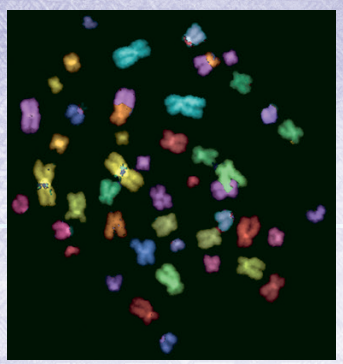
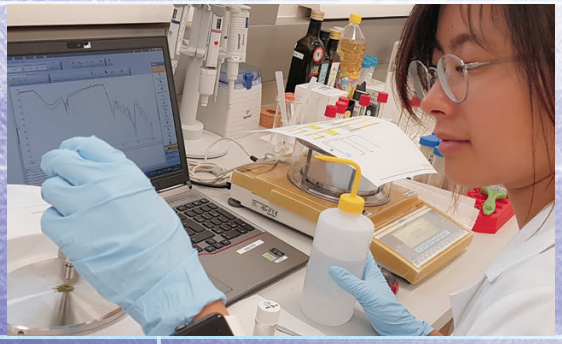
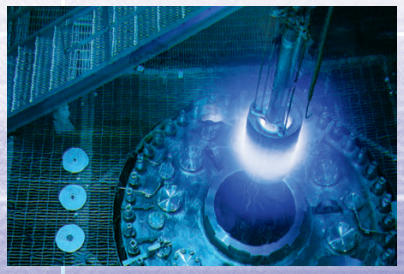
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢٠







IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

صورة الغلاف مقدَّمة من: Getty، الوكالة الدولية
للطاقة الذرية، جامعة سنغافورة الوطنية؛ مختبر
أوك ريدج الوطني؛ روزاتوم."

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢٠

GC(64)/INF/2

طُبِع من قِبَل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا

أيلول/سبتمبر ٢٠٢٠

IAEA/NTR/2020

تمهيد

تلبية لطلبات الدول الأعضاء، تصدر الأمانة كل عام *استعراضاً شاملاً للتكنولوجيا النووية*.

ويتناول *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢٠* المجالات المختارة التالية: تطبيقات القوى، والأنشطة الانشطارية والاندماجية المتقدِّمة، وتطبيقات المعجِّلات ومفاعلات البحوث، وتكنولوجيات النظائر والتكنولوجيات الإشعاعية، والصحة البشرية والتقنيات النووية في الغذاء والزراعة.

وقد قُدِّمت مسودة استعراض التكنولوجيا النووية إلى مجلس المحافظين خلال دورته المعقودة في آذار/مارس ٢٠٢٠ ضمن الوثيقة GOV/2020/4. وأُعدَّت الصيغة النهائية في ضوء المناقشات التي جرت في مجلس المحافظين، وكذلك في ضوء التعليقات التي وردت من الدول الأعضاء.

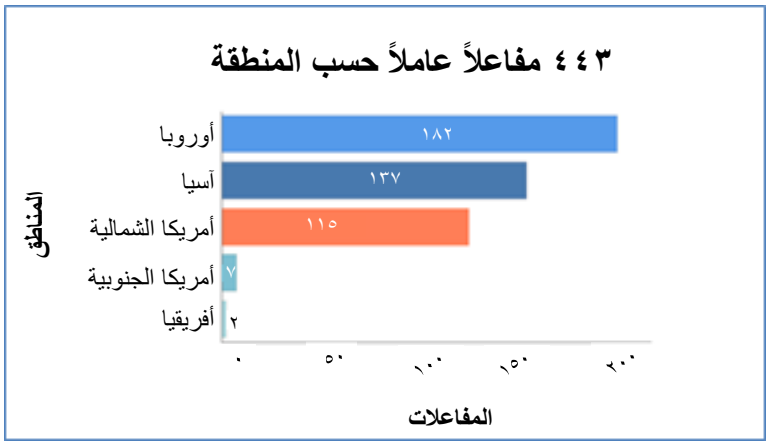
قائمة المحتويات

موجز جامع ١
التقرير الرئيسي..... ٥
ألف- تطبيقات القوى ٥
ألف-١- القوى النووية اليوم..... ٥
ألف-١-١- البلدان المشغِّلة ٨
ألف-١-٢- مشاريع جديدة ضمن برامج القوى النووية القائمة ٩
ألف-١-٣- البلدان المستجدَّة ١١
ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية..... ١٣
ألف-٣- دورة الوقود ١٤
ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية..... ١٤
ألف-٣-٢- ضمان الإمداد ١٨
ألف-٣-٣- المرحلة الختامية..... ١٨
ألف-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة ٢٠
ألف-٤-١- إخراج مرافق نووية من الخدمة..... ٢٠
ألف-٤-٢- الاستصلاح البيئي..... ٢٢
ألف-٤-٣- التصرُّف في النفايات المشعّة ٢٥
باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان..... ٣٠
باء-١- الانشطار المتقدم ٣٠
باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء ٣٠
باء-٢- النظم النيوترونية السريعة..... ٣٣
باء-٢-١- المفاعلات المبرَّدة بالغاز..... ٣٥
باء-٢-٢- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية..... ٣٧
باء-٢-٣- المبادرات الدولية بشأن نُظم الطاقة النووية الابتكارية..... ٤١
باء-٢-٤- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية ٤١
باء-٣- الاندماج..... ٤٣
جيم- المعجِّلات ومفاعلات البحوث ٤٥
جيم-١- المعجِّلات والأجهزة المرتبطة بها..... ٤٥
جيم-١-١- مرفق الحُزم المزدوجة يفتح فرصاً جديدة لأبحاث المواد ٤٥
جيم-١-٢- المعجل المتحرك للتحليل غير المتلِّف للتراث الثقافي في الموقع "ماكينا" ٤٦
جيم-١-٣- تصوير الخلايا بأكملها باستخدام حُزم أيونية ذات طاقات تقدر بالملايين
من الإلكترون فلط..... ٤٧
جيم-١-٤- تكنولوجيا المعجِّلات القائمة على الليزر تَعِدُ بتطبيقات متنوعة ٤٨
جيم-٢- مفاعلات البحوث..... ٤٨
دال- النظائر المشعة والتكنولوجيات الإشعاعية..... ٥١
دال-١- مواجهة عبء البلاستيك: تطبيق التقنيات النووية..... ٥١
دال-٢- طفرة في تكنولوجيا المعجِّلات تقدم العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون إلى المستشفيات..... ٥٤

دال-٢-١- التقدم المحرز في مصادر النيوترونات المدمجة القائمة على المعجلات ٥٤
دال-٢-٢- المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية التشخيصية والعلاج
بأسر النيوترون في نواة البورون ٥٧
دال-٣- التطبيق "Medical Isotope Browser": أداة لطرق إنتاج النظائر المشعة الحديثة
في مكافحة السرطان والأمراض الأخرى ٥٨
هاء- الصحة البشرية ٥٩
هاء-١- طريقة القافيات النظيرية المزدوجة الجديدة لتقييم جودة البروتين لدى البشر ٥٩
هاء-١-١- البروتين وآثاره على نمو الطفل ونمائه ٥٩
هاء-١-٢- جودة البروتين ٥٩
هاء-١-٣- طريقة القافيات النظيرية المزدوجة لتقييم جودة البروتين لدى البشر ٦٠
هاء-١-٤- الوسم الذاتي للبقوليات بأكسيد الديوتريوم أثناء النمو في الحقل ٦٠
هاء-١-٥- دراسة بشرية بوجبات اختبار أعدت من البقوليات الموسومة ذاتياً ٦١
هاء-١-٦- أهمية هذه الطريقة ٦١
هاء-٢- قياس الجرعات البيولوجية كأداة تشخيصية/تنبؤية مفيدة لحالات الطوارئ
الإشعاعية والطب الإشعاعي ٦٢
هاء-٢-١- قياس الجرعات البيولوجية يربط الواسمات الحيوية بالجرعات ٦٢
هاء-٢-٢- طرق قياس الجرعات البيولوجية القياسية ٦٣
هاء-٢-٣- الملامح الرئيسية في الطرق الجديدة لقياس الجرعات البيولوجية التي تم
تطويرها منذ عام ٢٠٠٠ ..... ٦٣
هاء-٢-٤- الاتجاهات المستقبلية ٦٥
واو- الأغذية والزراعة ٦٦
واو-١- التطبيقات المعززة لتقنية الحشرة العقيمة للوقاية من الآفات الحشرية الغازية والقضاء عليها ٦٦
واو-١-١- معلومات أساسية ٦٦
واو-١-٢- تحسين تقنيات واستراتيجيات تقنية الحشرة العقيمة ٦٨
واو-١-٣- التحوط والتأهب لمكافحة الآفات الحشرية الغازية ٧٠
واو-٢- استخدام التقنيات النووية لدعم نظم اقتفاء أثر الأغذية ٧١
واو-٢-١- معلومات أساسية ٧١
واو-٢-٢- التقنيات النووية ٧٢
واو-٢-٣- قواعد البيانات ٧٤
واو-٣- التقنيات النووية لرصد غازات الدفيئة للتخفيف من آثار تغير المناخ ٧٥
واو-٣-١- معلومات أساسية ٧٥
واو-٣-٢- تطوير تكنولوجيا الكربون-١٣ للمستوى الميداني ٧٧
واو-٣-٣- تقنية اقتفاء أثر النتروجين-١٥ لقياس أكسيد النيتروز وتحديد مصادره ٧٧
واو-٣-٤- التطورات الجديدة في قياسات الأمونيا على نطاق الميدان ٧٨
واو-٣-٥- التطلع إلى المستقبل ٧٩

موجز جامع

١- في نهاية عام ٢٠١٩، بلغت القدرة الإجمالية لمفاعلات القوى النووية العاملة في العالم (الشكل ألف-١) البالغ عددها ٤٤٣ مفاعلاً ٣٩٢,١ غيغاواط (كهربائي). وفي عام ٢٠١٩ أُغلقت بشكل دائمٍ ١٣ مفاعلً، وتمَّ ربط ٦ مفاعلات بالشبكة الكهربائية، وبدأ تشييد ٥ مفاعلات. ومازالت آفاق النمو في الأجلين القريب والطويل تتمركز في آسيا، فهي تحتضن ٣٥ من أصل ٥٤ مفاعلاً قيد التشييد، مثلما تحتضن ٦١ مفاعلاً من أصل ٧٤ مفاعلاً وُصلت بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.



الشكل ألف-١ - مفاعلات القوى النووية العاملة في عام ٢٠١٩ . (المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة (www.iaea.org/pris)

٢- وثمة ثلاثون بلداً في الوقت الراهن تستخدم القوى النووية و٢٨ بلداً يدرس أو يخطِّط أو تعمل بهمَّة من أجل إدخال القوى النووية في مزيج الطاقة لديها. وتعكف أربعة بلدان مستجدّة على تشييد أولى محطات القوى النووية لديها، وقد أوشكت محطتان منها على الاكتمال، وبلغت عدّة بلدان أخرى قرّرت إدخال القوى النووية مراحل متقدّمة من إعداد البنية الأساسية.

٣- وتوقعات الوكالة لعام ٢٠١٩ بشأن القدرة العالمية على توليد القوى النووية تعطينا تقديراً مختلطاً عن المساهمة المستقبلية للقوى النووية في توليد الكهرباء في العالم، وهذا يتوقف جزئياً على ما إذا كان من الممكن إضافة قدرة جديدة كبيرة لتعويض الحالات المحتملة لسحب مفاعلات من الخدمة. وفي إطار التوقُّعات المنخفضة حتى عام ٢٠٣٠، يسجّل صافي القدرة المنشأة على توليد الكهرباء النووية انخفاضاً تدريجياً قبل أن ترتدّ مجدداً إلى ٣٧١ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠. وفي إطار التوقُّعات المرتفعة، ستزيد القدرة بنسبة ٢٥٪ مقارنةً بالمستويات الحالية لتبلغ ٤٩٦ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠، وبنسبة ٨٠٪ لتبلغ ٧١٥ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠. وستبلغ حصة القوى النووية من إجمالي توليد القدرة الكهربائية في العالم قرابة ٦٪ في الحالة المنخفضة وقرابة ١٢٪ في الحالة المرتفعة بحلول منتصف القرن، مقارنة بقرابة ١٠٪ في عام ٢٠١٩.

