعة السينية عند مستوى الكيلوفلط على النحو المعمول به في التشعيع الداخلي. وقياس الجرعات الإشعاعية الصغرى وقياس الجرعات الإشعاعية النانوية (الذي يُطلق عليه أيضاً قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى الهيكلية) يوفران قيماً كمية لقياس الإشعاع تبيّن طبيعة التفاعلات الإشعاعية ومن ثم خصائص السمات الإشعاعية المختلفة المسؤولة عن الفعالية البيولوجية لتلك التفاعلات.

١٥٨- وقياس الجرعات الإشعاعية الصغرى مجال واسع ومتعدِّد التخصُّصات، وتتراوح الأنشطة المضطلع بها في إطاره من عمليات المحاكاة والنمذجة، إلى استحداث الكاشفات والأجهزة المتخصصة، بالإضافة إلى التطبيقات الإكلينيكية وغيرها.

١٥٩- ولا يوجد جهاز واحد لقياس الجرعات الإشعاعية الصغرى قادر على تحديد خصائص جميع أنواع الإشعاعات المؤينة على اختلافها تحديداً سليماً، وتركِّز الدراسات الحديثة حول العالم على الكاشفات المطوَّرة لأغراض تطبيقات بعينها. ففي حالة تيارات الحزم الأيونية العالية الشدَّة المستخدمة في التطبيقات العلاجية، يكون الهدف هو تقليل حجم الكاشف إلى ما دون المليمتر الواحد، أمَّا في حالة الوقاية من الإشعاعات والأغراض الفضائية، تشغل الأجهزة المطوَّرة لقياس الجرعات الإشعاعية الصغرى مساحات كبيرة.

الاتجاهات

١٦٠- لا يزال هناك عدد من المسائل التي يلزم حلُّها قبل أن يكون من الممكن أن يصبح قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى ممارسة معيارية لتقدير الآثار البيولوجية في سياق مختلف استخدامات التكنولوجيات الإشعاعية. ومن العلامات المرحلية الجوهرية في هذا الصدد توحيد البيانات المستمدة من قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى، بما في ذلك دراسة عوامل عدم التيقُّن أو ما يُعرف بميزانية عدم التيُّقن.

١٦١- وتتمثل الخطوة الأولى في وضع منهجيات مشتركة وآليات للإفادة بنتائج قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى. ولا تزال الحاجة قائمة لبذل جهود من أجل مقارنة أجهزة قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى المختلفة من حيث حجمها الحساس وشكلها والمادة التي تُصنع منها، للحصول على نتائج لها نفس التفسير بصرف النظر عن الكاشف المستعمل. وبالإضافة إلى ذلك، ينبغي أن تُدرس البيانات المستمدة من قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى للتنبُّؤ بالبارامترات المعتمدة في كلٍّ استخدام محدَّد من استخدامات الكاشفات، وهي: الانتقال الخطي للطاقة في سياق العلاج بالحزم الأيونية (الشكل واو-١)، والفعالية البيولوجية النسبية في سياق البيولوجيا الإشعاعية، وعامل النوعية في سياق الوقاية من الإشعاعات.

الشكل-واو-١ - يعتبر تخطيط وتنفيذ العلاج بالحزم الأيونية وتنفيذه من المجالات التي يمكن أن يقدِّم فيها قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى مساهمة قيِّمة. ويبيّن الشكل غرفة التشعيع في مركز ميدأوسترون للعلاج بالحزم الأيونية في فينر نويشتات بالنمسا، حيث يتلقى مرضى الأورام العلاج بحزم البروتونات وأيونات الكربون. ويُثبت سرير المريض عن طريق الذراع الروبوتي المعلَّق في السقف، وتُستخدم حلقة التصوير بالأشعة السينية لضبط وضع المريض. (المصدر: مركز ميدأوسترون لعلاج السرطان MedAustron، النمسا. ملتقط الصورة: كايستنباور/إيتل).

١٦٢- ويمكن للوكالة أن تؤدي دوراً استراتيجيًّا في توفير الخبرات المتعددة التخصصات وتهيئة البيئة اللازمة في هذا المجال. وقد نظمت الوكالة في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠٢٠ اجتماعاً تقنيًّا بشأن الاتجاهات الجديدة وأوجه التقدُّم المحرز في قياس الجرعات الإشعاعية الصغرى وتطبيقاته. وحدَّد الاجتماع المسارات التي يمكن أن تتبعها البحوث في المستقبل، بما في ذلك مواضيع رئيسية مثل الحزم الأيونية، والجوانب المتصلة بالوقاية من الإشعاعات، والنمذجة البيولوجية، وقياس الجرعات الإشعاعية النانوية. وسوف يُسترشد بهذه المسارات لتوجيه ما تضطلع به الوكالة من أعمال البحث والتطوير ذات الصلة في الدورات البرنامجية المقبلة.

