استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2022

تقرير من المدير العام

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

GC(66)/INF/4

استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2022

تقرير من المدير العام

GC(66)/INF/4

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
أيلول/سبتمبر 2022
IAEA/NTR/2022

المحتويات

تصدير 5
تصدير من المدير العام 6
موجز جامع 7
ألف- القوى النووية 12
ألف-1- التوقعات بشأن القوى النووية12
ألف-2- محطات القوى العاملة 14
ألف-3- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسِّعة 17
ألف-4- تطوير تكنولوجيا القوى النووية 21
ألف-4-1- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء 22
ألف-4-2- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية، بما في ذلك المفاعلات المرتفعة الحرارة 24
ألف-4-3- المفاعلات السريعة 27
ألف-4-4- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية 28
ألف-4-5- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل 30
باء- دورة الوقود النووي 34
باء-1- المرحلة الاستهلالية 34
باء-2- المرحلة الختامية 36
جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة 38
جيم-1- الإخراج من الخدمة 38
جيم-2- الاستصلاح البيئي 42
جيم-3- التصرُّف في النفايات المشعة 43
دال- مفاعلات البحوث ومعجِّلات الجسيّمات 46
دال-1- مفاعلات البحوث 46
دال-2- معجِّلات الجسيّمات والأجهزة ذات الصلة 49
هاء- البيانات الذرية والنووية 51
واو- البيئة 52
واو-1- التكنولوجيات الإشعاعية لمعالجة التلوُّث بالمواد البلاستيكية 53
واو-2 التقنيات النووية والنظيرية لمعالجة التلوث البلاستيكي في البيئة البحرية 54
زاي- الأغذية والزراعة 58
زاي-1- البصمات النظيرية الجديدة لتقييم وتخفيف ثبات ونقل المضادات الحيوية وانعكاساتها على مقاومة مضادات الميكروبات 58

زاي-2- التنوع الجيني المستحث فضائيًا، وتحسين السلالات النباتية وعلم الأحياء الفلكي لمكافحة تغير المناخ 61
حاء- الصحة البشرية 63
حاء-1- التشخيص العلاجي: خارطة طريق لتقديم العناية الشخصية لمرضى السرطان 63
حاء-2- أوجه التقدم المحرز في مجال علوم التغذية: مساعدة البلدان في معالجة وباء البدانة بالبيانات 65
طاء- النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية 68
طاء-1- مسارات جديدة لإنتاج النظائر المشعة الطبية 68
ياء- الذكاء الاصطناعي من أجل العلوم النووية وتطبيقاتها 70
المرفق 73

تصدير

- تلبيةً لطلبات الدول الأعضاء، تُعدُّ الأمانة كلَّ عام استعراضاً شاملاً للتكنولوجيا النووية وتُصدره في تقرير بعنوان *استعراض التكنولوجيا النووية*. ويَرِدُ مرفقاً بهذه الوثيقة التقريرُ الخاص بالعام الحالي، والذي يسلط الضوء على أبرز المستجدَّات في عام 2021.

- ويتناول *استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2022* المجالات المختارة التالية: القوى النووية، ودورة الوقود النووي، والإخراج من الخدمة، والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة، ومفاعلات البحوث ومعجِّلات الجسيّمات، والبيانات الذرية والنووية، والبيئة، والأغذية والزراعة، والصحة البشرية، والنظائر المشعة والتكنولوجيات الإشعاعية، واستخدام الذكاء الاصطناعي لأغراض العلوم والتطبيقات النووية.

- وقد قُدِّمت مسودة هذا الاستعراض إلى مجلس المحافظين خلال دورته المعقودة في آذار/مارس 2022 ضمن الوثيقة GOV/2022/2. وأُعدَّت الصيغة النهائية في ضوء المناقشة التي جرت في مجلس المحافظين، وكذلك في ضوء التعليقات التي وردت من الدول الأعضاء.

تصدير من المدير العام

يواجه المجتمع الدولي تحديات عالمية عديدة، منها تغيُّر المناخ وتلوث الهواء وأمن الطاقة والأمن الغذائي والتلوث البلاستيكي والسرطان والبدانة.

وبغية التصدي لهذه التحديات، لا بد لنا من استخدام جميع الأدوات المتاحة.

وتساعد التكنولوجيات النووية، بالاقتران مع تكنولوجيات أخرى، الدول الأعضاء على اتخاذ قرارات مدروسة بشأن المسار الصحيح الذي يتعيَّن اتباعه — سواءً فيما يتعلق باستخدام الذكاء الاصطناعي لمختلف الأغراض النووية، أو إنتاج الطاقة الموثوقة المنخفضة الكربون، أو المساهمة في فهم ومكافحة التلوث البلاستيكي، أو إنقاذ الأرواح عن طريق تحسين التغذية ورعاية المصابين بالسرطان.

وخلال الدورة السادسة والعشرين لمؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (COP26)، والتي عُقدت في عام 2021 في غلاسكو بالمملكة المتحدة، ساهمت الوكالة في المناقشة من خلال نهجها العلمي المتفرد القائم على الأدلة لتوضيح الدور الحيوي الذي تؤديه التكنولوجيا النووية سواء في مكافحة الأزمة المناخية أو في التكيف بفعالية مع عواقبها المتزايدة الشدَّة. وتجسيداً للدور المتزايد الذي تؤديه التكنولوجيات النووية، ستواصل الوكالة المشاركة في الحوار الرفيع المستوى حول الطاقة النووية والتقنيات والتطبيقات النووية في الدورة السابعة والعشرين لمؤتمر الأطراف ((COP27، التي ستُعقد في شرم الشيخ في مصر.

ويلخِّص *استعراض التكنولوجيا النووية لعام 2022* الحالة الراهنة في بعض المجالات الرئيسية للتكنولوجيا النووية، ويسلِّط الضوء على التطورات المستجدة والواعدة في تلك المجالات.

الشكل- التصدير-1- زيارة المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، لمحطة الأدميرال ألفارو ألبرتو للقوى النووية. (رودوفيا ريو سانتوس - إيتورنا، أنجرا دوس ريس، البرازيل)

موجز جامع

1- لأول مرة منذ وقوع حادث محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية قبل عقد من الزمن، رفعت الوكالة سقف توقعاتها فيما يخصُّ النمو المحتمل لقدرة القوى النووية على توليد الكهرباء خلال العقود المقبلة. وعلى وجه الإجمال، شهدت القدرة على توليد القوى النووية زيادة تدريجية منذ عام 2011، بما في ذلك زيادة نحو 20.7 غيغاواط (كهربائي) في القدرة الجديدة بفضل توصيل وحدات جديدة بالشبكة الكهربائية وزيادة قدرة مفاعلات قائمة.

2- وفي نهاية عام 2021، كانت القدرة العالمية لمحطات القوى النووية قيد التشغيل تبلغ 389.5 غيغاواط (كهربائي) تولِّدها 437 من مفاعلات القوى النووية العاملة في 32 بلداً. وعلى مدى العام، وُصِّل بالشبكة الكهربائية ما يزيد على 5.2 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة المستمدة من أربعة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط في الإمارات العربية المتحدة وباكستان والصين، ومفاعل واحد يعمل بالماء الثقيل المضغوط في الهند، ومفاعل واحد مرتفع الحرارة مبرَّد بالغاز في الصين. وخلال الفترة نفسها، أسفرت عمليات إنهاء الخدمة عن فقدان 8.7 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية.

3- وكان هناك ما مجموعه 26 دولة عضواً في مراحل مختلفة من إعداد بنيتها الأساسية الوطنية لاستهلال برنامج جديد للقوى النووية، ويُتوقع أنَّ ما بين 10 و12 من البلدان المستجدَّة سوف تأخذ بالقوى النووية بحلول عام 2035، ليزيد عدد البلدان المشغِّلة بمقدار الثلث. ومن التطورات التكنولوجية المهمة التي تجذب اهتمام واضعي الخطط والسياسات في مجال الطاقة أنَّ هناك مجموعة متعددة من المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية (المفاعلات النمطية الصغيرة) الأولى من نوعها التي يُتوقع توافرها ونشرها بحلول عام 2030. ونتيجةً لذلك، أخذت عدَّة بلدان مستجدة المفاعلات النمطية الصغيرة في الحسبان عند النظر في الاعتبارات التكنولوجية، رغم أنَّه من المتوقع أن تظلَّ المفاعلات المتقدمة الكبيرة الحجم المبرَّدة بالماء تشكِّل الجانب الأكبر من الإضافات الجديدة إلى القدرة النووية على مدى العقود الثلاثة المقبلة. وهناك حاجة إلى توافر البنية الأساسية الوطنية للقوى النووية للحفاظ على نفس القدر من الانتباه الصارم والمتواصل إلى الأمان النووي والأمن النووي والمتطلبات المتعلقة بالضمانات فيما يخص المفاعلات المتقدِّمة الكبيرة والمفاعلات النمطية الصغيرة.

4- واستمر التشغيل الموثوق لمحطات القوى النووية حول العالم خلال جائحة كوفيد-19 من خلال اتباع نُهُج تشغيلية مبتكرة وتنفيذ تدابير خاصة لحماية العاملين. وأثبت أسطول القوى النووية مجدَّدا أن عملياته التشغيلية تتسم بالموثوقية والقدرة على الصمود والتكيُّف خلال مثل هذه الأوقات العصيبة.

5- ولا يزال التشغيل الطويل الأجل عنصراً جوهريًّا لا في التحوُّل نحو 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.

6- وأحرزت دول أعضاء عديدة تقدُّماً ملموساً في تطوير تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة لغرض نشرها في الأمد القريب. وبالإضافة إلى محطة القوى النووية العائمة أكاديميك لومونوسوف في الاتحاد الروسي، والتي بدأ تشغيلها التجاري منذ أيار/مايو 2020، بدأت الصين تشييد مفاعل من طراز ACP بقدرة 125 ميغاواط (كهربائي). وفي الوقت الراهن، يوجد قيد التطوير ما يزيد على 70 من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة، سواء لأغراض التطبيقات الكهربائية أو غير الكهربائية. وشهدت عدَّة بلدان أيضاً تكثيف أنشطة التطوير المتعلقة بمجموعة فرعية من المفاعلات النمطية الصغيرة تُعرف باسم المفاعلات المتناهية الصغر يُتوخَّى أن تكون الحل الأمثل لتوفير التوليد المشترك للحرارة والكهرباء في المناطق النائية والجزر الصغيرة و/أو أن تحل محلَّ مولدات الديزل. وبغية مساعدة الدول الأعضاء على التوصُّل إلى فهم مشترك لاحتياجاتها وخصوصياتها فيما يتعلق بتكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة، استهلَّت الوكالة إطاراً جديداً لإعداد المتطلبات والمعايير التي يشترطها عموم المستخدمين في تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة وتكنولوجياتها.

7- وما فتئ استخدام الطاقة النووية في أغراض تتجاوز إنتاج الكهرباء يحظى بزخم غير مسبوق حول العالم. وخلال عام 2021، استُخدم ما مجموعه 61 مفاعلاً نوويًّا عاملاً في التطبيقات غير الكهربائية (تحلية مياه البحر وتدفئة الأحياء السكنية وتوفير الحرارة للمعالجة الصناعية) لتوليد كمية من الحرارة تبلغ تقريباً 2167 غيغاواط-ساعة من الكهرباء دعماً للتوليد المشترك للطاقة النووية، بما في ذلك 5 مفاعلات دعمت تحلية مياه البحر.

8- وحافظ مشروع مفاعل إيتير على التقدُّم المطرد في عملية تجميع مكونات الجهاز والمحطة، رغم الضغوط غير المسبوقة بسبب الجائحة والصعوبات التي واجهت تصنيع بعض المكونات الأولى من نوعها في المفاعل إيتير. وأُحرز تقدُّم كبير في عملية تجميع مكونات جهاز المفاعل وإدماجها. واستُهلَّ عدد من المبادرات الرامية إلى وضع إطار رقابي خاص للاندماج، حيث يُعتبر ذلك واحداً من العناصر الرئيسية في تطوير الاندماج ليكون مصدراً مجديًّا من الناحية التجارية على المستوى الوطني.

9- وبسبب استمرار انخفاض سعر اليورانيوم، اضطُّر العديد من منتجي اليورانيوم الأساسيون إلى خفض معدلات الإنتاج. وقد دفع هذا العديد من المستثمرين والصناديق والتجار ومنتجي اليورانيوم الأساسيين إلى شراء ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم (U_3O_8) الموجود في السوق لمواجهة التحول المتوقع في العرض والطلب على ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم. ونتيجة لتراجع الأرصدة والتسارُع في معدل تداول ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم في عام 2021، شهد سعر التسليم الفوري زيادة كبيرة بحلول نهاية العام مقارنة بالربع الأول من عام 2021. وحفزت الزيادات الأخيرة في سعر اليورانيوم في السوق بعض الاستثمارات التي انطوت على أنشطة استكشاف وتطوير متجددة في عام 2021 بالإضافة إلى استئناف قدر من الإنتاج الأولي.

10- ومن المتوقع أنَّ العديد من الأسباب التي أدَّت إلى إغلاق المرافق النووية خلال العقد الماضي – أي العوامل السياسية والاقتصادية، وتكاليف الصيانة و/أو التجديد، وظروف سوق الكهرباء – ستظلُّ قائمة في المستقبل، بل إنَّ وتيرة عمليات الإغلاق قد تتسارع بسبب التركيبة العمرية للأساطيل الحالية، لكنَّ تمديد الأعمار الافتراضية سيعوِّض ذلك جزئيًّا. وقد تشهد العقود الثلاثة المقبلة إنهاء خدمة الغالبية العظمى من مفاعلات القوى النووية التي يصل عمرها حاليًّا إلى 30 عاماً أو أكثر والبالغ عددها نحو 300 مفاعل. ومن المتوقع حدوث تطور مماثل في حالة مفاعلات البحوث بالنظر إلى التشابه الكبير في التركيبة العمرية لهذا الأسطول أيضاً. وتشير الاتجاهات الحالية إلى الميل إلى اتباع نهج التفكيك الفوري، رغم أنَّ التفكيك المؤجل كان الاستراتيجية المفضلة تاريخيًّا.

11- واتخذت بعض الدول الأعضاء خطوات كبيرة في عام 2021 صوب المراحل النهائية للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مرافقها. وفيما يتعلق ببرامج التخلص من النفايات القوية الإشعاع في المستودعات الجيولوجية العميقة، بدأت الشركة الفنلندية للتصرف في النفايات (Posiva) حفر أول أنفاق للتخلص من النفايات في عام 2021 في موقع أونكالو للمستودعات الجيولوجية العميقة. ويشهد التعاون الدولي في مجال التصرف في النفايات المشعة توسُّعاً مستمراً، لا سيما فيما يتعلق ببرامج التخلص الجيولوجي العميق. وأُحرز في 2021 أيضاً تقدُّم كبير في مجال التصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة، وتحديداً فيما يتعلق بالاسترجاع والتكييف.

12- واستمر تزايد الاهتمام العالمي بمفاعلات البحوث. وبالإضافة إلى مفاعلات البحوث العاملة البالغ عددها 235 مفاعلاً، كان هناك أحد عشر مفاعلاً قيد التشييد في عام 2021. وتستفيد العديد من البلدان من فرص الوصول إلى مفاعلات البحوث من خلال مبادرات التعاون الدولية والإقليمية. وبدأ بثُّ التجارب من اثنين من مختبرات المفاعلات على شبكة الإنترنت، في الجمهورية التشيكية وجمهورية كوريا، لفائدة طلاب في بلدان أخرى.

13- ومع توافر القدرات الحاسوبية وأدوات تحليل البيانات المتطورة، بدأت الصناعة النووية تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلُّم الآلي والتعلُّم العميق في طائفة واسعة من الأنشطة التي يمكن أن تحدث تحوُّلاً نوعيًّا في طريقة تصميم النظم النووية وترخيصها وتشغيلها. وينطوي الذكاء الاصطناعي على إمكانية تحسين إدماج الحسابات والبيانات التجريبية التي تُجمع من تجارب صغيرة النطاق أو من أجهزة الاستشعار أثناء التشغيل. والاعتماد السريع للذكاء الصناعي/التعلُّم الآلي في مجالات متعددة هو اتجاه واضح سوف يؤثِّر أيضاً في الفيزياء النووية وتطوير مكتبات البيانات النووية.

14- وينطوي الذكاء الاصطناعي أيضاً على إمكانية هائلة لتسريع وتيرة التطور التكنولوجي في العديد من المجالات النووية، من الصحة البشرية إلى الاندماج والعلوم النووية. ويمكِّن الذكاء الاصطناعي الخبراء من إجراء تحليل سريع لكميات ضخمة من البيانات النظيرية المتعلقة بالمياه والمخزنة في الشبكات العالمية، وهو بذلك يساعد العلماء بالفعل على فهم تأثير تغيُّر المناخ والنمو السكاني في الموارد المائية. ويمكن للذكاء الاصطناعي أن يسهم أيضاً في مكافحة السرطان وتحسين إجراءات التأهب لحالات تفشي الأمراض الحيوانية المصدر في المستقبل. وحتى يتسنى تعزيز استخدام الذكاء الاصطناعي في العلوم والتطبيقات النووية، يتعيَّن إقامة شراكات دولية قوية وتعاون متعدد القطاعات من أجل وضع إرشادات بشأن التنظيم الرقابي والمسائل الأخلاقية والتعليم والتدريب، وكذلك من أجل تقاسم الخبرات والمعارف والممارسات الجيدة.

15- وأثبت قياس الطيف الكتلي باستخدام المُعجِّلات أنَّه تقنية فائقة الحساسية تنطوي على إمكانات كبيرة للاستخدام في تطبيقات تحليلية متعلقة بمشاكل المجتمع الحديث. وتُستخدم هذه التقنية حاليًّا في مجال علم الآثار وتطبيقات الطب الحيوي ودراسات تغير المناخ والهيدرولوجيا وعلوم المحيطات والعديد من المجالات الأخرى ذات الأهمية المجتمعية والاقتصادية المتزايدة. وأدت التطورات التكنولوجية الحديثة أيضاً إلى توسيع مجال تطبيقات هذه التقنية، حيث أتاحت دراسة طائفة واسعة من عناصر التراث الثقافي والطبيعي وكذلك الكشف عن عمليات التزوير والاتجار غير المشروع بالمنتجات.

16- وتوفر التكنولوجيات الإشعاعية المبتكرة المستخدمة في إعادة التدوير وتقنيات الاقتفاء النظيري المستخدمة في الرصد في المحيطات حلولاً لمواجهة التلوث البلاستيكي، الذي يُعدُّ واحداً من أكثر التحديات البيئية العالمية إلحاحاً ويشكِّل تهديدًا مباشرًا للتنمية المستدامة. وتستند مبادرة "تسخير التكنولوجيات النووية لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية (مبادرة NUTEC Plastics)، التي أُطلِقت في عام 2021، إلى جهود الوكالة لمعالجة التلوُّث بالمواد البلاستيكية من خلال إعادة التدوير باستخدام التكنولوجيا الإشعاعية والرصد البحري باستخدام تقنيات الاقتفاء النظيري.

17- ومن خلال التطبيق المبتكر لحزم أشعة غاما والحزم الإلكترونية، يمكن توفير طريقة فعالة لفرز النفايات البلاستيكية من أجل توجيهها عبر تدفقات إعادة التدوير. وتسهم التقنيات النووية والنظيرية، بالاقتران مع نمذجة حركة المياه والتشتت في المحيطات، في تتبُّع مصادر المواد البلاستيكية ومصيرها في المحيطات. وهي تساعد العلماء على إعادة تكوين الاتجاهات التاريخية للتلوث البحري بالمواد البلاستيكية والوصول إلى فهم أفضل بشأن تقادم المواد البلاستيكية الدقيقة في مرحلة ما بعد الترسُّب.

18- وفي حين تُستخدم المواد المضادة للميكروبات، مثل المضادات الحيوية ومضادات الفيروسات ومضادات الفطريات ومضادات الطفيليات، للوقاية والعلاج من الإصابة بالميكروبات في البشر والحيوانات والنباتات، فإنَّ استخدامها الخاطئ والمفرط يشكِّل تهديداً للصحة العامة على الصعيد العالمي، حيث يؤدي حاليًّا إلى 000 700 حالة وفاة سنويًّا. وتحليل النظائر المستقرة المحدَّدة للمركب وتكنولوجيات السبر أدوات قوية لتقييم المواد المضادة للميكروبات. ومن المتوقع أن يؤدي إدماج هذه التقنيات النظيرية والتقنيات الجزيئية المتقدمة إلى التوصل إلى فهم أفضل لمصير وديناميات المضادات الحيوية في السماد العضوي المستخدم وآثارها في مقاومة المضادات الحيوية في البيئة.

19- وهناك اهتمام متزايد بفهم تأثير بيئة الفضاء في إحداث طفرات في جينومات النباتات وفي تعديل الفسيولوجيا النباتية، ومن ثم تحسين قدرة النباتات على تحمل الظروف غير المؤاتية للنمو على الأرض، مثل الظروف التي يتسبَّب فيها تغيُّر المناخ. ومن المتوقع أن يشهد هذا المجال تقدماً سريعاً مع استمرار الاهتمام باستكشاف البيولوجيا النباتية في الفضاء، سواء لتوفير الغذاء لرواد الفضاء أو لاستخدام الطفرات المفيدة الناتجة عن التعرض للفضاء لاستيلاد أصناف محاصيل قادرة على التكيف.

20- وفي مجال مكافحة السرطان، تجمع تقنية التشخيص العلاجي القائم على النظائر بين التشخيص والعلاج لتمكين المهنيين الطبيين من التركيز على الاحتياجات المحددة لكل مريض. ويختلف النهج التشخيصي العلاجي عن العلاج الإشعاعي التقليدي في أنَّه يتيح قدراً أكبر من الدقة من خلال استهداف الورم بقذائف مشعة دون المساس بالأنسجة السليمة المحيطة به، مما يزيد من فعالية العلاج وأمانه في آن واحد. وتركِّز معظم التطبيقات البارزة في الوقت الراهن على أورام الأعصاب والغدة الصماء، والأورام اللمفاوية، وسرطانات البروستاتا والثدي والرئة والغدة الدرقية. وهناك حاجة متزايدة إلى توسيع نطاق التعاون والتوحيد على الصعيد الدولي في تدريب الخبراء الطبيين والعلميين وإرساء البنية الأساسية الطبية المتخصصة.

21- ووصلت الأمراض المرتبطة بالبدانة إلى مستويات وبائية على الصعيد العالمي، حيث تؤدي زيادة الوزن أو البدانة إلى وفاة ما لا يقل عن 2.8 مليون شخص سنويًّا. ومن المقدر أنَّ تكلفة الأمراض المرتبطة بالبدانة سوف تبلغ 1.2 تريليون دولار سنويًّا بحلول عام 2025. وتوفِّر تقنية الماء المزدوج الترقيم القائمة على النظائر المستقرة بيانات بالغة الأهمية بشأن استهلاك الجسم البشري للطاقة، وسوف تزود واضعي السياسات بالأدلة اللازمة لوضع سياسات أكثر فعالية في مجالي التغذية والصحة من أجل مكافحة وباء البدانة الآخذ في التفشي حول العالم. بيد أنَّ هناك حاجة لجمع مزيد من البيانات من البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط لتعزيز مستوى التمثيل العالمي في الدراسات وتمكين واضعي السياسات من الاستناد إلى الأدلة المتاحة من أجل إيلاء الأولوية لاتخاذ الإجراءات الضرورية في مجال التغذية والتصدي لوباء البدانة.

22- تُستخدم النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية لإنقاذ أرواح المصابين بالسرطان وغيره من الأمراض المزمنة، سواءً في التشخيص أو في العلاج. ولذلك يُعدُّ توفير إمدادات مستمرة من النظائر المشعة الرئيسية أمراً بالغ الأهمية. وتوفر المعجلات الخطية ومحطات القوى النووية مسارين جديدين لإنتاج الموليبدينوم-99، أكثر النظائر المشعة الطبية استخداماً حول العالم، مما يفتح الآفاق أمام تعزيز وتدعيم سلسلة الإمداد العالمية الخاصة بذلك النظير المشع. وقد بدأ بالفعل استخدام الحزم الإلكترونية العالية الطاقة في إنتاج الموليبدينوم-99 على نطاق تجاري.

23- ويقوم إنتاج النظائر المشعة في المفاعلات النووية على تفاعلات أسر النيوترونات في المادة المستهدفة. وعادة ما تُستخدم مفاعلات البحوث لإنتاج النظائر المشعة للتطبيقات العلاجية في مجال الطب النووي. وتشعيع المستهدفات في محطات القوى النووية هو المسار المعتاد لإنتاج نظائر مشعة مثل الكوبلت-60 الذي يُستخدم في الصناعة وفي التشعيع الداخلي. وفي عام 2021، أذنت الهيئة الرقابية باستخدام مفاعل تجاري من نوع كاندو في إنتاج الموليبدينوم-99. ويجري حاليًّا استكشاف إمكانية إنتاج أنواع مهمة أخرى من النظائر المشعة الطبية، بما في ذلك اللُّتِشيُوم-177 والهولميوم-166. وقد يفتح ذلك آفاقاً جديدة أمام المصممين للنظر في الاستفادة من مفاعلات القوى التي لديها القدرة على إنتاج النظائر المشعة.

ألف- القوى النووية

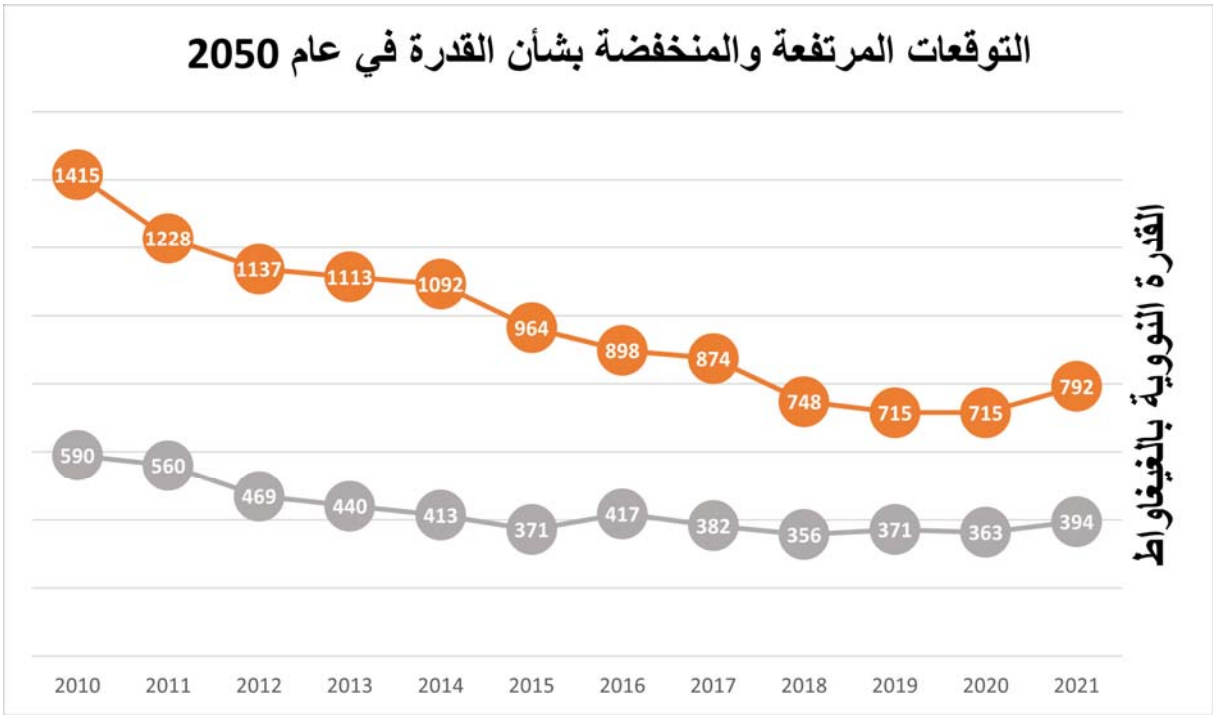
ألف-1- التوقعات بشأن القوى النووية

الحالة

1- لأول مرة منذ وقوع حادث فوكوشيما دايتشي قبل عقد من الزمن، رفعت الوكالة سقف توقعاتها فيما يخصُّ النمو المحتمل لقدرة القوى النووية على توليد الكهرباء خلال العقود المقبلة. وهذا التغيُّر في التوقعات السنوية للوكالة بشأن هذا المصدر للطاقة المنخفض الكربون لا يمثِّل حتى الآن اتجاهاً جديداً، وإنما يأتي في سياق سعي العالم إلى الابتعاد عن استخدام الوقود الأحفوري من أجل مكافحة تغيُّر المناخ. وهناك بلدان عديدة تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية لتعزيز إنتاج الطاقة الموثوقة والنظيفة. وشهدت الدورة السادسة والعشرين لمؤتمر الأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (COP26)، والتي عُقدت في تشرين الثاني/نوفمبر 2021 في غلاسكو بالمملكة المتحدة، مناقشات إيجابية ورفيعة المستوى بشأن استخدام القوى النووية، في سابقة هي الأولى من نوعها طوال السنوات العديدة التي عُقد فيها المؤتمر (الشكل ألف-1).

الشكل- ألف-1- حوار رفيع المستوى بشأن الطاقة النووية في مؤتمر المناخ COP26 بين المدير العام غروسي والوزير ألبوكركي من البرازيل والوزير برمبه من غانا والأمينة التنفيذية للجنة الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا السيدة ألغايروفا.

2- ومقارنة بالقدرة النووية المنشأة في العالم في عام 2020 – والتي بلغت 392 غيغاواط (كهربائي)، بما يعادل حصة قدرها 10.2% من مجمل توليد الكهرباء – تشير التقديرات في الحالة المنخفضة إلى أنَّ القدرة العالمية على توليد القوى النووية ستظلُّ ثابتة تقريباً لتصل إلى 394 غيغاواط (كهربائي) في عام 2050، مع تراجع حصة القوى النووية من مجمل توليد الكهرباء في العالم إلى 6.3%. أمَّا في الحالة المرتفعة، فتشير التقديرات إلى زيادة القدرة المنشأة إلى ما يزيد على الضعف لتبلغ 792 غيغاواط، بما يعادل زيادة حصة القوى النووية من مجمل توليد الكهرباء إلى 12.3% (الشكل ألف-2).



الشكل- ألف-2- تطور التوقعات المرتفعة والمنخفضة بشأن القدرة على توليد القوى النووية في عام 2050 بناءً على البيانات الواردة في إصدارات العدد 1 من سلسلة البيانات المرجعية في الفترة من عام 2020 إلى عام 2021.

3- 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 40 عاماً) وثانياً: بذل جهد كبير لبناء مفاعلات جديدة ذات قدرة إضافية تصل إلى 550 غيغاواط (كهربائي) على مدى ثلاثة عقود. ولتحقيق ذلك، يلزم أن تزيد معدلات توصيل المفاعلات الجديدة في العقود المقبلة بمقدار الضعف على الأقل، وسيلزم أيضاً للتعجيل بإيضاح ونشر تكنولوجيات المفاعلات الابتكارية.