وتُعدُّ المزايا المتحققة من حيث التخفيف من حدة تغيُّر المناخ، وأمن الطاقة، والسياسات البيئية والاجتماعية الاقتصادية، من الأسباب الرئيسية وراء اعتزام العديد من الدول الأخذ ببرامج القوى النووية أو توسيع ما لديها منها. وقد أكّد المؤتمر الدولي بشأن تغيُّر المناخ ودور القوى النووية، الذي نظمته الوكالة في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩ بالتعاون مع وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، على أنّ للقوى النووية دوراً رئيسياً تضطلع به في المساعدة على تحقيق أهداف المناخ من خلال تسريع الانتقال إلى طاقة منخفضة الكربون.

٤- وكان من المتوقع أن يماثل الإنتاج العالمي من اليورانيوم في عام ٢٠١٩ إنتاج عام ٢٠١٨ المقدَّر بنحو ٥٠٠ ٥٣ طن. وأدّى استمرار انخفاض الأسعار إلى تراجُع كبير في استكشاف اليورانيوم، إذ بقيت المشاريع الجديدة لليورانيوم معلقة وظلّ عدد من المناجم التي كانت عاملة في السابق ومرافق المعالجة قيد الرعاية والصيانة. وكانت القدرات العالمية في مجالات التحويل والإثراء وتصنيع الوقود أكثر من كافية لتلبية الطلب في الوقت الراهن والمتوقع في المستقبل.

٥- وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩، تسلمت الوكالة شحنة من اليورانيوم الضعيف الإثراء في مرفق مُشيّد لهذا الغرض في كازاخستان، لينشأ بذلك رسمياً مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، ويهدف المصرف إلى توفير ضمانات للبلدان بشأن إمداد الوقود النووي.

٦- ويُتوقع الاضطلاع في السنوات المقبلة بالكثير من العمل في ميدان الإخراج من الخدمة، وما يتصل بذلك من أنشطة الاستصلاح، فيما يخص مفاعلات القوى ومفاعلات البحوث والمرافق الأخرى المعنية بدورة الوقود والمجمعات الحرجة والمعجِّلات ومرافق التشعيع. وهناك تحسينات مستمرة تتحقَّق في هذه المجالات بالاستعانة بتكنولوجيات مثبتة وجديدة على حد سواء.

٧- وأحرزت عدَّة بلدان تقدماً في المشاريع التي تضطلع بها بشأن التخلُّص الجيولوجي العميق من النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك المعلن عنه باعتباره من النفايات. وتعمل فنلندا على تشييد مرفق، فيما تنتظر السويد قراراً نهائياً بشأن طلب الترخيص الذي تقدّمت به، وتعمل فرنسا على استكمال طلب ترخيص المرفق الخاص بها. وتُحرز مشاريع التخلص داخل حفر السبر للمصادر المشعّة المختومة المهملة تقدُّماً في عدة بلدان، بما في ذلك المشاريع التجريبية المدعومة من الوكالة في غانا وماليزيا. وتوجد حول العالم مرافق عاملة معنية بالتخلُّص من سائر فئات النفايات المشعة.

٨- وتكتسب المفاعلات النووية المتقدمة وتطبيقاتها، التي يُنظر إليها على أنها قادرة على المساهمة في تحوُّل العالم نحو نُظم طاقة أكثر استدامةً وأيسر من حيث التكلفة وأكثر موثوقيةً، زخماً في جميع مناطق العالم. وتشمل مثل هذه التكنولوجيا، التي هي ملائمة لإدماجها في نُظم الطاقة المستقبلية الخالية من الكربون مع حصص كبيرة من المصادر المتجدّدة المتغيرة، المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية.

٩- وثمة اهتمام متنامٍ باستخدام الطاقة النووية للتطبيقات غير الكهربائية في تحلية مياه البحر، وإنتاج الهيدروجين، وتدفئة الأحياء السكنية والتبريد، وكذلك الأمر في العديد من التطبيقات الصناعية المستهلِكة للطاقة بكثافة. والمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية ملائمة بشكل خاص لمثل هذه التطبيقات، المعروفة أيضاً باسم التوليد المشترك للطاقة، والتي يمكن أن تعوّض جزءاً كبيراً من تكاليف توليد الطاقة النووية.

١٠- ويظهر للعيان التقدُّم الكبير المحرَز في أعمال تشييد المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، فقد استُكمل ما نسبته أكثر من ٧٣٪ من الأعمال المدنية. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل المفاعل التجريبي الحراري

النووي الدولي بكامل طاقته من حيث قوى الاندماج حوالي عام ٢٠٣٥. كذلك ثمة برامج بحث وتطوير واسعة النطاق في مجال الاندماج النووي قيد التنفيذ في العديد من الدول الأعضاء. وبُلِغَ معلَمٌ مهمّ تمثَّل في تشييد جهاز JT-60SA، وهو توكاماك فائق التوصيل جار تشييده في ناكا باليابان في إطار تعاون دولي بين أوروبا واليابان.

١١- ولا تزال مفاعلات البحوث العاملة، البالغ عددها ٢٥٠ مفاعلاً في ٥٤ بلداً، تؤدي دوراً استراتيجيًّا في دعم قطاعات الطب والصناعة والتعليم والقوى النووية. وفي المجمل، هناك ٩ مفاعلات بحوث قيد الإنشاء في ٦ بلدان، ومن المزمع إنشاء ١٤ مفاعل بحوث في ١١ بلداً. وتُعدُّ مفاعلات البحوث مرافق وطنية رئيسية لتطوير البنية الأساسية والبرامج المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية. وفي عام ٢٠١٩، أصبحت منظمة بحثية، هي المعهد الكوري لبحوث الطاقة الذرية، أحدَ المراكز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث المسمَّاة من الوكالة.

١٢- وحتى اليوم، هناك ٩٩ مفاعل بحوث وأربعة مرافق لإنتاج النظائر الطبية إمَّا تمَّ تحويلها من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تأكَّد أنَّها في حالة إغلاق. وفي عام ٢٠١٩، بدأت الاستعدادات لإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء من مفاعل البحوث من فئة IVG.1M في كازاخستان إلى الاتحاد الروسي بعد تحويل مفاعل البحوث من فئة IVG.1M إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. كما بدأت الاستعدادات لتخفيف درجة إثراء وقود اليورانيوم الشديد الإثراء في مفاعل البحوث من فئة مفاعلات الغرافيت النبضية (IGR) في كازاخستان إلى مستوى الإثراء الذي يقل عن ٢٠٪. وبحلول نهاية عام ٢٠١٩، استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الأمريكي المصدر إزالةُ حوالي ١٦٠٠ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلك الخاص بمفاعلات البحوث، وفي إطار برنامج إزالة الفجوات تمت إزالة ٢٨٧٥ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء أو تم تأكيد التخلص منها، كما استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الروسي المنشأ إزالة حوالي ٢٣٠٠ كغ من الوقود.

١٣- وتفي التكنولوجيات الإشعاعية بالمبادئ الأساسية للكيمياء "الخضراء" وتوفر إمكانيات متعددة في معالجة المواد مثل البوليمرات، المعروفة أيضاً باسم اللدائن أو المواد البلاستيكية، من خلال التكوين أو الانقسام الخاضع للرقابة للروابط الكيميائية. وقد تمَّ التثبُّت من أداء التكنولوجيات الإشعاعية بشكل شامل في كيمياء البوليمرات، بما في ذلك التعديل المبتكر لخصائص البوليمرات واستحداث مواد ومركبات بوليمرية فريدة، وكذلك في إعادة تدوير النفايات البوليمرية. والاهتمام في هذه التكنولوجيا في تنامٍ، وتطلب الدول الأعضاء بشكل متزايد تكييف التكنولوجيات الإشعاعية مع التحدي العالمي المتمثل في إعادة تدوير النفايات البلاستيكية.

١٤- ويمثل العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون تقنية قائمة على النيوترون تسمح بالتشعيع الانتقائي على المستوى الخلوي للورم. والعلاج المذكور مناسب بشكل خاص لعلاج سرطانات المخ والرأس والعنق والجلد. فباستخدام التفاعل بين نيوترون وبورون لتدمير الخلايا السرطانية دون غيرها بطريقة انتقائية، قد يصبح العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون علاجاً مختلفاً اختلافاً جذرياً عن العلاج الإشعاعي التقليدي وهو واعدٌ بأن يكون خياراً مجدياً لعلاج السرطان. وقد تمَّ إحراز تقدُّم كبير على صعيد العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون في المراكز المشاركة في أنحاء العالم. وأُحرز تقدُّم كبير في الارتقاء بمركبات البورون والتحكّم في تراكمها في خلايا الورم، وتمَّ تطوير نُظم ثلاثية الأبعاد لحساب الجرعات. وثمة اهتمام متجدّد بالموضوع بسبب الاختراقات التكنولوجية المتحققة في عمليات إنتاج النيوترونات المدمجة القائمة على المعجّلات، وهو ما يسمح بتركيب هذه المرافق في المستشفيات ومراكز بحوث السرطان.

١٥- وجودة البروتين مهمة للغاية في تلبية الاحتياجات التغذوية للسكان في جميع أنحاء العالم النامي، وخاصة أثناء الحمل والطفولة المبكرة. وللأحماض الأمينية دور بارز في تحقيق النمو الصحي في المراحل الأولى من عمر الإنسان. وتقيس الطريقة النظيرية الجديدة المتسمة بأدنى قدر من الاختراق والقائمة على استخدام الديوتيريوم

والكربون-١٣ إمكانيةَ الهضـــم اللفائفي الحقيقي للأحماض الأمينية التي لا غنى عنها، وتتيح تقييم جودة البروتين الغذائية عند الإنسان. وستساعد هذه الطريقة الجديدة على تحديد مصادر جيدة للبروتين النباتي، وخاصة البروتينات البقولية، لاستهلاك الإنسان وسيكون ذلك بمثابة أساس لصوغ توصيات جودة البروتين للبشر من طرف منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة.

١٦- وتساعد طرق قياس الجرعات البيولوجية على تحديد التعرُّض للإشعاعات عند البشر، وتحديد حجمه. بل وقد يساعد قياس الجرعات البيولوجية بأثر رجعي في الكشف عن التعرُّض للإشعاع من سنوات سابقة. وأدخلت طرق قياس الجرعات البيولوجية مؤخراً في العلاج الإشـــعاعي للأورام والطب النووي، وكذلك علم الأشـــعة التشخيصي والتدخلي.

١٧- وتمَّ تطوير أداة جديدة قائمة على شـبكة الويب، هي متصـفّح النظائر الطبية، تتيح إمكانية التنبؤ مباشـرة بالحصيلة الإنتاجية لنظير طبي على أساس مدخلات المستخدمين. ويمكن استخدام متصفح النظائر الطبية من جانب علماء الطب وصـناعة المسـتحضـرات الصـيدلانية الإشـعاعية لاكتشـاف طرق إنتاج النظائر المشـعة التي لم يتم استكشافها بعدُ. وسوف يسهم هذا بشكل كبير في مكافحة السرطان والأمراض الأخرى. ويعتمد إنتاج النظائر الطبية لأغراض علاجية أو تشـخيصـية على عمليات تفاعل نووي معقدة للغاية، وهي متاحة فقط للفيزيائيين النوويين من خلال القياسات ونظريات التفاعل النووي. ويجعل متصفح النظائر الطبية هذه المعلومات الأساسية في متناول العديد من المستخدمين غير المتخصصين من خلال واجهة مستخدم رسومية لإنتاج النظائر.

١٨- وانتشار الأنواع الغازية في تزايُد، وهي تسهم في فقدان التنوع البيولوجي على الصعيد العالمي. وتستطيع تقنية الحشـرة العقيمة، التي يتم نشـرها بصـفتها مكوناً مهماً لنهج الإدارة المتكاملة للآفات على نطاق مناطق كاملة، أن تمنع توطُّن مجموعات الآفات الغازية، مثلما تستطيع احتواءها أو استئصـالها، دون ترك بصـمة إيكولوجية. وقد أدَّى الأخذ بتكنولوجيات وبروتوكولات محسَّنة فيما يخص الإنتاج المكثَّف للحشرات العقيمة وتعقيمها وإطلاقها إلى التعزيز كثيراً من الفعالية من حيث التكلفة في برامج المكافحة المتكاملة للآفات على نطاق مناطق بأســـرها التي تتضـــمَّن مكوِّناً قائماً على تقنية الحشـــرة العقيمة. وقد أســـفر ذلك عن فتح الباب أمام التوسُّـــع في اســـتخدام هذه التكنولوجيا لمكافحة آفات حشرية رئيسية أخرى، بما في ذلك آفات غازية بارزة تصيب النباتات والحيوانات وتضرّ بالصـحة البشـرية. وتشـير التحليلات إلى أنَّ اتِّخاذ تدابير تأهُّب تمكِّن من التصـدي السـريع للآفات قبل اسـتشـرائها ينطوي على تكاليف أقلَّ كثيراً مقارنة بحملات الإبادة.