زاي- النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية

زاي-١- دور المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في الكشف عن الأمراض المعدية وتشخيصها والتصدي لها

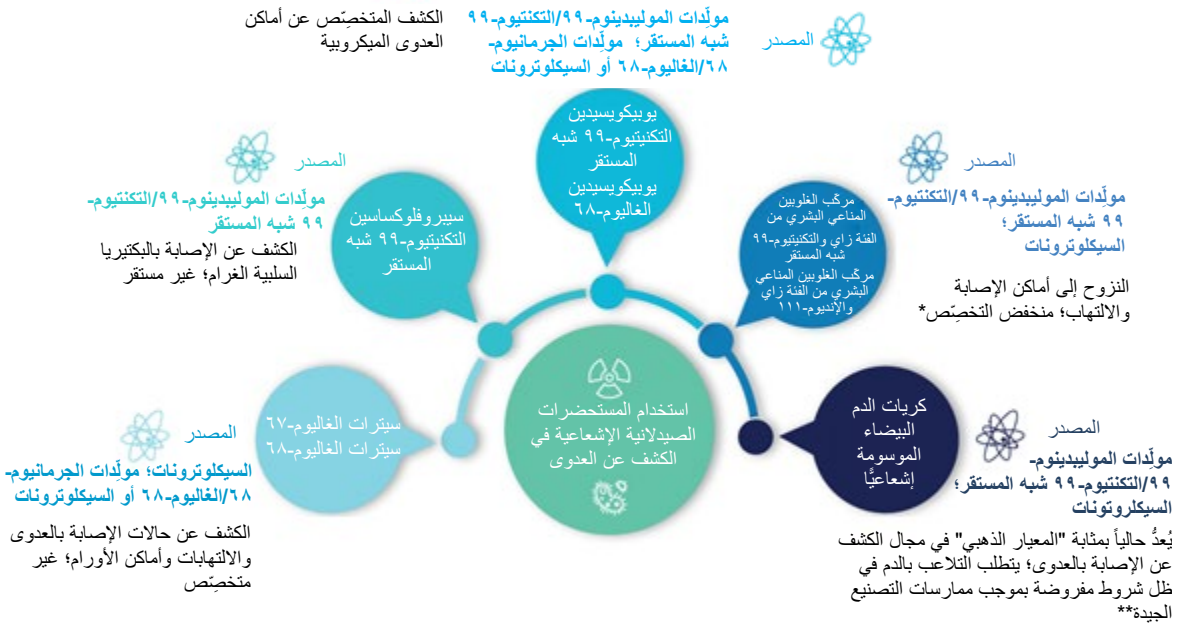
الحالة

١٦٣- تشكِّل الأمراض المعدية خطراً يتهدَّد التجمعات البشرية، كما تبيَّن من جائحة كوفيد-١٩ الحالية. وفي حين تركِّز جميع التخصُّصات العلمية جهودها من أجل تحسين فهم هذه الأمراض باستخدام التكنولوجيات

المتقدمة، فقد وصل تطوير المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية إلى مرحلة صار من الممكن فيها تصوير العمليات الخلوية والبيوكيميائية بطريقة غير اقتحامية، مما يمهّد الطريق أمام وضع نهج تشخيصية وكذلك نهج علاجية محتملة للتصدي للأمراض المعدية التي تصيب البشر.

١٦٤- واكتشاف الأمراض المعدية وعلاجها في وقت مبكر عامل رئيسي في جهود المكافحة وفي التقليل من أعداد المرضى والوفيات. وبالنظر إلى أنَّ الاستجابة المناعية للعدوى ظاهرة معقدة، فينبغي للمستحضر الصيدلاني الإشعاعي المثالي أن يكون قادراً على التمييز على وجه التحديد بين الكائنات الدقيقة المسببة للعدوى وغيرها من الكائنات غير المسببة للأمراض، ومسببات أنواع العدوى والالتهاب الأخرى في الجسم. وينبغي أيضاً أن يُظهر قدرته على التراكم العددي والبقاء بقدر كافٍ في الأنسجة المصابة فحسب، لتوفير الدقة في التشخيص و/أو في تقييم الاستجابة للعلاج.

١٦٥- وهناك مستحضرات صيدلانية إشعاعية عديدة تؤدي أدواراً مهمة في الكشف بطريقة غير اقتحامية عن الإصابة بالعدوى في السياقات الإكلينيكية. بيد أنَّه لا يوجد بين هذه المستحضرات ما يميّز بوضوح بين الأسباب المحددة للعدوى أو أنواع العدوى المختلفة.



* Development of kits for Tc-99m radiopharmaceuticals for infection imaging (IAEA-TECDOC-1414) ("إعداد مجموعات الأدوات لاستخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية القائمة على التكنيتيوم-٩٩ شبه المستقر لتصوير الإصابات بالعدوى" (وثيقة الوكالة التقنية TECDOC-1414))

** Radiolabelled Autologous Cells: Methods and Standardization for Clinical Use (IAEA Human Health Series No. 5) ("الخلايا الذاتية المنشأ الموسومة إشعاعيًّا: الأساليب والتوحيد القياسي من أجل الاستخدام الإكلينيكي"، (العدد ٥ من سلسلة وثائق الصحة البشرية الصادرة عن الوكالة))