الاتجاهات

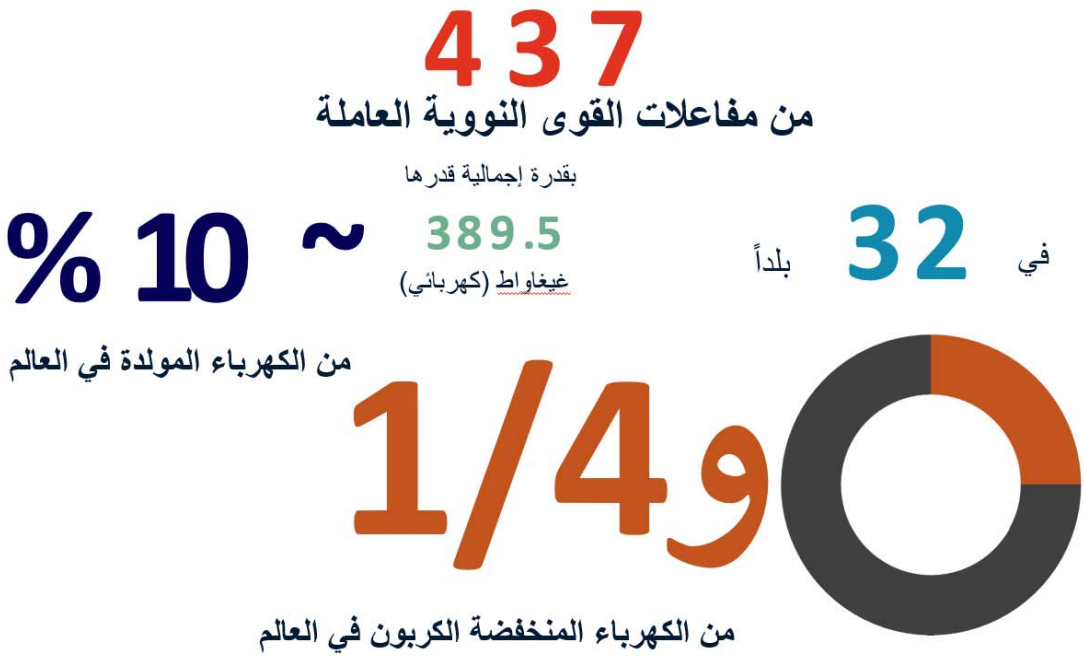
4- هناك اهتمام كبير ومتزايد بتكنولوجيات المفاعلات الابتكارية، بما في ذلك المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية (المفاعلات النمطية الصغيرة). ومع ذلك، يُتوقَّع أنَّ المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء ذات الحجم الكبير سوف تستأثر بالجانب الأكبر من الإضافات إلى قدرة التوليد خلال العقود الثلاثة المقبلة من أجل توليد الطاقة المنخفضة الكربون في إطار العمل من أجل التصدي لتغيُّر المناخ. وسيواصل القطاع النووي العمل على التصدي لعدد من التحديات، بما في ذلك خفض التكاليف وزيادة التوحيد من أجل تحسين القدرة التنافسية.

5- وسوف يلزم توفير دعم قوي على صعيد السياسات بغية الاعتراف بمساهمة القوى النووية في توفير نظم قوى منخفضة الكربون تتسم بالقدرة على الصمود والموثوقية، بما في ذلك توفير فرص متكافئة للحصول على التمويل بالمقارنة مع سائر مصادر الطاقة المنخفضة الكربون. 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.

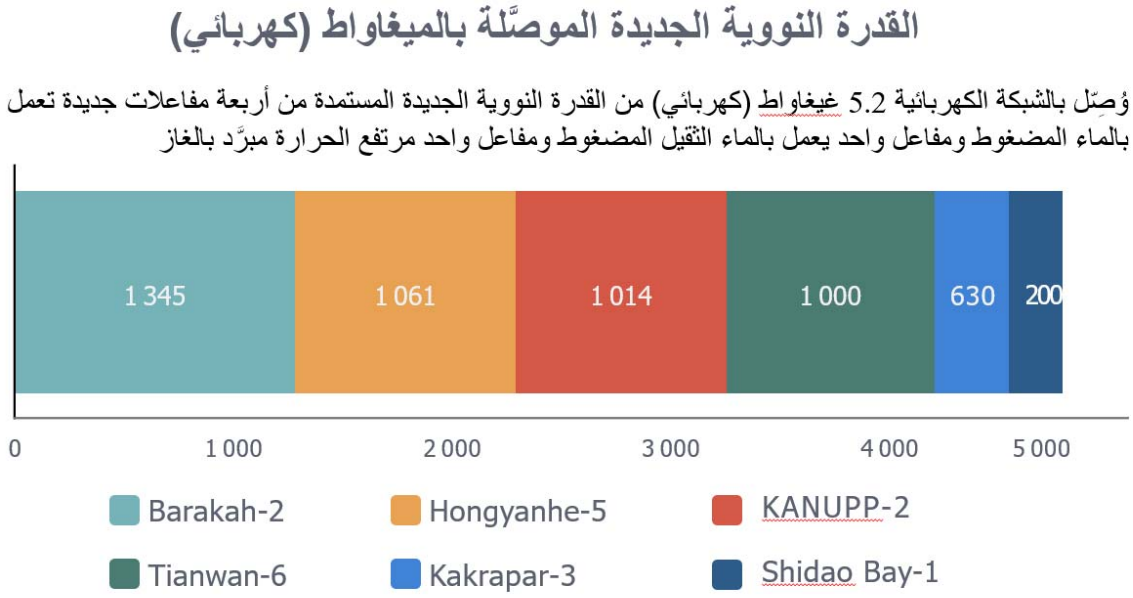
ألف-2- محطات القوى العاملة

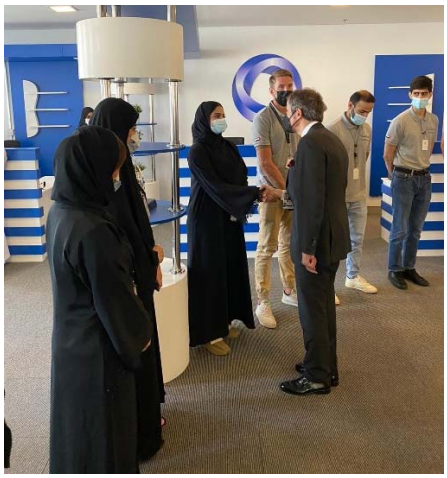
الحالة

6- في نهاية عام 2021، كانت القدرة العالمية على توليد القوى النووية تبلغ ما مجموعه 389.5 غيغاواط (كهربائي) توفِّرها 437 من مفاعلات القوى النووية العاملة في 32 بلداً (انظر الجدول ألف-1). وواصلت البلدان إثبات قدرتها على التكيُّف مع جائحة كوفيد-19 عن طريق اتخاذ تدابير فعالة لضمان التشغيل المأمون والموثوق مع التقليل إلى أدنى حد من المخاطر على الموظفين، مما ينمُّ عن وجود ثقافة تنظيمية راسخة. وخلال عام 2021، واصلت الوكالة تقاسم المعلومات عن التدابير المتخذة للتخفيف من آثار الجائحة وتداعياتها على تشغيل محطات القوى النووية من خلال شبكة خبرات تشغيل محطات القوى النووية في ظل كوفيد-19. ولم يُفِد أيٌّ من البلدان التي لديها محطات قوى نووية عاملة، والبالغ عددها 32 بلداً، بتسبُّب الجائحة في وقوع أيّ حادث تشغيلي كان له تأثير في تشغيل محطات القوى النووية على نحو مأمون وموثوق.



7- 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-19. ووُصِّل بالشبكة الكهربائية ما يزيد على 5.2 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية الجديدة المستمدة من ستة مفاعلات جديدة. وتشمل هذه المفاعلات أربعة مفاعلات جديدة تعمل بالماء المضغوط (Tianwan-6 (1000 ميغاواط (كهربائي)) وHongyanhe-5 (1061 ميغاواط (كهربائي)) في الصين، وKANUPP-2 (1017 ميغاواط (كهربائي)) في باكستان، وبراكة-2 (1310 ميغاواط (كهربائي) في الإمارات العربية المتحدة)، ومفاعل واحد يعمل بالماء الثقيل المضغوط (Kakrapar-3 (630 ميغاواط (كهربائي))) في الهند، فضلاً عن مفاعل واحد مرتفع الحرارة مبرَّد بالغاز (Shidao Bay-1 (200 ميغاواط (كهربائي))) في الصين (الشكل ألف-3).





الشكل- ألف-3- في كانون الأول/ديسمبر 2021، قام المدير العام السيد رافائيل ماريانو غروسي بزيارة إلى محطة براكة للطاقة النووية في الإمارات العربية المتحدة والتقى بعدد من شباب المهنيين العاملين في المجال النووي.

8- 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. ووافقت الهيئة الرقابية النووية بالولايات المتحدة على الطلب المقدم من شركة Dominion Energy بتمديد رخصتي تشغيل المفاعلين Surry-1 وSurry-2 في جنوب شرق ولاية فرجينيا لمدة 20 عاماً. وبذلك سوف يمتد العمر الافتراضي لهذين المفاعلين ليصل إلى 80 عاماً، مما يسمح لهما بمواصلة العمل حتى عامي 2052 و2053 على التوالي. كما أعلنت هيئة الأمان النووي الفرنسية أنَّها قد انتهت من استعراض خطة هيئة كهرباء فرنسا لتمديد العمر الافتراضي لما مجموعه 32 مفاعلاً من أسطول المفاعلات بقدرة 900 ميغاواط (كهربائي) لمدة عشر سنوات أخرى. وخلصت هيئة الأمان النووي إلى أنَّ التدابير المشمولة بخطة هيئة كهرباء فرنسا بالاقتران مع التدابير المفروضة من الهيئة تفسح المجال لمواصلة تشغيل هذه المفاعلات لعشر سنوات إضافية عقب خضوعها لاستعراض الأمان

الدوري الرابع. واكتمل بالفعل إجراء دراسات تحديث التصميم وتنفيذ عمليات استبدال المعدات على النحو اللازم لتمديد تشغيل المفاعلين Tricastin-1 وBugey-2، مما يسمح بتشغيلهما حتى عام 2031.

9- وخلال عام 2021، أسفرت عمليات إنهاء الخدمة عن فقدان 8.7 غيغاواط (كهربائي) من القدرة النووية (عشرة مفاعلات). ويرجع السبب في فقدان نصف هذه القدرة إلى إغلاق ثلاثة مفاعلات في ألمانيا هي: Brokdorf (يعمل بالماء المضغوط، 1410 ميغاواط (كهربائي))، وGrohnde (يعمل بالماء المضغوط، 1360 ميغاواط (كهربائي)) وGundremmingen-C (يعمل بالماء المغلي، 1288 ميغاواط (كهربائي)). وقد أُنهيت في المملكة المتحدة خدمة ثلاثة مفاعلات مبرَّدة بالغاز وهي: Dungeness B-1 (545 ميغاواط (كهربائي))، وDungeness B-2 (545 ميغاواط(كهربائي))، وHunterston B-1 (490 ميغاواط (كهربائي)). والمفاعلات الثلاثة الأخرى التي أُغلقت هي المفاعل KANUPP-1 (وهو مفاعل ماء ثقيل مضغوط بقدرة 90 ميغاواط (كهربائي)) في باكستان، والمفاعل Kursk-1 (وهو مفاعل يعمل بالماء الخفيف ومهدأ بالغرافيت بقدرة 925 ميغاواط (كهربائي)) في الاتحاد الروسي، والمفاعل Indian Point-3 (وهو مفاعل ماء مضغوط بقدرة 1030 ميغاواط (كهربائي)) في الولايات المتحدة الأمريكية. كما أُغلق المفاعل Kuosheng-1 (وهو مفاعل يعمل بالماء المغلي بقدة 985 ميغاواط (كهربائي)) في تايوان، الصين.

الاتجاهات

10- على وجه الإجمال، شهدت القدرة على توليد القوى النووية زيادة تدريجية منذ عام 2011، بما في ذلك زيادة نحو 20.7 غيغاواط (كهربائي) من القدرة الجديدة بفضل توصيل وحدات جديدة بالشبكة الكهربائية وزيادة قدرة مفاعلات قائمة (الشكل ألف-4).

الشكل- ألف-4- زيارة المدير العام للوكالة، السيد رافائيل ماريانو غروسي، لمحطة الأدميرال ألفارو ألبرتو للقوى النووية في البرازيل ومشاهدته تشييد المفاعل أنغرا 3.

11- ويُعدُّ التشـــغيل الطويل الأجل عنصـــراً جوهريًّا لا في التحوُّل نحو نُظم الكهرباء المنخفضـــة الكربون وتحقيق الأهداف المتعلقة بالوصـول بصـافي انبعاثات الكربون إلى مسـتوى الصـفر فحسـب، وإنما أيضـاً لإتاحة الوقت اللازم للتوسُّع في القدرة الجديدة على توليد الكهرباء المنخفضة الكربون، بما في ذلك إنشاء محطات جديدة للقوى النووية. وبالإضـــافة إلى ذلك، فإنَّ محطات القوى النووية القائمة هي أرخص مصـــدر لتوفير الكهرباء المنخفضـــة الكربون على نحو مأمون وآمن. بيد أنَّ العقد الماضـــي شـــهد أيضـــاً إغلاق بعض المفاعلات، ومن المرجح أنَّ بعضـاً آخر سـوف يُغلق لأسـباب اقتصـادية في الأجل القريب، رغم حصـول المشـغِّلين على رخص لتمديد التشغيل. وبالإضافة إلى ذلك، فقد كانت سلاسل الإمداد القائمة تواجه تحديات يمكن أن تؤثِّر في استمرارية العمليات التشغيلية والمشاريع والتخطيط لانقطاع التشغيل. بيد أنَّ هناك سلاسل إمداد جديدة آخذة في الظهور في البلدان المستجدة، وهو ما يمكن أن يجتذب جهات فاعلة جديدة إلى الميدان.

ألف-3- برامج القوى النووية الجديدة والمتوسِّعة

الحالة

12- من بين الدول الأعضـــاء التي أعربت عن اهتمامها بالأخذ بالقوى النووية، والبالغ عددها 50 دولة عضـــواً، هناك 24 دولة في مرحلة ســـابقة لاتخاذ القرار ولا تزال تنفِّذ أنشـــطة تخطيطية. أمَّا البلدان الســـتة والعشرون المتبقية فتسعى إلى بدء الأخذ بالقوى النووية، وتنقسم إلى فئتين متمايزتين:

- 16 بلداً في مرحلة اتخاذ القرار – وهي البلدان التي تفكِّر في الأخذ بالقوى النووية، بما في ذلك البلدان التي تجري دراسات جدوى تمهيدية أو تعمل بالفعل على إعداد البنية الأساسية دون أن تكون قد اتَّخذت قراراً بعدُ (إثيوبيا، وإندونيسيا، وإستونيا، وأوغندا، وتايلند، وتونس، والجزائر، وزامبيا، وسري لانكا، والسلفادور، والسنغال، والسودان، والفلبين، وكازاخستان، والمغرب، والنيجر).
- 10 بلدان في مرحلة ما بعد اتِّخاذ القرار – وهي البلدان التي اتخذت قرارها وتعمل على تشـــييد البنية الأساسية، أو وقعت عقداً وستشرع في التشييد في المستقبل القريب (الأردن، وأوزبكستان، وبنغلاديش، وبولندا، وتركيا، وغانا، وكينيا، ومصر، والمملكة العربية السعودية، ونيجيريا).

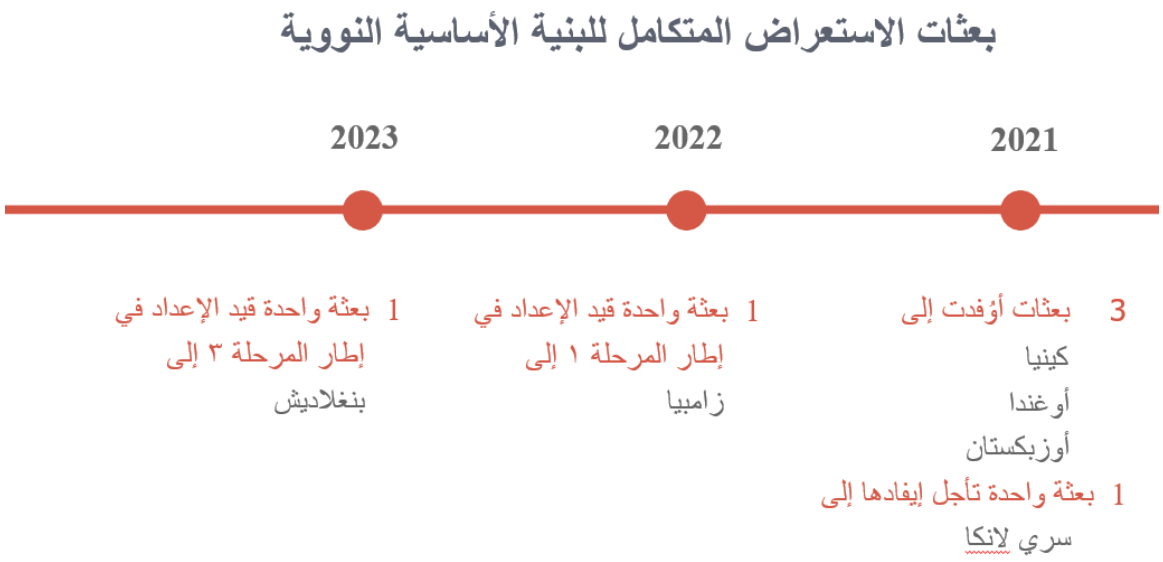
13- وفي بنغلاديش، تتواصل أعمال تشييد أول محطة للقوى النووية، ويُعتزم أن يبدأ التشغيل التجاري للوحدتين في عامي 2024 و2025 على التوالي. واستمر في عام 2021 تشييد أربع وحدات في محطة أكويو للقوى النووية في تركيا. ومن المتوقع إدخال الوحدات الأربع في الخدمة في الفترة 2023–2026. وفي مصر، تقدَّمت هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء بطلب رخصة تشييد الوحدتين 1 و2 في محطة الضبعة في تموز/يوليه 2021. وتتواصل أعمال تجهيز الموقع للتشييد. وتخضع كلتا المنظمتين الرئيسيتين المعنيتين (أي هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء وهيئة الرقابة النووية والإشعاعية المصرية) لعملية إعادة هيكلة بناءً على احتياجات البرنامج. وفي بولندا، استحوذت خزانة الدولة على شركة PGE EJ 1 بالكامل في آذار/مارس 2021 مع تغيير اسم الشركة إلى PEJ. وستقوم شركة PEJ بدور المستثمر في مفاعلات الماء المضغوط الجديدة المعتزم إنشاؤها بقدرة إجمالية على توليد القوى النووية تتراوح بين 6000 و9000 ميغاواط (كهربائي) بحلول عام 2042. ويُعتزم أن يبدأ تشييد أول محطتين للقوى النووية في عامي 2026 و2032، على أن يكون إدخال أول وحدة في الخدمة في عام 2033. وفي الأرجنتين، بلغ المفاعل CAREM مرحلة متقدمة من التشييد، وهو موجود في الموقع المجاور لمحطة أتوتشا 1، بغية إنتاج 32 ميغاواط (كهربائي) كإيضاح للنموذج الأولي.

14- وفي المملكة العربية السعودية، يجري العمل حاليًّا على إعداد مواصفات تقديم العطاءات لعملية شراء أول وحدتين من وحدات محطات القوى النووية بقدرة بين 1000 و1600 ميغاواط (كهربائي). وقد قرَّر الأردن المضي في مسارين متوازيين صوب استحداث برنامج للقوى النووية، أولهما إنشاء محطة للقوى النووية من الحجم الكبير (1000 ميغاواط (كهربائي) بنظام التشييد والامتلاك والتشغيل فنقل الملكية)، والثاني إنشاء مفاعلات نمطية صغيرة، مع إيلاء الأولوية للمسار الثاني. وقد أُعدَّت مسوَّدات الوثائق الخاصة بمواصفات تقديم العطاءات لمشروع المفاعلات النمطية الصغيرة، ومن المتوقع وضعها في صيغتها النهائية والإعلان عنها في بداية عام 2022. وواصلت غانا العمل على إرساء البنية الأساسية الوطنية لإنشاء برنامج للقوى النووية، بما في ذلك مواصلة تنمية قدرات المنظمات الرئيسية المعنية. وأصدرت وزارة الطاقة دعوة للبائعين المحتملين لإبداء الاهتمام فيما يتعلق بإنشاء قدرة تبلغ نحو 1000 ميغاواط (كهربائي). ويُعتزم أن يبدأ تشييد أول محطة للقوى النووية في عام 2023 على أن يكون الإدخال في الخدمة في عام 2029. وأعلنت كينيا أنَّها سوف تنظر في تشييد مفاعل بحوث وكذلك محطة للقوى النووية من الحجم الكبير، وستستكشف أيضاً المفاعلات النمطية الصغيرة. واستأنفت نيجيريا الأنشطة المتعلقة ببرنامج القوى النووية الخاص بها بعد فترات تأخير بسبب تغيرات مؤسسية في المنظمات الرئيسية المعنية وجائحة كوفيد-19، وشملت هذه الأنشطة تحديث الدراسات التمهيدية ودراسات الجدوى لإعادة تقييم الجدوى الاقتصادية لمشروع محطة القوى النووية. وفي العديد من هذه البلدان، يمثِّل الأخذ بالقوى النووية في مزيج الطاقة مساهمة كبيرة صوب تحقيق أهدافها فيما يتعلق بالتخفيف من حدة تغير المناخ. وقد أدرجت عدَّة بلدان منها (الأردن، وتركيا، ومصر) الطاقة النووية ضمن مساهماتها المحددة وطنيًّا المقدَّمة بمقتضى اتفاق باريس إلى أمانة اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ.

15- وفي عام 2021، أُوفدت ثلاث بعثات في إطار خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية، إلى أوزبكستان (المرحلة 2) وأوغندا (المرحلة 1) وكينيا (بعثة متابعة في إطار المرحلة 1). وأُجِّلت البعثة التي كان مخططاً لإيفادها إلى سري لانكا (المرحلة 1) بسبب جائحة كوفيد-19 (الشكل ألف-5). وتلقت الوكالة أيضاً طلبين بإيفاد بعثتين في إطار الخدمة نفسها، من زامبيا لاستضافة بعثة في إطار المرحلة 1، ومن بنغلاديش لاستضافة بعثة في إطار المرحلة 3، ويجري الإعداد لتنفيذهما في عامي 2022 و2023 على التوالي.

الشكل- ألف-5- استعراض الوكالة لإرساء البنية الأساسية للقوى النووية في أوغندا.

16- وبالإضافة إلى ذلك، هناك 15 دولة عضواً لديها خطط عمل متكاملة سارية. وبسبب تداعيات جائحة كوفيد-19، خضعت خطط العمل المتكاملة للاستعراض بالكامل أو في إطار استعراض منتصف المدة من خلال اجتماعات افتراضية مع الأفرقة الأساسية.



الاتجاهات

17- بحلول عام 2035، قد يزيد عدد البلدان المشغلة بنسبة تقترب من 30% بانضمام 10–12 بلداً جديداً إلى صفوف البلدان المشغلة لمحطات قوى نووية والبالغ عددها حاليًّا 32 بلداً. وتتطلب هذه الزيادة الكبيرة مواصلة تعزيز جاهزية البنية الأساسية لدى تلك البلدان بدعم من الوكالة لضمان النشر المسؤول.

18- ومن التطورات التكنولوجية المهمة التي تجذب اهتمام واضعي الخطط والسياسات في مجال الطاقة أنَّ هناك مجموعة متعددة من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة الأولى من نوعها التي يُتوقع توافرها ونشرها بحلول عام 2030. ونتيجةً لذلك، فهناك عدَّة بلدان مستجدة أخذت المفاعلات النمطية الصغيرة في الحسبان عند النظر في الاعتبارات التكنولوجية أو تواصل رصد التطورات، بما في ذلك بلدان مستجدة مثل الأردن وإستونيا وإندونيسيا وبولندا وزامبيا والسودان وغانا والفلبين وكينيا والمملكة العربية السعودية، وبلدان متوسعة مثل

بلغاريا وجنوب أفريقيا والجمهورية التشـــيكية ورومانيا. والدافع وراء ذلك الاهتمام هو التقدم الذي تشـــهده تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصـــغيرة والمزايا التي يمكن لتلك المفاعلات أن تكفلها مقارنة بمحطات القوى النووية الكبيرة الحجم، مثل انخفاض التكاليف الرأسـمالية الأولية، وإمكانية الاسـتخدام في الشـبكات الكهربائية الأصغر حجماً والتطبيقات غير الكهربائية، وإمكانيات توسيعها عن طريق إضافة وحدات نمطية.

19- ويجدر التشـــديد على أنَّه بصـــرف النظر عما إذا كان برنامج القوى النووية قائماً على محطات القوى النووية من الحجم الكبير أو المفاعلات النمطية الصـغيرة، فإنَّه يتطلب اسـتيفاء الشـروط نفسـها تقريباً من حيث البنية الأساسية الوطنية للقوى النووية، مع إيلاء القدر نفسه من الانتباه الصـارم والمتواصـل إلى الأمان النووي والأمن النووي والمتطلبات المتعلقة بالضمانات.

20- وفي الوقت الذي أحرزت فيه الدول الأعضـاء العشـر التي تسـتهلُّ برامجها للقوى النووية بالاسـتناد إلى محطات قوى نووية تطوُّرية تقدُّماً كبيراً في مساعيها، مما يدلُّ على استمرار الاهتمام بتكنولوجيا محطات القوى النووية الكبيرة الحجم، تفيد الدول الأعضـاء باعتزامها اسـتخدام التصـميم المرجعي في التشـغيل والاسـتفادة من الخبرات التي اكتسبتها الهيئات الرقابية والجهات المشغلة في بلد المنشأ.

ألف-4- تطوير تكنولوجيا القوى النووية

الحالة

21- أصـبحت مفاعلات القوى النووية التطوُّرية، أي التصـاميم التي لا تنطوي إلا على تعديلات أو تحسينات طفيفة مقارنة بأســـطول محطات القوى النووية القائم، واقعاً مترسِّـــخاً بالفعل في أنحاء عديدة من العالم. فهناك مفاعلات متقدمة مبرَّدة بالماء قيد التشـغيل في الاتحاد الروسـي والإمارات العربية المتحدة وبيلاروس والصـين واليابان. وفي بلدان أخرى مثل الأرجنتين وفرنســـا وفنلندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية، هناك مفاعلات متقدمة مبرَّدة بالماء بمسـتويات مختلفة من القدرة في مرحلة متقدمة من التشـييد وفي بعض الحالات قيد الإدخال في الخدمة. وفي الاتحاد الروســـي، هناك اثنان من المفاعلات الســـريعة المبرَّدة بالصـــوديوم من الحجم الصـناعي قيد التشـغيل، وبدأ أيضـاً تشـييد المفاعل السـريع المبرَّد بالصـوديوم الأول من نوعه. كما توجد مفاعلات سريعة قيد التشغيل أو التشييد في الصين والهند. ووُصِّل بالشبكة الكهربائية في الصين في كانون الأول/ديسمبر 2021 أول مفاعل نمطي مرتفع الحرارة مبرَّد بالغاز يستخدم تكنولوجيا القاع الحصوي.

22- وبموازاة ذلك، يتزايد اهتمام الدول الأعضـاء بالتطوير السـريع والنشـر المبكر للمفاعلات الابتكارية، أي التصـــاميم المتقدمة التي تنطوي على تغييرات مفاهيمية في نُهُج التصـــميم أو أنســـاق النظم مقارنة بالممارســـات القائمة. وهناك مفاهيم ابتكارية قيد التطوير في إطار جميع أنواع المفاعلات الرئيســـية، أي المفاعلات المبرَّدة بـالمـاء، والمفـاعلات المرتفعـة الحرارة والفـائقـة الحرارة المبرَّدة بـالغـاز، والمفـاعلات المبرَّدة بـالصـــوديوم والرصـاص والغاز القائمة على طيف النيوترونات السـريعة، ومفاعلات الأملاح المصـهورة، وأخيراً المفاعلات المتناهية الصغر، وهي أحدث هذه الأنواع. وهناك بعض المفاهيم ذات الأمد القريب التي شارفت عملية تطويرها على الانتهاء، في حين توجد تصـــاميم أخرى أكثر ابتكارية لا تزال تتطلب الكثير من العمل، بما يشـــمل جهود البحث والتطوير، واختبارات الجدوى، وإعداد بيان حالة الأمان بصـــيغته الكاملة. بيد أنَّ هناك عدداً من النماذج الأولية والمفاعلات الابتكارية الإيضاحية قيد التطوير لدى عدَّة مصممين وبائعين في أنحاء مختلفة من العالم.

23- وفي العقد الأخير، تركَّز اهتمام الصناعة النووية وعدد متزايد من الدول الأعضاء على فئة خاصة من المفاعلات المتقدمة، وهي المفاعلات النمطية الصغيرة، لغرض نشرها في الأمد القريب. ويُتوخَّى استخدام العديد من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة في أسواق الكهرباء أو الطاقة المتخصصة التي لا يناسبها استخدام المفاعلات المتقدمة الكبيرة الحجم. ومن المتوقع أن تلبي المفاعلات النمطية الصغيرة الحاجة إلى مصادر مرنة لتوليد الكهرباء لفائدة طائفة واسعة من المستخدمين والتطبيقات، بما في ذلك الاستعاضة بها عن محطات القوى المتقادمة العاملة بالوقود الأحفوري، وتوفير الكهرباء للمناطق النائية وغير الموصَّلة بالشبكة الكهربائية، وتوفير التوليد المشترك للتطبيقات الكهربائية وغير الكهربائية، وتمكين نظم الطاقة المختلطة التي تجميع بين الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة.

الاتجاهات

24- مع توافر القدرات الحاسوبية وأدوات تحليل البيانات المتطورة، بدأت الصناعة النووية تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلُّم الآلي والتعلُّم العميق في طائفة واسعة من الأنشطة الاستشرافية التي يمكن أن تحدث تحوُّلاً نوعيًّا في طريقة تصميم النظم النووية وترخيصها وتشغيلها. وينطوي الذكاء الاصطناعي على إمكانية تحسين إدماج الحسابات والبيانات التجريبية التي تُجمع من تجارب صغيرة النطاق أو من أجهزة الاستشعار أثناء التشغيل. ويتيح هذا الإدماج، في صيغته المثلى، للمتخصصين في الحوسبة العلمية وضع نماذج فيزيائية على درجة غير مسبوقة من الدقة، ويساعد العلماء التجريبيين على التقليل إلى أدنى حد من تكاليف وعدد التجارب التي يجرونها للتحقُّق من النظم الأولى من نوعها. وهو يمكِّن أيضاً مشغِّلي النظم من رصد حالات النظم التي لا يمكن رصدها مباشرة بالأجهزة. ويمكن تطبيق منهجيات وأدوات الذكاء الاصطناعي لإجراء تحليل تنبؤي قائم على علم الفيزياء يمكن استخدامه في الارتقاء بالتصميم والصنع والتشييد إلى المستوى الأمثل، وتحقيق الفعالية في العمليات التشغيلية، وتحسين الصيغ الجديدة من تصاميم المفاعلات، والكشف عن الأعطال بالاستعانة بالنماذج، ووضع نظم التحكُّم المتقدمة. ويمكن للذكاء الاصطناعي أيضاً أن يحقق فوائد إضافية للصناعة النووية من حيث الموثوقية والأمان والكفاءة الإجمالية.

ألف-4-1- المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء

الحالة

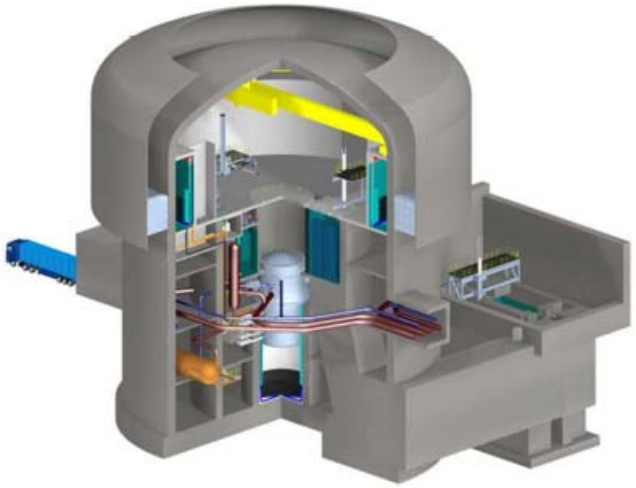
25- تؤدي المفاعلات المبرَّدة بالماء دوراً مهمًّا في الصناعة النووية التجارية منذ نشأتها، وهي تستأثر حاليًّا بنسبة تفوق 95% من مجمل مفاعلات القوى المدنية العاملة في العالم. ومن بين جميع المفاعلات النووية التي كانت قيد التشييد حتى نهاية عام 2021 والبالغ عددها 51 مفاعلاً، كان هناك 48 مفاعلاً مبرداً بالماء الخفيف أو الثقيل.