١٩- وتباع العديد من الأطعمة بأسـعار مرتفعة بسـبب المطالبات بوسـم "ذات القيمة المضـافة" المتعلقة بأصـول جغرافية محددة وطرق الإنتاج والخصـائص الفريدة. ويمكن أن تشكّل المنتجات المرتبطة بالأصـول جزءاً من دورة حميدة للجودة المسـتدامة تعتمد على الحفاظ على الموارد المحلية، بما في ذلك وضـــع الوســـوم الزراعية والحِرَفية والأخلاقية والغذائية الدوائية، وهي مواصـفات تضـيف قيمة إلى المنتجات الغذائية. ومن أجل حماية المسـتهلكين من الاحتيال في الأغذية، وما قد ينشـأ جراء ذلك من مشـاكل غير مقصـودة تتعلق بسـلامة تلك الأغذية، ثمة حاجة إلى طرق تحليلية للتحقُّق من المطلبات بوسم القيمة المضـافة دعماً لنُظم اقتفاء أثر الأغذية. وقد أثبتت عدّة تقنيآت نووية ونظيرية وتقنيات ذات صلة أنها مناسبة للتحقق من مجموعة واسعة من المطالبات بوسم القيمة المضافة. وتتسم مثل هذه التقنيات بإمكانات كبيرة لدعم نُظم اقتفاء أثر الأغذية التي تحمي وتروج للمنتجات الغذائية ذات المطالبات بوسم القيمة المضـافة. والاسـتخدام الموسَّـع لهذه التكنولوجيا من قبل الدول الأعضـاء سـيضـمن في نهاية المطاف حماية المسـتهلكين والمنتجين ذوي السـمعة الطيبة، وضـمان الامتثال الرقابي والأخلاقي، وتحفيز الأسـواق المحلية، وتقليل الحواجز أمام التجارة الدولية.

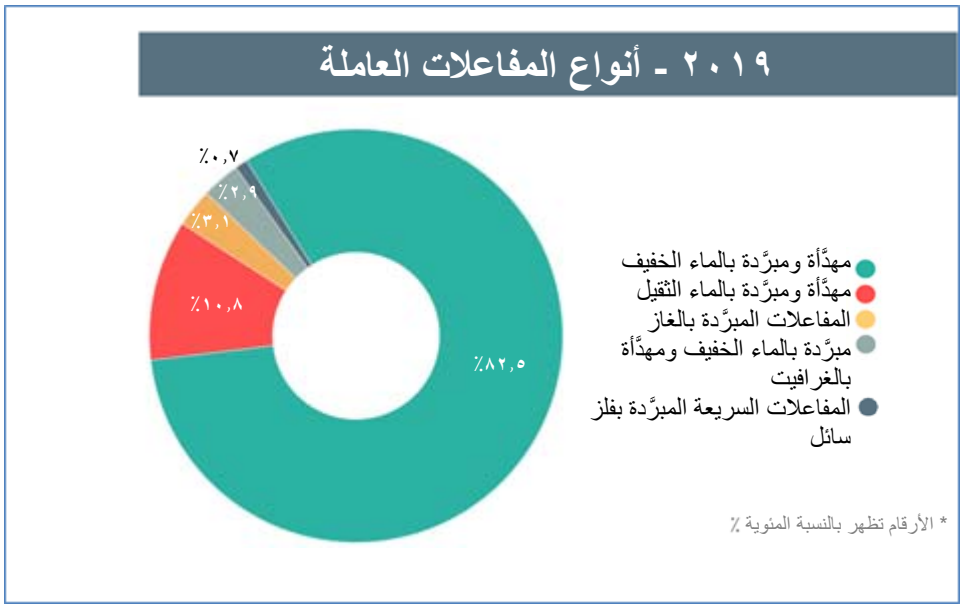
استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠٢٠

التقرير الرئيسي

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

٢٠- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩، كان ثمة ٤٤٣ مفاعل قوى نووية قيد التشغيل على نطاق العالم، يبلغ إجمالي قدرتها على توليد الكهرباء ٣٩٢,١ غيغاواط (كهربائي)[١] (الجدول ألف-١). والمفاعلات قيد التشغيل منها ٨٣٪ مفاعلات مهدَّأة ومبرَّدة بالماء الخفيف؛ و١١٪ مفاعلات مهدَّأة ومبرَّدة بالماء الثقيل؛ و٣٪ مفاعلات مبرَّدة بالماء الخفيف ومهدَّأة بالغرافيت؛ و٣٪ مفاعلات مبرَّدة بالغاز (الشكل ألف-٢). منها ثلاثة مفاعلات سريعة مبرَّدة بفلز سائل. وأنتج ٣٧٦ مفاعل ماء خفيف قرابة ٨٩٪ من الكهرباء المولَّدة نووياً.



الشكل ألف-٢ - مفاعلات القوى النووية حسب النوع. (المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة www.iaea.org/pris)

٢١- وفي عام ٢٠١٩، تمَّ ربط ستة مفاعلات ماء مضغوط جديدة بالشبكة: منها مفاعلان في الصين (تاشيان-٢، ١٦٦٠ ميغاواط (كهربائي) وهايانغ-٦، ١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي))، ومفاعل في جمهورية كوريا (شين-كوري-٤، ١٣٤٠ ميغاواط (كهربائي)، وثلاثة في الاتحاد الروسي نوفوفورونيز ٢-٢، ١١١٤ ميغاواط (كهربائي) وأكاديميك لومونوسوف-١، ٣٠ ميغاواط (كهربائي) وأكاديميك لومونوسوف-٢، ٣٠ ميغاواط (كهربائي)، ليصل بذلك إجمالي القدرة المضافة على نطاق العالم خلال العام إلى ٥١٧٤ ميغاواط (كهربائي). وخضع ما مجموعة ١٣ مفاعلاً للإغلاق الدائم، وهي: تشينشان-٢ في تايوان، الصين؛ وفيليبسبرغ-٢ في ألمانيا؛ وغينكاي-٢ وفوكوشيما دايني ١-٤

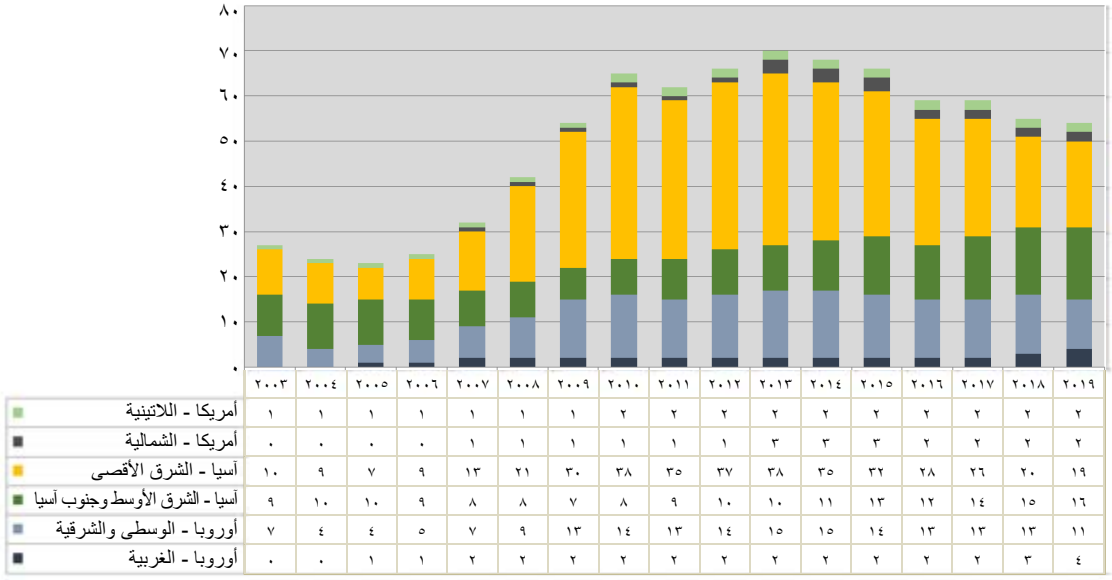
---

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

في اليابان؛ وفولسنغ-١ في جمهورية كوريا؛ وبيليبينو-١ في الاتحاد الروسي؛ ورينغهالس-٢ في السويد؛ ومولبرغ في سويسرا؛ وبيلغريم-١ وثري مايل آيلند-١ في الولايات المتحدة الأمريكية.

٢٢- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩، كان هناك ٥٤ مفاعلاً قيد التشييد. وبدأ تشييد المفاعل جانغجو-١ وتايبينغلينغ -١ في الصين، وبوشهر-٢ في جمهورية إيران الإسلامية، وكورسك-٢-٢ في الاتحاد الروسي، وهينكلي بوينت ج-١ في المملكة المتحدة. ولا تزال حالات التوسُّع، وكذلك آفاق النمو في الأجلين القريب والطويل، تتركَّز في آسيا (الشكل ألف-٣)، حيث يوجد ٣٥ مفاعلاً قيد التشييد. ويوجد في آسيا أيضاً ٦١ من أصل ٧٤ مفاعلاً جديداً وُصِّلت بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

عدد المفاعلات قيد التشييد حسب المنطقة



	٢٠٠٣	٢٠٠٤	٢٠٠٥	٢٠٠٦	٢٠٠٧	٢٠٠٨	٢٠٠٩	٢٠١٠	٢٠١١	٢٠١٢	٢٠١٣	٢٠١٤	٢٠١٥	٢٠١٦	٢٠١٧	٢٠١٨	٢٠١٩
أمريكا - اللاتينية	١	١	١	١	١	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢
أمريكا - الشمالية	٠	٠	٠	٠	١	١	١	١	١	١	٣	٣	٣	٢	٢	٢	٢
آسيا - الشرق الأقصى	١٠	٩	٧	٩	١٣	٢١	٣٠	٣٨	٣٥	٣٧	٣٨	٣٥	٣٢	٢٨	٢٦	٢٠	١٩
آسيا - الشرق الأوسط وجنوب آسيا	٩	١٠	١٠	٩	٨	٨	٧	٨	٩	١٠	١٠	١١	١٣	١٢	١٤	١٥	١٦
أوروبا - الوسطى والشرقية	٧	٤	٤	٥	٧	٩	١٣	١٤	١٣	١٤	١٥	١٥	١٤	١٣	١٣	١٣	١١
أوروبا - الغربية	٠	٠	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٣	٤

الشكل ألف-٣- عدد المفاعلات قيد التشييد حسب المنطقة.
(المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة www.iaea.org/pris)