الاتجاهات

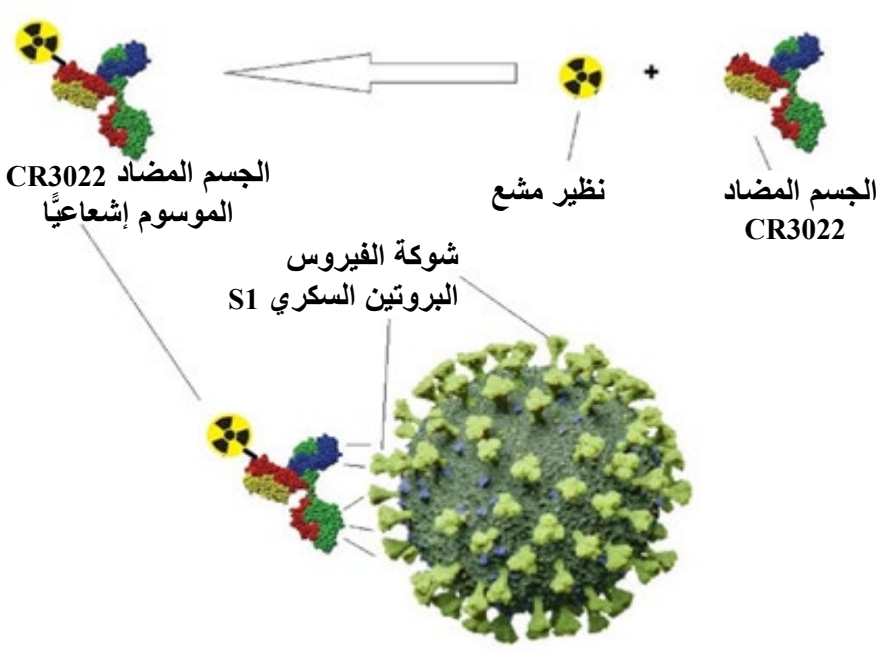
١٦٦- في الوقت الراهن، وبينما تتزايد أنواع العدوى تعقيداً، بما في ذلك أنواع العدوى الفيروسية التي تشكِّل خطراً على الأرواح خلال العقود الأخيرة، مثل فيروس نقص المناعة البشرية والمتلازمة التنفسية الحادة الوخيمة وإنفلونزا الطيور والإيبولا وكوفيد-١٩، فهناك عدَّة جزيئات قيد الدراسة يمكن أن تُستخدم في الكشف عن نوع محدد من العدوى وتشخيصه في الجسم البشري أو في عينة بشرية.

١٦٧- وعلى مدى فترة تزيد على ٢٠ عاماً، وفَّرت الوكالة، بالشراكة مع الفاو، التدريب والتجهيز لخبراء من جميع أنحاء العالم من أجل استخدام التكنولوجيات النووية والمستمدة من المجال النووي، بما يشمل التكنولوجيات المناعية (مثل القياس المناعي الإشعاعي (RIA))، والقياس المناعي الإنزيمي (اختبار إليزا)، والتكنولوجيات الجزيئية (اختبار التفاعل البوليميري المتسلسل (PCR)). وما فتئت هذه التكنولوجيات الحساسة والمتخصصة تُستخدم هي وتطبيقاتها بصورة متزايدة لأغراض الكشف المبكر والسريع عن الأمراض الحيوانية والحيوانية المصدر العابرة للحدود، تحديد خصائص تلك الأمراض ومراقبتها ومكافحتها. وقد استُخدمت هذه التقنيات في الآونة الأخيرة لتشخيص الأمراض المعدية التي يُحتمل أن يؤدي تفشيها إلى جائحة عالمية، مثل حمى الخنازير الأفريقية وداء الحمى القلاعية والإيبولا وزيكا وإنفلونزا الطيور ومتلازمة الشرق الأوسط التنفسية والمتلازمة التنفسية الحادة الوخيمة، وأخيراً كوفيد-١٩. ووفَّرت مختبرات الوكالة في زايبرسدورف إرشادات الخبراء وخدماتهم وإجراءات العمل الموحدة والتدريب على استخدام المعدات الوقائية الشخصية، بالإضافة إلى ما قدَّمته من بناء القدرات التقنية والتدريب على إجراءات الاختبار بالاقتران مع حُزم المعدات/الكواشف/المستهلكات التي أعدَّتها الوكالة لغرض التصدي لكوفيد-١٩ وقدَّمتها إلى ما يزيد على ١٢٠ دولة عضواً.

١٦٨- وقد تطورت الأجسام المضادة الأحادية النسيلة، منذ اكتشافها في عام ١٩٧٣، حيث صار من الممكن الآن استخدامها في المواد العلاجية البيولوجية الكبيرة الجزئيات، كما يمكن إنتاجها على نطاق واسع في المختبرات المتخصصة. ويمكن لهذه الأجسام المضادة التي تُستخدم في علاج الأورام أن ترتبط بمستضدات تستهدف نوعاً بعينه من الأورام، حيث تؤدي دور الناقل لتوصيل النويدات المشعة إلى موقع الورم المحدَّد. وقد نشأت هذه التقنية الجديدة في استخدام الأجسام المضادة الأحادية النسيلة الموسومة إشعاعيًّا بنظائر مشعة باعثة للفوتونات يمكن حقنها في الجسم البشري لتشخيص الإصابة بالسرطانات. وتُعرف هذه التقنية باسم التصوير المناعي الومضاني الإشعاعي.

١٦٩- وفي الخطوة التالية، أعدَّ العلماء أجساماً مضادة أحادية النسيلة موسومة إشعاعيًّا بنظائر مشعة باعثة لجسيمات بيتا وقادرة على التعرف على خلايا الأورام واستهدافها عن طريق قصفها بجسيمات بيتا عالية الطاقة بهدف تدمير الخلايا السرطانية. وتُعرف هذه التقنية باسم العلاج المناعي الإشعاعي.