26- وشملت التطورات الرئيسية التي شهدها عام 2021 فيما يخصُّ المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء بدء تشييد مفاعل من طراز HPR-1000 (المفاعل Changjiang-3 في الصين) ومفاعلين من طراز VVER-1200 (V-491) (المفاعل Tianwan-7 والمفاعل Xudabao-3 في الصين)، ومفاعل مبَّرد ومهدَّأ بالماء من طراز VVER (V-509) (المفاعل Akkuyu-3 في تركيا)، وكذلك توصيل مجموعة من المفاعلات الجديدة بالشبكة الكهربائية، وهي مفاعل من طراز APR-1400 (المفاعل براكة-2 في الإمارات العربية المتحدة)، ومفاعل من طراز ACPR-1000 (المفاعل Hongyanhe-5 في الصين)، ومفاعل من طراز CNP-1000 (المفاعل

Tianwan-6 في الصـــين)، ومفاعل من طراز ACP-1000 (المفاعل KANUPP-2 في باكســـتان)، ومفاعل من طراز PHWR-700 (المفاعل Kakrapar-3 في الهند).

27- وهناك أيضـاً أشـكال متقدِّمة من المفاعلات القائمة المبرَّدة بالماء قيد النظر والدراسـة والتنفيذ بصـورة متزايدة في عدَّة بلدان في ظل النشر التدريجي لدورات وقود متقدِّمة تتسم بقدر أكبر من الكفاءة.

28- وتشـارك أربعة بلدان (الاتحاد الروسـي والصـين وكندا واليابان) والاتحاد الأوروبي في مشـروع بحث وتطوير مشـترك بشـأن مفاهيم تصـميم المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج. والغرض الرئيسـي من المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج هو توليد الكهرباء بكفاءة وأمان وعلى نحو مجد من الناحية الاقتصادية. وتُصمَّم معظم المحطات القائمة على المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج لتوليد القوى بقدرة تفوق 1000 ميغاواط (كهربائي)، وبحيث تبلغ مستويات الضـغط التشـغيلي نحو 25 ميغاباسكال وتتراوح درجة حرارة المبرِّد الخارج من المفاعل بين 500 و625 درجة مئوية. ونتيجةً لذلك، يمكن لهذه المفاعلات أن تولِّد الكهرباء بمســـتويات كفاءة حرارية تتراوح بين 43% و48%، وهي مستويات أعلى كثيراً مما يوفره الأسطول الحالي من نظم المفاعلات النووية. وبســـبب ارتفاع درجة حرارة المبرِّد الخارج من قلب المفاعل، يســـهل اســـتخدام المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج في التوليد المشترك، بما يشمل إنتاج الهيدروجين والتدفئة وإنتاج البخار. وتوضـع معظم مفاهيم المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج لتوليد حمل أسـاسـي كبير يتجاوز 1000 ميغاواط (كهربائي)، وهو ما يُعتبر مسـتوى زائداً عن الحاجة في حالة المجتمعات المحلية الصـــغيرة في المناطق النائية وعمليات التعدين الصـــغيرة وإنتاج النفط. وفي حال تصميم مفاهيم المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج وفقاً لنسق قائم على الوحدات النمطية، يمكن تصـغير حجمها بحيث تلبي احتياجات النشـر المحلي. وقد بدأ العمل أيضـاً على تطوير مفاهيم لمفاعلات صـغيرة وبالغة الصـــغر مبرَّدة بالماء فوق الحرج؛ حيث تعكف الصـــين على تطوير مفهوم لمفاعل بقدرة 150 ميغاواط (كهربائي) لاستخدامه في محطة إيضـاحية. واكتمل التصـميم النظري لكلٍّ من المفاعل الكندي المبرد بالماء فوق الحرج، وهو مفهوم لمفاعل قائم على أنابيب الضـغط ومهدَّأ بالماء الثقيل، والمفاعل الصـيني CSR1000 (الشـكل ألف-6).



الشكل- ألف-6- تصميم المفاعل الكندي المبرد بالماء فوق الحرج – رسم مقطعي لمبنى المفاعل.
(الصورة من: شولنبرغ وليونغ، المختبرات النووية الكندية)

29- وفي أوروبا، يعالج مفهوم مفاعل الماء الخفيف العالي الأداء مسألة الجدوى الاقتصادية لمفاعلات الماء الخفيف العالية الكفاءة العاملة في ظروف الماء فوق الحرج، حيث يكفل كفاءة متوقعة تبلغ تقريباً 44% ويستهدف أن تكون درجة حرارة البخار الخارج من منفذ المفاعل 500 درجة مئوية دون تجاوز الحدود القصوى لمواد الكسوة المتاحة. ولدى الاتحاد الروسي تصميم نظري مبتكر لمفاعلات قوى مبرَّدة ومهدَّأة بالماء يُستخدم فيها المبرِّد عند مستويات ضغط فوق حرجية، بما يشمل أيضاً إمكانية أن يكون قلب المفاعل قائماً على طيف النيوترونات السريعة.

الاتجاهات

30- تنطوي معظم المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء على قدرة أكبر على إنتاج الكهرباء، حيث تتراوح قدرة المفاعلات المشيَّدة مؤخراً بين 1000 و1700 ميغاواط (كهربائي) للوحدة الواحدة، ويُستهدف تحقيق زيادات أكبر في المفاعلات المتطوِّرة المبرَّدة بالماء الكبيرة الحجم التي لا تزال في مرحلة التصميم. وبالإضافة إلى ذلك، فهناك اتجاه واضح نحو تعدُّد الوحدات في الموقع الواحد سواء كانت تلك الوحدات من نوع واحد أو أنواع متعددة من المفاعلات، مما يدلُّ على أهمية وفورات الحجم في سياق المفاعلات النووية التجارية. ومن بين البلدان التي لا يوجد لديها الآن محطات قوى نووية عاملة، ينظر نحو 30 بلداً في تشييد محطات للقوى النووية. وفيما يخصُّ هذه البلدان المستجدَّة، من المتوقع أن تكون المفاعلات الأولى من نوع المفاعلات المتقدِّمة المبرَّدة بالماء.

ألف-4-2- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية، بما في ذلك المفاعلات المرتفعة الحرارة

الحالة

31- على مدى عام 2021، أحرزت دول أعضاء عديدة تقدُّماً ملموساً في تطوير تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة لغرض نشرها في الأمد القريب. وهناك ما يزيد على 70 من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة التي يجري تطويرها في إطار الخطوط التكنولوجية الرئيسية لتُستخدم في تطبيقات مختلفة.

32- وفي الاتحاد الروسي، يجري تشغيل محطة القوى النووية العائمة أكاديميك لومونوسوف تجاريًّا منذ أيار/مايو 2020 بوحدتي مفاعل من طراز KLT-40S، عقب توصيلها بالشبكة الكهربائية في كانون الأول/ديسمبر 2019، لتوفر القوى المنخفضة الكربون والحرارة لميناء بيفيك. وفي الصين، وُصِّل بالشبكة الكهربائية في 20 كانون الأول/ديسمبر 2021 المفاعل الحصوي القاع المرتفع الحرارة المبرَّد بالغاز (المفاعل HTR-PM) (الشكل ألف-7). وبلغت وحدتا المفاعل HTR-PM مرحلة الحرجية في آب/أغسطس وتشرين الثاني/نوفمبر 2021، على التوالي. وسيعمل المفاعل HTR-PM كمحطة إيضاحية تولِّد 210 ميغاواط (كهربائي). وفي الأرجنتين، بلغ المفاعل CAREM-25 مرحلة متقدمة من التشييد، وهو نموذج أولي لمفاعل ماء مضغوط متكامل في موقع محطة Néstor Carlos Kirchner للقوى النووية، ويُستهدف حاليًّا تحميله بالوقود وبدء إدخاله في الخدمة في عام 2024 لإنتاج 100 ميغاواط (حراري) و34 ميغاواط (كهربائي) إجمالاً.

الشكل- ألف-7- وُصِّل المفاعل HTR-PM في الصين بالشبكة الكهربائية في 20 كانون الأول/ديسمبر 2021. (الصورة من: جامعة شينغوا، معهد تكنولوجيا الطاقة النووية ومصادر الطاقة الجديدة، الصين)

33- وفي تموز/يوليه 2021، بدأت الصين تشييد مفاعل من طراز ACP100 بقدرة 125 ميغاواط (كهربائي)، يُعرف أيضاً باسم Linglong One، في تشانغ جيانغ بمقاطعة هاينان. وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل مصمَّم ليكون مفاعل قوى صغير متعدِّد الأغراض. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أصدرت الهيئة الرقابية النووية موافقتها على التصميم المعياري المقدم من شركة NuScale للمفاعل الذي يحمل اسمها. ومفاعل NuScale للقوى هو مفاعل ماء مضغوط متكامل قائم على الدوران الطبيعي. وسيبدأ تشييد المفاعل المكون من 6 وحدات قدرة كلٍّ منها 77 ميغاواط (كهربائي) في السنوات الثلاث المقبلة في موقع قريب من مختبر أيداهو الوطني، على أن يبدأ تشغيله بحلول عام 2029.

34- وبحلول نهاية عام 2021، كانت 16 دولة عضواً على الأقل قد أنشأت برامج وطنية نشطة معنية بتصميم المفاعلات النمطية الصغيرة أو تطوير التكنولوجيا الخاصة بها، معظمها ينطوي على التعاون الدولي. وفي تموز/يوليه 2021، استأنفت اليابان تشغيل مفاعل الاختبارات الهندسية المرتفع الحرارة الذي يولِّد 30 ميغاواط (حراري) من قلبه المنشوري القاع. وقبل ذلك، انتهت جمهورية كوريا والمملكة العربية السعودية سويًّا من مرحلة الأعمال الهندسية السابقة لتنفيذ مشروع المفاعل النمطي المتقدِّم المتكامل النظم، وتمخضت تلك الأعمال عن تقرير تحليل الأمان الأولي لمفاعل الماء المضغوط المتكامل الذي تبلغ قدرته 110 ميغاواط (كهربائي). وأحرزت فرنسا تقدُّماً في تطوير المفاعل NUWARD، (يتألف من وحدتي مفاعلات قدرة كل منهما 170 ميغاواط (كهربائي)) وهو مفاعل نمطي صغير من نوع مفاعلات الماء المضغوط المتكاملة بقدرة 340 ميغاواط (كهربائي) قائم على الحَمْل الحراري القسري ومزوَّد بنظم أمان متقدِّمة، بالإمكان نشره في الأسواق الخارجية في أوائل ثلاثينيات هذا القرن. وبالمثل، واصلت المملكة المتحدة العمل على تطوير التكنولوجيا الخاصة بالمفاعل النمطي الصغير البريطاني، وهو تصميم لمفاعل نمطي صغير ثلاثي الحلقات يعمل بالماء المضغوط تبلغ قدرته 470 ميغاواط (كهربائي) ويُتوخَّى نشره محليًّا وعالميًّا بحلول عام 2030. وفي الاتحاد الروسي، اتُّخذ قرار ببدء تشييد المفاعل RITM-200N، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل بري لتوليد 50 ميغاواط (كهربائي) في ياكوتيا في عام 2024. وقد نُشرت عدَّة وحدات مفاعلات من طراز RITM-200 في

كاســـحات الجليد النووية. وفي كندا، تحدِّد خريطة الطريق وخطة العمل بشـــأن المفاعلات النمطية الصـــغيرة تطبيقات محتملة يمكن أن تحلَّ محلَّ محطات التوليد التي تعمل بالوقود الأحفوري والديزل، ســواء داخل الشــبكة الكهربائية أو خارجها، بما في ذلك المحطات المستخدمة في صناعات النفط والتعدين.

الاتجاهات

35- في عام 2021، شـهدت عدَّة بلدان أيضـاً تكثيف أنشـطة التطوير المتعلقة بمجموعة فرعية من المفاعلات النمطية الصـــغيرة تُعرف باســـم المفاعلات المتناهية الصـــغر، ومن هذه البلدان الاتحاد الروســـي والجمهورية التشيكية وكندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. ومن المتوخَّى أن تقدِّم المفاعلات المتناهية الصــغر من الخطوط التكنولوجية الرئيســية الحلَّ الأمثل لتوفير التوليد المشــترك للحرارة والكهرباء في المناطق النائية والجزر الصغيرة و/أو أن تحل محلَّ مولدات الديزل.

36- وزاد عدد البلدان التي تعكف على تطوير مفاعلات بحرية. حيث وضـع الاتحاد الروسـي أربعة تصـاميم لمفاعلات نمطية صـغيرة لتُسـتخدم في وحدات القوى العائمة، وتصـميماً واحدا، باسـم "SHELF"، ليُسـتخدم في وحدة مغمورة لتوليد القوى تحت سطح البحر (الشكل ألف-8). وكان لدى الصين تصميم واحد على الأقل، يُطلق عليه ACPR100، لتوفير الكهرباء لمنصـــات اســـتخراج النفط والغاز الموجودة في عرض البحر. وواصـــلت جمهورية كوريا أيضـــاً تطوير الوحدة BANDI-60، وهي وحدة عائمة لتوليد القوى قائمة على مفاعل ماء مضغوط.

الشكل- ألف-8- يجري تشغيل محطة القوى النووية أكاديميك لومونوسوف تجاريًّا منذ أيار/مايو 2020، وتضمُّ المحطة مفاعلَيْن من طراز KLT-40S وتنتج 70 ميغاواط (كهربائي) في بيفيك بالاتحاد الروسي. (الصورة من: مكتب أفريكانتوف للتصاميم التجريبية المتعلقة بتصنيع الآلات التابع للشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم")

37- وتشترك الجهود الرامية إلى تطوير المفاعلات النمطية الصغيرة في هدف واحد، وهو إيضـاح أنَّ تشييد مفاعلات أقلَّ قدرة تتألف من وحدات نمطية سـوف يؤدي إلى خفض التكاليف الرأسـمالية الأولية بالاسـتفادة من الوفورات المتأتية من الإنتاج المتوالي، وأنَّ تبسـيط التصـميم وقصـر مدَّة التشـييد يؤديان إلى إيجاد مخططات تمويل ميسورة التكلفة. وبغية مساعدة الدول الأعضـاء على التوصُّل إلى فهم مشترك لاحتياجاتها وخصـوصـياتها فيما يتعلق بتكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة، استهلَّت الوكالة إطاراً جديداً لإعداد المتطلبات والمعايير التي

يشترطها عموم المستخدمين في تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة وتكنولوجياتها. والفائدة الرئيسية لوضع وثيقة وطنية بالمتطلبات والمعايير التي يشترطها عموم المستخدمين هي تحديد مجموعة من المتطلبات الرئيسية التقنية والاقتصادية والمتعلقة بالسياسات لتساعد البلدان المستهلَّة على 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.

ألف-4-3- المفاعلات السريعة

الحالة

38- يواصل الاتحاد الروسي تشغيل مفاعلين سريعين مبرَّدين بالصوديوم من الحجم الصناعي، وهما المفاعل BN-600 والمفاعل BN-800، في محطة بيلويارسك للقوى النووية، ويجري العمل على تصميم المفاعل BN-1200، وهو مفاعل سريع مبرَّد بالصوديوم من الجيل الرابع من المقرر تشييده في نفس الموقع. ويجري العمل على تشييد مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض في ديميتروفغراد. وفي حزيران/يونيه 2021، بدأ صبُّ الخرسانة لتشييد المفاعل BREST-OD-300، وهو أول مفاعل تجريبي وإيضاحي مبرَّد بالرصاص، في سيفيرسك. وواصلت الصين تشييد مفاعل ثانٍ من طراز المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم CFR-600، في منطقة زيابو بمقاطعة فوجيان. وفي الهند، كان من المتوقع للمفاعل النموذجي السريع التوليد المبرد بالصوديوم بقدرة 500 ميغاواط (كهربائي) أن يبلغ الحرجية للمرة الأولى ويدخل في الخدمة في عام 2020، لكن تأجَّل ذلك. وفي عام 2021، أعلنت شركة TerraPower وشركة GE Hitachi للطاقة النووية عن خطط لتشييد مفاعل Natrium الهجين الذي يجمع بين مفاعل سريع مبرَّد بالصوديوم بقدرة 345 ميغاواط (كهربائي) ونظام طاقة قائم على الأملاح المصهورة للوصول بذروة الإنتاج إلى 500 ميغاواط (كهربائي) في ولاية وايومنغ بالولايات المتحدة الأمريكية (الشكل ألف-9).

الشكل- ألف-9- بيل غيتس في مقر شركة TerraPower مع نموذج بالحجم الطبيعي لمجمّعة فرعية مبرَّدة بالصوديوم. (الصورة من: مدونة Gates Notes على الإنترنت)

الاتجاهات

39- تشكِّل المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم الغالبية العظمى من نظم الطاقة النووية العاملة والجديدة القائمة على النيوترونات السريعة، حيث إنَّها تقوم على تكنولوجيا مثبتة وخبرة تراكمية في تشغيل المفاعلات تزيد على 400 سنة. وفي الوقت نفسه، تجتذب تكنولوجيا المبرِّدات القائمة على الفلزات السائلة الثقيلة اهتماماً متزايداً، ولا سيما في مجال المفاعلات النمطية الصغيرة حيث توجد عدَّة تصاميم ابتكارية قائمة على المفاعلات المبرَّدة إما بالرصاص أو بخليط الرصاص والبزموث المنصهرين. وتنظر عدَّة بلدان أيضاً في استخدام مبرِّدات أخرى، مثل الهليوم والأملاح المصهورة، كخيارات تكنولوجية واعدة فيما تعده من تصاميم نظرية لمفاعلات ابتكارية. ويُعتقد أنَّ المفاعلات السريعة عموماً سوف تكون مكوِّناً رئيسيًّا في الطاقة النووية المستدامة في المستقبل، لأنَّ أيَّ توسُّع كبير في تطوير القوى النووية سوف يتطلب استغلال الإمكانات الكاملة لموارد اليورانيوم و/أو الثوريوم الطبيعية.

ألف-4-4- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

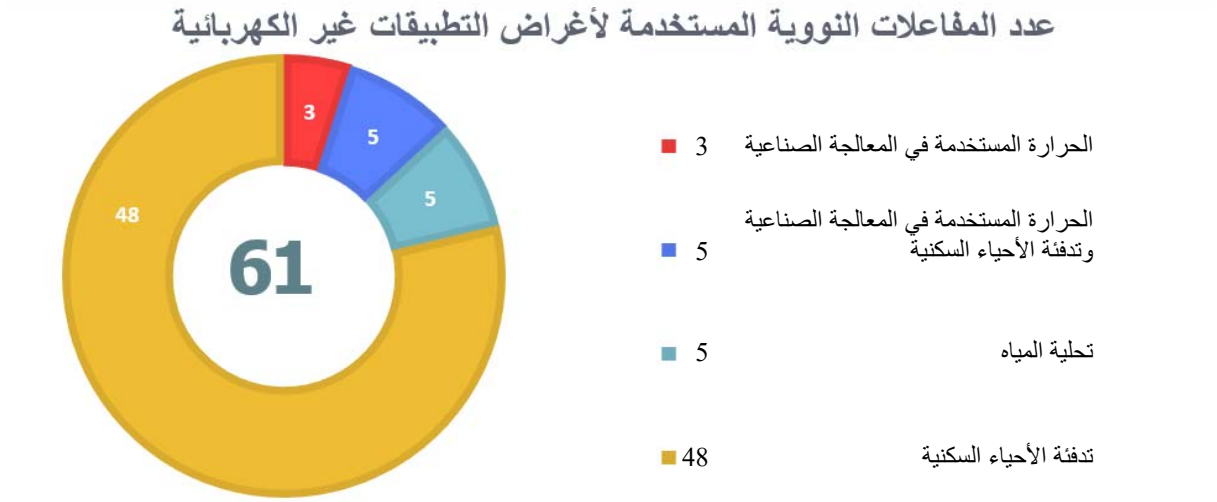
الحالة

40- في عام 2021، أستُخدم ما مجموعه 61 مفاعلاً نوويًّا عاملاً في التطبيقات غير الكهربائية (تحلية مياه البحر وتدفئة الأحياء السكنية وتوفير الحرارة للمعالجة الصناعية) لتوليد ما يزيد على 2167 غيغاواط-ساعة من الكهرباء سنويًّا. ومن بين هذه المفاعلات، دعم 48 مفاعلاً تدفئة الأحياء السكنية، ودعمت ثلاثة مفاعلات توفير الحرارة للمعالجة الصناعية، ودعمت خمسة مفاعلات كلاً من تدفئة الأحياء السكنية وتوفير الحرارة للمعالجة الصناعية، ودعمت خمسة مفاعلات تحلية مياه البحر.

41- ويلقى استخدام الطاقة النووية في منتجات نافعة أخرى تتجاوز توليد الكهرباء اهتماماً غير مسبوق حول العالم، خصوصاً لأنَّه يتيح إنتاج الحرارة أو الهيدروجين أو غير ذلك من المنتجات دون أيِّ انبعاثات كربونية. وتنطوي تكنولوجيا التدفئة النووية على مسارات تقنية ناضجة وآفاق سوقية عريضة وإمكانات تطوير كبيرة. وبالإضافة إلى مجموعة البلدان ذات الخبرة في استخدام الطاقة النووية في تدفئة الأحياء السكنية، والتي تضمُّ الاتحاد الروسي وأوكرانيا وبلغاريا والجمهورية التشيكية ورومانيا وسلوفاكيا وسويسرا وهنغاريا، بدأت الصين توفير التدفئة للأحياء السكنية من محطة هايانغ النووية في مقاطعة شاندونغ في أواخر عام 2020. وأدى استخدام الحرارة المستمدة من الوحدتين 1 و2 في محطة هايانغ (وهما مفاعلان من الجيل الثالث من طراز AP1000) إلى الاستغناء عن الغلايات التي تعمل بوقود الفحم ومن ثم خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 000 180 طن سنويًّا. وأُطلق أيضاً مشروع لإيضاح تدفئة الأحياء السكنية في محطة كينشان للقوى النووية بمقاطعة تشجيانغ، بهدف استخدام الطاقة النووية في تدفئة مساحة قدرها 4 ملايين متر مربع بحلول عام 2025، بما يشمل الجزء الحضري الرئيسي من منطقة هايان وكامل مساحة بلدة شوبو.

42- وتنظر عدَّة بلدان في إنتاج الهيدروجين باستخدام الكهرباء أو الحرارة المستمدة من المفاعلات النووية. ووفقاً لدراسة استطلاعية أُجريت مؤخراً باستخدام أعمال نمذجة نفذتها الوكالة، يمكن للطاقة النووية أن تكون الوسيلة الأكثر فعالية من حيث التكلفة لإنتاج الهيدروجين النظيف إذا ما ظلَّت أسعار الغاز الطبيعي عند مستواها الراهن الأعلى كثيراً من المستويات المنخفضة التي شهدتها العقود السابقة. ويقع هذا التحوُّل مع وصول تكاليف الغاز الطبيعي إلى ما بين 10 دولارات و15 دولاراً لكلِّ مليون وحدة حرارية بريطانية. وهذا المستوى هو بالفعل أقل كثيراً مما شهده النصف الثاني من هذا العام في الاتحاد الأوروبي والمملكة المتحدة وأجزاء من آسيا.

43- وأعلنت فرنسا في تشرين الأول/أكتوبر 2021 أنَّها تستهدف البدء في تشييد مفاعل نمطي صغير بحلول عام 2030 وأن تستخدم المحطات النووية الأخرى في إنتاج الهيدروجين النظيف عن طريق التحليل الكهربائي. واختار الاتحاد الروسي موقع محطة كولا للقوى النووية لاختبار إنتاج الهيدروجين النظيف عن طريق التحليل الكهربائي. وفي عام 2021 أيضاً، أعلنت الولايات المتحدة الأمريكية عن تمويل قدره 20 مليون دولار لإيضاح التكنولوجيا المستخدمة في إنتاج الطاقة الهيدروجينية النظيفة من القوى النووية. وسوف يدعم ذلك تحقيق هدف مبادرة Hydrogen Shot التي أُطلقت هذا العام، وهو الوصول بتكلفة الهيدروجين إلى دولار واحد للكيلوغرام الواحد في غضون عقد واحد.



الاتجاهات

44- تركِّز التكنولوجيات الناشئة مثل المفاعلات النمطية الصغيرة والمفاعلات المتناهية الصغر على نظم تنتج قدراً أقل من القوى ويمكن استخدامها في تطبيقات خارج الشبكة الكهربائية، مثل توفير الحرارة المنخفضة الكربون للاستخدام في شبكات تدفئة الأحياء السكنية ولأغراض المعالجة الصناعية، وإنتاج الهيدروجين، وإتاحة المرونة في توليد القوى. وتُعدُّ المفاعلات المتناهية الصغر مناسبة بوجه خاص لتوفير الطاقة النظيفة بتكلفة تنافسية للأسواق غير المركزية وغير الموصَّلة بالشبكة الكهربائية. وهناك اهتمام خاص بمفاهيم المفاعلات المتقدمة القادرة على توفير مخرجات مرتفعة الحرارة والتي يمكن أن توسِّع كثيراً من فرص الاستخدام في

التطبيقات الحرارية. ويجري العمل على تطوير المفاعلات المرتفعة الحرارة في عدَّة بلدان، وأحرزت اليابان تقدُّماً كبيراً في هذا الصدد، في حين بدأت الصين مؤخراً تشغيل أول وحدة حصوية القاع من المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز (HTR-PM) في مقاطعة شاندونغ.

ألف-4-5- تطوير بحوث وتكنولوجيا الاندماج النووي لأغراض إنتاج الطاقة في المستقبل

الحالة

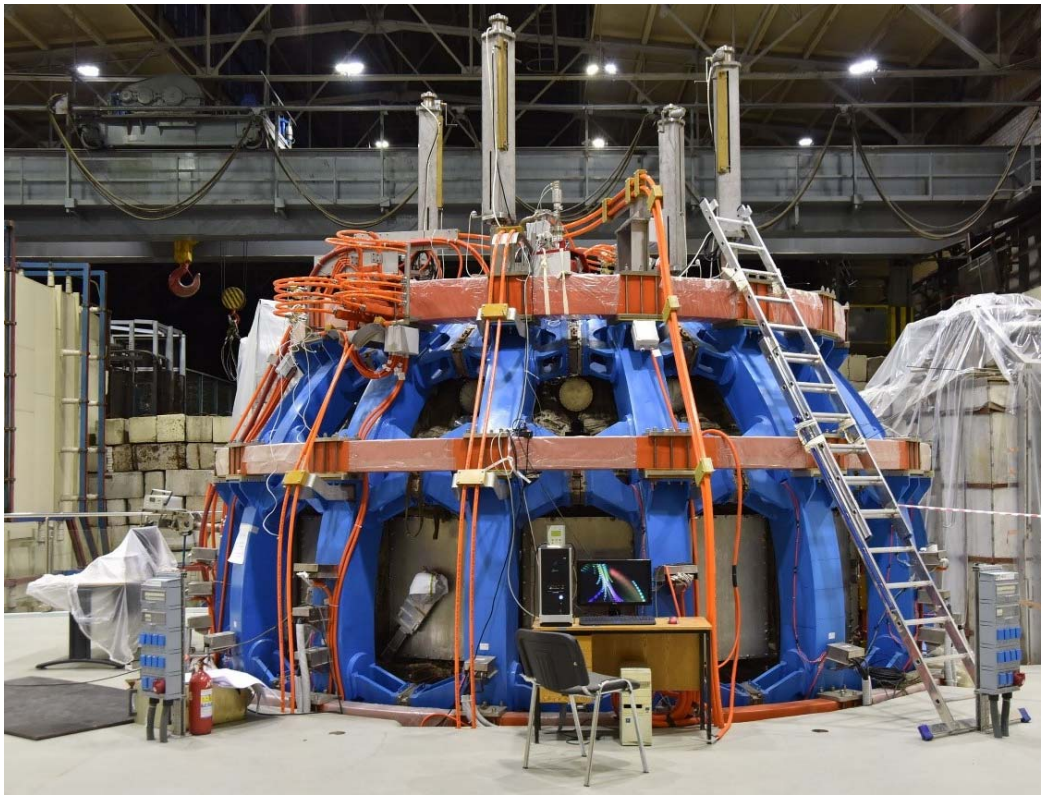
45- يحافظ مشروع مفاعل إيتير على تقدُّم مطرد في عملية تجميع مكونات الجهاز والمحطة، رغم الضغوط غير المسبوقة بسبب الجائحة والصعوبات التي واجهت تصنيع بعض المكونات الأولى من نوعها في المفاعل إيتير. وأُحرز تقدُّم كبير في عملية تجميع مكونات جهاز المفاعل وإدماجها، بما في ذلك تركيب الدرع الحراري للأسطوانة السفلى من وعاء المحافظة على البرودة (الكريوستات) في حفرة التوكاماك، ولحام أول قسمين من الكريوستات، وتركيب أول اثنين من المغناطيسات الفائقة التوصيل في حفرة التوكاماك، ووصول أول اثنين من الملفات المغناطيسية الخاصة بالمجال الحلقي إلى الموقع (من أوروبا واليابان) وكذلك أولى وحدات الملف الكهربائي (من الولايات المتحدة) الذي سيُجمَّع من ست وحدات نمطية مستقلة متراصة في هيكل يبلغ ارتفاعه 18 متراً (الشكل ألف-10).

الشكل- ألف-10- الوحدة النمطية البالغ وزنها 110 أطنان والتي ستُستخدم في الملف الكهربائي المركزي في المفاعل إيتير أثناء تحميلها على متن إحدى سفن نقل البضائع العامة لشحنها من الولايات المتحدة الأمريكية إلى موقع المفاعل إيتير في فرنسا. وسوف يبلغ ارتفاع المغناطيس المركزي ما يعادل خمسة طوابق وسيصل وزنه إلى 1000 طن، ليولِّد تياراً كهربائيًّا تبلغ شدته 15 مليون أمبير في بلازما المفاعل لبدء كلِّ نبضة من نبضات البلازما وكفالة الاستقرار الرأسي للبلازما. ولتحقيق ذلك، ستبلغ شدة المجال المغناطيسي للملف الكهربائي المركزي 13 تسلا، بما يعادل نحو 280 000 ضعف شدة المجال المغناطيسي للأرض. (الصورة من: المشروع الخاص بالولايات المتحدة والمعني بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

46- وعُقد مؤتمر الوكالة الثامن والعشرين للطاقة الاندماجية في شكل افتراضي في الفترة من 10 إلى 15 أيار/مايو 2021، وقُدِّمت فيه أدلة على جودة ما يُضطلع به حول العالم من أنشطة التطوير النظري والتجريبي والتكنولوجي والتطوير في مجال المواد، وعلى التقدُّم الكبير الذي أُحرز في أداء الأجهزة العاملة حاليًّا، بما في ذلك بعض الأجهزة الجديدة التي بدأ تشغيلها مؤخراً، وتحديداً جهاز JT-60SA في اليابان وجهاز HL-2M في الصين وجهاز MAST-U في المملكة المتحدة.