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد في العالم (حتى ٣١ كانون الثاني/يناير ٢٠١٩)[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٩		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٩	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	% من المجموع	الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٨	٢٨٤٣٧	٤	٤٥٢٥	١٩٥,٥	١٩,٧	١٣٣٤	٥
الأرجنتين	٣	١٦٤١	١	٢٥	٧,٩	٥,٩	٨٨	٢
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٠	٢٧,٨	٤٥	٨
إسبانيا	٧	٧١٢١			٥٥,٩	٢١,٤	٣٤٣	١
ألمانيا	٦	٨١١٣					٨٤٦	٧
الإمارات العربية المتحدة			٤	٥٣٨٠				
أوكرانيا	١٥	١٣١٠٧	٢	٢٠٧٠	٧٨,١	٥٣,٩	٥١٨	٦
إيران (جمهورية – الإسلامية)	١	٩١٥	١	٩٧٤	٥,٩	١,٨	٨	٤
باكستان	٥	١٣١٨	٢	٢٠٢٨	٩	٦,٦	٨٢	٥
البرازيل	٢	١٨٨٤	١	١٣٤٠	١٥,٢	٢,٧	٥٧	٣
بلجيكا	٧	٥٩٣٠			٤١,٤	٤٧,٦	٣٠٣	٧
بلغاريا	٢	٢٠٠٦			١٥,٩	٣٧,٥	١٦٧	٣
بنغلاديش			٢	٢١٦٠				
بيلاروس			٢	٢٢٢٠				
تركيا			١	١١١٤	غير متاح	غير متاح		
الجمهورية التشيكية	٦	٣٩٣٢			٢٨,٦	٣٥,٢	١٧٠	١٠
جمهورية كوريا	٢٤	٢٣١٧٢	٤	٥٣٦٠	١٣٨,٨	٢٦,٢	٥٧٢	٢
جنوب أفريقيا	٢	١٨٦٠			١٣,٦	٦,٧	٧٠	٣
رومانيا	٢	١٣٠٠			١٠,٤	١٨,٥	٣٥	١١
سلوفاكيا	٤	١٨١٤	٢	٨٨٠	١٤,٣	٥٣,٩	١٧٢	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٥,٥	٣٧,٠	٣٨	٣
السويد	٧	٧٧٤٠			٦٤,٤	٣٤,٠	٤٦٧	٠
سويسرا	٤	٢٩٦٠			٢٥,٤	٢٣,٩	٢٢٤	١١
الصين	٤٨	٤٥٥١٨	١١	١٠٥٦٤	٣٣٠,١	٤,٩	٣٧٠	١
فرنسا	٥٨	٦٣١٣٠	١	١٦٣٠	٣٨٢,٤	٧٠,٦	٢٢٨٠	٤
فنلندا	٤	٢٧٩٤	١	١٦٠٠	٢٢,٩	٣٤,٧	١٦٣	٤
كازاخستان							٢٥	١٠
كندا	١٩	١٣٥٥٤			٩٤,٩	١٤,٩	٧٦٩	٦
المكسيك	٢	١٥٥٢			١٠,٩	٤,٥	٥٥	١١
المملكة المتحدة	١٥	٨٩٢٣	٢	٣٢٦٠	٥١,٠	١٥,٦	١٦١٩	٧
الهند	٢٢	٦٢٥٥	٧	٤٨٢٤	٤٠,٧	٣,٢	٥٢٦	١١
هنغاريا	٤	١٩٠٢			١٥,٤	٤٩,٢	١٣٨	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٧	٣,١	٧٥	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٦	٩٨١٥٢	٢	٢٢٣٤	٨٠٩,٤	١٩,٧	٤٥٠٥	٨
اليابان	٣٣	٣١٦٧٩	٢	٢٦٥٣	٦٥,٧	٧,٥	١٨٩٩	٦
المجموع[ب، ج، د]:	٤٤٣	٣٩٢٠٩٨	٥٤	٥٧٤٤١	٢٥٨٦,٢		١٨٣٢٩	١٠

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

(ب) إجمالي إمدادات الكهرباء المولدة نووياً في عام ٢٠١٩ لا تشمل البيانات المتعلقة بسبع وحدات مفاعلات ألمانية حيث إن المعلومات المتعلقة بهذه الوحدات لم تُقدَّم حتى وقت النشر.

(ج) مجموع الأرقام هذا يتضمَّن البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين: ٤ وحدات، ٣٨٤٤ ميغاواط(كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط(كهربائي) قيد التشييد.

(د) يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً و٨ شهور)، وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ أشهر)، وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ شهور)، والمحطات المغلقة والعاملة في تايوان، الصين (٢٢٤ عاماً وشهر واحد).

ألف-١-١- البلدان المشغِّلة

٢٣- في نهاية عام ٢٠١٩، كان أكثر من ٦٦٪ من مفاعلات القوى النووية العاملة البالغ عددها ٤٤٣ مفاعلاً، والتي تمثّل ٢٥٦,٣ غيغاواط (كهربائي) من القدرة الصافية، قيد التشغيل لأكثر من ٣٠ عاماً. ومثّلت مفاعلات القوى النووية العاملة في الخدمة لأكثر من ٤٠ عاماً ١٧٪ من القدرة العالمية. ويجري تنفيذ برامج معنية بالتشغيل الطويل الأجل وبإدارة التقادم فيما يخص عدداً متزايداً من محطات القوى النووية.

في عام ٢٠١٩، تمَّ استخدام ما مجموعه ٧١ مفاعل قوى نووية (١٤ في آسيا و٥٧ في أوروبا) على نطاق العالم لتوليد ٢١٤٦,٧٢ جيجاوات-ساعة من المعادِل الكهربائي للحرارة لدعم التطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية. ومن بين هذه المفاعلات، دعم ١٠ مفاعلات منها تحلية المياه (أنتجت ٤٨,٠١ جيجاوات-ساعة)، و٥٦ مفاعلاً منها تدفئة الأحياء السكنية (١٨٧٠,٦ جيجاوات-ساعة) و٣٢ منها التطبيقات الحرارية للمعالجة الصناعية (١٢٤٨,٠١ جيجاوات-ساعة).

٢٤- وهناك مفاعلان سريعان قيد التشغيل في الاتحاد الروسي. ووفّر المفاعل بيلويارسك ٣، بقدرة صافية ٥٦٠ ميغاواط (كهربائي) ١٤٠ ٧٧٧ جيجاوات-ساعة من الكهرباء منذ ربطه بالشبكة في عام ١٩٨٠. فيما وفّر المفاعل بيلويارسك ٤، بقدرة صافية ٨٢٠ ميغاواط (كهربائي) ١٣ ٠٦٦ جيجاوات-ساعة من الكهرباء منذ بدء تشغيله تجارياً في عام ٢٠١٦.

٢٥- وفي إفريقيا، بدأت شركة إسكوم بترميم مفاعلات كويبيرغ التابعة لها في جنوب إفريقيا، بهدف إطالة أعمارها التشغيلية لمدة ٢٠ عاماً على أقلّ تقدير.

٢٦- وفي آسيا، بدأت الصين باستخدام مفاعِلَيْن من نوع AP1000 تمَّ إدخالها الخدمة مؤخراً لأغراض التوليد المشترك. وفي تايوان، الصين، تمَّ إقرار تعديل يلغي شرطاً بأن تتوقف جميع محطات القوى النووية عن العمل في عام ٢٠٢٥، استيفاء لنتائج استفتاء أجري في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨. وفي الهند، أُعيد تشغيل محطة كاكرابار للقوى الذرية بعد استبدال قناة التبريد وأنابيب التغذية.

٢٧- ويظلُّ تركيز اليابان على استصلاح موقع محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية، وكذلك على إعادة تشغيل محطات القوى النووية الخاملة. وأُعيدَ تشغيل تسعة مفاعلات (جميعها مفاعلات ماء مضغوط) وذلك منذ إغلاقها في أعقاب حادث فوكوشيما دايتشي. ومع إيلاء الأولوية للأمان، تتوخى الخطة الاستراتيجية للطاقة (٢٠١٨) أن تكون الطاقة النووية مصدر قوى أساسي ومهم في تحقيق "خليط الطاقة الأمثل" بحلول عام ٢٠٣٠ وخياراً لإزالة الكربون بحلول عام ٢٠٥٠.

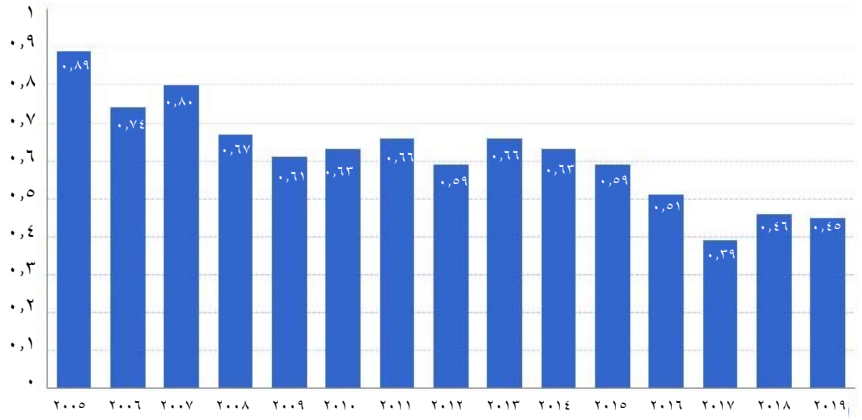
٢٨- وفي أوروبا، أجّلت فرنسا لمدة ١٠ سنوات التخفيض المعتزَم لأسطولها من القوى النووية وبدأت أعمال الترقية والصيانة في مفاعل تريكاستان-١ الذي تبلغ قدرته ٩٠٠ ميغاواط (كهربائي)، والذي يمكن أن يتيح تشغيل الوحدة لمدة عقد آخر. غير أنَّ خطة الطاقة متعددة السنوات المنشورة في مطلع عام ٢٠١٩ تحدّد عام ٢٠٣٥ ليكون موعداً نهائياً لتقليص حصة الطاقة النووية من مزيج الكهرباء في البلاد إلى ٥٠٪. وللوصول إلى هذا الهدف، سيتمُّ إغلاق ١٤ مفاعلاً وهو ما يخفض القدرة الإجمالية بمقدار ١٢٦٠٠ ميغاواط (كهربائي). وفي بلجيكا، استُكملت

أعمال الإصلاح الخرسانية في محطة دويل-٣، فيما يتواصل برنامج تحديث في محطة تشرنافودا للقوى النووية في رومانيا. وفي السويد، تمَّت الموافقة على تمديد عمر تشغيل الوحدتين ١ و٢ من محطة فورسمارك للقوى النووية، فيما تواصَل في أوكرانيا مشروع لتمديد عمل تشغيل مفاعل أوكرانيا-٣ لمدة ١٠ سنوات إضافية.

٢٩- وفي أمريكا اللاتينية، خُفّضت قدرة محطة إمبالسي للقوى النووية في الأرجنتين بنسبة ١,٣٣٪، فيما تمَّ تمديد عمر تشغيل المحطة لمدة ٣٠ عاماً.

٣٠- وفي أمريكا الشمالية، قامت كندا باستثمارات كبيرة في مشاريع تمديد عمر تشغيل محطات القوى النووية لديها، ومن المقرر إعادة تشغيل محطة دارلينغتون-٢ في عام ٢٠٢٠. وأما في الولايات المتحدة الأمريكية فقد تمَّ تمديد عمر تشغيل أغلب المفاعلات القائمة لمدة ٦٠ عاماً. ووافقت الهيئة الرقابية النووية على طلب شركة "فلوريدا باور أند لايت" لتمديد تشغيل الوحدتين ٣ و٤ من محطة توركي بوينت لتوليد القوى النووية لمدة ٢٠ عاماً إضافية. وهذه هي المرة الأولى التي تصدر فيها الهيئة الرقابية النووية تراخيص تجدّد التصريح بتشغيل مفاعلات من ٦٠ إلى ٨٠ سنة.

٣١- وقد استمرت موثوقية محطات القوى النووية في التحسُّن مع مرور الوقت. ويبيّن الشكل ألف-٤ عدد حالات الإيقاف أو الإغلاق اليدوي أو التلقائي غير المخطط لكل ٧ ٠٠٠ ساعة (زهاء عام) من التشغيل للوحدة الواحدة.



الشكل ألف-٤- متوسط معدّل حالات الإيقاف غير المخطط له: عدد حالات الإيقاف التلقائي واليدوي غير المخطط له التي تقع في كل ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل للوحدة الواحدة. (المصدر: نظام معلومات مفاعلات القوى التابع للوكالة www.iaea.org/pris)

ألف-١-٢- مشاريع جديدة ضمن برامج القوى النووية القائمة

٣٢- من بين الدول الأعضاء المشغِّلة البالغ عددها ٣٠ دولة عضواً، هناك ١٥ دولة عضواً تتَّخذ خطوات فعلية لتشييد وحدات إضافية لتوليد القوى النووية. ويمثّل ما سبق ٤٥ مشروع مفاعل بقدرة صافية إجمالية ٥٦٧ ٤٦ ميغاواط (كهربائي). ويبيّن الشكل ألف-٥ هذه البلدان حسب عدد الوحدات التي يشيّدها كلّ بلد وقدرتها الصافية الإجمالية.