١٧٠- وتبيَّن أنَّ الجزئيات السطحية الميكروبية الدخيلة يمكن أن تتسبَّب في إنتاج أجسام مضادة أحادية النسيلة تستهدف نوعاً معيناً من الكائنات الدقيقة في جسم العائل، ومن ثم تتيح استخدام التصوير المناعي الومضاني الإشعاعي والعلاج المناعي الإشعاعي للكشف عن مجموعة متنوعة من الأمراض المعدية، بما يشمل التهديدات الفطرية أو الفيروسية أو البكتيرية، مع إمكانية التطبيق للأغراض العلاجية. وتشير قواعد بيانات التجارب الإكلينيكية إلى إجراء ما لا يقل عن ٨٨ دراسة تتناول تجارب إكلينيكية لاستخدام الأجسام المضادة الأحادية النسيلة في المرضى المصابين بكوفيد-١٩. وتستكشف الدراسات الأولية أيضاً إمكانية استخدام التصوير المناعي الومضاني الشعاعي لتشخيص الإصابة بكوفيد-١٩، بالاستعانة بمستضدات سطحية فيروسية معيَّنة. ومن أمثلة ذلك استخدام الجسم المضاد المخلَّق المسمى "مضاد البروتين السكري S1 الموجود في أشواك فيروس SARS-CoV-2"، أو اختصاراً الجسم المضاد CR3022، والذي يُعتبر الآن عاملاً علاجيًّا يمكن أن يُستخدم في تشخيص كوفيد-١٩ والعلاج منه (الشكل زاي-١). وكان هذا الجسم المضاد قد استُحدث في بادئ الأمر ونُشر على نطاق تجاري لغرض استخدامه في إجراء الاختبارات خارج الجسم، مثل اختبار القياس المناعي الإنزيمي (اختبار إليزا). وقد نجحت عملية وسم الجسم المضاد CR3022 إشعاعيًّا باليود-١٣١ لأغراض دراسات الارتباط وفي إطار اختبار التحقُّق من المفهوم، ومن المقترح تطبيقه في صيغة علاجية موسومة إشعاعيًّا.



الشكل-زاي-١ - مخطط التطوير المحتمل للجسم المضاد الأحادي النسيلة CR3022 بوسمه إشعاعيًّا للأغراض التشخيصية في مواجهة فيروس كورونا SARS-CoV-2 المسبِّب للمتلازمة التنفسية الحادة الوخيمة (المصدر: الوكالة)

١٧١- بيد أنَّ هناك العديد من الأسئلة التي لا تزال بلا إجابة، ومنها تأثير الطفرات التي تطرأ على جينوم الفيروس في فعالية هذه الطريقة.

١٧٢- ووفقاً لإحدى الدراسات، فقد نجح المستحضر الصيدلاني الإشعاعي المسمى Bi-213 anti-HIV-1 gp41 في القضاء على الخلايا الأحادية النواة الموجودة في الدم المحيطي والمصابة بفيروس نقص المناعة البشرية دون إلحاق الضرر بالحائل الدموي الدماغي في البشر، وهو ما يمكن أن يمهِّد الطريق أمام العلاج من الإصابة بذلك الفيروس.

١٧٣- وتُعدُّ هذه التطورات الأخيرة المشجِّعة في تقنية المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية الجديدة التي تُحضَّر باستخدام أجسام مضادة أحادية النسيلة تستهدف نوعاً معيناً من الكائنات الدقيقة دليلاً على ما تنطوي عليه هذه التقنية من إمكانات فيما يتعلق بتشخيص وعلاج الأمراض المعدية. وسيكون العمل على استكشاف استخدام هذه المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية في محله وحينه تماماً لدى جميع الدول الأعضاء.

حاء- البيئة

حاء-١- استخدام التقنيات النووية والمستمدة من المجال النووي للنهوض بالمعارف المتعلقة بالكربون الأزرق عالميًّا والتصدي لآثار تغيُّر المناخ