47- ووفَّرت النتائج المستمدة من التجارب التي أُجريت في جهاز التوكاماك المعروف باسم الطارة الأوروبية المشتركة، استعداداً لحملة التريتيوم والديوتيريوم-تريتيوم، معلومات مهمة لمفاعل إيتير لتجهيز نظام التخفيف من أثر الاختلالات الخاص به، كما وفَّرت نتائج بالغة الأهمية فيما يتعلق بالمكونات المواجهة للبلازما والتكنولوجيا النووية. وأكَّدت النتائج المستمدة من تحليل التجارب التي أُجريت في جهاز ستيلاريتور Wendelstein 7-X المعدَّل في ألمانيا تقليل خسائر الطاقة من البلازما، مما يوطِّد الثقة في أنَّ عيوب تصاميم أجهزة ستيلاريتور السابقة يمكن التغلُّب عليها وأنَّ هذا النوع من الأجهزة يمكن أن يكون مناسباً أيضاً للاستخدام في محطات القوى. وفي تجربة جديدة أجرتها هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة باستخدام جهاز MAST-U في مركز كولام لطاقة الاندماج، أثبتت النتائج فعالية نظام مبتكر لتصريف الحرارة صُمِّم لغرض جعل محطات القوى الاندماجية المضغوطة الحجم مجدية من الناحية التجارية. ويُطلَق على النظام الجديد اسم "المحرِّف Super-X"، وسوف يتيح للمكونات في أجهزة التوكاماك التجارية المستقبلية أن تدوم لفترة أطول كثيراً، مما يزيد من اللياقة التشغيلية لمحطات القوى ويحسِّن من جدواها الاقتصادية. كما سيتولى مرفق اختبار جهاز المحرِّف توكاماك (DTT)، قيد الإنشاء في موقع فراسكاتي التابع للوكالة الوطنية الإيطالية للتكنولوجيات الجديدة والطاقة والتنمية الاقتصادية المستدامة، على مدى العقود القادمة، اختبارَ الأنساق الهندسية المختلفة للمحرِّف ومقارنتها في بلازما ذات كثافة طاقة عالية التدفق، تشبه قدر الإمكان البلازما المحترقة فعليًّا.

48- واحتفل معهد كورشاتوف في الاتحاد الروسي ببدء تشغيل جهاز التوكاماك المحدَّث T-15MD (الشكل ألف-11). وسيستهدف البرنامج البحثي لجهاز التوكاماك T-15MD حلَّ المشاكل الأكثر إلحاحاً التي يواجهها المفاعل إيتير. وقطعت التجارب في مرفق الإشعال الوطني بمختبر لورانس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية خطوةً مهمة صوب إثبات إمكانية إنتاج الطاقة من الاندماج، حيث حققت حصيلة صافية من الطاقة الاندماجية تزيد على 1.3 ميغاجول.



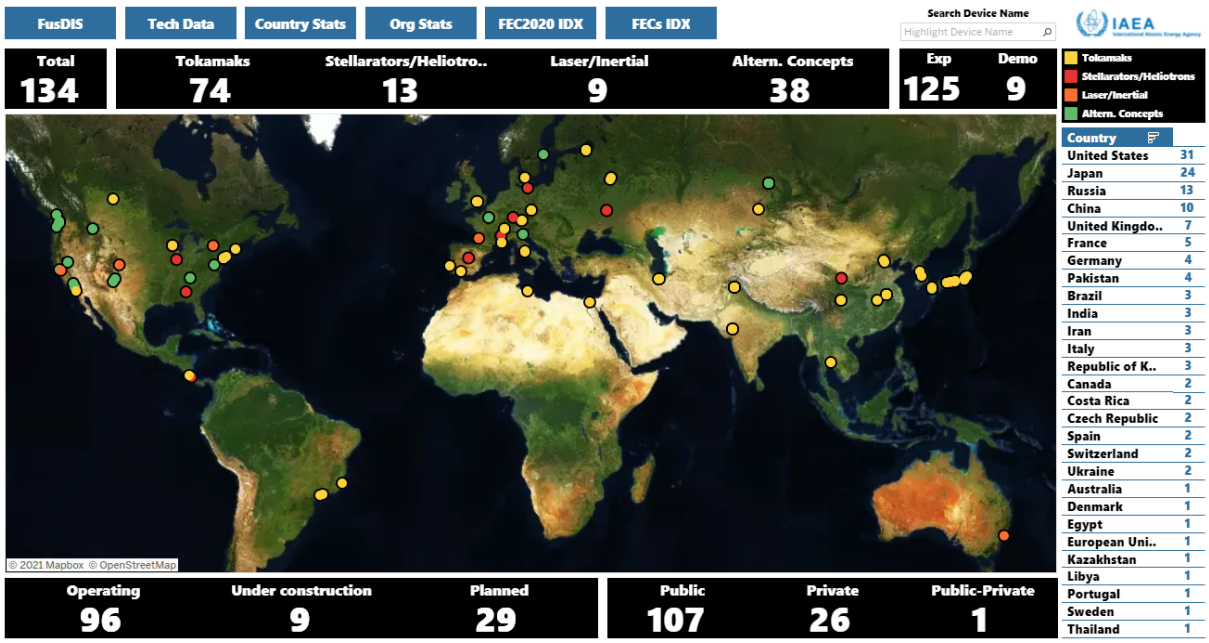
الشكل- ألف-11- يُبرَّد جهاز التوكاماك T-15MD بالماء وهو قادر على إنتاج مجال مغناطيسي حلقي عند محور البلازما تبلغ شدته 2 تسلا؛ وسيزوَّد أيضاً بنظم تسخين إضافية تصل قدرتها الإجمالية على إدخال الحرارة للبلازما إلى 20 ميغاواط، وهو قائم على بنية أساسية هندسية حديثة. ويُفترض أن تصل شدة التيار داخل البلازما إلى 2 ميغا أمبير في غضون 10 ثوان. وقد تمَّ بناء جهاز التوكاماك T-15MD على مدى عشر سنوات، وسوف يسهم برنامجه التجريبي في تشغيل المفاعل إيتير ومحطات القوى الاندماجية المستقبلية. (الصورة من: معهد كورشاتوف)

49- وأحد العناصر الرئيسية في تطوير الاندماج ليكون مصدر طاقة مجدياً من الناحية التجارية هو وضع إطار ملائم للأمان والتنظيم الرقابي فيما يخصُّ أجهزة الاندماج. وخلال عام 2021، استُهلَّ عدد من المبادرات الرامية إلى وضع إطار رقابي خاص بالاندماج على المستوى الوطني في الصين وأوروبا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية. وشرعت الوكالة أيضاً في جمع كلِّ المعلومات المتاحة في المجال من أجل توفير الإرشادات وأفضل الممارسات على المستوى الدولي، وذلك لتحقيق الهدف النهائي المتمثِّل في تعزيز التجانس بين الأطر الرقابية المعنية بالاندماج.

الاتجاهات

50- شهدت السنوات السبع الأخيرة تسارُع وتيرة إنشاء مشاريع الاندماج المدعومة برأس مال من القطع الخاص. وصارت هناك شركات جديدة في أنحاء شتى من العالم، غالباً في الدول الأعضاء المشاركة في مشروع المفاعل إيتير (الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان، وأيضاً في المملكة المتحدة). وبالإضافة إلى ذلك، انبثقت من جامعة نيو ساوث ويلز في أستراليا شركة ناشئة تأسست في عام 2020. وأثبت نموذج الشركات الممولة بالشراكة بين القطاعين العام والخاص الذي ظهر

في الولايات المتحدة الأمريكية نجاحاً كبيراً، وبدأت دول أعضاء أخرى تستكشف إمكانية الأخذ بالأسلوب نفسه. ويمكن الاطلاع على لمحة عامة عن جميع أجهزة الاندماج ذات التصاميم التجريبية والإيضاحية التابعة للقطاعين العام والخاص، بما يشمل الأجهزة التي هي حاليًّا قيد التشغيل أو التشييد أو التخطيط، في نظام المعلومات عن أجهزة الاندماج[1] (الشكل ألف-12).



الشكل- ألف-12- يوجد حاليًّا قيد التشغيل أو التشييد أو التخطيط ما يزيد على 130 من أجهزة الاندماج التجريبية التابعة للقطاعين العام والخاص، وهناك عدد من المنظمات التي تدرس تصاميم لمحطات قوى اندماجية إيضاحية. (المصدر: نظام المعلومات عن أجهزة الاندماج التابع للوكالة).

51- وأطلقت هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة مبادرة طموحة لإثبات القدرة على توليد قوى كهربائية صافية من الاندماج بحلول عام 2040، وسوف تنطوي هذه المبادرة على تشييد جهاز التوكاماك الكروي لإنتاج الطاقة (مرفق ستيب). وستوفِّر هذه المحطة المعارف والخبرات المتعلقة بالصيانة طوال دورة الحياة التشغيلية للمرفق والاستدامة الذاتية للوقود. ويُتوقع أن تتم الموافقة على مفهوم تصميم مرفق ستيب بحلول عام 2024، على أن يتألف المرفق في مرحلته الأولى من جهاز توكاماك كروي يُوصَّل بالشبكة الكهربائية الوطنية وينتج حصيلة صافية من الطاقة ولكن ليس للأغراض التجارية. وخُصِّص مبلغ قدره 222 جنيه استرليني (264 مليون يورو) لبدء أعمال تصميم مرفق ستيب. وتجري في الوقت الراهن دراسة عدد من الأماكن المختلفة في المملكة المتحدة، ومن المتوقع اتخاذ القرار النهائي بحلول نهاية عام 2022 (الشكل ألف-13).

[1] https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx

الشكل- ألف-13- رسم لمبنى مرفق ستيب المعتزم تشييده. (الصورة من: هيئة الطاقة الذرية في المملكة المتحدة)

باء- دورة الوقود النووي

باء-1- المرحلة الاستهلالية

الحالة

52- في الربع الأول من عام 2021، كان السعر الفوري لليورانيوم حوالي 26.50 دولاراً/رطل من ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم. وأجبر استمرار الأسعار عند هذا المستوى العديدَ من المنتجين الأساسيين على إبقاء عملياتهم التشغيلية قيد العناية والصيانة أو الإنتاج بمعدلات أقل[2]. ومنذ عام 2011 كان هناك فائض في المعروض من اليورانيوم في السوق؛ ومع ذلك، نظرًا للطلب المستمر على اليورانيوم لاستخدامه كوقود نووي وانخفاض الإنتاج الأولي، انخفضت الأرصدة العالمية من ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم بشكل مطرد استجابة للانخفاض المستمر للأسعار. وكان الاتجاه في خفض الأرصدة واضحًا في عامي 2020 و2021.

53- وكشف التراجع المستمر في الإنتاج الأولي العالمي خلال عام 2020 وحتى عام 2021 عن هشاشة سوق اليورانيوم. وقد دفع هذا العديد من المستثمرين والصناديق والتجار ومنتجي اليورانيوم الأساسيين إلى شراء ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم الموجود في السوق لمواجهة التحول المتوقع في العرض والطلب على ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم. فعلى سبيل المثال، أعلنت شركة Kazatomprom في تشرين الأول/أكتوبر 2021 عن نيتها المشاركة في صندوق يورانيوم مادي (يُسمى ANU Energy)، والذي سيحتفظ باليورانيوم المادي كاستثمار طويل الأجل. ولم تشهد أسواق اليورانيوم على مستوى العالم في الماضي إجراء عدد متنوع من الجهات الفاعلة غير النووية لعمليات شراء كهذه لثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم. ونتيجة لانخفاض الأرصدة والتداول السريع لثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم في عام 2021، ارتفع السعر الفوري في أواخر تشرين الأول/أكتوبر عام 2021 بنسبة 74% ليصل إلى حوالي 46.00 دولارًا/رطل من ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم منذ الربع الأول من عام 2021.

[2] أعلن منتج رئيسي آخر لليورانيوم، شركة Kazatomprom في كازاخستان، عن خفض بنسبة 20% في الإنتاج من مناجم الاسترداد الموقعي مع استمرار هذا الانخفاض في الإنتاج حتى عام 2021.

54- وإنتاج الوقود النووي تقنية ناضجة، تحسنت باستمرار على مر السنين من خلال الأتمتة والرقمنة، وتقليل توليد النفايات التشغيلية، وتعزيز وقاية العاملين من الإشعاعات، فضلًا عن تقليل حالات انقطاع الوقود في المفاعلات. والقدرات الحالية لتصنيع الوقود النووي كافية في جميع أنحاء العالم لتلبية الطلب المتوقع على القوى النووية، وثمة تقدم جيد لإثبات السلوك المأمون للأنواع الجديدة للوقود القائم على التكنولوجيا المتقدمة المصممة للتشعيع في الأجيال الحالية والقادمة من مفاعلات القوى النووية، بما في ذلك المفاعلات النمطية الصغيرة (على سبيل المثال، تصميم مجمعات وقود GAIA الذي طورته شركة Framatome بما في ذلك الوقود المتحمِّل للحوادث المعزَّز الذي تنتجه شركة PROtect، بالإضافة إلى مفاهيم الوقود المتحمِّل للحوادث التي أعدَّتها شركتا Global Nuclear Fuels وWestinghouse والذي يتكون من كسوة سبيكة زركونيوم مطلية وأقراص وقود مغطاة بثاني أكسيد اليورانيوم، والنموذج TVS-2M الذي تنتجه شركة TVEL المحاط بكسوة من الزركونيوم المطلي بالكروم، وسبائك الكروم والنيكل، والوقود من نوع REMIX الذي تنتجه روزاتوم والمصمم لإعادة التدوير المتعدد لليورانيوم والبلوتونيوم في مفاعلات الماء الخفيف، وتكنولوجيا الوقود المسماة الطاقة النووية المتقدمة من أجل الرخاء (ANEEL) الذي تنتجه شركة Clean Core باستخدام مزيج من الثوريوم واليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز لزيادة تحسين أداء الوقود في مفاعلات كاندو).

55- وقيّم المختبر النووي الوطني في المملكة المتحدة العديد من تصميمات الوقود المتحمِّل للحوادث من ناحية النضج والاقتصاد والأمان.

الاتجاهات

56- انخفض الإنفاق على استكشاف اليورانيوم بشكل مطرد منذ عام 2012 نتيجة لاستمرار انخفاض أسعار اليورانيوم، والذي تأثر كذلك بجائحة كوفيد-19 منذ أوائل عام 2020. وحفزت الزيادات الأخيرة في سعر اليورانيوم في السوق بعض الاستثمارات التي انطوت على أنشطة استكشاف وتطوير متجددة في عام 2021 بالإضافة إلى استئناف قدر من الإنتاج الأولي.

57- ودفعت الزيادة الحادة في السعر الفوري لليورانيوم في عام 2021 بعض المشغلين[3]، الذين وضعوا مناجم اليورانيوم ومرافق المعالجة قيد العناية والصيانة، إلى دراسة خطط إعادة التشغيل. وقد يؤدي حدوث انخفاض آخر لأرصدة ثامن أكسيد ثلاثي اليورانيوم واستمرار زيادة السعر الفوري لليورانيوم إلى تحفيز مناجم اليورانيوم ومرافق المعالجة الأخرى الموجودة قيد العناية والصيانة لاستئناف عملياتها ووضع مشاريع جديدة لليورانيوم للأغراض التجارية أو لصالح أمن الإمدادات المحلية[4].

58- ولا بدَّ من الابتكار لبدء مرحلة الإنتاج في مكامن اليورانيوم القريبة من تلك المرحلة. ومن الأمثلة الدائمة على هذا الابتكار في مجال صناعة تعدين اليورانيوم في عام 2021 النتائج الإيجابية التي تحققت في دراسات الجدوى لتطوير منجم استرداد موقعي في مكمن مكون من رواسب من النوع الناشئ عن عدم توافق

[3] على سبيل المثال، أعلن منجم لانغر هاينريتش لليورانيوم في ناميبيا في تشرين الأول/أكتوبر أنه يعمل على عناصر المسار الحرج المطلوبة لإعادة تشغيل منجم اليورانيوم ومرفق المعالجة المعطلين.

[4] أحد الأمثلة على ذلك مشروع شركة Badrakh Energy في منغوليا، والتي أعلنت في تموز/يوليه أنها بدأت اختبارًا تجريبيًا في مكمن زوفش اوفو التابع لها. وعلاوة على ذلك، في تموز/يوليه، أعلنت شركة تعدين اليورانيوم الأردنية أن محطتها التجريبية قد تم تشغيلها بالكامل ولديها القدرة على معالجة 70 طنًا من الخام سنويًا. وستُستخدم نتائج هذه الاختبارات لتقييم الجدوى التقنية والبيئية والاقتصادية لهذه المكامن وما إذا كانت ستبدأ في الإنتاج الكامل.

طبقات الأرض. ومن الابتكارات المهمة الأخرى أساليب النضّ البيولوجي التي يجري تطويرها لتُستخدم في الاستخراج الموقعي لليورانيوم من مكامنه المكونة من رواسب من نوع الحجر الرملي.

59- ومنذ عام 2011، تركزت الجهود الدولية على تحسين أمان وأداء الوقود المستخدم في مفاعلات الماء الخفيف الحالية. والدافعان الآخران لتطوير الوقود النووي هما التصاميم المبتكرة للمفاعلات، مثل مفاعلات الجيل الرابع والمفاعلات النمطية الصغيرة (تتراوح من الطرازات المصغرة من تصاميم وقود مفاعلات الماء الخفيف إلى تصاميم وقود الجيل الرابع الجديدة تمامًا)، وقد وصل بعضها إلى نطاق التجريب (مثل المفاعل HTR-PM في الصين)؛ وتحسين اقتصاديات واستدامة القوى النووية (إطالة دورات تشعيع الوقود، وارتفاع معدلات الحرق، وحملات التأكد من عدم وجود عيوب، والأساليب المبتكرة لتصنيع الوقود، ودورات الوقود الجديدة، وإعادة التدوير المتعدد للمواد النووية من الوقود النووي المستهلك). واليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز مطلوب لتصنيع العديد من مفاهيم الوقود النووي المبتكرة، مثل الوقود القائم على التكنولوجيا المتقدمة أو وقود المفاعلات النمطية الصغيرة.

باء-2- المرحلة الختامية

الحالة

60- يتراكم الوقود النووي المستهلك في الخزن بمعدل يقارب 7000 طن من الفلزات الثقيلة سنويًا على مستوى العالم، ويقترب الرصيد المخزون من حوالي 300000 طن من الفلزات الثقيلة. وتتمثل التحديات الرئيسية التي تواجهها البلدان التي لديها برامج راسخة للقوى النووية والتي تسعى إلى الأخذ باستراتيجيات قائمة على دورات الوقود المفتوحة، في الحاجة إلى سعة خزن إضافية للوقود النووي المستهلك بالإضافة إلى زيادة مدَّة التخزين (أكثر من 100عام).

61- ويُنقَل الوقود النووي المستهلك من الخزن الرطب إلى الخزن الجاف بعد وقت التبريد الأولي. ونظرًا لزيادة شيوع تقليص أوقات التبريد الأولية هذه، تتطلب نظم الخزن الجاف تحسين قدرات إزالة الحرارة[5]. ورُخّصت مرافق خزن مركزية جديدة في أوكرانيا والولايات المتحدة الأمريكية. ويُنقل الوقود النووي المستهلك في بعض البلدان وتُنفذ التدابير اللازمة لتحسين النقل بشكل روتيني. وتواصل الدول الأعضاء إزالة ونقل وقودها النووي المستهلك في إطار مشاريع إخراج محطات قوى نووية لديها من الخدمة. وطور باحثون في الجمهورية التشيكية تقنية مبتكرة تسمى Teplator وحصلوا على براءة اختراع لها، للاستفادة من حرارة الاضمحلال الإشعاعي الناتجة عن الوقود المستهلك لتسخين المياه[6].

62- ومن المتوقع اتخاذ خطوات نحو تنفيذ إعادة التدوير: ففي فرنسا، يعد هذا النشاط نشاطاً صناعيًّا ناضجاً، وفي اليابان، يخطط اتحاد شركات القوى الكهربائية لاستخدام وقود موكس في 12 وحدة على الأقل بحلول عام

[5] في أيار/مايو، وضِعت مجمعات الوقود المستهلك النهائية من محطة القوى النووية أويستر كريك في الخزن الجاف بعد 32 شهرًا من إغلاق المفاعل نهائيًا، وهو ما يمثل معدلًا قياسيًا لتفريغ الوقود. واكتملت حملة تحميل البراميل بأمان في غضون 21 أسبوعًا.

[6] في نيسان/أبريل، قدم باحثون من الجامعة التقنية التشيكية في براغ وجامعة ويست بوهيميا في بلزن حلًا مبتكرًا حاصل على براءة اختراع يستخدم حرارة الاضمحلال الإشعاعي التي تنتجها قضبان الوقود المستهلك لتسخين المياه.

2030[7]؛ وفي الاتحاد الروسي، هناك مرفق إيضاحي تجريبي في مراحله النهائية من التشييد[8] يقع في المجمَّع التعديني والكيميائي في كراسنويارسك، لتجربة تكنولوجيات جديدة لإعادة معالجة الوقود النووي المستهلك من أجل نشرها لاحقاً على نطاق واسع؛ وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تعاونت مؤسسة Oklo ومختبر أرغون الوطني في إجراء أنشطة بحث وتطوير فيما يتعلق بتكنولوجيا التكرير الكهربائي لإعادة تدوير الوقود للاستخدام في محطات القوى الانشطارية المتقدِّمة[9].

63- وفي العديد من البلدان (مثل الاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين وفرنسا واليابان)، تواصل مشاريع البحث والتطوير دراسة التجزئة الانتقائية للأكتينات الثانوية من أجل مواصلة تحويلها في المفاعلات السريعة و/أو النظم دون الحرجة بغية التقليل إلى أدنى حد من عبء النفايات النووية القوية الإشعاع.

64- وأصدر المختبر الوطني النووي في المملكة المتحدة خارطة الطريق التي تحدد الدور الذي تؤديه عمليات تطوير دورة الوقود المتقدمة في دعم الطاقة النووية المنخفضة الكربون في المستقبل.

الاتجاهات

65- يظل فهم سلوك الوقود النووي المستهلك في نظم الخزن المختلفة والآليات التي تؤدي إلى التقادم والتدهور في هياكل ونظم ومكونات الخزن أمرًا حيويًا في ضمان استمرار الخزن المأمون للوقود النووي المستهلك ونقله لاحقًا إلى مرافق التخلص أو إعادة المعالجة. وتنسق الوكالة أنشطة بحثية في هذا الشأن لجمع الخبرات التشغيلية للدول الأعضاء وتعزيز تبادل المعلومات.

66- ونتج عن مكاسب الكفاءة في إدارة المفاعلات النووية، بمرور الوقت، تقليل الوقود النووي المستهلك الذي يجري تفريغه من المفاعلات النووية، إلا أن الاتجاه صوب استخدام أنواع وقود مُثراة إلى مستويات مبدئية أعلى وذات معدلات حرق أعلى يؤدي إلى ارتفاع الحرارة المتبقية وزيادة مخاطر تقصف للكسوة، وقد يكون لذلك تأثير في خطوات التصرف في الوقود النووي المستهلك.

67- وستكون هناك حاجة إلى إجراء بحوث للتصرف في الوقود النووي المستهلك استنادًا إلى التصميمات الجديدة (مثل الوقود المتطور القائم على التكنولوجيا المتقدمة ووقود اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي التركيز) ذات المستويات المرتفعة من إثراء اليورانيوم-235 (تصل إلى 20%) ومواد كسوة جديدة، لا سيما فيما يتعلق بأحمال حرارة أعلى وسلوكيات من الممكن أن تكون مختلفة للوقود على المدى الطويل. وربما تكون مرافق الخزن المركزية أحد الحلول في المستقبل القريب لاستيعاب الوقود المستهلك الناتج عن مفاعلات القوى المغلقة لتمكين إخراج الموقع بالكامل من الخدمة ومعالجته.

---

[7] في شباط/فبراير، نفَّح اتحاد شركات القوى الكهربائية خطة استخدام البلوتونيوم، استناداً إلى أحدث خطة تشغيلية لمحطة إعادة المعالجة Rokkasho ومحطة تصنيع وقود موكس، والتغيرات التي طرأت على بيئة الأعمال في العام الماضي.

[8] بالإضافة إلى ذلك، يجري العمل في الاتحاد الروسي على إرساء بنية أساسية لبيان إغلاق دورة الوقود النووي باستخدام المفاعلات السريعة، ومنذ عام 2017، كان الإنتاج الصناعي لوقود موكس للمفاعل السريع BN-800 جاريًّا في الاتحاد الروسي، ويتم تصنيع الوقود النووي للمفاعلات العالية القدرة المزوَّدة بقنوات والمفاعلات المبرَّدة والمهدَّأة بالماء باستخدام اليورانيوم المعاد تنشيطه.

[9] في حزيران/يونيه، منحت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة تمويلاً لمختبر أرغون الوطني لبدء إجراء البحث والتطوير في مجال تكنولوجيا التكرير الكهربائي لإعادة تدوير الوقود لاستخدامه في محطات القوى الانشطارية المتقدِّمة. وقدَّمت مؤسسة Oklo نسبة من هذا التمويل.

68- وتخضـــع العمليات المتقدمة لإعادة تدوير البلوتونيوم لعدة مرات (الوقود من نوع REMIX في روســيا والوقود من نوعي CORAIL وMIX في فرنســـا) في مفاعلات الماء الخفيف حاليًّا لاختبارات تجريبية لتمكين الانتقال إلى استراتيجيات إعادة تدوير البلوتونيوم لعدة مرات في المفاعلات السريعة في المستقبل.

69- وهناك اهتمام متزايد بتطوير المفاعلات النمطية الصغيرة استنادًا إلى تصميمات مختلفة سيتم نشرها في العقد القادم أو نحو ذلك، حيث ستكون هناك حاجة إلى تطوير دورة وقود مرتبطة مأمونة وآمنة ومستدامة.

70- وينطبق هذا المسعى على الجهود المستمرة في التقدم نحو تنفيذ المفاعلات المتقدمة التي تتطلب دورات وقود متقدمة مرتبطة مأمونة وآمنة ومستدامة.

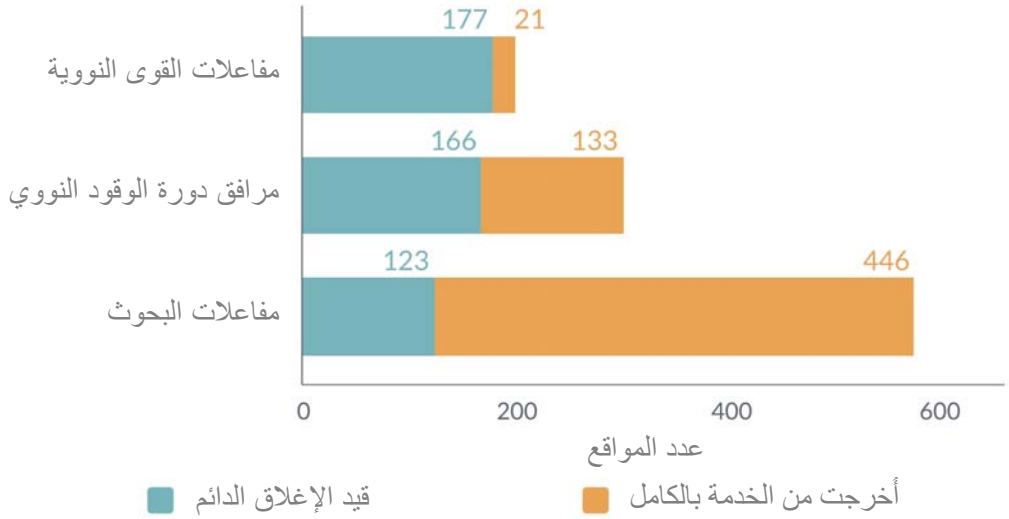
جيم- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعة

جيم-1- الإخراج من الخدمة

الحالة

71- في عام 2021، خضـــعت خمســـة من المفاعلات النووية للإغلاق الدائم، وهي: المفاعلان B1 وB2 في محطة Dungeness في المملكة المتحدة، والمفاعل Indian Point-3 في الولايات المتحدة الأمريكية، والمفاعل KANUPP-1 في باكســـتان، والمفاعل Kuosheng-1 في تايوان، الصـــين. ويتماشـــى هذا بشـــكل عام مع معدل الإغلاق الدائم للمفاعلات خلال العقد الماضـــي، والذي تم خلاله ســـحب 57 مفاعلًا من الخدمة (منها 18 مفاعلًا في اليابان و12 مفاعلًا في الولايات المتحدة الأمريكية). وإغلاق المفاعلين B1 وB2 في محطة Dungeness هو أول إغلاق دائم في أســـطول من المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز في المملكة المتحدة، ومن المتوقع أن يحدث نفس الأمر مع مفاعلات الأســـطول المتبقية بحلول نهاية العقد الحالي. ومفاعل KANUPP-1 من نوع كاندو هو المفاعل الأول من أسطول مفاعلات باكستان الذي يتم إغلاقه بشكل دائم.

حالة مفاعلات القوى النووية ومرافق الوقود النووي ومفاعلات البحوث



72- وفي تشرين الثاني/نوفمبر 2021، تم إنهاء ترخيص الوحدة 3 من محطة القوى النووية Humboldt Bay في كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية، مع السماح باستعمال الموقع دون قيود. وبذلك، بلغ عدد مفاعلات القوى النووية التي أخرِجت من الخدمة بالكامل 21 مفاعلاً، بالإضافة إلى 177 مفاعلاً آخر، أي أن حوالي 28% من أسطول المفاعلات في العالم[10]، أصبح قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا. وبالإضافة إلى ذلك، هناك 166 مرفقًا لدورة الوقود النووي في حالة إغلاق دائم أو قيد الإخراج من الخدمة، وأُغلق 133 مرفقًا بالكامل من الخدمة. وعلاوة على ذلك، هناك 123 مفاعلاً من مفاعلات البحوث التي إمَّا أُغلقت إغلاقاً دائماً أو تخضع حاليًّا لعملية الإخراج من الخدمة، وأُخرج من الخدمة 446 مفاعلاً بحثياً بالكامل. والبرامج الأساسية المستمرة لإخراج مفاعلات القوى من الخدمة موجودة في ألمانيا حيث يوجد 27 مفاعلاً قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا؛ وفي اليابان حيث يوجد 26 مفاعلاً قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا؛ وفي الولايات المتحدة الأمريكية حيث يوجد 25 مفاعلاً قيد الإغلاق الدائم أو قيد الإخراج من الخدمة حاليًّا.

73- ويُحرز تقدم في مواقع المفاعلات النووية التي تعرضت لحوادث كبيرة، بما في ذلك محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في اليابان، والتي تعرضت لحادث في أعقاب الزلزال الكبير في شرق اليابان في عام 2011 (الشكل جيم-1). ويتواصل العمل لإزالة الوقود المستهلك من أحواض الوقود المستهلك في وحدات فوكوشيما داييتشي 1-4 وفقًا للجدول الزمني، مع التركيز الحالي على الوحدتين 1 و2 (تم الانتهاء بالفعل من الوحدتين 3 و4). وتحقق إنجاز مهم أيضًا في الوحدة 4 المتضرّرة من محطة تشرنوبل للقوى النووية في أوكرانيا عندما حصل نظام الاحتواء المأمون الجديد على رخصة للتشغيل في آب/أغسطس 2021 (الشكل جيم-2). وأُحيل في كانون الأول/ديسمبر 2020 إخراج الوحدة 2 في جزيرة ثري مايل في الولايات المتحدة الأمريكية من الخدمة إلى اتحاد متخصص في الإخراج من الخدمة؛ بدأ الآن إخراج المرفق المتضرّر من الخدمة ومن المقرر أن يكتمل بحلول عام 2037.

[10] يتكون أسطول المفاعلات في العالم من 442 مفاعلًا (69%) قيد التشغيل، و177 مفاعلًا (28%) قيد الإغلاق الدائم، و21 مفاعلًا (3%) أُخرجت من الخدمة بالكامل.

الشكل- جيم-1- التصرف في الوقود المستهلك في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية.

74- وفيما يتعلق بأنشطة الإخراج من الخدمة في مرافق دورة الوقود، فإن أحد أهم الخطوات الرئيسية لتفكيك المرفق بشكل عام هي إزالة النفايات الموروثة، المخزنة عادة في أحواض أو خنادق خرسانية. ويتواصل إحراز تقدم كبير في هذا الجانب الخاص بالإخراج من الخدمة في المرافق الرئيسية، لا سيما إزالة الحمأة من أحواض خزن الوقود الموروث في سيلافيلد بالمملكة المتحدة؛ وإزالة نفايات الغرافيت والمغنيسيوم الموروثة المخزنة في صوامع خرسانية في لاهاي بفرنسا؛ وهدم المباني وإزالة الألواح الخرسانية الأساسية في محطة أوك ريدج للانتشار الغازي في الولايات المتحدة الأمريكية؛ وهدم العديد من المباني الملوَّثة بالإشعاع التي كانت تستخدمها سابقًا محطة الكيمياء الإشعاعية التابعة لمجمّع مایاك الإنتاجي في الاتحاد الروسي.