الشكل ألف-٥- تقوم خمس عشرة دولة عضواً تملك برامج قوى نووية حالية ببناء وحدات قوى نووية إضافية

٣٣- وفي عام ٢٠١٩، ربطت الصين مفاعلاً ثانياً من نوع المفاعلات الأوروبية التي تعمل بالماء المضغوط (تاشيان-٢) وكذلك مفاعل من نوع مفاعلات الماء المضغوط من طراز ACPR-1000 (هايانغ-٦)، ما رفع إجمالي عدد وحدات القوى النووية العاملة إلى ٤٨ وحدة. وجنباً إلى جنب مع أربعة مفاعلات عاملة في تايوان، بلغ إجمالي قدرة القوى النووية للصين ٤٩٣٦٢ ميغاواط (كهربائي). وفي هذه الأثناء، أعلنت فنلندا وفرنسا عن خُطط لربط مفاعلاتها من طراز المفاعلات الأوروبية التي تعمل بالماء المضغوط بالشبكة في تموز/يوليه ٢٠٢٠ وفي نهاية عام ٢٠٢٢ على التوالي. وفي المملكة المتحدة، صُبَّت أول خرسانة لأساسات محطة هينكلي بوينت ج للقوى النووية.

٣٤- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٩، تلقّت شركة روزإينيرغوأتوم في الاتحاد الروسي رخصة لتشغيل محطة أكاديميك لومونوسوف للقوى النووية العائمة حتى عام ٢٠٢٩، وفي كانون الأول/ديسمبر تمَّ ربط المفاعلات بالشبكة. (انظر الفقرة ١٥٢ لمزيد من المعلومات).

٣٥- والهند، التي تملك ٢٢ مفاعلاً عاملاً وسبعة مفاعلات قيد التشييد، من المتوقع أن تدخل حيز التشغيل ٢١ مفاعل قوى نووية جديداً، بقدرة توليد مجتمعة ١٥ ٧٠٠ ميغاواط (كهربائي)، وذلك بحلول عام ٢٠٣١.

ألف-١-٣- البلدان المستجدَّة

٣٦- من بين ٢٨ دولة عضواً أعربت عن اهتمامها بالقوى النووية، بدأت ١٨ دولة منها دراسات عن البنية الأساسية للقوى النووية، واتخذت أربع دول منها بالفعل قراراً في هذا الشأن وتعكف على بناء القدرات المؤسسية وتطوير البنية الأساسية اللازمة استعداداً للتعاقد على محطة قوى نووية وتمويلها، ووقعت دولة منها (مصر) عقداً وتستعد للتشييد، وبدأت دولتان منها (بنغلادش وتركيا) أعمال التشييد، فيما أوشكت دولتان أخريان منها (بيلاروس والإمارات) على الانتهاء من بناء أول محطة قوى نووية.

٣٧- وفي الإمارات العربية المتحدة، يكاد يكتمل تشييد المفاعلات الأربعة لمحطة براكة للقوى النووية، وبات إصدار رخصة التشغيل لأول وحدتين وشيكاً. ومن المقرَّر تحميل وقود الوحدة ١ في الربع الأول من ٢٠٢٠، وفي الوحدة ٢ بعد عام من ذلك. وتمَّ إيفاد بعثة متابعة لاستعراض إجراءات التأهب للطوارئ في أيلول/سبتمبر ٢٠١٩.

٣٨- وفي بيلاروس، جارٍ تشييد أول محطة قوى نووية في أوستروفيتس. ومن المقرَّر تحميل وقود الوحدة الأولى خلال الربع الأول ٢٠٢٠، رهناً بالحصول على الموافقة الرقابية، فيما من المقرَّر إدخال الوحدة الثانية الخدمة في عام ٢٠٢١. وكانت بيلاروس قد استضافت في آب/أغسطس ٢٠١٩ بعثة الخدمة الاستشارية التابعة للوكالة الخاصة بنظم الدولة لحصر ومراقبة المواد النووية وبعثة تمهيدية لاستعراض أمان التشغيل، وطلبت إيفاد المرحلة ٣ من بعثة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في شباط/فبراير ٢٠٢٠.

٣٩- وفي بنغلاديش، جارٍ تشييد محطة روبور للقوى النووية، ومن المتوقع إدخال الوحدتين ١ و٢ منها في الخدمة في عامَي ٢٠٢٣ و٢٠٢٤ على التوالي. ويمضي العمل قُدُماً في مسح موقع لمشروع ثانٍ لمحطة قوى نووية. ومن المتوقع إيفاد بعثة خدمة الاستعراضات الرقابية المتكاملة في عام ٢٠٢٠. ومن المتوقع إيفاد بعثات الخدمة الاستشارية الدولية المعنية بالحماية المادية والخدمة الاستشارية المعنية بالنظام الحكومي لحصر ومراقبة المواد النووية في عام ٢٠٢١.

٤٠- وفي تركيا، تواصلت أعمال تشييد أول وحدة من محطة أكويو للقوى النووية، ومن المتوقع أن تدخل في الخدمة في عام ٢٠٢٣، فيما صدرت رخصة تشييد للوحدة الثانية. ومن المتوقع إيفاد بعثة الخدمة الاستشارية الدولية المعنية بالحماية المادية في عام ٢٠٢٠ ومن المتوقع إيفاد بعثة خدمة الاستعراضات الرقابية المتكاملة في عام ٢٠٢١.

٤١- وفي مصر، وفي أعقاب الموافقة على رخصة الموقع لمحطة قوى نووية تتألف من أربع وحدات في الضبعة في آذار/مارس ٢٠١٩، من المقرر بدء أعمال التشييد في منتصف عام ٢٠٢٠، رهناً بالحصول على الموافقة الرقابية. ومن المتوقع استكمال إدخال الوحدة الأولى في الخدمة في عام ٢٠٢٦ والوحدات الأخرى بحلول عام ٢٠٢٨. وكانت مصر قد استضافت بعثة لخدمة تصميم المواقع والأحداث الخارجية في كانون الثاني/يناير ٢٠١٩، والمرحلة الثانية من خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في تشرين الأول/أكتوبر- تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩.

٤٢- وواصلت المملكة العربية السعودية الأعمال التحضيرية لتشييد مفاعل من فئة المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية وتشييد محطتين كبيرتين من محطات القوى النووية بموازاة ذلك. وجارٍ الآن توصيف الموقعين الخاصين بمحطَتي القوى النووية الكبيرتين. ومن المتوقع أن يبدأ إنشاء المفاعل المتقدم النمطي المتكامل النظم (المفاعل SMART) في عام ٢٠٢٣، فيما من المتوقع أن يدخل الخدمة في عام ٢٠٢٨.

٤٣- وواصل الأردن إجراء تقييمات التكنولوجيا لاختيار المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية المناسبة. وسيتم إدخال محطة قوى بقدرة ٢٠٠–٤٠٠ ميغاواط (كهربائي) في الخدمة، استناداً إلى تكنولوجيا المفاعلات النمطية الصغيرة المحددة بحلول عام ٢٠٣٠. ومن المتوقع تشييد محطة قوى نووية كبيرة في الأجل الأطول (ما بعد عام ٢٠٣٠).

٤٤- وتعتزم نيجيريا بناء أربع وحدات مفاعلات، ومن المتوقع رسمياً أن تدخل الوحدة الأولى مرحلة التشغيل في عام ٢٠٢٧. وقد يؤدي قرار استئناف دراسة الجدوى التمهيدية قبل استكمال دراسة الجدوى إلى المزيد من التأخير في الموعد المستهدف.

٤٥- وفي بولندا، وعقب مشاورات عامة، من المتوقع اتخاذ قرار بالمُضيّ قُدُماً في برنامج القوى النووية وبناء محطة قوى نووية في عام ٢٠٢٠. ومن المتوقع أن تدخل الوحدة الأولى الخدمة في عام ٢٠٢٣.

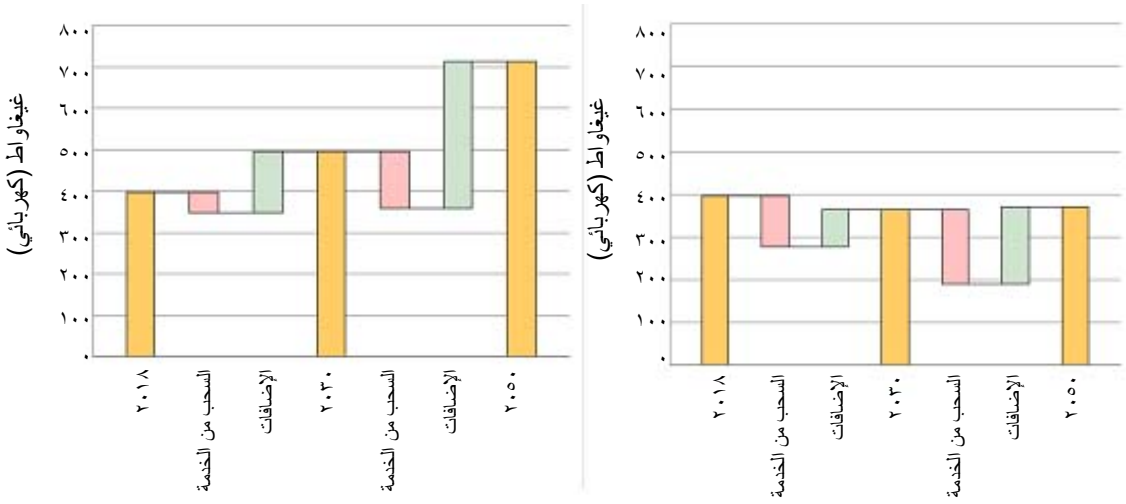
٤٦- ولا تزال الدول الأعضاء تستفيد من المساعدة التي تقدّمها الوكالة في فهم الالتزامات والواجبات المرتبطة بإرساء البنية الأساسية اللازمة لبرنامج قوى نووية، استناداً إلى نهج المعالم المرحلية البارزة، بما يدعم إنشاء برامج مأمونة وآمنة ومستدامة في مجال القوى النووية.

في عام ٢٠١٩، تمَّ تحديث خطط العمل المتكاملة والنماذج القُطرية للبنية الأساسية النووية لثماني دول أعضاء من خلال مشاريع تعاون تقني وطنية في كلّ من: المملكة العربية السعودية (كانون الثاني/يناير)، وتركيا (كانون الثاني/يناير)، والأردن (شباط/فبراير)، وبيلاروس (آذار/مارس)، وبولندا (آذار/مارس)، والفلبين (تشرين الثاني/نوفمبر)، وكينيا (كانون الأول/ديسمبر)، وبنغلاديش (كانون الأول/ديسمبر). وبإنجاز المرحلة الثانية من بعثة خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية إلى مصر والمرحلة الأولى من بعثة خدمة المتابعة في الإطار نفسه إلى غانا في ٢٠١٩، وصل عدد بعثات خدمة الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية الموفَدة منذ عام ٢٠٠٩ إلى ٢٩ بعثة تم إيفادها إلى ٢١ دولة عضواً. وعلاوة على ذلك، استفاد قرابة ٤٩٠ مشاركاً من ٥٢ بلداً من البلدان المستهلة لبرامج نووية وتلك الموسّعة لمثل هذه البرامج من المشاركة في ٣١ نشاطاً تدريبياً أقاليمياً في إطار مشروع التعاون التقني INT2018، "دعم اتخاذ القرارات على نحو مستنير وبناء القدرات اللازمة لبدء وتنفيذ برامج القوى النووية" (الشكل ألف-٦).

الشكل ألف-٦ - دعم الوكالة المتكامل للبلدان المستهلة لبرامج قوى نووية جديدة يُساعد في إرساء الأسس لمحطة قوى نووية أولى من خلال بعثات استعراض النظراء الخاصة بالخبراء، وأنشطة مخصّصة لمعالجة الثغرات المحددة وبناء القدرات.

ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية

٤٧- توقعات الوكالة لعام ٢٠١٩ (الشكل ألف-٧)، التي أُعدَّت بالتشاور مع خبراء إقليميين وتعكس أحدث المعلومات عن السياسات وظروف السوق، تعطينا تقديراً مختلطاً عن المساهمة المستقبلية للقوى النووية في توليد الكهرباء في العالم، وهذا يتوقف جزئياً على ما إذا كان من الممكن إضافة قدرة جديدة كبيرة لتعويض الحالات المحتملة لسحب مفاعلات من الخدمة. وفي إطار التوقُّعات المنخفضة حتى عام ٢٠٣٠، يسجّل صافي القدرة المنشأة على توليد الكهرباء النووية انخفاضاً تدريجياً قبل أن يرتدَّ مجدداً إلى ٣٧١ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠. وفي الحالة المرتفعة، ستزيد القدرة لتبلغ ٤٩٦ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠ و٧١٥ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٥٠. وهذا يمثل زيادة بنسبة ٢٥٪ في القدرة عن المستويات الحالية بحلول عام ٢٠٣٠ وزيادة بنسبة ٨٠٪ بحلول عام ٢٠٥٠. وستبلغ حصة القوى النووية من إجمالي القدرة الكهربائية في العالم قرابة ٦٪ في الحالة المنخفضة وقرابة ١٢٪ في الحالة المرتفعة بحلول منتصف القرن، مقارنة بقرابة ١٠٪ اليوم.



الشكل ألف-٧- التوقعات بشأن القدرات النووية العالمية في الحالة المرتفعة (إلى اليسار) والمنخفضة (إلى اليمين).
(المصدر: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 (التقديرات بشأن الطاقة والكهرباء والقوى النووية للفترة حتى عام ٢٠٥٠)، العدد ١ من سلسلة البيانات المرجعية الصادرة عن الوكالة، ٢٠١٨)

٤٨- ويرجع التفاوت الكبير بين التوقعات إلى حالة عدم اليقين بشأن استبدال العدد الكبير من المفاعلات التي من المقرَّر إحالتها إلى التقاعد قبيل عام ٢٠٣٠ وبعده، ولا سيما في أمريكا الشمالية وأوروبا. ومع ذلك، تنطوي توقعات ٢٠١٩ على عدد أقلّ من أوجه عدم التيقن مقارنة بالسنوات السابقة، ومردُّ ذلك إلى ما صدر مؤخراً من إعلانات عن مستقبل الأسطول الراهن في بعض المناطق وخُطط التوسُّع طويلة الأجل. وقد تكون ثمة حاجة إلى قدرة كبيرة جديدة لتعويض الحالات المحتملة لسحب مفاعلات من الخدمة بسبب عمرها، أو التنافسية، أو عوامل أخرى.

٤٩- ويمكن للطاقة النووية، جنباً إلى جنب مع غيرها من التكنولوجيات منخفضة الكربون، تلبية الطلب المتزايد على الكهرباء والطاقة غير الكهربائية حتى عام ٢٠٥٠ كجزء من التحوُّل نحو الطاقة المستدامة. ويحدّد ما مجموعه ٩٠٪ من السيناريوهات الصارمة للتخفيف من آثار تغيُّر المناخ توليد الطاقة النووية في عام ٢٠٥٠ عند مستويات تفوق أحدث التوقعات المنخفضة الصادرة عن الوكالة، بينما يتجاوز ٦٠٪ منها التوقعات المرتفعة الصادرة عن الوكالة.

> وتتوخّى سيناريوهات الطاقة العالمية الصادرة عن الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغيُّر المناخ والوكالة الدولية للطاقة، وكذلك عن الحكومات والصناعة والمنظمات غير الحكومية، تزايُد دور القوى النووية في التخفيف من حدة تغيُّر المناخ من أجل تحقيق أهداف اتفاق باريس. وقد تجلّت هذه الحقيقة أيضاً في استنتاجات المؤتمر الدولي بشأن تغيُّر المناخ ودور القوى النووية الذي نظّمته الوكالة في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩، بالتعاون مع وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي.

٥٠- ومقارنةً بالسياسات واتجاهات السوق الراهنة التي تجسّدها توقعات الوكالة، والأهداف المتواضعة للتخفيف من آثار تغيُّر المناخ في المساهمات المحدَّدة وطنياً والمقدَّمة من البلدان بموجب اتفاق باريس، توضّح السيناريوهات الحاجة إلى بذل جهود إضافية لإطلاق العنان للإمكانات الهائلة للقوى النووية في التخفيف من آثار تغيُّر المناخ من أجل تحقيق الأهداف العالمية الطموحة المتعلقة بالمناخ.

ألف-٣- دورة الوقود

ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية

موارد اليورانيوم وإنتاجه

> في عام ٢٠١٩، ظلّت أسعار التسليم الفوري لليورانيوم منخفضة، وبقيت عموماً في النطاق بين ٥٢ و٥٧ دولاراً أمريكياً للكيلوغرام. لم تتغير أسعار التسليم الفوري لليورانيوم منذ عام ٢٠١٨ (تراوحت من ٤٧ دولاراً أمريكياً للكيلوغرام و٥٩ دولاراً أمريكياً للكيلوغرام) وتراجعت منذ عام ٢٠١٣، ما تسبب في تراجع كبير في برامج استكشاف اليورانيوم.

٥١- بقيت مشاريع اليورانيوم الجديدة التي هي في مرحلة التخطيط أو التطوير معلّقة، وظلّ عدد من المناجم التي كانت عاملة في السابق ومرافق المعالجة قيد الرعاية والصيانة بسبب انخفاض أسعار البيع الفوري لليورانيوم.

ومن المتوقع أن يماثل الإنتاج العالمي لليورانيوم من مناجم اليورانيوم العاملة في عام ٢٠١٩ الإنتاج في عام ٢٠١٨، والذي بلغ ٥٣٤٩٨ طناً من اليورانيوم. وهو ما يمثل انخفاضاً بنسبة ١٥٪ في الإنتاج العالمي لليورانيوم منذ عام ٢٠١٦.

٥٢- وحافظت كازاخستان على تصدُّر قائمة أكبر منتجي اليورانيوم في العالم. وفي عام ٢٠١٩، كان ثمة ثمانية مناجم لليورانيوم قيد التشغيل، تستخدم جميعها الاسترداد الموقعي، ومن المتوقع أن يتراوح إجمالي الإنتاج المجمّع بين ٢٢٠٠٠ و٢٣٠٠٠ طن يورانيوم (أكثر بقليل من مستويات الإنتاج في عام ٢٠١٨ البالغة ٢١٧٠٥ طن يورانيوم). وفي كندا، ثاني أكبر المنتجين، كان منجم سيغار ليك ووحدة التجهيز ماكلين ليك المرتبطة به هُما مُنتجا اليورانيوم العاملان الوحيدان في عام ٢٠١٩، مع توقّع إنتاج قرابة ٧٠٠٠ طن يورانيوم، فيما ظلّ منجمان ووحدتا تجهيز في حالة رعاية وصيانة غير محدَّدة الأجل بسبب انخفاض أسعار اليورانيوم. وأما في أستراليا فقد قلَّص منجم رينجر لليورانيوم إنتاجه في عام ٢٠١٩ (ومن المتوقع أن يتراوح بين ١٤٠٠ و١٨٠٠ طن يورانيوم معالَج من المخزونات)، بينما يمضي قُدُماً نحو الإخراج من الخدمة والاستصلاح. فيما أنتج منجم أولمبيك دام للنحاس اليورانيومَ (قرابة ٣٠٠٠ طن يوارنيوم في عام ٢٠١٩) كأحد منتجاته الثانوية. ومن المتوقع أن تكون عملية الاسترداد الموقعي في منجم فور مايل قد أنتجت قرابة ١٢٠٠ طن يورانيوم في عام ٢٠١٩. ويتراوح إجمالي إنتاج اليورانيوم المتوقع في أستراليا لعام ٢٠١٩ بين ٥٦٠٠ و٥٨٠٠ طن يورانيوم (أقلّ بقليل من إنتاج ٢٠١٨، فقد أنتجت أستراليا حينها ٦٥١٧ طن يوارنيوم، ومردّ ذلك إلى انخفاض الإنتاج في منجم رينجر).

٥٣- وفي إفريقيا، ثمة مناجم يورانيوم عاملة في ناميبيا والنيجر. ففي ناميبيا، هناك أربعة مناجم يورانيوم مطوَّرة، إثنان منها قيد التشغيل (روسينغ وهوساب، مع توقُّع أن تبلغ كمية الإنتاج ٢٢٠٠ طن يورانيوم و٣٠٢٨ طن يورانيوم في عام ٢٠١٩، على التوالي)، وإثنان منها في وضعية الرعاية والصيانة بسبب أسعار اليوارنيوم المتدنية (لانغر هاينريتش وتريكوبجي). ولكن صدرت دراسة جدوى تمهيدية في أواخر عام ٢٠١٩ لإعادة تشغيل منجم لانغر هاينريتش لليورانيوم في غضون ١٢ شهراً. وفي النيجر منجما يوارانيوم قيد التشغيل هما: سومير وكوميناك. ومن المتوقع أن تكون معدلات إنتاج هذين المنجمين في عام ٢٠١٩ كما كانت عليه في عام ٢٠١٨ (١٧٦٩ طن يورانيوم لمنجم سومير و١١١٥ طن يوارنيوم لمنجم كوميناك). وبشكل عام، من المتوقع أن يصل إنتاج اليورانيوم في أفريقيا إلى ٨١٠٠ طن يوارنيوم في عام ٢٠١٩.

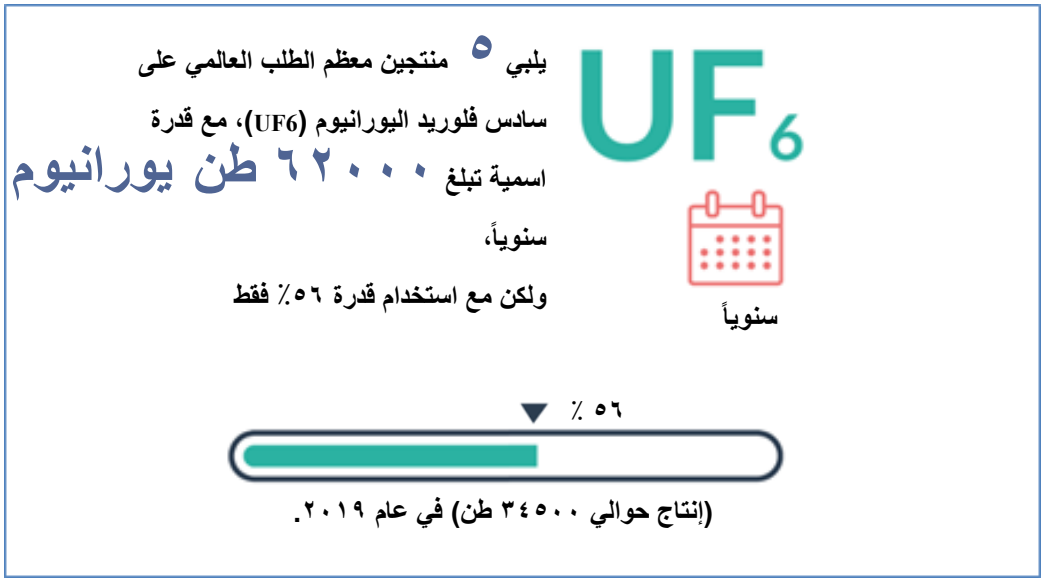
٥٤- وتتمثل السياسة الوطنية في ضمان وفرة إمدادات موارد اليورانيوم من أجل التنمية المستدامة للقوى النووية في الأمدَين المتوسط والطويل. ولدى الصين حالياً سبعة مناجم يورانيوم محلية عاملة يبلغ إجمالي إنتاجها السنوي ١٦٥٠ طناً من اليورانيوم. وبالإضافة إلى ذلك، تشارك الصين في العديد من المشاريع الأجنبية لتطوير المعادن، لا سيما في كازاخستان وناميبيا والنيجر.

٥٥- وتواصلت دراسات الجدوى لاسترداد اليورانيوم في وسط الأردن، وتم تشغيل محطة تجريبية في موقع في وسط الأردن (تقوم على تكنولوجيا النض التكويمي) في عام ٢٠٢٠. وخضع للتقييم كذلك مشروع محطة صُنع ركازة اليورانيوم في سالامانكا بإسبانيا.