الحالة

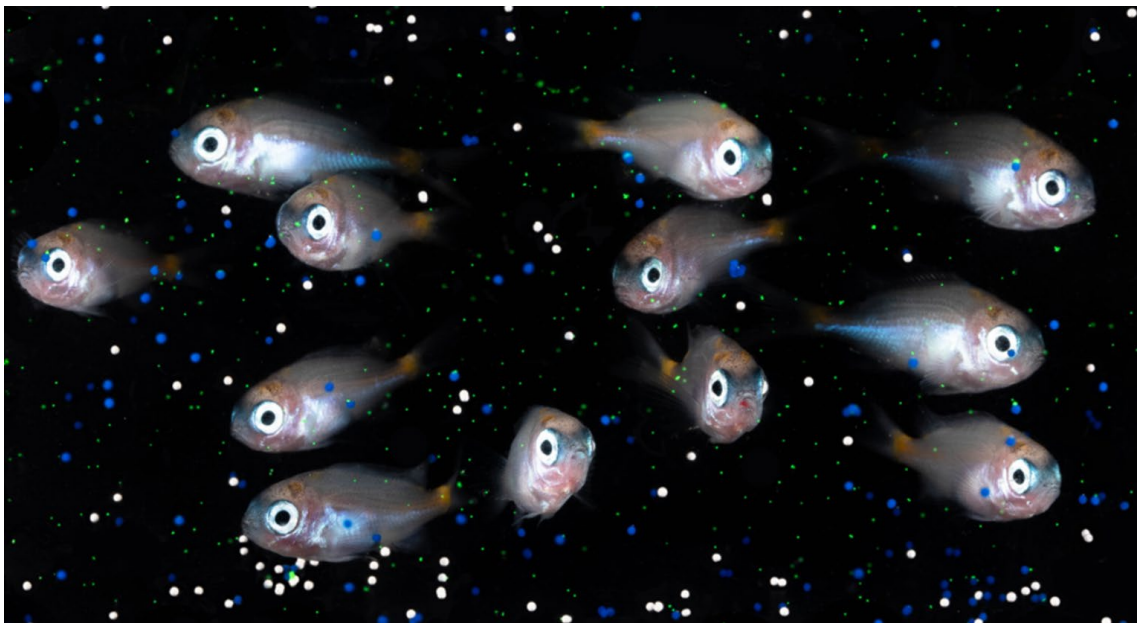
١٧٤- منذ أواخر القرن التاسع عشر، شهد الغلاف الجوي زيادة هائلة في محتواه من غازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز، وهو ما أدى إلى الاحترار العالمي المتزايد. وكانت أهم العناصر التي ساهمت في ذلك هي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري وإنتاج الأسمنت والتغيرات البشرية المنشأ في استخدامات الأراضي. وتؤدي المحيطات دوراً رئيسيًّا في تنظيم النظام المناخي العالمي عن طريق امتصاص ثاني أكسيد الكربون وتخزينه بعيداً عن الغلاف الجوي، أي أنَّها تقوم بدور بالوعة صافية لتصريف ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ، ومن ثمَّ التقليل كثيراً من معدَّل الاحترار العالمي.

١٧٥- ومن الآليات الرئيسية التي تمتص بها المحيطات ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي آلية المضخة المستندة إلى القابلية للذوبان (أي امتصاص ثاني أكسيد الكربون عن طريق تبادل الغازات ونقل الماء المثرى بثاني أكسيد الكربون إلى أعماق المحيطات بدفعه نحو الأسفل) وآلية المضخة البيولوجية (النقل العمودي للكربون العضوي الجسيمي المنتج عن طريق التمثيل الضوئي من سطح الماء إلى أعماق المحيطات).

الاتجاهات

١٧٦- يُعرف الكربون العضوي الذي تمتصه وتخزنه المحيطات باسم الكربون الأزرق. وتسهم النظم الإيكولوجية في المناطق الساحلية المغطاة بالنباتات، مثل مروج الحشائش البحرية والمستنقعات الناتجة عن المد والجزر وغابات الأيكات الساحلية، في مراكمة وتخزين كميات كبيرة من الكربون العضوي في رواسبها. ورغم أنَّ المساحة العالمية الإجمالية لهذه النظم الإيكولوجية أقل كثيراً من مساحة النظم الإيكولوجية للغابات الأرضية، فإنَّها تتمتع بإمكانات كبيرة من حيث القدرة على احتجاز الكربون، وهو ما يعني أنَّها ينبغي أن تُؤخذ في الحسبان ضمن الاعتبارات الرئيسية في الاستراتيجيات العالمية القائمة على الطبيعة والرامية إلى التكيُّف مع تغيُّر المناخ (الشكل حاء-١). ويمكن الاستفادة أيضاً من سجلات الرواسب التي حُدِّدت أعمارها بالاستعانة بالنظائر المشعة القصيرة العمر لاستخلاص بيانات بشأن التلوُّث بالمواد البلاستيكية القديمة (الشكل حاء-٢). وتعمل مختبرات البيئة التابعة للوكالة على وضع نماذج تقويمية جيولوجية تُستخلص من عينات الرواسب الجوفية الاسطوانية التي تُجمع من بيئات الأيكات الساحلية باستخدام مقتفيات إشعاعية قصيرة العمر مثل الرصاص-٢١٠ والبريليوم-٧ والثوريوم-٢٣٤ والسيزيوم-١٣٧.

الشكل-حاء-١ - التوزُّع العالمي للنظم البيئية الساحلية المحتوية على الكربون الأزرق.
(منقولٌ بتصرُّف من: https://thebluecarboninitiative.org)



الشكل-حاء-٢ - صورة مأخوذة للأسماك المعرضة للمواد البلاستيكية الدقيقة، في إطار مشروع للبحث والتطوير تنفِّذه مختبرات البيئة التابعة للوكالة في موناكو. (الصورة من: الوكالة)

١٧٧- وبالإضافة إلى ذلك، فقد بلغت الخسائر الحالية من الكربون الرسوبي بسبب التدهور الواسع النطاق في الموائل مبلغاً يستوجب اتخاذ إجراءات منسقة بهدف إيجاد موائل جديدة وإصلاح ما تدهور منها، وكذلك تنفيذ حلول إبداعية قائمة على الهندسة البيئية.