75- وتقع مفاعلات البحوث الخاضعة للإخراج من الخدمة بشكل أساسي في فرنسا وألمانيا واليابان والاتحاد الروسي والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية. والعديد من مشاريع إخراج مفاعلات البحوث من الخدمة متواصلة في البلدان الإسكندنافية. وتحقق إنجاز مهم خلال عام 2021 في مفاعل FiR-1 في فنلندا عندما نُقِل الوقود المشعَّع من المفاعل إلى الولايات المتحدة الأمريكية. ومعهد أوراي للبحث والتطوير التابع للوكالة اليابانية للطاقة الذرية في محافظة إيباراكي يعد مثالًا آخر على التقدم المحرز حيث تمت الموافقة في آذار/مارس 2021 على خطة الإخراج من الخدمة للمفاعل الياباني لاختبار المواد. وقُسِّم برنامج التفكيك بكامله إلى أربع مراحل، وبدأت المرحلة الأولى من التفكيك.

الشكل- جيم-2- في احتفال بمناسبة الذكرى الخامسة والثلاثين لحادث تشرنوبل النووي، يعرب المدير العام رافائيل ماريانو غروسي عن احترامه للضحايا أمام نظام الاحتواء المأمون الجديد.

الاتجاهات

76- من المتوقع أن يستمر في المستقبل تطبيق العديد من الأسباب التي أدت إلى إغلاق المرافق النووية خلال العقد الماضي - العوامل السياسية والاقتصادية، وتكاليف الصيانة و/أو التجديد، وظروف سوق الكهرباء، وفي الواقع قد تتسارع وتيرة عمليات الإغلاق بسبب مسألة تقادم الأساطيل الحالية، والتي تُعوَّض جزئيًا عن طريق تمديدات الأعمار الافتراضية. وقد تُسحب، خلال العقود الثلاثة القادمة، من الخدمة الغالبية العظمى لمفاعلات القوى النووية التي يصل عددها إلى حوالي 300 مفاعل ويبلغ عمرها حاليًّا 30 عاماً أو أكثر. ومن المتوقع حدوث تطور مماثل في حالة مفاعلات البحوث بالنظر إلى التشابه الكبير في التركيبة العمرية لهذا الأسطول أيضاً.

77- وهناك اتجاه متصاعد لصالح التفكيك المبكر للمرافق بمجرد إغلاقها بشكل دائم. وعادة ما يتأثر اختيار استراتيجية التفكيك الفوري بالسياسة التي تتبعها الحكومة، على سبيل المثال، نفذت فرنسا وألمانيا سياسات تفضل بشدة هذا النهج. ومن المحتمل أيضًا أن يكون عدم التيقّن من تكاليف المشاريع التي ستنفذ في المستقبل البعيد عاملًا مهمًا لمالكي المرافق، الذين يفضل الكثير منهم تجنب تحمل التزامات طويلة الأجل تفتقر بشدة لجانب التيقن. ويبدو أن هذا محرك قوي للاتجاه الحالي في الولايات المتحدة الأمريكية بعيدًا عن استراتيجيات التفكيك المؤجل.

78- وكان التفكيك المؤجل على مر التاريخ هو الاستراتيجية المفضلة للمفاعلات المهدَّأة بالغرافيت، بسبب الافتقار إلى الاستراتيجيات المقبولة عمومًا للتصرف الطويل الأجل في الغرافيت المشعَّع، وأيضًا لأن هذه المفاعلات عادة ما تكون أكبر بكثير من المفاعلات المهدَّأة بالماء، وبالتالي تنطوي أنشطة التفكيك على قدر أكبر

من التعقيد. ومع ذلك، حتى بالنسبة لمثل هذه المفاعلات، يبدو أن الاتجاهات الحالية تفضل اتباع نهج التفكيك الفوري. فعلى سبيل المثال، قررت الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة في المملكة المتحدة اعتماد استراتيجية للإخراج من الخدمة تخص كل موقع من مواقع مفاعلات ماغنوكس على حدة، مع استمرار التفكيك المبكر لمفاعلات Dungeness A وTrawsfynydd على أساس "الريادة والتعلم". وتشرع محطة إغنالينا للقوى النووية في التفكيك الفوري لمرفقها، بما في ذلك تطوير مرفق خزن للغرافيت المشعَّع حتى يتم تطوير مرفق للتخلص الجيولوجي الطويل الأجل في ليتوانيا.

جيم-2- الاستصلاح البيئي

الحالة

79- يشمل الاستصلاح البيئي حلولًا لمعالجة تلوث المساحات الأرضية (التربة والمياه الجوفية) الناجم عن ممارسات التصرف غير الملائمة المتبعة في الماضي. ويمكن أن تشمل المواقع الموروثة مواقع نووية (لا سيما مرافق البحوث ودورة الوقود الزائدة عن الحاجة)، ومواقع التجارب النووية السابقة، والمواقع التي تأثرت بالعمليات السابقة لتعدين ومعالجة اليورانيوم بالإضافة إلى الأنشطة الأخرى التي تنطوي على استخدام المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية، أو المواقع المتضرَّرة من الحوادث النووية أو الإشعاعية الكبرى. ولقد تركت الصناعة النووية تأثيرًا ملحوظًا في 31 بلدًا، باستثناء مواقع تعدين ومعالجة اليورانيوم.

80- وفي معظم هذه البلدان، يكون هذا التأثير صغيرًا إلى حد ما؛ ومع ذلك، هناك بعض البلدان التي لديها صناعات نووية عريقة، تشمل كلا القطاعين المدني والعسكري، حيث تتداخل العمليات النووية، مثل توليد الكهرباء وإعادة المعالجة والعمليات التجريبية، في المرافق الزائدة عن الحاجة، والنفايات النووية والمواقع الموروثة. ومع ذلك، فإن الأراضي الملوَّثة من خلال العمليات النووية في أوروبا، على سبيل المثال، تمثل 0.1% فقط من الأراضي الملوَّثة في القارة. وهناك اعتراف على المستوى العالمي بضرورة معالجة المواقع المتأثرة بالصناعات ذات الصلة بالمواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية.

81- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، شهد عام 2020 بدء تشغيل مرفق معالجة نفايات الأملاح في سافانا ريفر والانتهاء من أنشطة إزالة التلوث والإخراج من الخدمة في متنزه إيست تينيسي التكنولوجي في أوك ريدج. وفي عام 2022، من المتوقع أن يتعامل مكتب الإدارة البيئية التابع لوزارة الطاقة مع تلوث المياه الجوفية بالكروم في مختبر لوس ألاموس الوطني وأن يكمل عمليات استخراج النفايات المدفونة المستهدفة في موقع مختبر أيداهو الوطني.

82- وفي اليابان، تتواصل أنشطة إزالة التلوث الناتجة عن حادث محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية على قدم وساق. وتم الانتهاء من إزالة التلوث في المنطقة بأكملها في منطقة إزالة التلوث الخاصة كما هو مخطط. كما تم الانتهاء من إزالة التلوث التي أجرتها البلديات في منطقة مسح التلوُّث المكثَّف. وهذا يعني أنه تم الانتهاء من إزالة التلوث في المنطقة بأكملها بناءً على قانون التدابير الخاصة المتعلقة بالتعامل مع التلوث الإشعاعي، باستثناء المنطقة المحظورة. وتنخفض معدلات جرعات الهواء في البيئة باستمرار. واعتبارًا من نهاية نيسان/أبريل 2021، تم نقل ما يقرب من 10730000 متر مكعب من التربة والنفايات المزالة إلى مرفق الخزن المؤقت. ومن المتوقع نقل كل التربة المزالة تقريبًا إلى مرفق الخزن المؤقت بحلول نهاية آذار/مارس 2022.

الاتجاهات

83- في بعض البلدان، يكون الاستصلاح راكدًا بسبب نقص الموارد. ولذلك، فإن تمويل الاستصلاح يشكل تحديًا رئيسيًا. وأنشأ المجتمع الدولي، بقيادة الاتحاد الأوروبي، حساب الإصلاح البيئي لآسيا الوسطى. ويجب سد فجوة التمويل من أجل تمويل العمل العاجل لمعالجة مواقع تعدين اليورانيوم الموروثة في المنطقة. واعتبارًا من أيلول/سبتمبر 2021، قُدرت هذه الفجوة بنحو 40 مليون يورو. ومع ذلك، قد لا يكون الاعتماد على الأموال العامة وحدها كافيًا لتحمل جميع إجراءات الاستصلاح اللازمة. ولذلك، يتمثل أحد التحديات المهمة في إرساء آليات مالية ابتكارية جديدة للاستصلاح، لا سيما تلك المبادرات التي يمكن أن تؤدي إلى حشد رأس المال الخاص.

84- وهناك اتجاه لاتباع آليات صنع القرار الشاملة، ولكن هناك حاجة لتوضيح أدوار ومسؤوليات الجهات الفاعلة وتعزيز التنسيق؛ والانخراط في حوار مع أصحاب المصلحة المحليين لتحسين معالجة فكرة الإقليم/المجتمع المتأثر؛ والتطلع إلى بروتوكولات الإدارة ذات الصلة. ويمكن اعتبار مشاركة المواطنين في النشاط العلمي ممارسة لمشاركة الجمهور وتعاونه في البحث العلمي لزيادة المعارف العلمية. وتمكِّن هذه المشاركة، من بين أمور أخرى، الناس من رصد أوطانهم وبيئاتهم، وستؤثر على علاقة الأفراد بالحكومة والمؤسسات الرئيسية الأخرى. ويتعين على المنظمات الوطنية والدولية أن تكون مستعدة للتعامل مع هذه التأثير في عملية صنع السياسات والقرارات التشاركية.

جيم-3- التصرُّف في النفايات المشعة

الحالة

85- في عام 2021، أعلنت الحكومة الأسترالية عن خطط لإنشاء المرفق الوطني لخزن النفايات النووية في ناباندي بجنوب أستراليا. وسيتخلص المرفق بشكل دائم من النفايات المشعة الضعيفة الإشعاع وستُخزَّن فيه مؤقتًا النفايات المتوسطة الإشعاع. وبالمثل، هناك عملية جارية في إيطاليا لتحديد المناطق المناسبة لإنشاء مستودع وطني للتخلص من 78000 متر مكعب من النفايات ذات مستويات الإشعاع الضعيفة جداً والضعيفة، والخزن المؤقت الطويل الأجل لحوالي 17000 متر مكعب من النفايات ذات مستويات الإشعاع المتوسطة والعالية. وسيكون المستودع مرفقاً بالقرب من سطح الأرض يشمل مجمعاً تكنولوجيًّا لتطوير الأنشطة البحثية في المجال النووي.

86- واتخذت بعض الدول الأعضاء خطوات هامة في عام 2021 صوب المراحل النهائية للتخلص في مرافقها من النفايات الضعيفة الإشعاع. وفي سلوفاكيا، جرت الموافقة على وضع الغطاء النهائي فوق النفايات الضعيفة الإشعاع جدًا في مرفق موشوفتشي للتخلص. وفي المملكة المتحدة، تم تنفيذ الأعمال التحضيرية هذا العام للسماح بوضع غطاء فوق النفايات في القبو 8 وجزء من الخنادق في موقع مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع. وعلاوة على ذلك، يتم النظر أيضاً فيما إذا كان يمكن استخدام الموقع لإنشاء مرفق للتخلص من النفايات قرب سطح الأرض ويجري حاليًّا إجراء استقصاءات موقعية لصخور الأساس (الشكل جيم-3).

الشكل- جيم-3- الأعمال التحضيرية في مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع (المملكة المتحدة) لدعم وضع الغطاء النهائي فوق جزء من المرفق. (الصورة من: الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة في المملكة المتحدة، 2021).

87- ويمكن أيضاً ملاحظة إحراز تقدم كبير في تنفيذ برامج المستودع الجيولوجي العميق للنفايات القوية الإشعاع. فعلى سبيل المثال، قدَّمت الشركة الفنلندية للتصرف في النفايات (Posiva) طلباً للحصول على ترخيص للعمليات في كانون الأول/ديسمبر 2021، وخططاً للتخلص من الوقود المستهلك لأول مرة في موقع أونكالو للمستودعات الجيولوجية بحلول منتصف عام 2023. وتنتظر الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية قرارًا حكوميًا للبدء في الدراسات الخاصة بالتشييد والتثبت من جوف الأرض في الموقع المقترح لإنشاء مستودع جيولوجي عميق. ومن المتوقع أن تقدم الوكالة الوطنية الفرنسية للتصرف في النفايات المشعة طلب ترخيص لتشييد مرفق التخلص الجيولوجي العميق للنفايات ذات مستويات الإشعاع القوية والمتوسطة في عام 2022. كما بدأت التعاونية السويسرية الوطنية للتخلص من النفايات المشعة والهيئة الكندية للتصرف في النفايات النووية في الأنشطة المتعلقة باختيار المواقع المناسبة لإنشاء مستودع جيولوجي عميق للتخلص من الوقود المستهلك.

88- وهذا التقدم المحرز في هذه الدول الأعضاء هو ثمرة عدة عقود من عمليات البحث والتطوير، التي أجريت بشكل أساسي في مرافق البحوث المقامة تحت الأرض. وفي الوقت الحاضر، هناك 13 مرفق بحوث مقامة تحت الأرض عاملة. وبدأت الصين تشييد مختبر بيشان للبحوث المقام تحت الأرض في حزيران/يونيه 2021 وجعلت برنامج البحث والتطوير والتطبيق بشأن المرافق المستقبلية من هذا النوع مفتوحًا للتعاون الدولي كمركز متعاون مع الوكالة في مجال التخلص الجيولوجي.

89- وفي عام 2021، أحرز تقدم كبير في مجال التصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة، وتحديدًا من حيث الاسترجاع والتكييف. وفي الأردن، تم استرجاع المصادر المشعة الموروثة المهجورة من حفرة خزن تحت الأرض وتكييفها في عبوات نفايات جديدة (الشكل جيم-4).

الشكل- جيم-4- استرجاع وتكييف المصادر المشعة في عبوات نفايات جديدة في موقع لخزن نفايات موروثة في الأردن. (الصور من: هيئة الطاقة الذرية الأردنية)

الاتجاهات

90- استهل عدد ملحوظ من الدول الأعضاء أو استأنف وضع سياسة وطنية واستراتيجيات للتصرف في النفايات المشعة على مدى السنوات القليلة الماضية مع إحراز تقدم كبير خلال عام 2021. وعلى مدار هذا العام، انخرطت الحكومة الكندية مع الجمهور، بما في ذلك الشعوب الأصلية وأصحاب المصلحة والخبراء، لاستعراض وتحديث سياسة كندا بشأن النفايات المشعة. وفي المملكة المتحدة، أصبحت شركة مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع فرعًا مباشرًا للهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة في تموز/يوليه 2021، تماشيًا مع الاستراتيجية الوطنية الجديدة للهيئة المذكورة للتعامل مع النفايات الحالية والمتوقعة بسبب الإخراج من الخدمة.

91- وهناك حاجة متنامية لزيادة سعة خزن النفايات المشعة والقدرة على التخلص من جميع أنواعها، ومن المتوقع أن يتسارع هذا الاتجاه مع التخطيط لإخراج المزيد من محطات القوى النووية من الخدمة خلال العقد المقبل. ولتلبية هذه الحاجة، جاري تقديم عدد من طلبات الترخيص وتنفيذ إنشاءات جديدة. فعلى سبيل المثال، وافقت لجنة الأمان والأمن النوويين في جمهورية كوريا على زيادة سعة الخزن في المرفق المؤقت للوقود المستهلك في محطة وولسونغ للقوى النووية في عام 2020 حيث إن مرفق الوقود المستهلك الحالي يقترب من طاقته الاستيعابية الكاملة.

92- وأظهرت العقود القليلة الماضية أيضًا زيادة مطردة في الاهتمام بالمشاركة المستمرة والمدروسة مع الجمهور. ونتيجة لجائحة كوفيد-19، اضطلعت الدول الأعضاء بالكثير من الأعمال الرامية إلى مشاركة أصحاب المصلحة باستخدام الوسائل الافتراضية، مما أدى إلى تواصل خارجي أوسع مع الجمهور (على سبيل المثال، بُثت عبر الإنترنت الحلقةُ الدراسية الوطنية التي تدعم عملية تحديد موقع المستودع الوطني التي تجري في إيطاليا).

93- وفي حين أن العديد من البلدان قد أحرزت تقدمًا فيما يتعلق بالتصرف في المصادر المشعة المختومة المهملة، فإن التخلص من هذه المصادر لا يزال يمثل تحديًا، لا سيما في البلدان التي لديها برامج نووية أصغر. وتخطط ماليزيا في عام 2022 للتخلص لأول مرة من المصادر المشعة المختومة المهملة داخل حفر السبر.

ولوحظت زيادة في عودة المصـــادر المهملة القوية الإشـــعاع إلى الموردين لإعادة تدويرها والتخلص منها. ومن المقرر إزالة أكثر من 50 مصـدرًا من المصـادر القوية الإشـعاع من أكثر من اثنتي عشـرة دولة عضـوًا في عام 2022.

94- ويستمر التعاون الدولي في التوسع في مجال التصرف في النفايات المشعة، خاصة في برامج التخلص الجيولوجي العميق. وتواصـل منصـة الاتحاد الأوروبي التنفيذية للتخلص الجيولوجي من النفايات المشـعة، والتي أُطلِقت في عام 2009، سـعيها الدؤوب لتحقيق ما ورد في تقريرها لرؤية عام 2025، الذي يبين تفاصـيل الرؤية الرامية إلى أن تكون في أوروبا بحلول عام 2025 أول مرافق تعمل بأمان للتخلص الجيولوجي من الوقود المسـتهلك، والنفايات القوية الإشـعاع، وغيرها من النفايات المشـعة الطويلة العمر. وفي الوقت نفسـه، تواصـل منظمة ERDO، المعروفة سابقاً باسم المنظمة الأوروبية لتطوير المستودعات والتي أُنشِئت منذ عام 2021 باسم رابطة الحلول المتعددة البلدان للنفايات المشـــعة، العملَ على اســـتكشـــاف إقامة مســـتودع واحد أو أكثر من المستودعات الجيولوجية المشتركة في أوروبا.

دال- مفاعلات البحوث ومعجِّلات الجسيّمات

دال-1- مفاعلات البحوث

الحالة

95- في نهاية عام 2021، كان هناك 235 مفاعلًا بحثيًا عاملًا، بما في ذلك تلك التي أُغلِقت مؤقتًا، في 53 بلدًا. واستمرت هذه المفاعلات في تقديم حزم نيوترونية وخدمات تشعيع لا غنى عنها للعلوم والطب والصناعة، وفي المساهمة في التعليم والتدريب. ويُبيّن الجدول دال-1 في المرفق التطبيقات الأشيع لمفاعلات البحوث.

11
من مفاعلات البحوث الجديدة يجري تشييدها في 10 بلدان

14
دولة عضواً لديها خطط رسمية لتشييد مفاعلات بحوث جديدة

16
بلداً تنظر في تشييد مفاعلات بحوث

96- وهناك أحد عشر مفاعل بحوث جديد قيد الإنشاء في عشرة بلدان هي: الأرجنتين ودولة بوليفيا المتعددة القوميات والبرازيل والصين والجمهورية التشيكية وفرنسا وجمهورية كوريا والاتحاد الروسي والمملكة العربية السعودية وأوكرانيا (الأشكال دال-1-ألف ودال-1-باء ودال-1-جيم). وفي عام 2021، تم صب الخرسانة لأول مفاعل بحوث في دولة بوليفيا المتعددة القوميات، ودخل المفاعل PIK في الاتحاد الروسي المرحلة النهائية من اختبارات الإدخال في الخدمة. ووضعت جنوب أفريقيا خططاً رسمية لبناء مفاعل بحوث جديد – والدول الأعضاء التي لديها مثل هذه الخطط حاليًّا هي بلجيكا وبنغلاديش وبيلاروس وتايلند وجنوب أفريقيا وزامبيا والصين وطاجيكستان والفلبين وفييت نام ونيجيريا والهند وهولندا والولايات المتحدة الأمريكية. ويفكر عدد كبير من البلدان في بناء مفاعلات البحوث، وهي إثيوبيا وأذربيجان وتونس وجمهورية تنزانيا المتحدة ورواندا والسنغال والسودان والعراق وغانا والفلبين وكينيا وماليزيا ومنغوليا وميانمار والنيجر والهند.

الشكل- دال-1-ألف- بناء مفاعل البحوث RA-10 في مركز إيزيزا الذري في الأرجنتين. (الصورة من: الهيئة الوطنية للطاقة الذرية في الأرجنتين)

الشكل- دال-1-باء- تركيب رأس إغلاق لمفاعل جول هورويتز في كاداراش بفرنسا. (الصورة من: المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة).

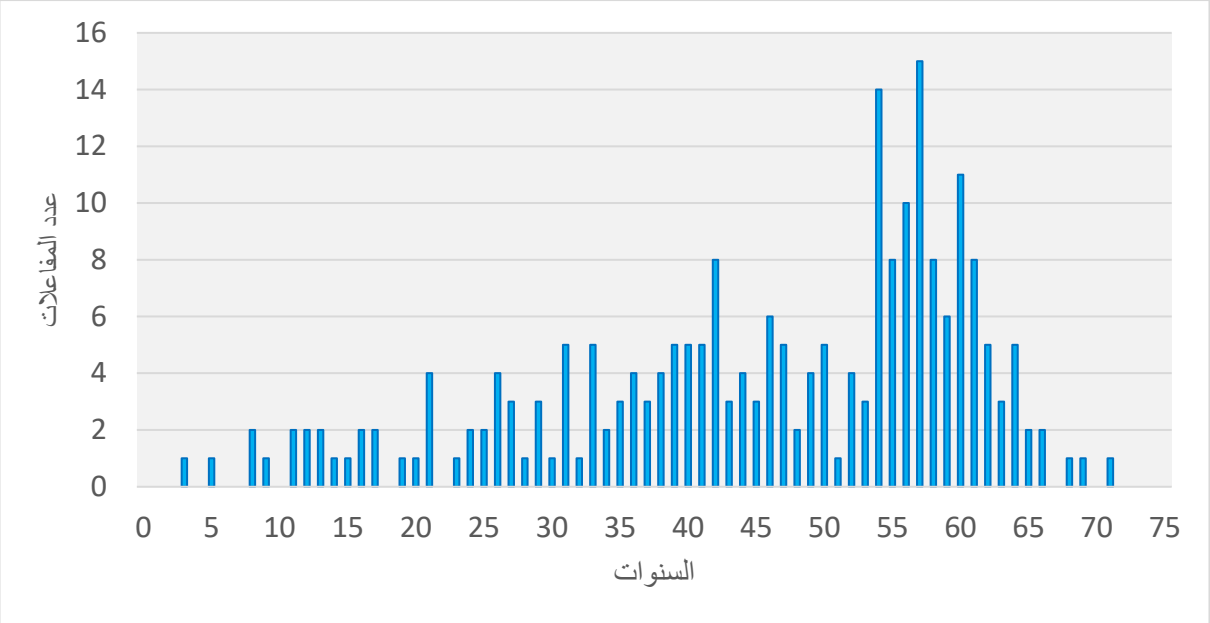
الشكل- دال-1 ج- تركيب لوح أرضي في قاعدة تجويف مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض بمعهد بحوث المفاعلات الذرية، المركز العلمي الحكومي، ديميتروفغراد، الاتحاد الروسي. (الصورة من: روزاتوم)

97- واستمرت الجهود الدولية لتقليل استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع المدني. وحتى الآن، أعيد 6826 كيلوغراماً من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى بلدان المنشأ أو جرى التخلص منه بطريقة أخرى من 48 بلداً (وتايوان، الصين). وبالإضافة إلى ذلك، هناك 107 مفاعلات بحوث ومرافق رئيسية لإنتاج النظائر الطبية إمَّا تمَّ تحويلها من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تأكَّد أنَّها في حالة إغلاق. ويُضطلع بأعمال بحث وتطوير مكثفة لتطوير أنواع جديدة من وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء العالي الكثافة لمفاعلات البحوث العالية الأداء. ولا يزال معهد العناصر المشعة في بلجيكا في طريقه لتحقيق التحويل الكامل إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء لإنتاج الموليبدينوم-99 في عام 2022، وعند هذه النقطة سيستخدم جميع المنتجين العالميين لهذا النظير الطبي المطلوب بشدة أساليب إنتاج لا يستخدم فيها اليورانيوم الشديد الإثراء. ومنحت إدارة الأمن النووي الوطنية التابعة لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة بشكل تنافسي ثلاثة اتفاقات تعاونية جديدة مشتركة التكلفة لشركات خاصة لإنتاج الموليبدينوم-99 على نطاق تجاري بحلول نهاية عام 2023.

الاتجاهات

98- تقترب نسبة مفاعلات البحوث العاملة لمدة 50 عامًا على الأقل من 50 في المائة. ولضمان استمرار عملها بشكل مأمون وموثوق وتعزيز استخدامها، أرست العديد من المرافق، أو هي في طور إرساء، استراتيجيات استباقية وإدارة منهجية للتقادم، وللتجديد وللتحديث. وتقوم بعض المنظمات المُشغِّلة لمفاعلات البحوث الأكثر استخدامًا بالتجهيز أو التفكير في تمديد عمرها النشط إلى 80 أو حتى 100 عام (الشكل دال-2). وأحد الأمثلة الأكثر شيوعًا هو استبدال الأجهزة التناظرية ونظم التحكّم القديمة بنظم رقمية جديدة.

99- وتستفيد العديد من البلدان من فرص الوصول إلى مفاعلات البحوث من خلال مبادرات التعاون الدولية والإقليمية. وفي عام 2021، بدأ مختبران من مختبرات المفاعلات على شبكة الإنترنت مع المفاعلات المضيفة في جمهورية التشيك وجمهورية كوريا في بث تجارب ليشاهدها الطلاب في بلدان أخرى، وتم إطلاق المنصة التعليمية التجريبية النووية الأوروبية، التي تقدم تدريباً عملياً في مفاعلات البحوث الصغيرة للجامعات والمهنيين الشباب العاملين في المجال النووي من جميع أنحاء العالم.



الشكل- دال-2- التوزيع العمري لمفاعلات البحوث العاملة، تشرين الثاني/نوفمبر 2021.
(المصدر: قاعدة بيانات الوكالة لمفاعلات البحوث)

100- ويُستخدَم التشتُّت النيوتروني في جميع أنحاء العالم لمواجهة عدد من التحديات لا سيما في مجال علوم الصحة والحياة لتوفير معلومات عن الوظيفة البيولوجية، بما في ذلك الفيروسات والبروتينات والأمراض التنكسية، وللمساعدة في تطوير عقاقير وأساليب علاجية جديدة. ويساهم في فهم العمليات ذات الصلة بالإنتاج والتلوث والتنقية والمحافظة على الغذاء والمياه. ويؤدي دورًا مهمًا في دراسة مصادر الطاقة الجديدة لحماية البيئة ومكافحة تغير المناخ، بما في ذلك خزن الهيدروجين وخلايا الوقود والخلايا الشمسية وأنواع جديدة من البطاريات. ويُستخدّم في العديد من تطبيقات البحث والتطوير والتطبيقات الصناعية والهندسية. وفي حين أن أعمال البحث والتطوير الرائدة التي أُجريت باستخدام أحدث أدوات التشتُّت النيوتروني تتم عادةً على مصادر نيوترونية عالية التدفق وعالية الأداء، فإن التطورات التكنولوجية الحديثة في مجال المصادر النيوترونية المدمجة

القائمة على المُعجِّلات لا سيما مع دمج بيئات عينات متقدمة في الموقع، تتيح فرصاً جديدة في مجال التشتُّت النيوتروني في مفاعلات البحوث باستخدام المصادر النيوترونية المتوسطة التدفق والمصادر النيوترونية المضغوطة الحجم القائمة على المُعجِّلات.

دال-2- معجِّلات الجسيِّمات والأجهزة ذات الصلة

الحالة

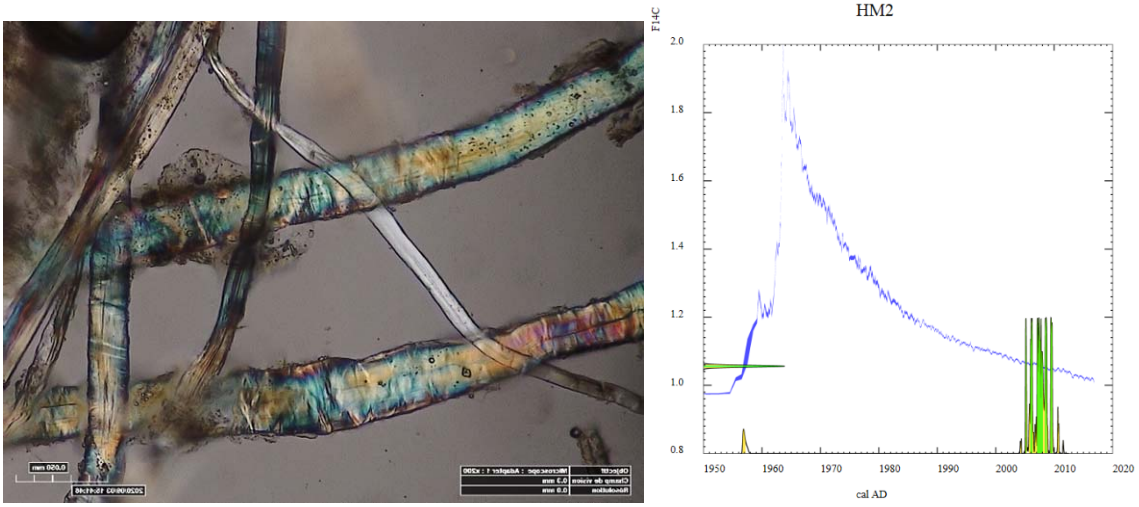
101- لطالما كانت مفاعلات البحوث أقوى المصادر النيوترونية المتاحة للأبحاث المتعلقة بالحزم النيوترونية. ومع ذلك، فإن القيود المتأصلة في مفاعلات الوضع المستقر، جنبًا إلى جنب مع تقليل استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء للأغراض المدنية، تعني أن مفاعلات البحوث لم تشهد تحسينات كبيرة في الأداء في مجال تدفق النيوترونات. ومكنت التحسينات المطردة في العديد من مجالات التكنولوجيا المصادرَ النيوترونية القائمة على المُعجِّلات من البدء في منافسة دور مفاعلات البحوث.

102- ومن المقرر أن يبدأ تشغيل مصدر التشظية الأوروبي في عام 2023، وهو قيد الإنشاء بالقرب من لوند في السويد، بدعم من 13 دولة عضوًا مشاركة. وتدفق مصدر التشظية الأوروبي بشكل متكامل مع الزمن سيجعله المصدر النيوتروني الأكثر لمعانًا في العالم الذي يصل إلى هذه الحالة من مفاعل التدفق العالي الموجود في معهد لاوا-لانجفين في غرونوبل بفرنسا، والذي ظل يحتفظ به منذ ما يقرب من نصف قرن. والهدف المستقبِل لنيوترونات مصدر التشظية الأوروبي التي تصنع التشظي هو عجلة من التنجستن مبردة بالهليوم تُسلَّط عليها حزمة بروتونات نابضة قدرها 2 غيغا إلكترون فلط من معجل خطي بروتوني بقدرة 5 ميغاواط (في المتوسط).