التحويل والإثراء

٥٦- والقدرة الحالية على تحويل اليورانيوم وإثرائه أكثر من كافية لتلبية الطلب العالمي، مع تجزُّؤ السوق إلى شرائح مختلفة وتركُّز الإنتاج في يد عدد قليل من الموردين. وفي الوقت الراهن، يلبي خمسة منتجين معظم الطلب العالمي على سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6)، مع قدرة اسمية تبلغ ٦٢٠٠٠ طن يورانيوم سنوياً، ولكن مع استخدام

قدرة ٥٦٪ فقط (إنتاج حوالي ٣٤٥٠٠ طن) في عام ٢٠١٩ (الشـــكل ألف-٨). وفي المقام الأول، يأتي الإمداد العالمي من اليورانيوم المثرى من محطات إثراء تجارية بالإضـــافة إلى الإمدادات الثانوية، مثل اليورانيوم المثرى المنتَج ســابقاً أو إعادة إثراء المخلفات. وتتركز معظم قدرة الإثراء في أوروبا والاتحاد الروســي (أورانو ويورينكو والشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم")، على الرغم من أن الشركة الوطنية النووية الصينية آخذة في التطور كمزوّد محلي بخدمات الإثراء في الصين وتعتزم تقديم مثل هذه الخدمات دولياً في المستقبل.



الشكل ألف-٨- القدرة العالمية على التحويل والإثراء في عام ٢٠١٩ .

صنع الوقود

٥٧- في شـــباط/فبراير ٢٠١٩، أعلنت محطة كوزلودوي للقوى النووية في بلغاريا أنها قد اســـتأجرت خدمات الفرع السويدي من شركة ويستينغهاوس إيليكتريك لدراسة خيارات ترخيص وإدماج الوقود المحسَّن لوحدتين من المحطة (٥ و٦) بموجب عقد قيمته ٣,١ مليون ليف بلغاري (١,٨ مليون دولار أمريكي)، من أجل الامتثال لاستراتيجية وكالة امدادات اليوراتوم بشأن تنويع إمدادات الوقود النووي. وكانت شركة الكهرباء الوطنية التشيكية ČEZ قد أعلنت في نيسان/أبريل ٢٠١٩ أنها ستقوم بتحميل دفعة تجريبية تتألف من ست مجمعات وقود، صنعتها فرع شركة ويستينغهاوس في السويد، في الوحدة ١ من محطة تيميلين للقوى النووية. وشركة الوقود الروسية TVEL (جزء من روزاتوم) هي المورد الرئيســي للوقود النووي لمحطة كوزلودوي للقوى النووية ومحطة تيميلين للقوى النووية وتوفر وقوداً متقدماً وأطول أمداً (من طراز TVSA-12 وTVSA-T.mod.2) إلى محطتي القوى النوويتين هاتين على أساس منتظم.

٥٨- وفي شباط/فبراير ٢٠١٩، أعلنت شركة ويستينغهاوس إيليكتريك عن إطلاق جيلها الجديد من مجمعات الوقود المصمَّمة لمفاعلات الماء المغلي (الاسم التجاري: Triton11، الاسم التقني: 11x11 BWR)، لتخفيض تكلفة دورة الوقود بشكل كبير ولزيادة موثوقية وأمان التشغيل. وفي البداية سيتمّ اختبار المجمعات الجديدة في الوحدتين ١ و٢ من محطة أولكيلوتو للقوى النووية في فنلندا، حيث تضـــمّ تلك المحطة مفاعلات ماء مغلي ABB-III تبلغ قدرتها ٩٠٠ ميغاواط (كهربائي).

٥٩- وفي آذار/مارس ٢٠١٩، أكملت الشركة الوطنية النووية الصينية اختبار التشعيع طويل الأجل لمجمع وقود نووي محلي لمفاعلات الماء المغلي وبدأت الإنتاج المكثف لمجمعات الوقود China Fuel 3 (المصنعة في المحطة الرئيسية التابعة للشركة لصنع الوقود النووي الخاص بمفاعلات الماء المغلي في ييبين، إقليم سيشوان، الصين، باستخدام أقراص الوقود المأخوذة من محطة أولبا التعدينية في كازاخستان) وذلك لمفاعل الماء المغلي هوالنوغ وَنْ (HPR1000) المصمَّم محلياً.

٦٠- وتم تحميل مجمعي وقود تجريبيين مع أربع مجموعات مختلفة من أقراص الوقود المتقدمة (مصنوعة من ثاني أكسيد اليورانيوم وسبائك اليورانيوم والموليبدينوم مع زيادة الكثافة والتوصيل الحراري) ومواد كسوة (مصنوعة من الزركونيوم المطلي بالكروم أو سبائك الكروم والنيكل) من تصنيع شركة الوقود TVEL، في مفاعل البحوث MIR في معهد بحوث المفاعلات الذرية في ديميتروفغراد بالاتحاد الروسي، في كانون الثاني/يناير ٢٠١٩ وجرى اختبارهما خلال عام ٢٠١٩.

٦١- وفي نيسان/أبريل ٢٠١٩، أعلنت شركتا "ساذرن نيوكلير" و"فراماتوم" عن تحميل أول مجمعات وقود متحمّلة للحوادث ومحتوية على أقراص الوقود معزَّزة بأكسيد الكروم الثلاثي وأغلفة سبائك الزركونيوم المطلية بالكروم إلى الوحدة ٢ من محطة فوغتل في ولاية جورجيا، الولايات المتحدة الأمريكية، خلال فترة قطع عملية إعادة التزويد بالوقود في الربيع. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩، أعلنت شركة BWX Technologies أنها تعكف على إعادة تشغيل خطها القائم لإنتاج الوقود النظيري الثلاثي الهيكل لأوكسي كربيد اليورانيوم وذلك في مرفقها في لينتشبيرغ في ولاية فرجينيا بالولايات المتحدة الأمريكية.

٦٢- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٩، وقعت شركة TVEL عقداً مع وزارة الطاقة الذرية الهندية لتوريد أقراص وقود اليورانيوم للمفاعلات العاملة بالماء المغلي التابعة لمحطة تارابور للقوى الذرية (سُلِّمَ ٥٠ طناً من أقراص الوقود بحلول تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩). وفي تموز/يوليه ٢٠١٩، وقّعت شركة TVEL عقداً مع شركة سونينغ للقوى النووية وهيئة صناعة الطاقة النووية الصينية، التابعتين للشركة الوطنية النووية الصينية، لتوريد وقود نووي للوحدتين ٧ و٨ من محطة تيان وان للقوى النووية في إقليم جيانغسو بالصين. كما سلَّمت شركة TVEL في تموز/يوليه ٢٠١٩ دفعة من الوقود النووي إلى المفاعل التجريبي الصيني السريع. وفي آب/أغسطس ٢٠١٩، تمَّ تعيين شركة TVEL كالمورد الوحيد المصدِّر للوقود النووي لوحدَتي محطة روبور للقوى النووية في بنغلاديش وذلك طوال دورة حياتهما.

٦٣- واستُلِمت الدفعة الصناعية الأولى من وقود الأكسيد المختلط المكون من ١٨ مجمعاً للوقود صُنِعَت في المجمَّع التعديني والكيميائي في زيليزنوغورسك بالاتحاد الروسي، وجرى تحميلها في المفاعل السريع BN-800 في محطة بيلويارسك للقوى النووية في آب/أغسطس ٢٠١٩. وفي الاتحاد الروسي، كان يجري أيضاً اختبار المفاعل لوقود الخليط المعاد تنشيطه (خليط معاد معالجته من اليورانيوم والبلوتونيوم) من أجل مفاعلات القوى المُبَرَّد والمُهَدّأة بالماء ولوقود خليط نيتريد اليورانيوم ونيتريد البلوتونيوم للمفاعلات السريعة.

٦٤- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، وقّعت الشركة الوطنية لتوليد الطاقة النووية "اينرغوأتوم" في أوكرانيا وشركة ويستينغهاوس اتفاقاً أولياً تقوم شركة ويستينغهاوس بموجبه بتصنيع الوقود لمفاعلات VVER-440 في أوكرانيا. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، تمَّ تحميل مجمّعات الاختبارات الأولية لقضبان وقود Encore من شركة ويستينغهاوس، المصنَّعة في مختبر أيداهو الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية والمتألفة من أقراص ADOPT عالية الكثافة (أقراص ثاني أكسيد اليورانيوم من شركة ويستينغهاوس والمغطاة بأكسيد الكروم الثلاثي والألومينا لتحديد الاقتصاد

في الوقود) وأقراص سيليسيد اليورانيوم (المنطوية على فوائد من حيث تحسين الأمان واقتصاديات المحطات) والواقعة ضمن أغلفة سبائك الزركونيوم المطلية بالكروم (لتحسين مقاومة الأكسدة والتآكل) في الوحدة ٢ من محطة بايرون للقوى النووية التابعة لشركة إكسيلون وذلك خلال قطع مقرَّر لعملية إعادة التزويد بالوقود.

ألف-٣-٢- ضمان الإمداد

٦٥- في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، وافق مجلس محافظي الوكالة على إقامة مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. وكانت الوكالة وكازاخستان قد استكملتا في عام ٢٠١٥ وضع الإطار القانوني الأساسي الخاص بإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في موقع محطة أولبا التعدينية في أوست-كامينوغورسك، كازاخستان.

٦٦- وتمَّ إنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء في كازاخستان (الشكل ألف-٩) ودخل طور التشغيل بعدَ أن تمَّ في مرفق تخزين اليورانيوم الضعيف الإثراء الخاص بالوكالة استلام ٣٢ اسطوانة مليئة من طراز 30B في إطار عقد التوريد المبرم مع أورانو سيكل في ١٧ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩. وبالإضافة إلى ذلك، تمَّ استلام ٢٨ اسطوانة مليئة من طراز 30B في إطار عقد التوريد المبرم مع كازاتومبروم في ١٠ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩.

الشكل ألف-٩- مرفق تخزين اليورانيوم الضعيف الإثراء الخاص بالوكالة مع حاويات اليورانيوم الضعيف الإثراء. (الصورة من: وزارة الشئون الخارجية في كازاخستان)

٦٧- ويبيّن استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٢ (الوثيقة GC(56)/INF/3) الآليات الأخرى المعمول بها لضمان الإمداد.

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية

نقل الوقود المستهلَك

٦٨- في الولايات المتحدة الأمريكية، صادقت الهيئة الرقابية النووية في آب/أغسطس ٢٠١٩ على حزمة النقل HI-STAR 100MB من شركة هولتك انترناشونال. والتصميم بمثابة تحسين لطراز سابق لتمكين نقل الوقود بمعدلات حرق أعلى وفترات تبريد أقصر مقارنةً بالطراز السابق. واستؤنفت عمليات نقل الوقود المستهلَك في محطة سان أونوفري للقوى النووية في أيار/مايو ٢٠١٩، بعد تعليق تلك العمليات في آب/أغسطس ٢٠١٨. ووافقت

الهيئة الرقابية النووية على إعادة تشغيل العمليات بعد الانتهاء من تحقيق في حادثة وقعت أثناء وضع حاوية وقود مستهلَك في قبو الخزن.

٦٩- وفي آب/أغسطس، وافقت حكومة بيلاروس رسمياً على استراتيجية التصرف في الوقود المستهلك لمحطة القوى النووية الجديدة في البلاد. وتتضمن الاستراتيجية إرسال الوقود المستهلك من محطة القوى النووية إلى الاتحاد الروسي لإعادة معالجته وإعادة النفايات المشعة للتخلص منها في بيلاروس.

٧٠- وفي الاتحاد الروسي، أُجريت أولى عمليات نقل مجمّعات وقود نووي مستهلَك تالفة من قاعدة ليبسي التقنية العائمة في حوض نيبرا لبناء السفن إلى مورمانسك. وفي نهاية المطاف، سيُرسل الوقود إلى محطة مایاك لإعادة المعالجة كجزء من برنامج يديره المصرف الأوروبي للإنشاء والتعمير.

خزن الوقود المستهلك

٧١- حتى اليوم، تمَّ تفريغ كمية تبلغ ٤٠٠ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة من محطات القوى النووية كوقود نووي مستهلك، وأعيد معالجة قرابة ٣٠٪ منها. وتُخزن الكمية المتبقية إمَّا في أحواض المفاعلات أو في مرافق خزن الوقود النووي المستهلك بعيداً عن المفاعلات والبالغ عددها ١٥١ مرفقاً في ٢٧ بلداً. وفي عام ٢٠١٩، تم نقل أكثر من ٦٦٣٠ من مجمعات الوقود المستهلك الخاصة بمفاعلات RBMK-1000 من محطتي القوى النووية في لينينغراد وكورسك ووضعت في الخزن الجاف في المجمع التعديني والكيميائي.