١٧٨- وبغية إدماج نظم الكربون الأزرق البيئية الساحلية في الاستراتيجيات القائمة الرامية إلى التخفيف من آثار تغيُّر المناخ، عن طريق تعويض انبعاثات غازات الدفيئة باحتجاز الكربون في هذه النظم، فإنَّ ذلك يتطلب وضع تقديرات كميَّة دقيقة لمعدلات تراكم احتجاز الكربون العضوي، حيث إن هذه التقديرات محدودة في الوقت الراهن ويشوبها قدر كبير من عدم اليقين. ويمكن تحديد معدلات احتجاز الكربون العضوي خلال الأطر الزمنية الممتدة لآلاف السنوات باستخدام الكربون-١٤، أما الأطر الزمنية الممتدة لعقود أو لمئات السنوات، فيمكن تحديد المعدلات فيها باستخدام النويدات المشعة الموجودة في البيئة، مثل الرصاص-٢١٠ والسيزيوم-١٣٧ ونظائر البلوتونيوم. ويوفِّر ذلك إطاراً زمنيًّا متوافقاً مع إجراءات الإدارة المتوخى اتخاذها في إطار أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة وعقد الأمم المتحدة لعلوم المحيطات من أجل التنمية المستدامة، وبما يمكِّن من تحديد معدلات احتجاز الكربون العضوي وتفاوتها مع مرور الزمن بفعل التغييرات الطبيعية والبشرية.

١٧٩- ويمكن للنويدات المشعة أيضاً أن تتيح إجراء تقييم فريد من نوعه لما إذا كانت الاضطرابات الطبيعية المنشأ أو البشرية المنشأ قد تسبَّبت في خسائر في الكربون المحتجز، على سبيل المثال عبر عودة الرواسب للتعلُّق بالمياه وعمليات التآكل. ويمكن استخدام النويدات المشعة الأقصر عمراً، مثل الثوريوم-٢٢٨ والثوريوم-٢٣٤ والبريليوم-٧، كمقتفيات لديناميات الترسيب في الأطر الزمنية الممتدة لأسابيع أو شهور أو حتى بضعة سنوات، وهو ما من شأنه أن يتوافق مع وضع أطر للسياسات بشأن الكربون الأزرق تدعم التقدير الكمي وتوفير التمويل لخفض انبعاثات الكربون.

١٨٠- وفي حين أنَّ هناك عدداً من الدراسات التي أُجريت بشأن الكربون الأزرق في المناطق الساحلية المغطاة بالنباتات خلال العقد الماضي (الشكل حاء-٣)، فلا تزال هناك أسئلة عديدة دون إجابة. وتتناول هذه الأسئلة جوانب مثل تقييم البقاع الساخنة حول العالم التي لا تزال غير مدروسة بالقدر الكافي في معظم الأحوال (مثل مروج الحشائش البحرية والأيكات الساحلية في البرازيل وآسيا)؛ والكيفية التي سيؤثر بها تغيُّر المناخ وغيره من الاضطرابات في مستويات الكربون الأزرق في نظم المناطق الساحلية المغطاة بالنباتات؛ والدور الذي تؤديه الطحالب الكبيرة؛ وأفضل إجراءات الإدارة التي يمكن اتخاذها لصون وتعزيز احتجاز الكربون في موائل الكربون الأزرق الساحلية. وللتقنيات النووية والتقنيات المستمدة من المجال النووي أهمية محورية في تقييم الدور الذي تؤديه الطحالب الكربونية والطحالب الكبيرة في دورة الكربون، وتحديد منشأ الكربون، وفهم العوامل التي تؤثر في عملية احتجاز الكربون في موائل الكربون الأزرق وفي ميزانية الكربون الخاصة بكلٍّ منها، وإجراءات التصرُّف الرامية إلى تعزيز استراتيجيات الكربون الأزرق.

الشكل-حاء-٣- اثنتان من عينات الرواسب الجوفية الاسطوانية المأخوذة في زنجبار بجمهورية تنزانيا المتحدة بهدف تقييم مخزونات الكربون العضوي ومعدلات دفنه كمقياس للقدرة على احتجاز الكربون.
(الصورة من: غلوريا سالغادو، جامعة إيديث كوان، بيرث، أستراليا)

١٨١- وتهدف الوكالة إلى دراسة عدَّة جوانب من المعارف العلمية عن الكربون الأزرق ونقل التكنولوجيات النووية ذات الصلة خلال العقد المقبل. وتشارك الوكالة حاليًّا، عن طريق مختبرات البيئة التابعة لها، في مشاريع متعلقة بالكربون الأزرق في أستراليا والبرازيل وجمهورية تنزانيا المتحدة والدانمرك وفرنسا وميانمار ونيوزيلندا والهند والولايات المتحدة الأمريكية. وتشارك الوكالة أيضاً في مشروع مبتكر تنسِّقه منظمة Oceans 2050 ويهدف إلى تقييم قدرة مزارع الأعشاب البحرية حول العالم على احتجاز الكربون. ويجري إعداد مشاريع للتعاون التقني على الصعيدين الوطني والإقليمي من أجل تقييم أهمية احتجاز الكربون في النظم المائية للاستراتيجيات القائمة على الطبيعة والرامية إلى التكيُّف مع تغيُّر المناخ، والمحافظة على البيئة، والفوائد الاجتماعية والاقتصادية.