الاتجاهات

103- أثبت قياس الطيف الكتلي باستخدام المُعجِّلات أنه ليس فقط تقنية فائقة الحساسية لحساب فرادى الذرات ولكنه أيضًا طريقة تقوم على المُعجِّلات تتسم بإمكانات كبيرة للتطبيقات التحليلية المتعلقة بمشاكل المجتمع الحديث. ويستخدم هذا القياس حاليًّا في مجال علم الآثار وتطبيقات الطب الحيوي ودراسات تغير المناخ والهيدرولوجيا وعلوم المحيطات والعديد من المجالات الأخرى ذات الاهتمام المجتمعي والاقتصادي المتزايد. ويمكن كذلك أن يكون هذا القياس أداة قوية جدًا للتطبيقات النووية الرقابية، خاصة في مرافق النفايات المشعة. وكما اتضح في السنوات الخمس الماضية، تم استخدام قياس الطيف الكتلي باستخدام المعجلات لإيجاد حلول للمشاكل الرئيسية المتعلقة بإخراج المنشآت النووية من الخدمة وأمانها على الأجل الطويل، مثل تحديد خصائص الموقع والنفايات والرصد البيئي للنفايات المشعة. وتشتمل النويدات المشعة ذات الأهمية في تحديد خصائص المواقع، والتي يمكن لقياس الطيف الكتلي باستخدام المُعجِّلات تحديد كميتها، على الكربون-14، واليود-129، والكلور-36، والتكنتيوم-99، والكريبتون-81، والبريليوم-10، والألومنيوم-26، في حين أن النويدات المشعة الرئيسية لتحديد خصائص النفايات هي الهيدروجين-3، والكربون-14، والكلور-36، والسيزيوم-135، واليود-129، والتكنتيوم-99، واليورانيوم-236، والزركونيوم-93 والبلوتونيوم-240، و241 و242. ومن الأمور ذات الأهمية الخاصة للهيئات الرقابية تحديد خصائص الخرسانة المستخدمة في المفاعلات النووية. وتسبب هذا في إجراء دراسات جدوى جديدة بشأن قياس الطيف الكتلي باستخدام المُعجِّلات لعدد من النظائر المشعة الجديدة مثل الكالسيوم-41.

104- وأدت التطورات التكنولوجية الحديثة لهذه التقنية أيضًا إلى توسيع مجال تطبيقاتها، مما يسمح بدراسة مجموعة واسعة من عناصر التراث الثقافي والطبيعي بالإضافة إلى اكتشاف عمليات التزوير والاتجار غير المشروع بالمنتجات. وعلى سبيل المثال، أتاحت التطورات التكنولوجية المتطورة لقياس الطيف الكتلي باستخدام المُعجِّلات إمكانية تحديد تاريخ فرادى طبقات الطلاء والأصباغ ومواد الربط والقماش المستخدمة في الأعمال الفنية (الشكل دال-3).



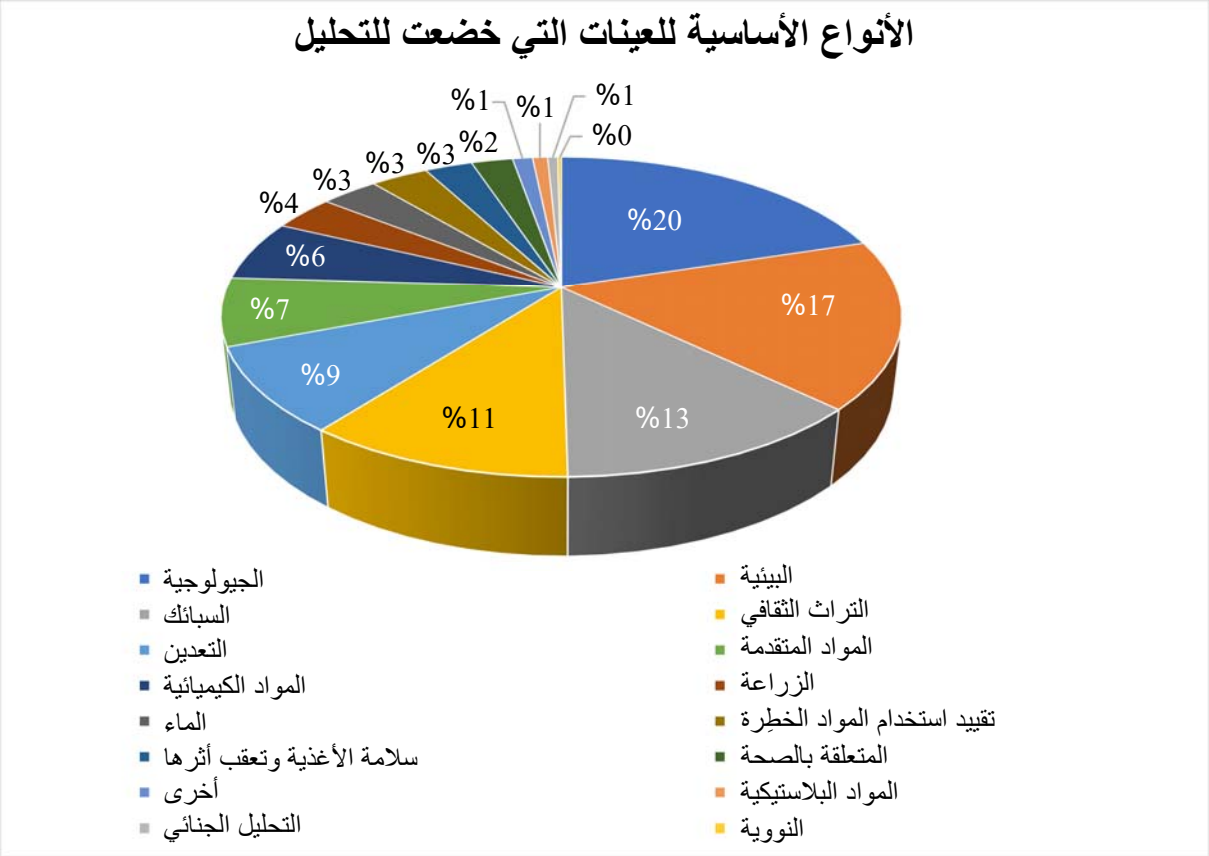
الشكل- دال-3- تحليل إحدى لوحات ما بعد الانطباعية. اليسار: ألياف النسيج النباتي مجمعة من طبقة الطلاء. اليمين: يوضح تحديد العمر باستخدام قياس الطيف الكتلي باستخدام المُعجِّلات أن جذر ألياف النسيج نشأ بعد وفاة الفنان المزعوم، مما يثبت أن اللوحة كانت مزورة.
(الصورتان من: مختبر قياس الكربون، جامعة باريس-ساكليه، فرنسا)

105- وتستخدم تقنية تحديد العمر باستخدام الكربون المشع تحلل الكربون-14 لتحديد عمر العناصر التي تحتوي على الكربون. ولأن الكربون-14 نظير مشع من الكربون الطبيعي المنشأ، يتم دمجه في جميع المواد الحاملة للكربون (العضوية وغير العضوية) كجزء من دورة الكربون العالمية. ولأن عمره النصفي يبلغ 5700 ± 30 عامًا، فاكتشاف الكربون-14 أداة مفيدة لتحديد عمر أي عينة تشكلت خلال الأعوام الـ 55000 الماضية.

106- وحتى الآن، يتمثل المعيار الأكثر حسمًا في مجال الكشف عن التزوير في الدليل العلمي على المفارقات التاريخية المادية، والذي يعتمد على مقارنة المواد الموجودة في عمل فني بمعلومات عن أقرب تاريخ لاكتشافها أو إنتاجها. وتحديد العمر باستخدام الكربون المشع طريقة جذابة، حيث إنها تعطي أعمارًا جازمة مع إطار زمني محدد للمواد المستخدمة.

107- وقياس الطيف لتألق الأشعة السينية تقنية تحليل متعددة العناصر غير متلِفة وسريعة ومتزامنة لتحديد خصائص العينات ذات الطبيعة المتنوعة والتكوين. وتألق الأشعة السينية خيار فعال من حيث التكلفة للعديد من المشاريع البحثية الأساسية والتطبيقية. وعند استخدامه مع أجهزة تركيز الأشعة السينية، فإنه يسمح بالتحديد غير المتلِف لتوزيع العناصر على مستوى بُعدين وثلاثة أبعاد. وتوفر المصادر السنكروترونية أشعة سينية عالية الكثافة مع إمكانية ضبط كل من الطاقة والتركيز المكاني لمجموعة متنوعة من أحدث التقنيات لتوزيع العناصر، والتحليل القريب من السطح والتحليل التتبعي الفائق للمواد في مختلف مجالات علوم المواد مثل المواد النانوية والمواد الحيوية ومواد الطاقة (الشكل دال-4).

108- واســـتناداً إلى المعلومات المتاحة في الخريطة التفاعلية التي وضـــعتها الوكالة مؤخراً لمختبرات تألق الأشـعة السـينية[11]، يوجد حاليًّا أكثر من 1200 مرفق لتألق الأشـعة السـينية في أكثر من 100 بلد؛ ومع ذلك، في كثير من الحالات، لا يزال مجتمع المســتخدمين النهائيين، الذين قد يســتفيدون من هذه التقنية التحليلية القوية، لا يعرفون قدراتها جيداً حتى الآن.



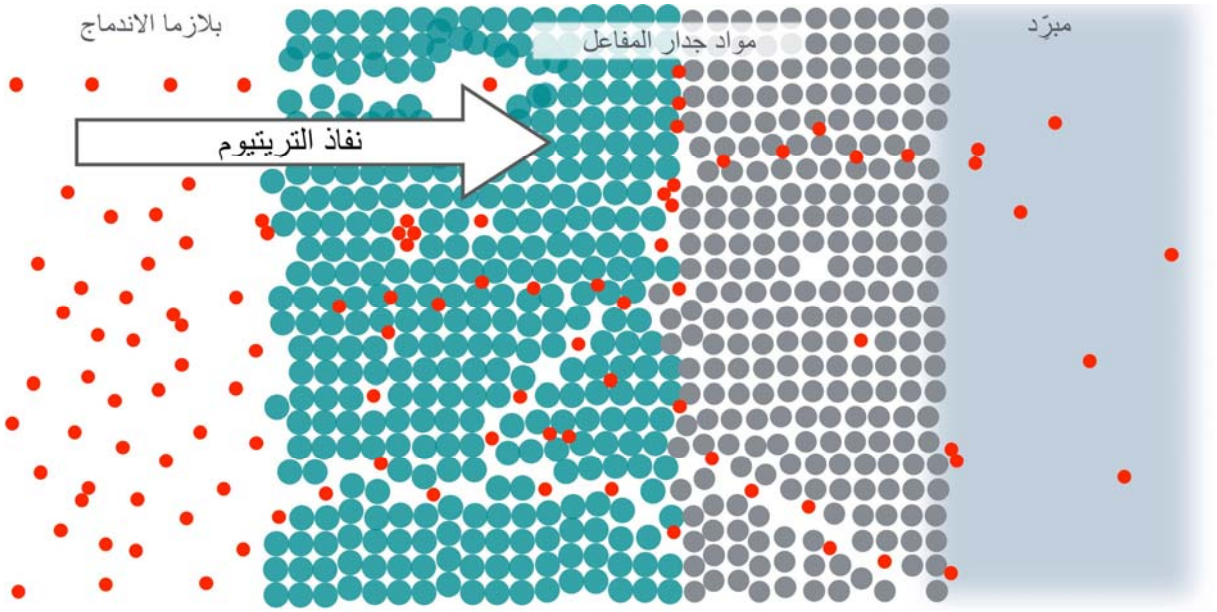
الشكل- دال-4- حقول التطبيق الرئيسية لمرفق مختار لتألق الأشعة السينية.

هاء- البيانات الذرية والنووية

الحالة

109- يتطلب تطوير المفاعلات الاندماجية قواعد بيانات رقمية عالية الجودة للتفاعلات الجارية على النطاق الذري. وباستخدام هذه البيانات، يمكن إجراء محاكاة حسابية للتصميم. ويركز البحث الحالي على محاكاة عمليات التفاعل بين البلازما ومواد جدار مفاعل الاندماج المرشح، والنمذجة الذرية الأساسية لتفاعلات الهيدروجين مع مواد جدار المفاعل (الشكل هاء-1). ويركز البحث التجريبي على التركيب الذري الأساسي لمواد الاندماج السائلة وتجارب بلازما الاندماج والفلزات الســـائلة باســـتخدام أجهزة البلازما الخطية وأجهزة الاندماج من نوع سِتلّلاريتُور. ويُجرى البحث النظري/الحسابي في الغالب لمحاكاة تأثيرات التشعيع النيوتروني ونفاذ الهيدروجين.

[11] https://nucleus-new.iaea.org/sites/nuclear-instrumentation/Pages/World-Map-XRF-laboratories.aspx



الشكل- هاء-1- عرض تخطيطي لعملية نفاذ التريتيوم في جدار مفاعل الاندماج.

الاتجاهات

110- الاعتماد السريع للذكاء الاصطناعي/التعلُّم الآلي في مجالات متعددة هو اتجاه واضح سيؤثر بشدة على الفيزياء النووية وتطوير مكتبات البيانات النووية. وتتراوح التطبيقات الممكنة من التنبؤ بالباراميترات في رموز النماذج النووية مثل TALYS، وتحليل الاتجاهات في البيانات التجريبية والبناء الآلي لقاعدة بيانات التفاعل النووي التجريبي، إلى اكتشاف وتوطين الحالات الشاذة في محطات القوى النووية عبر تدفقات البيانات الحديثة والآلية. وهناك إمكانات كبيرة للتقنيات الحديثة لتحليل البيانات لتحسين تقييمات البيانات النووية للتطبيقات النووية.

واو- البيئة

111- التلوث البلاستيكي هو أحد أكثر التحديات البيئية العالمية إلحاحًا ويشكِّل تهديدًا مباشرًا للتنمية المستدامة. وتستند مبادرة "تسخير التكنولوجيات النووية لمكافحة التلوث بالمواد البلاستيكية (مبادرة NUTEC Plastics)، التي أُطلِقت في عام 2021، إلى جهود الوكالة لمعالجة التلوُّث بالمواد البلاستيكية من خلال إعادة التدوير باستخدام التكنولوجيا الإشعاعية والرصد البحري باستخدام تقنيات الاقتفاء النظيري.

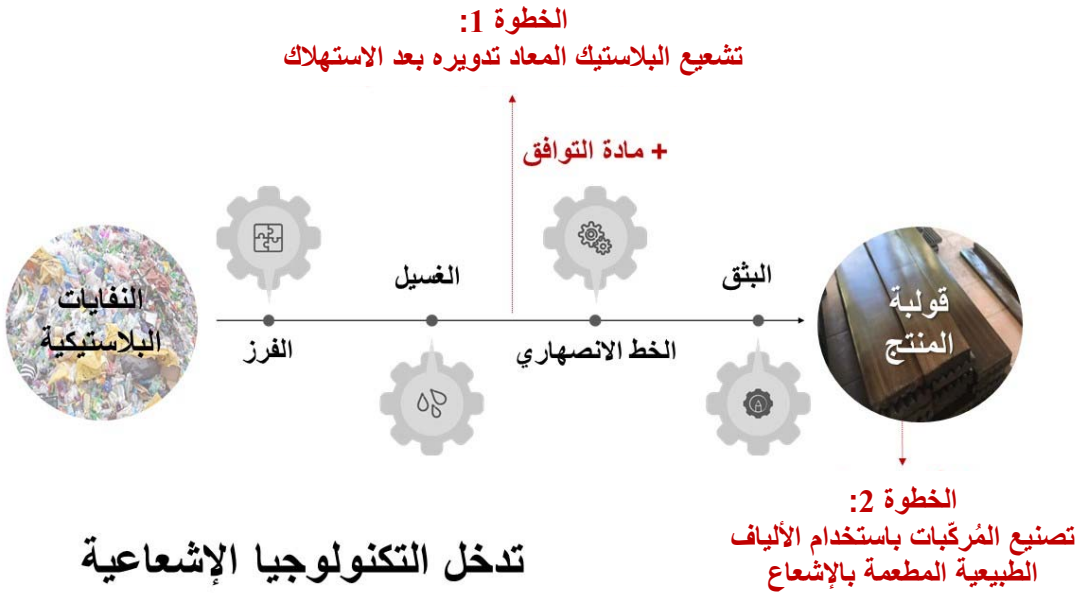
واو-1- التكنولوجيات الإشعاعية لمعالجة التلوُّث بالمواد البلاستيكية

الحالة

112- توفر التكنولوجيات الإشعاعية خصائص ومزايا فريدة لتقليل النفايات البلاستيكية والبوليمرية عن طريق زيادة إعادة التدوير الميكانيكي التقليدي للبلاستيك وتسهيل إعادة التدوير الكيميائي. ومن خلال التطبيق المبتكر لحزم أشعة غاما والحزم الإلكترونية، يمكن توفير طريقة فعالة لفرز النفايات البلاستيكية من أجل توجيهها عبر تدفقات إعادة التدوير. ويؤدي ذلك إلى تحسين جودة وقيمة المواد البلاستيكية المعاد تدويرها، ويحول النفايات البلاستيكية إلى منتجات أخرى ذات قيمة أعلى، ويساعد في إعادة التدوير المتقدم أو الكيميائي للبلاستيك. وتوفر هذه التطبيقات أيضًا الطاقة عن طريق تكسير نفايات البوليمرات البلاستيكية لاستخدامها كمواد تلقيم كيميائية.

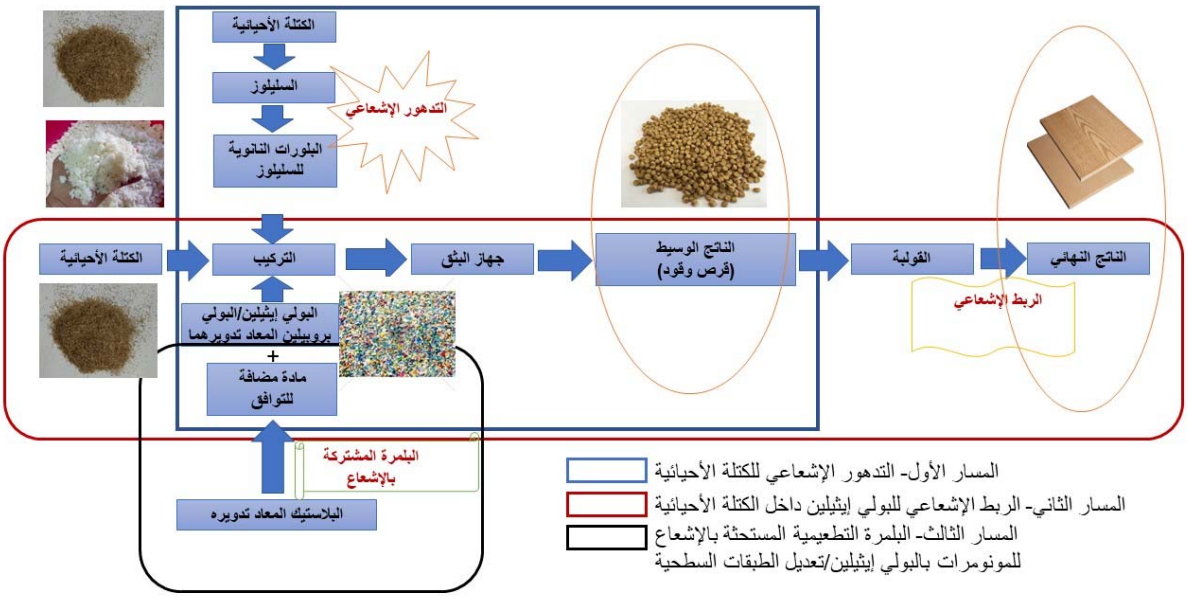
الاتجاهات

113- هناك تطبيق قيد التطوير في الفلبين، يتضمن استخدام الإشعاع لحث البلمرة التطعيمية من أجل التوافق الفعال للألياف الطبيعية مع البلاستيك المعاد تدويره. وتعمل البلمرة الناتجة عن الإشعاع على تعزيز الالتصاق بين الألياف والبلاستيك مما يحسن الخصائص الميكانيكية الحرارية الكلية (الشكل واو-1). والفلبين موطنًا لمجموعة متنوعة من الألياف الطبيعية مثل الأباكا والموز والأناناس والجوت، والمعروفة بخصائصها الميكانيكية الممتازة. ومع ذلك، فإن طبيعتها المحبّة للماء، المتأصلة في معظم الألياف الليغنوسليلوزية، تقيد تطبيقها في المركبات بسبب ضعف الالتصاق السطحي البيني. وتتغلب البلمرة التطعيمية التي يحثها الإشعاع على مسألة عدم الامتزاج هذه، مما يجعل هذه الألياف قادرة على المزج أو تحقيق التجانس.



الشكل- واو-1- مخطط تصنيع المركبات المقترحة باستخدام الألياف الطبيعية المطعمة بالإشعاع والبلاستيك المُشعَّع والمعاد تدويره بعد الاستهلاك في الفلبين. (الصورة من: معهد البحوث النووية الفلبيني)

114- ويستخدم تطبيق آخر، قيد التطوير في إندونيسيا، التكنولوجيا الإشعاعية لحل التحديات التي يمثلها مجريان للنفايات. وفي هذا النهج، يتم تشعيع النفايات البلاستيكية حتى يتسنى لها أن تشكل مركبات مستقرة تحتوي على نفايات ألياف الكتلة الحيوية لتوليد مواد البناء من نفايات البلاستيك والنخيل (الشكل واو-2). وتدعم التكنولوجيات الإشعاعية تفكيك الكتلة الحيوية، وتوافق المكونات، والترابط في المنتج النهائي لتكييف خصائصه.



الشكل- واو-2- مخطط خطوات الإنتاج المقترحة لمركب من الخشب والبلاستيك المقوى بالألياف الطبيعية والبلاستيك المعاد تدويره (البولي إيثيلين المعاد تدويره والبولي بروبيلين المعاد تدويره).
(الصورة من: الوكالة الوطنية للطاقة النووية، إندونيسيا)

واو-2 التقنيات النووية والنظيرية لمعالجة التلوث البلاستيكي في البيئة البحرية

الحالة

115- المحيطات هي المستودع النهائي للمواد البلاستيكية غير المتصرف فيها بشكل صحيح وغير المعاد تدويرها من مصادر برية. وبينما أحرز المجتمع العلمي العالمي تقدمًا كبيرًا خلال العقد الماضي في الوصول إلى فهم أفضل للتلوث البلاستيكي في البيئة البحرية وتأثيراته المحتملة على الكائنات المائية المتنوعة، لا يزال هناك نقص في المعارف فيما يتعلق بمدى غزارة المواد البلاستيكية الدقيقة في المحيط والآثار المترتبة على وجودها هناك. وتم توثيق التأثيرات البارزة والواضحة للمواد البلاستيكية الضخمة (الشكل واو-3) على الكائنات البحرية جيداً، ولكن الضرر المحتمل الناجم عن المواد البلاستيكية الدقيقة – الجسيمات التي يقل قطرها عن خمسة ملليمترات – أقل وضوحاً بكثير. ونظرًا لحجم هذه المشكلة، أصبح التلوث البلاستيكي قضية ذات اهتمام بيئي عالمي وبالتالي اجتذب انتباه الحكومات والمجتمع المدني والعلماء والمنظمات غير الحكومية.

الشكل- واو-3- صيد المواد البلاستيكية الضخمة بشبكة العوالق في مياه البحر الأبيض المتوسط الساحلية.

116- واستفاد الجهد العلمي العالمي بشأن التلوث البحري بالمواد البلاستيكية بشكل كبير من استخدام التكنولوجيات النووية. وتم تطوير مجموعة واسعة من التقنيات النووية والنظيرية في السنوات الأخيرة لتحديد تكوين وحجم وكمية المخلفات البلاستيكية في البيئة البحرية. وتعتمد هذه التقنيات على تقنيات التصوير بالقياس الطيفي، مثل تنظير الطيف بالأشعة تحت الحمراء باستخدام تحويل فورييه وفحص رامان المجهري، لتحديد نوع البوليمر وتحديد عدد الجسيمات البلاستيكية الأكبر من عشرة ميكرون في عينة طبيعية. ولاستكمال هذه التقنيات، يمكن للكشف باستخدام تقنيات التحلل الحراري – الاستشراب الغازي – قياس الطيف الكتلي والامتصاص الحراري - الاستشراب الغازي مع قياس الطيف الكتلي، تحديد البوليمر وتحليل كتلة كل نوع من أنواع البوليمر البلاستيكي في وقت واحد (من 500 ميكرون إلى جزء من الألف من الميكرون) والمضافات العضوية المرتبطة بالجسيمات البلاستيكية في العينات المعقدة بيئيًا.

117- ويمكن تطبيق كل هذه التقنيات النووية والنظيرية في الرصد العالمي للمواد البلاستيكية في البيئة البحرية. وبالجمع بين هذه التقنيات ودوران المحيطات ونمذجة التشتت، فإنها تساهم في اقتفاء مصادر المواد البلاستيكية ومصيرها في المحيط. ويتيح الجمع بين هذه التقنيات وقياسات النويدات المشعة في البيئة (البريليوم-7، والرصاص-210، والسيزيوم-137، والبلوتونيوم-240/239) في الرواسب وتألق الأشعة السينية، للعلماء تحديد التقويم الجيولوجي لعينات الرواسب الجوفية الأسطوانية. ويساعد هذا العلماء على إعادة تكوين الاتجاهات التاريخية للتلوث البحري بالمواد البلاستيكية والوصول إلى فهم أفضل بشأن تقادم المواد البلاستيكية الدقيقة في مرحلة ما بعد الترسُّب.

118- وساهمت التقنيات النووية أيضًا بشكل كبير في فهم انتقال المواد البلاستيكية الدقيقة إلى الكائنات البحرية وتأثيراتها على هذه الكائنات. وبعض جزيئات المواد البلاستيكية الدقيقة صغيرة للغاية بحيث يمكن أن تلتهمها هذه الكائنات وتدخل أعضاءها، مما يؤثر على بقائها. وبالإضافة إلى ذلك، قد تكون المواد البلاستيكية الدقيقة ناقلًا للملوّثات الأخرى. وسلطت الدراسات الحديثة الضوء على فائدة التقنيات النووية القائمة على المختبرات في

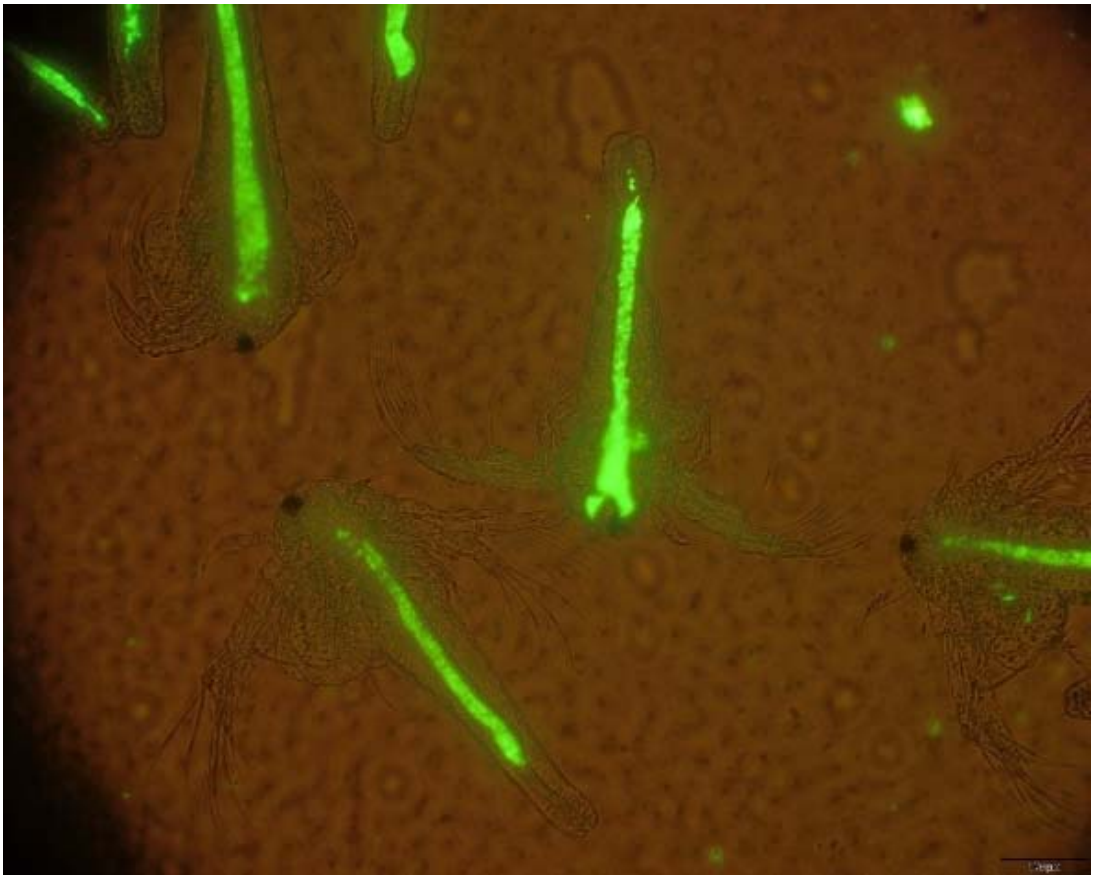
تحديد حركة المواد البلاستيكية الدقيقة والملوّثات المرتبطة بها والآثار البيولوجية المترتبة على ذلك، وفي اكتشاف الإجهاد الذي يصيب الكائنات البحرية بسبب المواد البلاستيكية الدقيقة. وبالإضافة إلى استخدام تقنيات التصوير النووي، مثل التصوير الإشعاعي الذاتي، والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، والتصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد، في تقييمات التوزيع الحيوي، فبإمكانها أن تساعد أيضًا في قياس التأثيرات المورفولوجية للمواد البلاستيكية على مستوى الأنسجة والكائنات العضوية.

الاتجاهات

119- لسد الفجوات المعرفية في رصد وتحديد خصائص التلوث البحري بالمواد البلاستيكية، خاصة فيما يتعلق بالجسيمات الأصغر حجمًا، هناك حاجة إلى بذل مجموعة من الجهود في مجال البحث والتطوير. ومن الضروري أن يتم فهم الآثار المادية للجسيمات البلاستيكية نفسها بشكل أفضل، بما في ذلك تراكمها وتغير مواضعها ونقلها الغذائي داخل البيئة البحرية.

120- ولدراسة تراكم الجسيمات البلاستيكية في الكائنات الحية، تقوم معظم الدراسات بإجراء قياسات خاصة بالجسم بالكامل أو بالأنسجة عن طريق هضم الأنسجة وفصل الجسيمات عن طريق الترشيح، أو استخدام تقسيم الأنسجة والتقييم النسيجي، متبوعًا بتأكيد مرئي و/أو تنظير الطيف. ويمكن حل التقييدات التي تُواجَه أثناء استخدام التقنيات التقليدية باستخدام المنهجيات النووية لإنشاء جزيئات بلاستيكية مشعة، أو مواد بلاستيكية مشعة، يمكن تتبعها باستخدام أدوات الاقتفاء الإشعاعي. وعلى الرغم من استخدام المواد البلاستيكية المشعة مؤخرًا مع البوليمرات والكربون-14 (بواعث بيتا)، فإن التطوير المستقبلي قد يستخدم المواد البلاستيكية المشعة مع بواعث غاما لتقييم احتباس المواد البلاستيكية الدقيقة بمجرد تناولها ونقلها على طول السلسلة الغذائية. وتشتمل التقنيات النووية الأخرى التي تطورها الوكالة والمتعاونون معها على استخدام مواد بلاستيكية دقيقة موسومة بنظائر مستقرة، والتي قد تتيح تحقيق تطورات رئيسية في فهم نقل المواد البلاستيكية الدقيقة وتأثيرها في الكائنات البحرية.

121- وبدأ الباحثون أيضًا في النظر في تفتيت المواد البلاستيكية على نطاقات أصغر، والمعروفة باسم المواد البلاستيكية النانوية. وفي الوقت الحالي، لا يمكن تحديد كمية المواد البلاستيكية النانوية في البيئة. وعلى الرغم من وجود طرق تحليلية (قياس التألق والتحلل الحراري – الفصل الكروماتوغرافي الغازي – قياس الطيف الكتلي) لدراسة المواد البلاستيكية النانوية في المختبر (الشكل واو-4)، فإن هذه التقنيات ليست بالضرورة مناسبة في تقييم العينات البيئية. وتؤدي التقنيات النووية والنظيرية دورًا في معالجة ورصد تفتيت المواد البلاستيكية الدقيقة وكمية المواد البلاستيكية النانوية في المستقبل. ويمثل التحدي المتمثل في فصل المخلفات البلاستيكية وتحديد خصائصها وفقًا للحجم، أي المواد البلاستيكية الدقيقة والمواد البلاستيكية النانوية، مصدر قلق متزايد لأن نطاق الحجم النانوي قد يوفر تفاعلات أكثر تعقيدًا وخطورة مع النُظُم البيولوجية. ومنهجية تجزئة تدفق مجال التدفق إلى جانب التحلل الحراري – الفصل الكروماتوغرافي الغازي – قياس الطيف الكتلي منهجية واعدة لتحديد الآثار المحتملة للمواد البلاستيكية النانوية على البيئة. وتشتمل التقنيات الناشئة الأخرى لتحديد كمية الجسيمات البلاستيكية في البيئة البحرية على تقنية قياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث للحصول على معلومات بشأن توزيع حجم الجسيمات وتركيز كتلة الجسيمات البلاستيكية النانوية والدقيقة عن طريق الكشف عن الكربون-13؛ والتصوير المقطعي الحاسوبي الثلاثي الأبعاد، وهي تقنية شائعة الاستخدام في البحث الهندسي.



الشكل- واو-4- ابتلاع يرقات الأرتيميا لمواد بلاستيكية نانوية (مرحلة الحياة المبكرة لأرتيميا الملاحات) أتاحت تقنية التألق رؤيتها.

122- ويجب النظر في المخاطر والأخطار المحتملة من المواد البلاستيكية النانوية في البيئة ومعالجتها، والتقنيات النووية الحالية القائمة على المختبرات قادرة بالفعل على ذلك. ومع ذلك، لم يتم حتى الآن استكشاف مصير وتأثير المواد البلاستيكية النانوية على البيئة إلا بشكل هامشي.

123- ويجب أن تقترن أوجه التقدم المتوقعة في التقنيات النووية والنظيرية لرصد التلوث البحري وتحسين تقييم آثاره على الكائنات البحرية بتطورين رئيسيين: يجب زيادة القدرات في جميع أنحاء العالم للقيام بأنشطة رصد بيانات المواد البلاستيكية البحرية وتقييمها للوصول إلى مستويات مماثلة؛ ويجب الحد من التفاوتات في التحقق من صحة أساليب الرصد من خلال المقارنة والمواءمة والتوحيد القياسي لضمان الوصول إلى نتائج موثوقة. ومن الضروري وجود مواد مرجعية تعكس تنوع أنواع البوليمر، والنطاق الواسع للأحجام، والأشكال المختلفة، وحالة تقادم جسيمات المواد البلاستيكية الدقيقة الموجودة في المحيطات، إلا أن هذه المواد المرجعية غير موجودة في الوقت الحالي.

124- وستؤدي التقنيات النووية والنظيرية دورًا حاسمًا في مكافحة التلوث البحري بالمواد البلاستيكية بطريقة مستدامة وفي تحسين اتخاذ قرارات مستنيرة والإدارة القائمة على العلوم لمحيطاتنا.

زاي- الأغذية والزراعة

زاي-1- البصمات النظيرية الجديدة لتقييم وتخفيف ثبات ونقل المضادات الحيوية وانعكاساتها على مقاومة مضادات الميكروبات

الحالة

125- تستخدم المواد المضادة للميكروبات، مثل المضادات الحيوية ومضادات الفيروسات ومضادات الفطريات ومضادات الطفيليات، للوقاية من العدوى لدى البشر والحيوانات والنباتات وعلاجها. وفي حين أنها تنقذ الأرواح، فإن إساءة استخدامها والإفراط في استخدامها هي الدوافع الرئيسية لتطوير مسبّبات الأمراض المقاومة للأدوية. وأعلنت منظمة الصحة العالمية أن مقاومة مضادات الميكروبات هي واحدة من أكبر عشرة تهديدات عالمية للصحة العامة، والتي تؤدي حاليًّا إلى 700000 حالة وفاة كل عام ومن المتوقع أن يصل العدد إلى عشرة ملايين حالة وفاة سنوياً بحلول عام 2050.

126- وتستخدم المضادات الحيوية على نطاق واسع في إنتاج الماشية والدواجن لمكافحة الأمراض وتعزيز النمو. وما بين 10% و90% من الأدوية التي يتم تناولها لا يمتصها/يستقلبها الحيوان بالكامل وتخرج في البول والبراز. ويمكن بعد ذلك استخدام هذه المخرجات كسماد أو كمحسِّنات للتربة في الأراضي الزراعية إما بشكل مباشر كالسماد (الشكل زاي-1) أو بشكل غير مباشر مثل حمأة مياه الصرف الصحي، مما يؤدي إلى إطلاق البكتيريا والمواد المضادة للميكروبات ومستقلباتها في التربة.

الشكل- زاي-1- تؤدي عمليات تحسين خصوبة التربة بالسماد الطبيعي إلى إطلاق كل من مضادات الميكروبات ومستقلباتها (الجينات المضادة للميكروبات) في الحقل. (الصورة من: برنامج خليج تشيسابيك)

127- وتحدث مقاومة مضادات الميكروبات عندما تتغير البكتيريا والفيروسات والفطريات والطفيليات بمرور الوقت. وهذه الأشياء تتحور وتتكيف، ولا تعد تستجيب للمواد المضادة للميكروبات، مما يجعل علاج العدوى أكثر صعوبة. وتوجد الكائنات الحية المقاومة لمضادات الميكروبات في البشر والحيوانات والأغذية والنباتات والبيئة (خاصة في المياه والتربة). وتتمتع هذه الكائنات بميزة تطورية ويمكن أن تؤدي إلى تطوير ميكروبيوم، أي مجموعة بكتيرية تحمل جينات مقاومة لمضادات الميكروبات. وبينما تمت دراسة مقاومة مضادات الميكروبات على نطاق واسع في مجال صحة الإنسان والحيوان، فإن تأثيرها على التربة والمياه لا يزال غير معروف.

128- وقد يؤدي نقل المواد المضادة للميكروبات عبر البيئة إلى وجود بقايا لمضادات الميكروبات في النباتات والحيوانات والغذاء، وتوفر السلسلة الغذائية العديد من المجالات التي تكثر فيها الميكروبات، والتي يمكن أن تظهر فيها مقاومة الميكروبات للأدوية. وبالتالي، يؤدي كل من الغذاء والبيئة دورًا مهمًا في المسارات المعقدة لانتقال مقاومة مضادات الميكروبات إلى البشر. وسيساعد تقييم مصدر ومصير مقاومة مضادات الميكروبات وتطوير خيارات الإدارة في تقليل عدد الوفيات المرتبطة بها. ويتماشى هذا مع نهج الصحة الواحدة، الذي يقر بأن صحة الإنسان والحيوانات الأليفة والبرية والنباتات والبيئة الأوسع (بما في ذلك النظم الإيكولوجية) مرتبطة ارتباطاً وثيقاً فيما بينها وتعتمد على بعضها بعضاً.

129- ويمكن استخدام الأساليب الكيميائية التقليدية الحالية لتقييم انتشار المواد المضادة للميكروبات في البيئة والغذاء، ودراسة المقاومة في البكتيريا، ولكنها لا تستطيع تفسير مصير وديناميات واستمرارية المواد المضادة للميكروبات ومقاومة مضادات الميكروبات في النظم الزراعية. ويمكن لهذه الأساليب قياس أرصدة تركيزات مضادات الميكروبات فتعطي لمحة سريعة عن ذلك في نقطة زمنية ما ولكن ليس بوسعها قياس الأمور المجهولة مثل المستقلبات. ويتم إدخال المواد المضادة للميكروبات باستمرار في الحقول الزراعية؛ ومع ذلك، فهذا يحدث بتركيزات ثابتة نتيجة الاستخدام المتكرر. وفي مثل هذا الوضع، يكون من الصعب اكتشاف كيفية تحلل هذه المواد الكيميائية بمرور الوقت، وباستخدام التحليل التقليدي، يكون من المستحيل تقييم مدى سرعة انتشار المواد المضادة للميكروبات في البيئة بعد استخدامها، ومدى سرعة تحويل/استقلاب المدخلات من الاستخدام الجديد لها وأنواع المستقلبات التي تتشكل، ومساهمة المستقلبات المضادة للميكروبات في تطوير مجموعات بكتيرية مقاومة لمضادات الميكروبات، ومدى أهمية هذه المدخلات الحالية بالنسبة إلى المدخلات السابقة واللاحقة لنفس المادة المضادة للميكروبات.

الاتجاهات

130- تحليل النظائر المستقرة المحدَّدة للمركب وتكنولوجيات السبر أدوات قوية لتقييم المواد المضادة للميكروبات. ويمكن استخدام هذه الأدوات لقياس نسب النظائر المستقرة الطبيعية المنشأ (مثل الكربون-13 والنتروجين-15) في العينات البيئية باستخدام الفصل الكروماتوغرافي الغازي – قياس الطيف الكتلي النسبي النظيري واستشراب سائل – قياس الطيف الكتلي لنسبة النظائر. ويمكنها إرشاد متخذي القرارات بشأن الاستصلاح البيئي بمصادر الملوِّثات المحتملة ومدى تحللها. وتُستخدم تقنيات سبر النظائر المستقرة لتحديد ما إذا كان التحلل البيولوجي لملوِّث معين يمكن أن يحدث أو لا يحدث في موقع ملوَّث. وتستخدم جميع نُهُج سبر النظائر المستقرة ملوِّثات موسومة بالنظائر (الكربون-13 مع النتروجين-15 والأكسجين-18) لاكتشاف عمليات التحلل البيولوجي وتحديدها وتحديد خصائص الكائنات الحية الدقيقة المسؤولة عن هذه الأنشطة. ولفهم دينامية مضادات الميكروبات ومقاومة مضادات الميكروبات من خلال السلسلة الغذائية، يُقترح استخدام نهج متكامل

باستخدام تكنولوجيا النظائر وتسلسل الجينوم. ويمكن أن يساعد هذا في التحقيق في ديناميات وإفراز مضادات الميكروبات من الحيوانات ومصيرها في البيئة (لا سيما في التربة والمياه)، إلى جانب تطور وانتشار الجينات المقاومة لمضادات الميكروبات.

131- ولتطبيق التكنولوجيات المذكورة أعلاه لتعقب مضادات الميكروبات في النظم الزراعية، أطلقت الوكالة مشروعًا بحثيًا منسقًا بعنوان "تقنيات النظائر لتقييم مصير مضادات الميكروبات وانعكاساتها على مقاومة مضادات الميكروبات في النظم الزراعية" (Isotopic Techniques to Assess the Fate of Antimicrobials and Implications for Antimicrobial Resistance in Agricultural Systems). وتم تطوير تقنية تحليل النظائر المستقرة بمركبات معيّنة لاقتفاء مصدر ومصير مبيدات الآفات/مضادات الميكروبات البيطرية في أحواض صرف المياه الزراعية. وتُستخدم هذه التقنية لرصد مصدر المضادات الحيوية وديناميكاتها وانتشارها بعد استخدامها في الأراضي الزراعية ولتقييم التأثير المحتمل على البيئة. وتتمثل الخطوة الأولى في مواءمة تقنيات تشخيص ورصد المضادات الحيوية الاصطناعية الموسومة بالسماد الطبيعي التي يتم استخدامها. وفي الوقت الحالي، تعيق الكميات غير الكافية من المضادات الحيوية الاصطناعية التجارية الموسومة إجراء الاختبار الميداني لهذه المنهجية.

132- وتتعاون الوكالة، من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، مع جامعة ميونيخ التقنية لتصنيع المضادين الحيويين الموسومين سلفاميثوكسازول وتتراسيكلين (مضادان حيويان شائعا الاستخدام في الطب البشري والبيطري) من خلال التخليق العضوي بغية استخدامهما في دراسة ميدانية تعاونية مع شركاء من أستراليا والبرازيل والصين وجنوب أفريقيا وفييت نام. والهدف من هذه الدراسة هو وضع بروتوكولات/مبادئ توجيهية تحليلية لاقتفاء تدفق المضادات الحيوية من الأدوية البشرية والحيوانية من خلال الإفراز، والسماد، والمياه السطحية والجوفية الملوَّثة المستخدمة في الري، والصرف الزراعي في البيئة. وسيعقد مختبر إدارة التربة والمياه وتغذية المحاصيل التابع للوكالة في زايبرسدورف تدريبًا عمليًا على تنفيذ التقنيات النظيرية لرصد مضادات الميكروبات في البيئة. كما سيوفر إرشادات بشأن تطبيق المنهجية لصالح البلدان النامية من أجل وضع استراتيجيات للتخفيف من حدة انتشار المضادات الحيوية في البيئة. وسيقدم مختبر حماية الأغذية والبيئة التابع للوكالة في زايبرسدورف المساعدة من خلال تحليل مضادات الميكروبات في الأغذية باستخدام تحليل التخفيف النظيري وتحليل النظائر المستقرة بمركبات معيّنة.

133- ويمكن استخدام التطورات الحديثة في التقنيات الجزيئية/البيولوجية، مثل الجينوميات البيئية بالطريقة العشوائية، لاكتشاف وتحديد الجينات المقاومة لمضادات الميكروبات. ويمكن أن توفر تحليلات العناصر الجينية أو الجينات الأخرى، مثل الإنزيم المدمج لفئات جينات الإنتجرون، غالبًا بديلًا جيدًا للوجود الكلي للتلوث البشري المنشأ، بما في ذلك البكتيريا المقاومة في البيئات الملوَّثة. ومن خلال منصات تسلسل الجينوم لدى مختبر الإنتاج الحيواني والصحة الحيوانية التابع للوكالة في زايبرسدورف، سيساهم المختبر في هذا المشروع بتوفير التكنولوجيات الجزيئية والتدريب العملي على الاختبارات المختبرية لتحديد السلالات المقاومة لمضادات الميكروبات وتتبع الجينات المرتبطة بمقاومة مضادات الميكروبات. ومن المتوقع أن يؤدي تكامل التقنيات النظيرية، مثل تحليل النظائر المستقرة بمركبات معيّنة، والتقنيات الجزيئية الأكثر تقدمًا إلى فهم أفضل لمصير وديناميات المضادات الحيوية في السماد المستخدم وانعكاساتها على مقاومة المضادات الحيوية في البيئة.

زاي-2- التنوع الجيني المستحث فضائيًا، وتحسين السلالات النباتية وعلم الأحياء الفلكي لمكافحة تغير المناخ

الحالة

134- غالبًا ما يستخدم الفضاء لأبحاث علم الأحياء الفلكي. ولقد حفَّزت الظروف المحددة السائدة في مدار الأرض وخارجه، ولا سيما البيئة الإشعاعية والجاذبية الصغرى، إجراء سلسلة من التجارب البيولوجية منذ بداية استكشاف الفضاء في أواخر الخمسينيات من القرن الماضي. وركزت العديد من التجارب على تأثير الجاذبية الصغرى على نمو النباتات، على سبيل المثال في محطة الفضاء الدولية، أو في بيئات محاكاة للفضاء على الأرض مثل مختبر علوم الحياة الفضائية التابع لوكالة ناسا.

135- وانصب تركيز هذه التجارب على علم الأحياء الأساسي لفهم القدرة على زراعة النباتات بشكل مثمر في ظل ظروف الجاذبية الصغرى لبعثات الفضاء. وأظهرت النتائج أن الجاذبية المتغيرة لها تأثيرات على تكاثر الخلايا ونموها، وعلى التعبير الجيني وعلى التخلق. واستكشفت التجارب الحديثة التنوع الجيني المستحث فضائيًا لمعرفة ما إذا كانت السلالات الجديدة من النباتات ستتحمل ظروفًا قاسية على الأرض، مثل تلك الناجمة عن تغير المناخ. وفي كانون الثاني/يناير 2021، أعاد باحثون فرنسيون حمولة مكونة من 320 فسيلة من فسائل العنب إلى الأرض بعد إبقائها داخل محطة الفضاء الدولية لمدة عشرة أشهر. وفي هذه التجربة، يدرس الباحثون بشكل أساسي تأثير الجاذبية الصغرى في البيئة الداخلية لمحطة الفضاء الدولية على جينوم العنب وأدائه الفسيولوجي. ولغرض بحثي مماثل، أرسلت شركة Front Range Biosciences لعلوم النباتات مزارع أنسجة من القنب والتبغ إلى محطة الفضاء الدولية في عام 2020.

136- وفي حين أن التركيز على تأثيرات الجاذبية الصغرى على علم الأحياء النباتي كان الدافع وراء معظم تجارب علم الأحياء الفلكي في العالم حتى الآن، فقد أُستخدِمت البيئة الإشعاعية للفضاء الخارجي كذلك لحث التنوع الجيني في بذور المحاصيل لتحسين المحاصيل من خلال الاستيلاد الطفري. وأصدرت الصين أكثر من 30 نوعًا جديدًا من أصناف المحاصيل الطافرة في الـ 15 عامًا الماضية والتي تم تطويرها من خلال التطفير عن طريق التعرض للفضاء باستخدام السواتل المدارية أو البالونات العالية الارتفاع أو عن طريق محاكاة الإشعاع الكوني على الأرض. واستخدمت هذه المشاريع مزيجًا من البيئة الإشعاعية والجاذبية الصغرى التي ينفرد بها الفضاء الخارجي لحث التنوع الجيني. وعندما كانت البذور في الفضاء الخارجي، تعرضت لبيئة الفضاء الخارجي، ولم تكن محمية من الإشعاعات كما هو الحال في البيئة الداخلية لمحطة الفضاء الدولية.

137- ولا تزال التجارب الحيوية الفلكية التي تبحث في تأثيرات الفضاء على بذور النباتات محدودة للغاية، وتركز بشكل أساسي على قابلية بقاء البذور جنبًا إلى جنب مع العديد من الكائنات الحية الدقيقة. وأُجري أول تعرض للكائنات الدقيقة للإشعاعات الفضائية على متن صواريخ سابرة في عام 1965 على ارتفاع 150 كم فوق سطح الأرض، ثم في بعثتي جيمني 9 و12 في عام 1966 على ارتفاع 300 كم، وأخيرًا أثناء عودة بعثة أبولو 16 من القمر في عام 1974. ومنذ ذلك الحين، أجريت سلسلة من التجارب الحيوية بشكل أساسي لإثبات أن الحياة يمكن أن تستمر في ظروف الفضاء القاسية للغاية، مع التركيز في المقام الأول على البكتيريا والطحالب والأشنات، وإلى حد محدود، بذور النباتات. ونُفِّذت هذه التجارب على منصات محددة مثل مختبر دراسة آثار التعرض الطويل المدى لظروف البيئة الفضائية، والناقلة الأوروبية القابلة للاسترداد، ومحطة الفضاء مير، والبرنامج البحثي المعنون "منهجية علم المعلومات البيولوجية لتحليل المسارات" (BioPAN)، والحمولات

المركبة خارجيًا لمرحلة الاستخدام الأول في محطة الفضاء الدولية، وتجربة تانبوبو في الوحدة التجريبية اليابانية التابعة لمحطة الفضاء الدولية، ومختبر السواتل النانوية لتعرض الكائنات الحية/التعرض العضوي للضغوط المدارية وحمولته من الكائنات الحية الخاضعة لاختبار قدرتها على البقاء على قيد الحياة في بيئة الفضاء. وإن توافر الحمولات التجارية مؤخرًا يسهل الآن إجراء تجارب علم الأحياء الفلكي في محطة الفضاء الدولية بالحمولات الداخلية أو الخارجية من المواد النباتية.

الاتجاهات

138- المعلومات العلمية عن التأثيرات المطفرة التي تسببها بيئة الفضاء على المستويات الجينومية والفسيولوجية لنباتات المحاصيل محدودة في الدراسات المنشورة. وأفاد علماء صينيون أنه في بذور القمح المرسلة إلى الفضاء في الساتل القابل للاسترداد شيغيان-8، تسبب الإشعاع الفضائي والجاذبية الصغرى في حدوث الطفرات الأكثر شيوعًا. ويشير هذا إلى وجود تأثير تآزري بين الأشعة الكونية والجاذبية الصغرى، بينما كان التأثير الفردي للجاذبية الصغرى أقل بكثير من تأثير الأشعة الكونية[12]. وكشف آخرون عن مسارات وجينات تشارك في طفرات قادرة على تحمُّل الملوحة الناتجة عن طفرات رحلات الفضاء[13]. كما تم إرسال بذور المحاصيل إلى الوحدة الأولى من محطة الفضاء الصينية الجديدة وإلى سطح القمر كجزء من بعثة الفضاء تشانغ-إي-4.

الشكل- زاي-2- منصة نانوراكس الخارجية في محطة الفضاء الدولية. (الصورة من: نانوراكس)

[12] غو هـ.، وآخرون، التأثيرات المطفرة لعوامل مختلفة في بيئة رحلات الفضاء للساتل شيغيان-8 على القمح، الدورية الشهرية Acta Agronomica Sinica العدد 36 الرقم 5، 2010.

[13] شيونغ، هـ.، وآخرون، تحليل تسلسل الحمض النووي الريبي يكشف عن المسارات والجينات المرشحة المرتبطة بالقدرة على تحمُّل الملوحة في طافرة قمح مستحثة في رحلة فضاء، التقارير العلمية 7، 2731، 2017.

139- وهناك الآن اهتمام متزايد بفهم تأثير بيئة الفضاء على إحداث طفرات في جينومات النباتات وفي تعديل فسيولوجيا النباتات، وبالتالي تحسين قدرة النباتات على تحمل ظروف النمو المعاكسة على الأرض مثل تلك التي يسببها تغير المناخ. ويمكن الآن إدارة حمولات البذور أو المواد النباتية المرسلة إلى محطة الفضاء الدولية بواسطة كيانين تجاريين على الأقل يتطلعان إلى سد الفجوة في تسهيل أو إجراء البحوث بشأن تأثيرات الإشعاع الكوني والجاذبية الصغرى في تعديل قدرة النباتات على التكيف مع ظروف النمو القاسية. ومن المتوقع أن يشهد هذا المجال تقدماً سريعاً مع استمرار الاهتمام باستكشاف البيولوجيا النباتية في الفضاء، سواء لتوفير الغذاء لرواد الفضاء أو لاستخدام الطفرات المفيدة الناتجة عن التعرض للفضاء لاستيلاد أصناف محاصيل قادرة على التكيف.

140- وستدخل الوكالة، من خلال المركز المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، في مجال البيولوجيا الفلكية والاستيلاد في الفضاء لأول مرة في عام 2022 بتجربة من المقرر أن تُوضع خلالها بذور نوعين من النباتات[14] داخل وخارج محطة الفضاء الدولية لمدة ثلاثة إلى سبعة أشهر في الحمولات الداخلية والخارجية، على التوالي. وبالنسبة للحمولة الخارجية، سيتم استخدام منصة نانوراكس الخارجية، والتي يتم تركيبها بشكل شبه دائم في مرفق الوحدة التجريبية اليابانية المكشوفة (الشكل زاي-2). وسيتم تثبيت الحمولة الخارجية في وحدة التخزين المضغوطة في محطة الفضاء الدولية قبل وضعها في الخارج. وسيكون هذا أول استكشاف منهجي في العالم لفهم واستخدام تأثيرات الإشعاع الكوني والجاذبية الصغرى على التنوع الجيني المستحث لاستخدامها المحتمل في تطوير المحاصيل التي يمكنها التكيف مع ظروف النمو القاسية على الأرض، مثل تلك الظروف التي يفرضها تغير المناخ.

حاء- الصحة البشرية

حاء-1- التشخيص العلاجي: خارطة طريق لتقديم العناية الشخصية لمرضى السرطان

الحالة

141- يتكون كل نوع سرطان من أنواع مختلفة من الخلايا. وللحصول على رعاية طبية مثالية، يجب أن يعتمد اختيار العلاج على تحديد الأنواع الفرعية للسرطان التي يمكن أن يحدد الطب النووي خصائصها بسهولة، مما يسمح بالوصول إلى نهج علاجي شخصي.

142- وعلى مدى السنوات القليلة الماضية، شهد الطب النووي تطوراً تقدماً مثيراً للإعجاب مع تطوير التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، وخاصة باستخدام الغلوكوز المنزوع الفلور المرقوم بالفلور-18، والأساليب الجديدة في العلاج المستهدف بالنويدات المشعة، إلى جانب تطورات أخرى. وتمهد هذه التطورات الطريق للإدارة المشخصنة للسرطان. والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تستهدف واسمات حيوية معينة هي أدوات قوية لتقييم موقع المرض وانتشاره، وتحديد القيمة التنبؤية، وتقييم الاستجابة للعلاج، ودعم تخطيط العلاج أو الخزعات الموجهة. وعلاوة على ذلك، فالمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية التي تستهدف الواسمات الجزيئية المعنية التي تظهر على شكل أورام صلبة ودموية، يمكن استخدامها بمجرد وسمها ببواعث بيتا أو ألفا في العلاجات المستهدفة بالنويدات المشعة.

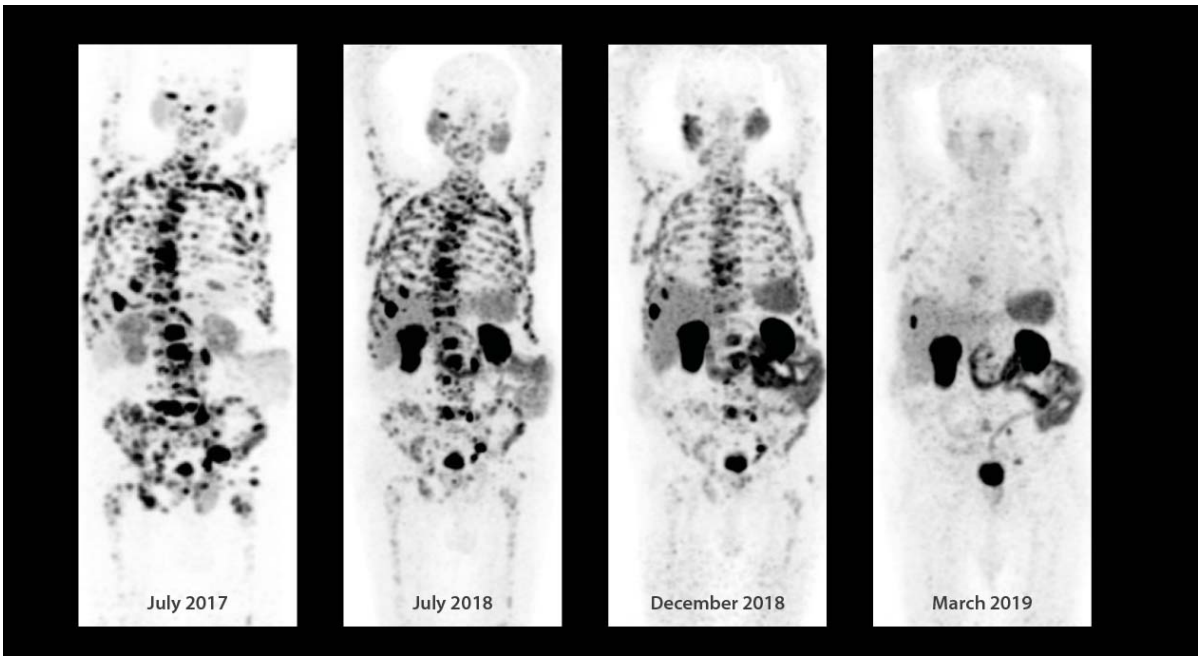
---

[14] *أرابيدوبسيس ثاليانا*، نبات مزهر صغير يستخدم عادة ككائن نموذجي في علم الأحياء النباتية، *والذرة الرفيعة الثنائية اللون*، والمعروفة ببساطة باسم السرغوم، وتزرع للحصول على حبوبها التي تستخدم في غذاء الإنسان، وعلف الحيوانات، وإنتاج الإيثانول.

143- ويؤدي الطب النووي الحديث دوراً أساسياً في تحقيق الطب "المشخصن" أو "الدقيق"، مما يسمح باختيار العلاج المحدد المناسب لحالة المريض الخاصة أو قابلية إصابته بمرض ما. ولذلك يمكن أن يتعامل الطب النووي مع تقييم المخاطر والتشخيص ورصد العلاج والعلاج بالنويدات المشعة المتعلقة بالخصائص الفريدة للفرد لتحسين نوعية الحياة والصحة العامة. ويساهم هذا بشكل مباشر في تحقيق الهدف 3 من أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة بشأن الصحة الجيدة والرفاه.

144- ويشير أسلوب التشخيص العلاجي القائم على النظائر إلى الجمع بين التشخيص والعلاج لتمكين المهنيين الطبيين من التركيز على الاحتياجات المحددة لكل مريض. وفي التشخيص العلاجي، تُستخدَم جزيئات مماثلة مدمجة مع نظائر مشعة مختلفة لأغراض التشخيص أو العلاج. وبينما يُستخدَم نظير مشع واحد لتحديد موقع وانتشار السرطان، بالإضافة إلى نوع معين من الخلايا السرطانية بدقة عالية، يصدر نظير آخر الإشعاعات لقتل الخلايا السرطانية. ويختلف النهج التشخيصي العلاجي عن العلاج الإشعاعي التقليدي، الذي يستهدف الموقع العام للمرض على نطاق أوسع، في أنَّه يتيح قدراً أكبر من الدقة من خلال استهداف الورم بقذائف مشعة دون المساس بالأنسجة السليمة المحيطة به، مما يزيد من فعالية العلاج وأمانه في آن واحد (الشكل حاء-1).

145- ويساهم دعم الوكالة للدول الأعضاء في إنشاء المرافق وتلقي التدريب على التشخيص العلاجي، في سياق الممارسات الإكلينيكية المأمونة والمناسبة، على الانتقال نحو الطب المشخصن.



الشكل- حاء-1- التقدم الحاصل في أسلوب التشخيص العلاجي المطبَّق على مريض يبلغ من العمر 82 عاماً والمصاب بسرطان البروستاتا الذي انتشر ليصل إلى العقد اللمفاوية والعظام. من اليسار إلى اليمين: الحالة في بداية تطبيق أسلوب التشخيص العلاجي وصولاً إلى حالة شبه الخمود الكامل للمرض. (الصور من: المركز الطبي في الجامعة الأميركية في بيروت)

الاتجاهات

146- حقق الطب الدقيق، وخاصة التصوير التشخيصي المستهدف، والعلاجات تقدماً كبيراً في العقود الأخيرة. ويرجع ذلك جزئياً إلى تطوير جزيئات وتكنولوجيات جديدة أدت إلى نمو سريع في كل من عدد التطبيقات الإكلينيكية التشخيصية العلاجية وفي استخدامها على الصعيد العالمي.

147- وتنمو التطبيقات الإكلينيكية بمعدل متسارع. وتعمل معظم التطبيقات البارزة في الوقت الراهن على إدارة المرضى المصابين بأورام الأعصاب والغدة الصماء، والأورام اللمفاوية، وسرطانات البروستاتا والثدي والرئة والغدة الدرقية.

148- ويعتمد مستقبل التشخيص العلاجي على تطوير جزيئات جديدة لاستهداف خلايا سرطانية معينة، مما يسمح بعلاج بعض أنواع السرطانات المتقدمة مع تقليل الآثار الجانبية. وفي هذا المجال السريع النمو، هناك حاجة ناشئة إلى توسيع نطاق التعاون وتوحيد المعايير على الصعيد الدولي، في تدريب الخبراء الطبيين والعلميين وإرساء البنية الأساسية الطبية المتخصصة.