المرفق

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد في العالم (في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠٢٠) [أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠٢٠		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠٢٠	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	٪ من المجموع	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٨	٢٨٥٧٨	٣	٣٤٥٩	٢٠١,٨	٢٠,٦	١٣٧٢	٥
الأرجنتين	٣	١٦٤١	١	٢٥	١٠,٠	٧,٥	٩١	٢
أرمينيا	١	٤١٥			٢,٦	٣٤,٥	٤٦	٨
إسبانيا	٧	٧١٢١			٥٥,٨	٢٢,٢	٣٥٠	١
ألمانيا	٦	٨١١٣			٦٠,٩	١١,٣	٨٥٢	٧
الإمارات العربية المتحدة	١	١٣٤٥	٣	٤٠٣٥	١,٦	١,١	٠	٥
أوكرانيا	١٥	١٣١٠٧	٢	٢٠٧٠	٧١,٥	٥١,٢	٥٣٣	٦
باكستان	٥	١٣١٨	٢	٢٠٢٨	٩,٦	٧,١	٨٧	٥
البرازيل	٢	١٨٨٤	١	١٣٤٠	١٣,٢	٢,١	٥٩	٣
بلجيكا	٧	٥٩٤٢			٣٢,٨	٣٩,١	٣١٠	٧
بلغاريا	٢	٢٠٠٦			١٥,٩	٤٠,٨	١٦٩	٣
بنغلاديش			٢	٢١٦٠				
بيلاروس	١	١١١٠	١	١١١٠	٠,٣	١,٠	٠	٢
تركيا			٢	٢٢٢٨	غير منطبق	غير منطبق		
الجمهورية التشيكية	٦	٣٩٣٤			٢٨,٤	٣٧,٣	١٧٦	١٠
جمهورية إيران الإسلامية	١	٩١٥	١	٩٧٤	٥,٨	١,٧	٩	٤
جمهورية كوريا	٢٤	٢٣١٥٠	٤	٥٣٦٠	١٥٢,٦	٢٩,٦	٥٩٦	٢
جنوب أفريقيا	٢	١٨٦٠			١١,٦	٥,٩	٧٢	٣
رومانيا	٢	١٣٠٠			١٠,٦	١٩,٩	٣٧	١١
سلوفاكيا	٤	١٨٣٧	٢	٨٨٠	١٤,٤	٥٣,١	١٧٦	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٦,٠	٣٧,٨	٣٩	٣
السويد	٦	٦٨٨٢			٤٧,٤	٢٩,٨	٤٧٤	٠
سويسرا	٤	٢٩٦٠			٢٣,٠	٣٢,٩	٢٢٨	١١
الصين	٥٠	٤٧٥٢٨	١٣	١٢٥٦٥	٣٤٤,٧	٤,٩	٤١٨	٨
فرنسا	٥٦	٦١٣٧٠	١	١٦٣٠	٣٣٨,٧	٧٠,٦	٢٣٣٧	٠
فنلندا	٤	٢٧٩٤	١	١٦٠٠	٢٢,٤	٣٣,٩	١٦٧	٤
كازاخستان							٢٥	١٠
كندا	١٩	١٣٦٢٤			٩٢,٢	١٤,٦	٧٨٨	٦
المكسيك	٢	١٥٥٢			١٠,٩	٤,٩	٥٧	١١
المملكة المتحدة	١٥	٨٩٢٣	٢	٣٢٦٠	٤٥,٧	١٤,٥	١٦٣٤	٧
الهند	٢٢	٦٢٥٥	٧	٤٨٢٤	٤٠,٤	٣,٣	٥٤٨	١١
هنغاريا	٤	١٩٠٢			١٥,٢	٤٨,٠	١٤٢	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٩	٣,٣	٧٦	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٤	٩٦٥٥٣	٢	٢٢٣٤	٧٨٩,٩	١٩,٧	٤٦٠٠	١٠
اليابان	٣٣	٣١٦٧٩	٢	٢٦٥٣	٤٣,١	٥,١	١٩٣٢	٦
المجموع [ب]، [ج].	٤٤٢	٣٩٢٦١٢	٥٢	٥٤٤٣٥	٢٥٥٣,٢		١٨٧٧٢	١٠

(أ) المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى (نظام PRIS) (www.iaea.org/pris) في ١ تموز/يونيه ٢٠٢١.

(ب) تشمل الأرقام الإجمالية البيانات التالية المتعلقة بتايوان، الصين: ٤ وحدات عاملة بقدرة إجمالية تبلغ ٣٨٤٤ ميغاواط (كهربائي).

(ج) يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً، ٨ أشهر) وكازاخستان (٢٥ عاماً، ١٠ أشهر) وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ أشهر)، والمحطات المغلقة والعاملة في تايوان، الصين (٢٣٢ عاماً و٨ أشهر).