حاء-2- أوجه التقدم المحرز في مجال علوم التغذية: مساعدة البلدان في معالجة وباء البدانة بالبيانات

الحالة

149- التغذية من الاعتبارات الحيوية لجميع البلدان في تحقيق الهدف 3 من أهداف التنمية المستدامة بشأن الصحة الجيدة والرفاه. وفي حين أن نقص التغذية لا يزال عند مستويات عالية بشكل ينذر بالخطر، فإن البدانة آخذة في الارتفاع. ووفقاً *لتقرير التغذية العالمي لعام 2021*[15]، فإن زيادة الوزن والبدانة لدى البالغين آخذة في الارتفاع في كل منطقة وبلد تقريباً. ويعاني 2.2 مليار شخص من زيادة الوزن، منهم 772 مليون يعانون من البدانة. وأُعتبِر أن حوالي 6% من الأطفال دون سن الخامسة يعانون من زيادة الوزن في عام 2020، يعيش نصفهم تقريباً في آسيا وأكثر من ربعهم في أفريقيا. والبدانة عامل خطر رئيسي للإصابة بمرض السكري وأمراض القلب والأوعية الدموية والسرطان والاضطرابات العضلية الهيكلية والوفيات بشكل عام. ووصلت الأمراض المرتبطة بالبدانة إلى مستويات وبائية على الصعيد العالمي، حيث تؤدي زيادة الوزن أو البدانة إلى وفاة ما لا يقل عن 2.8 مليون شخص سنويًّا. وتشير التقديرات إلى أن الأمراض المرتبطة بالبدانة ستكلف، على مستوى العالم، 1.2 تريليون دولار سنوياً بحلول عام 2025. وللتصدي لوباء البدانة، يجب على واضعي السياسات العامة والوطنية والدولية أن يتضافروا لدعم التدخلات والإجراءات والسياسات التغذوية الفعالة. وفي هذا السياق، توفِّر تقنية الماء المزدوج الترقيم القائمة على النظائر المستقرة بيانات بالغة الأهمية بشأن استهلاك الجسم البشري للطاقة، وسوف تزود واضعي السياسات بالأدلة اللازمة لوضع سياسات أكثر فعالية في مجالي التغذية والصحة من أجل مكافحة وباء البدانة الآخذ في التفشي حول العالم.

150- ويشير إجمالي استهلاك الطاقة عند قياسه بالماء المزدوج الترقيم إلى كمية الطاقة التي يستهلكها الشخص. ومن المهم تحديد متطلبات استهلاك الطاقة. وتُفيد بيانات إجمالي استهلاك الطاقة في استحداث وتقييم التدخلات على مستوى التغذية والنشاط البدني، فضلاً عن كونها المعيار الذهبي للتحقق من صحة تقنيات

[15] https://globalnutritionreport.org/reports/2021-global-nutrition-report/

اســتهلاك الطاقة البســيطة. وتدعم الوكالة تطبيق تقنية الماء المزدوج الترقيم لأنها التقنية الوحيدة التي تُمكِّن من تقييم إجمالي استهلاك الطاقة أثناء ممارسة الشخص لحياته العادية دون أن تتسبب في عرقلة أنشطته اليومية، مما يجعلها مثالية للاستخدام في الأوضاع الميدانية.

151- وتســتخدم هذه التقنية مقتفيين نظيريين مســتقرين، وهما الديوتيريوم والأكســجين-18، لقياس اســتهلاك الشخص للطاقة. ويشرب الشخص جرعة من الماء تحتوي على النظيرين غير المشعين، وتختلط هذه الجرعة مع الماء الموجود في الجســم. وتخرج النظائر من الجســم في البول والعرق وعند التنفس. وتُجمع عينات البول قبل تناول الجرعة ولمدة سبعة إلى 14 يوماً بعد ذلك. ويخرج الديوتيريوم من الجسم عبر ماء الجسم فقط، بينما يخرج الأكســجين-18 من الجســم بشــكل أســرع عبر الماء وثاني أكســيد الكربون. والفرق في معدلات التخلص من الديوتيريوم والأكســجين-18 يكون مقياســاً لمعدل إنتاج ثاني أكســيد الكربون، ويمكن أن يُحسَــب منه اســتهلاك الطاقة.

152- وفي حين أن هذه الطريقة غير اقتحامية ومأمونة وســهلة التطبيق في الأوضــاع الميدانية، فقد يكون تطبيقها على أعداد كبيرة من السكان مكلِّفاً بسبب تكلفة النظائر والمعدات التحليلية المطلوبة. ولذلك فإن الدراسات التي تســتخدم الماء المزدوج الترقيم تميل إلى أن تكون صــغيرة؛ ومع ذلك، فتجميع البيانات من العديد من الدراســات يمكن أن يقدم إجابات لأسئلة معينة لا تستطيع الدراســات الفردية وحدها أن تجيب عليها، مثل كيف ســيؤثر تغير المناخ على متطلبات الطاقة في مجموعات ســكانية مختلفة. ولتســهيل تجميع بيانات الماء المزدوج الترقيم على المستوى العالمي للإجابة على الأسئلة المهمة، أطلقت الوكالة في كانون الأول/ديسمبر 2018 قاعدة بيانات تحتوي على قياســات لاســتهلاك الطاقة البشــرية خلال العقود الثلاثة الماضــية. واعتباراً من تشــرين الثاني/نوفمبر 2021، تشتمل قاعدة البيانات هذه على بيانات بشأن أكثر من 7600 شخصاً من 32 بلداً، تتراوح أعمارهم بين ثمانية أيام و95 عاماً. وما يقرب من 65% من المشاركين في الدراسة من الإناث ومعظم البيانات مستقاة من بلدان ذات دخل مرتفع.

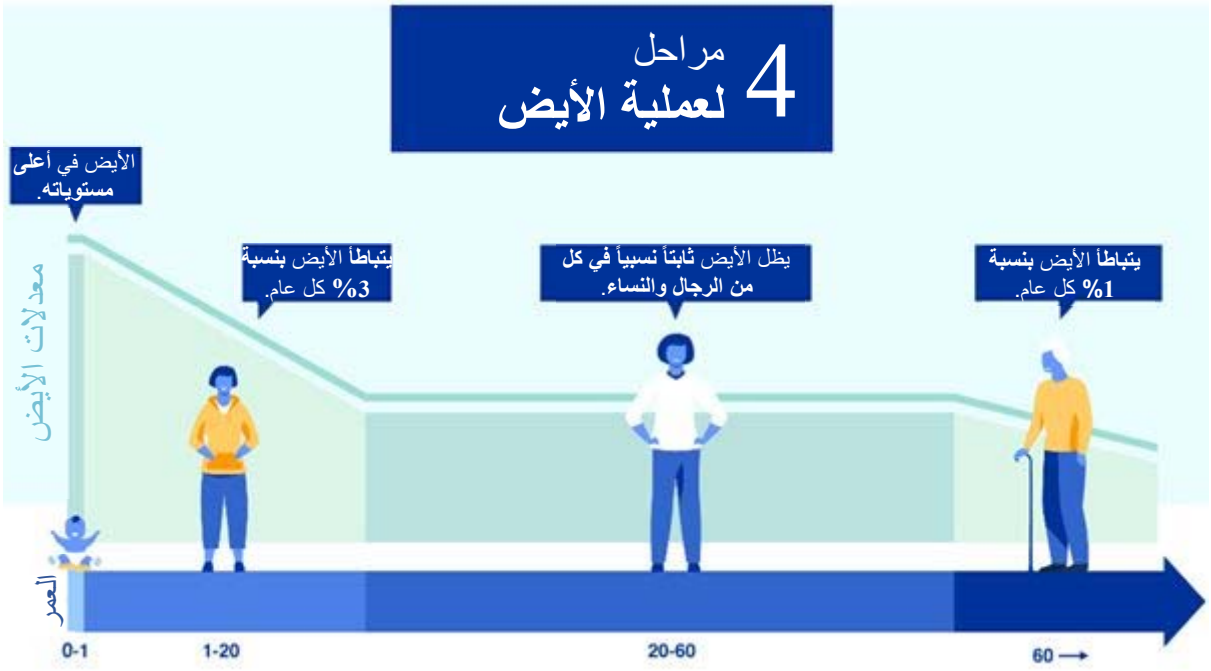
الاتجاهات

153- يمكن اعتبار قاعدة بيانات الماء المزدوج الترقيم لدى الوكالة بمثابة عامل يغير قواعد اللعبة في مكافحة البدانة. وتُظهر النتائج الجديدة المنشــورة في عام 2021 بناءً على تحليل بياناتها مدى أهمية تقنيات النظائر المستقرة لفهمنا للصحة البشرية وخاصة أزمة البدانة.

154- وبددت مقالة نُشرت في مجلة *Science*[16] فهمنا السابق لعملية الأيض (الشكل حاء-2) باستخدام بيانات من قاعدة بيانات الماء المزدوج الترقيم التابعة للوكالة، فقد درست كيفية تغير استهلاك الطاقة اليومية خلال مسار حياة الإنســان وأظهرت أن عملية الأيض في الواقع لها أربع مراحل مختلفة، من الولادة إلى العقد التاســع من العمر. فالمراحل البارزة في الحياة، مثل البلوغ والحمل وانقطاع الطمث، بالإضافة إلى نوع الفرد والشيخوخة في منتصف العمر، لا تؤثر على عملية الأيض بالقدر الذي كان يُعتقد سابقاً. وستساعد هذه النتائج العلماء على فهم الأسئلة المهمة المتعلقة بالصحة الأيضية بشكل أفضل وكيفية مساعدة الناس على عيش حياة أكثر صحة في كل مرحلة من مراحل الحياة.

[16] استهلاك الطاقة اليومية خلال دورة حياة الإنسان، مجلة Science، المجلد 373، العدد 6556، 13 آب/أغسطس 2021

155- ويركز مقال آخر نُشر في مجلة *Current Biology*[17] على تأثير النشاط البدني على توازن الطاقة ويظهر أن زيادة النشاط البدني لا يؤدي إلى ارتفاع إجمالي استهلاك الطاقة كما كان يعتقد سابقاً. وهذا بسبب التعويض، أي أن ممارسة المزيد من التمارين تؤدي إلى انخفاض الأيض الأساسي. وبالإضافة إلى ذلك، قد يواجه الأشخاص الذين يعانون من البدانة المفرطة صعوبات في حرق الدهون من خلال النشاط البدني أكثر من الأشخاص النحيفين. وهذه النتائج الجديدة لها أيضاً انعكاسات مهمة على استراتيجيات الصحة العامة لمكافحة زيادة الوزن والبدانة.



الشكل- حاء-2- بددت الدراسة الرائدة التي نُشرت في مجلة Science الفهم السابق لعملية الأيض.

156- وجاري العمل على المزيد من الدراسات والمنشورات، مع التركيز على قضايا مثل العوامل التي تؤثر على معدل تجدد المياه وكمية المياه النظيفة التي يحتاج الناس لشربها كل يوم، وتأثير درجة الحرارة المحيطة والاحترار العالمي على متطلبات الطاقة وما إذا كان استهلاك الطاقة ينخفض عند الإصابة بوباء البدانة. بيد أنَّ هناك حاجة لجمع مزيد من البيانات من البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط لتعزيز مستوى التمثيل العالمي وتمكين واضعي السياسات من الاستناد إلى الأدلة المتاحة من أجل إيلاء الأولوية لاتخاذ الإجراءات الضرورية في مجال التغذية والتصدي لوباء البدانة. وستدعم الوكالة مشروعاً بحثياً منسقاً جديداً لجمع المزيد من البيانات بشأن استهلاك الطاقة من البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل وضمان استمرار نمو قاعدة بيانات الوكالة المتعلقة بالماء المزدوج الترقيم وتمثيلها لجميع الدول الأعضاء.

[17] تعويض الطاقة والبدانة في البشر، مجلة Current Biology، المجلد 31، العدد 20، 25 تشرين الأول/أكتوبر 2021

طاء- النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية

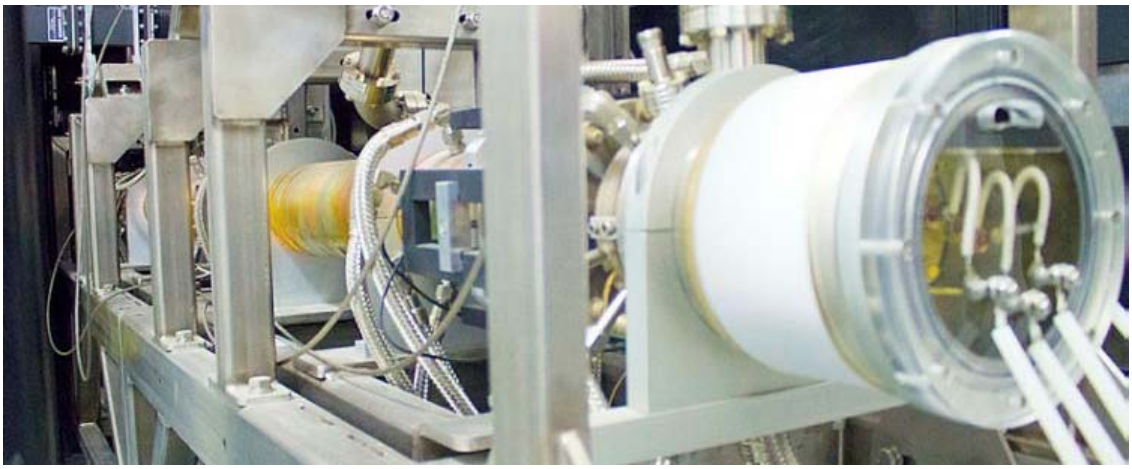
طاء-1- مسارات جديدة لإنتاج النظائر المشعة الطبية

الحالة

157- تُستخدم النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية لإنقاذ أرواح المصابين بالسرطان وغيره من الأمراض المزمنة، سواءً في التشخيص أو في العلاج. ولذلك يُعدُّ توفير إمدادات مستمرة من النظائر المشعة الرئيسية أمراً بالغ الأهمية. ويتم حالياً إنتاج النظائر المشعة الطبية، مثل الموليبدينوم-99 / التكنيتيوم-99 م، والفلور-18، والغاليوم-68، واليود-131 واللُّتِشيُوم-177، في مفاعلات البحوث والسيكلوترونات من خلال التفاعلات النووية الناتجة عن قصف المواد المستهدفة بجسيمات عالية الطاقة، مثل النيوترونات والبروتونات. وفي أعقاب الاضطرابات التي حدثت في إمداد الموليبدينوم-99 خلال الفترة من عام 2007 إلى عام 2010 وفي عمليات التوزيع أثناء جائحة كوفيد-19، يطور الباحثون والمنتجون طرقاً بديلة لإنتاج النظائر المشعة الطبية. وفي كندا، تمت الموافقة على التكنيتيوم-99m المنتج من السيكلوترون ويجري ترويجه تجاريًّا.

158- وتوفر المعجلات الخطية ومحطات القوى النووية مسارين جديدين لإنتاج الموليبدينوم-99، أكثر النظائر المشعة الطبية استخداماً حول العالم، مما يفتح الآفاق أمام تعزيز وتدعيم سلسلة الإمداد العالمية الخاصة بذلك النظير المشع. كما تُبذل جهود عالمية لإنتاج نظائر مشعة طبية من أجل عوامل علاجية مبتكرة وفعالة عبر تفاعلات (غاما، نيوترون) الدينامية الضوئية، لا سيما لإنتاج الأكتينيوم-225 والنحاس-67.

159- وبخلاف السيكلوترونات، يمكن استخدام تكنولوجيات المعجلات لإنتاج النظائر المشعة (الشكل طاء-1). وتخضع الأهداف المشعة في المعجلات الخطية لتفاعلات (غاما، نيوترون) ويمكن أن تنتج نظائر طبية متعددة مثل الموليبدينوم-99 والأكتينيوم-225 والنحاس-67 والسكانديوم-47. وسيغطي منشور من المنشورات التي تصدرها الوكالة يجري إعداده حاليًّا جميع مراحل العملية.



الشكل- أولا-1- صورة لمعجل خطي في شركة Canadian Isotope Innovations Corp.
(الصورة من: مصدر الضوء الكندي)

الاتجاهات

160- من الممكن أيضاً إنتاج النظائر المشعة من النحاس-67 والأكتينيوم-225 من خلال هذه التفاعلات الدينامية الضوئية. واجتذب النحاس-67 العديد من الباحثين والعلماء، نظراً لنصف عمره المتوسط، وانبعاثات جسيمات بيتا التي يصدرها وتستخدم في العلاج، وانبعاثات أشعة غاما التي يصدرها وتستخدم في التصوير التشخيصي، لتطوير المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية التشخيصية، وخاصة تلك التي تعتمد على الأجسام المضادة الأحادية النسيلة. ونجحت الدراسات الحديثة القائمة على تفاعل (غاما، نيوترون) الضوئي الدينامي في إنتاج النحاس-67 ذي الجودة العالية لإنتاج المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية وتطبيقها في التجارب الإكلينيكية في الولايات المتحدة الأمريكية وأستراليا.

161- ونويدة الأكتينيوم-225 لها أهمية كبيرة في العلاج المستهدف بأشعة ألفا لمرضى السرطان. وتشير تقارير[18] بشأن مسار دينامي ضوئي جديد لإنتاج الأكتينيوم-225 إلى أن المنتج المتولِّد يحتوي على شوائب أقل وكميات أكبر من المنتج المتولِّد في مسارات أخرى. وهذه نتيجة مهمة وواعدة للمساعدة في تلبية الطلب العالمي المتزايد على الأكتينيوم-225. وسيركز مشروع بحثي منسق جديد للوكالة على إنتاج ومراقبة جودة المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية المصنوعة باستخدام الأكتينيوم.

162- ويقوم إنتاج النظائر المشعة في المفاعلات على تفاعلات أسر النيوترونات في المادة المستهدفة. وعادة ما تُستخدم مفاعلات البحوث لإنتاج النظائر المشعة للتطبيقات العلاجية في مجال الطب النووي. وتشعيع المستهدفات في محطات القوى النووية هو المسار المعتاد لإنتاج بعض النظائر المشعة مثل الكوبلت-60 الذي يُستخدم في الصناعة وفي التشعيع الداخلي. وفي عام 2021، أذنت الهيئة الرقابية باستخدام محطة قوى نووية تجارية من نوع كاندو في إنتاج الموليبدينوم-99 (الشكل طاء-1-2). وجاري تحري نهج مماثل لإنتاج نظائر مشعة طبية مهمة أخرى قصيرة العمر في محطات القوى النووية، منها اللُّتِشيُوم-177 والهُلميوم-166. وقد يفتح هذا التطور أيضاً آفاقاً جديدة أمام المصممين للنظر في الاستفادة من مفاعلات القوى التي لديها القدرة على إنتاج النظائر المشعة.

[18] إنتاج الأكتينيوم-225 بمعجل الإلكترونات، مجلة Applied Physics (الفيزياء التطبيقية) 129، 104901 (2021)

الشكل- أولا-2- في عام 2021، أذنت لجنة هيئة الأمان النووي الكندية لمحطة القوى النووية دارلينغتون بإنتاج النظير المشع الطبي الموليبدينوم-99 الذي يساعد على إنقاذ الأرواح.
(الصورة من: شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء)

163- ويمكن أن يؤدي اعتماد هذه التطبيقات على نطاق واسع، والتي تقتصر حاليًا على عدد قليل من البلدان، إلى إحداث نقلة نوعية في إنتاج النظائر المشعة الطبية في المستقبل.

ياء- الذكاء الاصطناعي من أجل العلوم النووية وتطبيقاتها

الحالة

164- يشير الذكاء الاصطناعي إلى مجموعة من التقنيات التي تجمع بين البيانات الرقمية وخوارزميات المعالجة ولديها قوة حوسبية متزايدة باستمرار لتطوير أنظمة قادرة على التعامل مع المشكلات المعقدة بطرق تشبه المنطق والاستدلال البشريين. ويمكن لتقنيات الذكاء الاصطناعي تحليل كميات كبيرة من البيانات بغرض تعلُّم وتقييم كيفية إكمال مهمة معينة، وهي تقنية تسمى التعلم الآلي.

165- ويتقدم الذكاء الاصطناعي بشكل كبير ويمكنه بالفعل فرز وتفسير كميات هائلة من البيانات من مصادر مختلفة لتنفيذ مجموعة واسعة من المهام والمساعدة في مواجهة العديد من التحديات الأكثر إلحاحاً في العالم. ويتسم بإمكانات هائلة لتسريع التطور التكنولوجي في العديد من المجالات النووية من الطب النووي إلى إدارة الموارد المائية والعلوم والصناعة النووية. وعلى سبيل المثال، قدرة الذكاء الاصطناعي على التعرف على أنماط البيانات وتحليل الصور العالية الدقة التي تلتقطها السواتل أو الطائرات المسيّرة أو عمليات المسح الطبي من شأنها تحسين الاستجابة لحالات الطوارئ الإنسانية، واكتشاف التغيرات المناخية والمائية في العالم التي تشير إلى الجفاف أو الفيضانات، ورصد الإنتاجية الزراعية وتحسينها، وتتبع الهجرة الحيوانية والبحرية، ومساعدة المهنيين الطبيين على تحديد وعلاج السرطانات والأمراض الأخرى.

166- ويتيح الجمع بين علوم النظائر والذكاء الاصطناعي إطاراً قابلاً للتفسير لاستخراج معلومات جديدة من الاختلافات النظيرية الصغيرة، مما يوفر إمكانات كبيرة في العديد من المجالات منها الهيدرولوجيا النظيرية والإيكولوجيا والتحليل الجنائي والأمن الغذائي. ويطبق الخبراء بالفعل نُهُجاً قائمة على الذكاء الاصطناعي لتحليل كميات هائلة من البيانات النظيرية التي تتعلق بالمياه والمحفوظة في الشبكات العالمية، مثل الشبكة العالمية لاستخدام النظائر في دراسة الأمطار التي تتعهدها الوكالة والمنظمة العالمية للأرصاد الجوية. ويساعد التحليل الفعال والكفء لهذه البيانات، الذي ييسره الذكاء الاصطناعي، العلماءَ على فهم تغير المناخ وتأثير تغير المناخ والنمو السكاني على توافر المياه في جميع أنحاء العالم.

167- وفي مجال بحوث الاندماج والعلوم النووية، يتيح التعلُّم الآلي تحسين التخطيط التجريبي وحلول التحكم الآني اللازمة لتشغيل المرافق بشكل مستدام ومأمون وفعال، من خلال تعظيم كمية المعلومات المستخرجة من البيانات التجريبية وبيانات المحاكاة ومدى قابليتها للتطبيق.

168- ويمكن أن يساهم الذكاء الاصطناعي أيضاً في مكافحة السرطان مع المساعدة في الحفاظ على انخفاض التكاليف المرتبطة بذلك. ويتم تطبيق الأساليب القائمة على الذكاء الاصطناعي لدعم تشخيص وعلاج السرطان من خلال تحسين تفسير الصور ورسم خرائط كنتورية للأورام بدقة، مما يتيح وضع خطط علاجية دقيقة بالإضافة إلى العلاج الإشعاعي التكيفي – وهو عملية علاج إشعاعي تتكيف مع المتغيرات التشريحية الداخلية حسب كل مريض. ويؤدي التعلُّم الآلي دوراً متزايد الأهمية في التصوير الطبي للتنبؤ بمسار المرض لدى كل مريض والاستجابة للعلاج. وسيؤدي الذكاء الاصطناعي دوراً مهماً أيضاً في مبادرة العمل المتكامل لمكافحة الأمراض الحيوانية المصدر التابعة للوكالة لمساعدة الخبراء على التنبؤ بالأمراض الحيوانية المصدر وتحديدها وتقييمها واحتواء تفشيها في المستقبل.

الاتجاهات

169- يتطلب الاستخدام المعزز للذكاء الاصطناعي في مجال العلوم والتطبيقات النووية جهداً مشتركاً عبر التخصصات، بما في ذلك تنظيم المعلومات ومشاركتها، وأنشطة التطوير الشفافة لتنسيق ودعم التعاون فيما بين الباحثين من مجموعة واسعة من المجالات.

170- وتتطلب تقنيات الذكاء الاصطناعي إقامة شراكات دولية قوية وتعاون متعدد القطاعات من أجل وضع إرشادات بشأن التنظيم الرقابي والمسائل الأخلاقية والتعليم والتدريب وكذلك من أجل تقاسم الخبرات والمعارف والممارسات الجيدة. ويتعين أن تتسم تطبيقات الذكاء الاصطناعي بالشمول والعدالة والإنصاف لإفادة المجتمع ككل. ولهذا أهمية خاصة بالنسبة للذكاء الاصطناعي المطبق على التكنولوجيات النووية التي تستهدف التنمية المستدامة العادلة للأجيال الحالية والمقبلة.

171- وإدراكاً من الوكالة بالفوائد والفرص المتأتية من الذكاء الاصطناعي، فضلاً عن التحديات التي يواجهها، بما في ذلك المخاوف بشأن الشفافية والثقة والأمن والأخلاق، فهي تسعى إلى إقامة حوار مفتوح وتعاون لتعزيز تطبيق الذكاء الاصطناعي في مجال العلوم والتقنيات النووية، من أجل تقديم دعم أفضل للدول الأعضاء في الاستخدام السلمي للتكنولوجيات النووية.

172- وحركة الذكاء الاصطناعي من أجل تحقيق الصالح العام، التي ينظمها الاتحاد الدولي للاتصالات و38 منظمة في أسرة الأمم المتحدة، بما في ذلك الوكالة، عبارة عن منصة رقمية متاحة طوال العام تهدف إلى تحديد تطبيقات الذكاء الاصطناعي التي من شأنها التعجيل بتحقيق أهداف التنمية المستدامة (الشكل ياء-1). ووفرت الوكالة منتدى دولياً متعدد القطاعات لمناقشة العلوم والتكنولوجيا والتطبيقات النووية وتحديدها وتعزيزها من خلال حلقتين دراسيتين عقدتهما في تشرين الثاني/نوفمبر 2021 في إطار حركة الذكاء الاصطناعي من أجل تحقيق الصالح العام، وكذلك الاجتماع التقني الرائد الذي عُقِد في تشرين الأول/أكتوبر 2021 بشأن الذكاء الاصطناعي في مجال التكنولوجيا النووية وتطبيقاتها.

الشكل- ياء-1- تضم منصة الذكاء الاصطناعي من أجل تحقيق الصالح العام 38 منظمة في أسرة الأمم المتحدة.
(الصورة من: الاتحاد الدولي للاتصالات)

173- وسلطت هذه الفعاليات الضوء على الكيفية التي يمكن من خلالها أن يكون تطوير قواعد البيانات والوصول إلى البيانات عاملين تمكينين حقيقيين في تطبيقات الذكاء الاصطناعي. وشددت على أهمية إنشاء مستودعات مركزية وموحدة، حيثما كان ذلك عملياً، تجمع بيانات جيدة التنظيم لإتاحة تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتعلُّم الآلي؛ وتعزيز التعلُّم التعاوني (نقل النماذج بدلاً من البيانات) لأخذ نموذج من قاعدة بيانات إلى قاعدة بيانات أخرى وإقامة مكتبات مرجعية لجمع المراجع بما يفيد الذكاء الاصطناعي والتعلُّم الآلي في مجال التكنولوجيا النووية وتطبيقاتها.

174- وتسعى الوكالة إلى إرساء الركائز لمواصلة الابتكار في مجال الذكاء الاصطناعي في العلوم والتطبيقات النووية من خلال إنشاء منصة "الذكاء الاصطناعي من أجل العلوم الذرية" لتبادل المعارف، فضلاً عن دعم الرقابة والتدريب، وتعزيز الإرشادات الأخلاقية.

المرفق

الجدول ألف-1- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد في العالم[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء المولَّدة نوويًّا في عام 2021		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام 2021	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط ساعة	النسبة المئوية من الإجمالي	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	37	27 727	4	3 759	208.4	20.0	1 410	7
الأرجنتين	3	1 641	1	25	10.2	7.2	94	2
أرمينيا	1	448			1.9	25.3	47	8
إسبانيا	7	7 121			54.2	20.8	357	1
ألمانيا	3	4 055			65.4	11.9	830	11
الإمارات العربية المتحدة	2	2 762	2	2 690	10.1	1.3	1	9
أوكرانيا	15	13 107	2	2 070	81.1	55.0	548	6
إيران (جمهورية-الإسلامية)	1	915	1	974	3.2	1.0	10	4
باكستان	5	2 242	1	1 014	15.8	10.6	92	11
البرازيل	2	1 884	1	1 340	13.9	2.4	61	3
بلجيكا	7	5 942			48.0	50.8	317	7
بلغاريا	2	2 006			15.8	34.6	171	3
بنغلاديش			2	2 160	غير منطبق	غير منطبق		
بيلاروس	1	1 110	1	1 110	5.4	14.1	1	2
تركيا			3	3 342	غير منطبق	غير منطبق	غير منطبق	غير منطبق
الجمهورية التشيكية	6	3 934			29.0	36.6	182	10
جمهورية كوريا	24	23 091	4	5 360	150.5	28.0	620	2
جنوب أفريقيا	2	1 854			12.2	6.0	74	3
رومانيا	2	1 300			10.4	18.5	39	11
سلوفاكيا	4	1 868	2	880	14.6	52.3	180	7
سلوفينيا	1	688			5.4	36.9	40	3
السويد	6	6 882			51.4	30.8	480	0
سويسرا	4	2 960			18.6	28.8	232	11
الصين	53	50 034	16	15 967	383.2	5.0	470	0
فرنسا	56	61 370	1	1 630	363.4	69.0	2 393	0
فنلندا	4	2 794	1	1 600	22.6	32.8	171	4
كندا	19	13 624			86.8	14.3	807	6
المكسيك	2	1 552			11.6	5.3	59	11
المملكة المتحدة	12	7 343	2	3 260	41.8	14.8	1 648	6
الهند	22	6 795	8	6 028	39.8	3.2	554	9
هنغاريا	4	1 916			15.1	46.8	146	2
هولندا	1	482			3.6	3.1	77	0
الولايات المتحدة الأمريكية	93	95 523	2	2 234	771.6	19.6	4 694	4
اليابان	33	31 679	2	2 653	61.3	7.2	1 965	6
المجموع (ب)، (ج)	**437**	**389 508**	**56**	**58 096**	**2 653.1**	**غير منطبق**	**19 170**	**9**

ملحوظة: NA — Not applicable

(أ) المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى (نظام www.iaea.org/pris) (PRIS) في أيار/مايو 2022.

(ب) مجموع الأرقام هذا يتضمَّن البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين: 3 وحدات عاملة بقدرة إجمالية تبلغ 2859 ميغاواط (كهربائي)وفَّرت 26.8 تيراواط-ساعة من الكهرباء، بما يمثِّل 10.8% من إجمالي مزيج الكهرباء.

(ج) يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (80 عاماً، 8 أشهر) وكازاخستان (25 عاماً، 10 أشهر) وليتوانيا (43 عاماً، 6 أشهر)، والمحطات المغلقة والعاملة في تايوان، الصين (236 عاماً، 8 أشهر).

الجدول دال-1- الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم[19]

نوع التطبيقات(أ)	عدد مفاعلات البحوث المشاركة(ب)	عدد الدول الأعضاء التي تستضيف مرافق من هذا النوع
التدريس/التدريب	162	50
التحليل بالتنشيط النيوتروني	117	49
إنتاج النظائر المشعة	83	41
التصوير الشعاعي النيوتروني	69	37
تشعيع المواد/الوقود	68	26
التشتُّت النيوتروني	44	28
التقويم الجيولوجي	24	21
التحويل (معالجة السليكون)	23	15
التحويل (الأحجار الكريمة)	20	12
العلاج النيوتروني، أساساً أنشطة للبحث والتطوير	15	11
قياس البيانات النووية	14	7
استخدامات أخرى(ج)	118	34

(أ) يَرِدُ وصف لهذه التطبيقات بمزيد من التفاصيل في المنشور الصادر عن الوكالة بعنوان تطبيقات مفاعلات البحوث (العدد NP-T-5.3 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، فيينا 2014).

(ب) من بين 235 مفاعل بحوث تمت دراستها (220 قيد التشغيل، و15 في حالة إغلاق مؤقت، حتى كانون الأول/ديسمبر 2021).

(ج) تشمل التطبيقات الأخرى معايرة الأجهزة واختبارها وتجارب التدريع وإنشاء مصادر بوزيترونية ودراسات حرق النفايات النووية.

[19] الحالة حتى كانون الأول/ديسمبر 2021.

الوكالة الدولية للطاقة الذرية

Vienna International Centre, P.O. Box 100

1400 Vienna, Austria

الهاتف: 0-2600 (1-43+)

رقم الفاكس: 7-2600 (1-43+)

البريد الإلكتروني: Official.Mail@iaea.org

www.iaea.org

IAEA

الوكالة الدولية للطاقة الذرية

تسخير الذرة من أجل السلام والتنمية

22-03462A