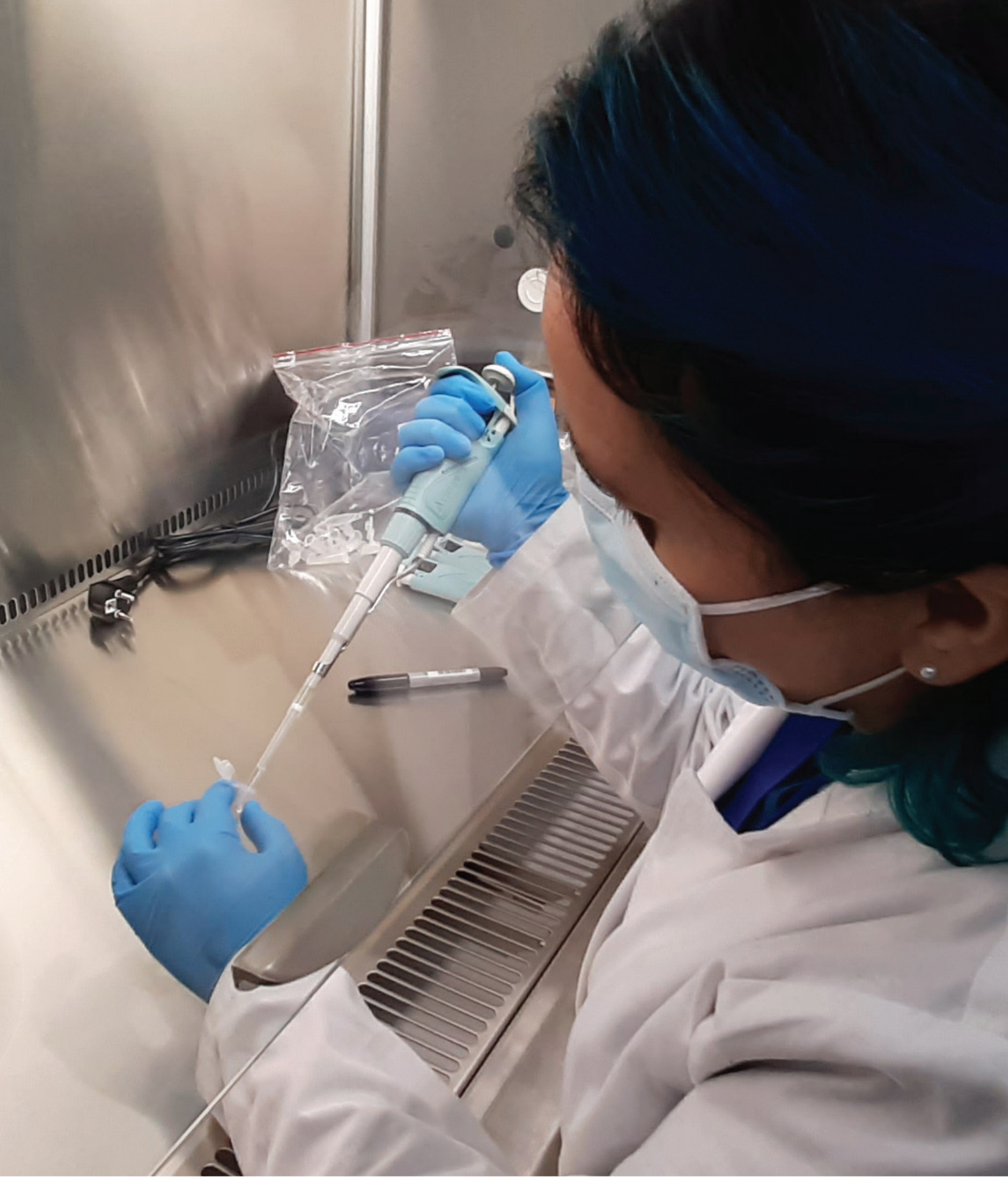
الجدول دال-١- الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم

نوع التطبيقات [أ]	عدد مفاعلات البحوث المشاركة [ب]	عدد الدول الأعضاء التي تستضيف مرافق من هذا النوع
التدريس/التدريب	١٦١	٥٠
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١١٦	٤٩
إنتاج النظائر المشعة	٨٢	٤١
التصوير الشعاعي النيوتروني	٧٠	٣٧
تشعيع المواد/الوقود	٦٧	٢٦
التشتُّت النيوتروني	٤٤	٢٨
التقويم الجيولوجي	٢٣	٢٠
التحويل (معالجة السليكون)	٢٢	١٥
التحويل (الأحجار الكريمة)	١٩	١٢
العلاج النيوتروني، أساساً أنشطة للبحث والتطوير	١٥	١٢
قياس البيانات النووية	١٤	٧
استخدامات أخرى [ج]	١١٧	٣٤

[أ] يَرِدُ وصف لهذه التطبيقات بمزيد من التفاصيل في المنشور الصادر عن الوكالة بعنوان *Applications of Research Reactors* ("تطبيقات مفاعلات البحوث") (العدد NP-T-5.3 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، ٢٠١٤).

[ب] من بين مفاعلات البحوث المأخوذة في الحسبان البالغ عددها ٢٣٦ مفاعلاً (بما يشمل ٢٢١ مفاعلاً عاملاً و١٥ مفاعلاً مغلقاً بصفة مؤقتة، في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠٢٠).

[ج] تشمل التطبيقات الأخرى معايرة الأجهزة واختبارها، وتجارب التدريع، وإنشاء المصادر البوزيترونية، ودراسات حرق النفايات النووية.



الوكالة الدولية للطاقة الذرية
Vienna International Centre, P.O. Box 100
1400 Vienna, Austria
الهاتف: ٠-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
رقم الفاكس: ٧-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
البريد الإلكتروني: Official.Mail@iaea.org
www.iaea.org

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

21-01295A