٧٢- في اليابان، تمَّ إصدار صور لحطام الوقود داخل وعاء الاحتواء الأولي الخاص بالوحدة الثانية من محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في شباط/فبراير. وأعقبَ المسحَ الفوتوغرافي دراسة استقصائية أخرى باستخدام مسبار عن بُعد مع قدرات مناولة؛ وقد تمكَّن من التقاط عينات من الحطام من خمسة مواقع لإجراء مزيد من التوصيف والتحليل. وبدأت عملية إزالة ٥٦٦ من مجمعّات الوقود المستهلَك من الوحدة الثالثة من محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في نيسان/أبريل ٢٠١٩ بعد أعمال أُجريت لإزالة الركام الناجم عن الحادث من أرضية خدمة المفاعل. وستؤخذ مجمّعات الوقود إلى حوض مركزي في الموقع.

٧٣- وفي المملكة المتحدة، بدأ برنامج مدته خمس سنوات لإعادة تعبئة حاويات البلوتونيوم التاريخية في سيلافيلد في آب/أغسطس ٢٠١٩، مع افتتاح وإعادة تعبئة أول حاوية في علبة خارجية حديثة وأكثر متانة. واستُكملت عملية إفراغ أسطول مفاعلات شركة ماغنوكس من الوقود، واستكملت عملية نقل الوقود المستهلَك النهائية من موقعَي Wylfa وCalder Hall في أيلول/سبتمبر. ونُقل الوقو المستهلَك إلى سيلافيلد لخزنه قبل البدء بإعادة معالجته. وبلغت الأعمال الجارية لإزالة العناصر المولدة المتبقية من المفاعل السريع في دونري نقطة منتصف الطريق. وكانت ثمة حاجة إلى أدوات متخصّصة عن بُعد لإزالة العناصر المحشورة التي تُركت في مكانها عندما أُغلق المفاعل في عام ١٩٧٧.

٧٤- وفي أوكرانيا، استكمل مرفق تشرنوبل المؤقت لخزن الوقود النووي المستهلَك (لمرافق المعالجة والخزن للوقود المستهلَك الناجم عن الوحدات ١ و٢ و٣ من محطة تشرنوبل للقوى النووية) المرحلة السابقة للإدخال في الخدمة في أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، وسيدخل رسمياً الخدمة بشكل كامل بمجرد أن يحصل المشغّل (محطة تشرنوبل للقوى النووية) على رخصة تشغيل فردية من الجهة الرقابية.

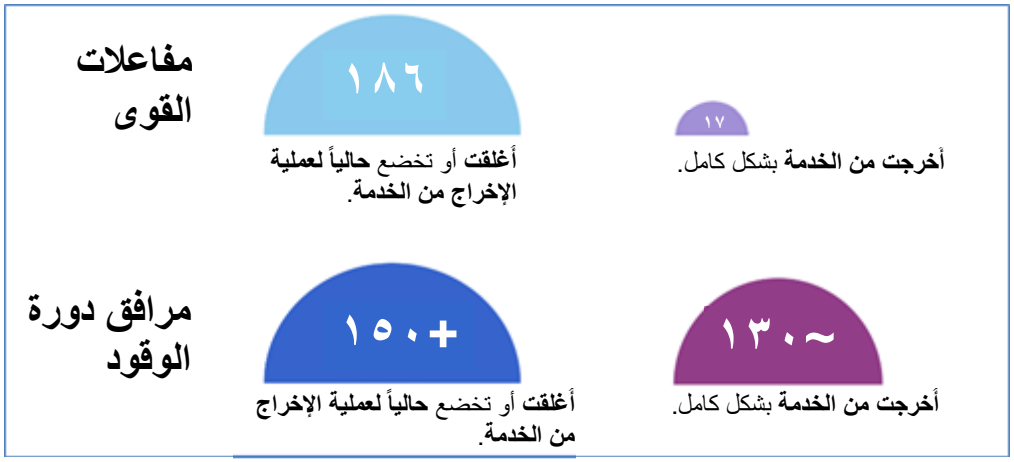
معالجة الوقود المستهلَك

٧٥- منذ إغلاق محطة إعادة المعالجة الحرارية للأكاسيد في المملكة المتحدة، تبلغ قدرة إعادة المعالجة العالمية السنوية لأنواع الوقود التجارية المستهلَكة نحو ٤٠٠٠ طن سنوياً (والتي قد تزيد بمجرد أن تدخل محطة إعادة المعالجة في روكاشو مرحلة التشغيل الكامل مرة أخرى).

ألف-٤- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرف في النفايات المشعة

ألف-٤-١- إخراج مرافق نووية من الخدمة

٧٦- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩، كان هناك في شتى أنحاء العالم ١٨٦ من مفاعلات القوى إمَّا قد أُغلقت أو تخضع حاليًّا للإخراج من الخدمة. ومن بين هذه المفاعلات، هناك ١٧ مفاعلاً انتهى إخراجها من الخدمة تماماً، في حين يقترب عدد آخر من المراحل النهائية من عملية الإخراج من الخدمة. وهناك ما يزيد على ١٥٠ مرفقاً من مرافق دورة الوقود النووي التي إمَّا أُغلقت إغلاقاً دائماً أو تخضع حاليًّا لعملية الإخراج من الخدمة، ويقترب عدد المرافق التي انتهى إخراجها من الخدمة من ١٣٠ مرفقاً (الشكل ألف-١٠).

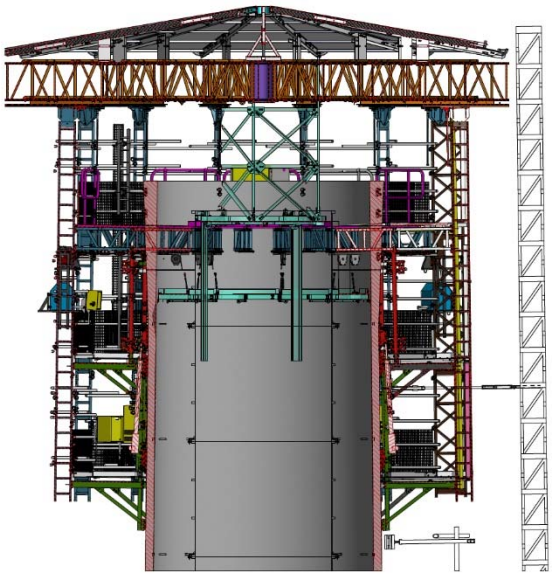


الشكل ألف-١٠- الحالة العالمية لأنشطة الإخراج من الخدمة في عام ٢٠١٩ .

٧٧- وحتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩، تمَّ إغلاق أكثر من ٥٦٠ من مفاعلات البحوث والمجمعات الحرجة بشكل دائم، وتمَّ إخراج قرابة ٤٤٠ منها من الخدمة بالكامل؛ وثمة قرابة ٧٠ مفاعل بحوث قيد الإخراج الفعلي من الخدمة وقرابة ٦٠ مفاعل بحوث قيد الإغلاق بشكل كامل في انتظار إخراجها من الخدمة.

٧٨- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، وقَّع مركز البحوث المشترك التابع للمفوضية الأوروبية اتفاقاً مع شركة سوغين، الشركة الإيطالية المملوكة للدولة والمسؤولة عن الإخراج من الخدمة والتصرف في النفايات المشعة، فيما يتعلق بتفكيك مفاعل البحوث ISPRA-1.

٧٩- ويتمخض نشر التكنولوجيات المثبتة للإخراج من الخدمة والعمل المضطلع به في مجال البحث والتطوير عن تحسينات مستمرة، لا سيما في البلدان التي لديها برامج واسعة النطاق في ميدان القوى النووية. مثال على تقنية ابتكارية مستخدَمة بشكل فعّال هي منصة ذاتية الصعود المصمَّمة للمساعدة في هدم رصة التهوية لمحطة معالجة متقادمة في موقع سيلافيلد (الشكل ألف-١١).



الشكل ألف-١١- منصة ذاتية الصعود المصمَّمة للمساعدة في هدم رصة التهوية لمحطة معالجة متقادمة في موقع سيلافيلد.
(الصورة من: شركة سيلافيلد المحدودة، المملكة المتحدة)

٨٠- ويتواصل إحراز التقدُّم في المشاريع المدعومة من المصرف الأوروبي للإنشاء والتعمير والرامية إلى إخراج محطات قوى نووية من الخدمة في أوكرانيا وبلغاريا وسلوفاكيا وليتوانيا. ومن أمثلة ذلك إزالة مولّدات البخار من قاعة الوحدة V-1 من محطة بوهونيتسه للقوى النووية ونقلها إلى قاعة التربينات لمزيد من التفتيت (الشكل ألف-١٢) واستهلال مشروع محطة إغنالينا للقوى النووية المتعلق بتفكيك مفاعلها العالي القدرة المزوَّد بقنوات وبخزن الغرافيت.

الشكل ألف-١٢- إزالة آخر دفعة من مولّدات البخار البالغ عددها ١٢ وذات وزن يبلغ ١٤٥ طناً من الوحدة V-1 من محطة بوهونيتسه للقوى النووية في سلوفاكيا. (الصورة من: شركة JAVYS للقوى النووية والإخراج من الخدمة)

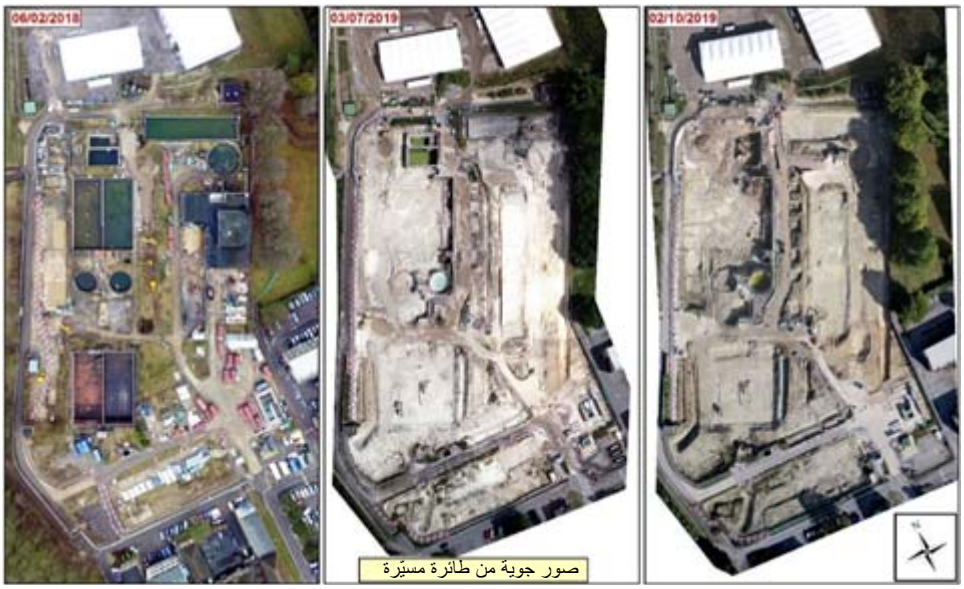
٨١- وقبلت المفوضية الأوروبية "تحليل البحوث المستند إلى الأطراف المعنية لأغراض الإخراج من الخدمة" "SHARE" الذي اقترحته عدة دول أعضاء في الاتحاد الأوروبي، وبدأ العمل به في منتصف حزيران/يونيه ٢٠١٩. وبحلول نهاية عام ٢٠٢١، يعتزم التحليل المذكور توفير خريطة طريق شاملة للبحوث في المجالات التقنية وغير التقنية، بما يمكّن الأطراف المعنية من الاشتراك في تحسين الأمان، وخفض التكاليف، وتقليص الآثار البيئية المترتبة على إخراج المرافق النووية من الخدمة إلى أبعد حدّ ممكن.

٨٢- ونشرت الوكالة اليابانية للطاقة الذرية خريطة طريق ختامية بيَّنت سياستها الطويلة الأجل الخاصة بإخراج منشآتها من الخدمة وكذلك معالجة التخلّص من النفايات المشعة المرتبطة بذلك. وسيكون ذلك رهناً باستعراض بعثات خدمة الاستعراض المتكاملة المتعلقة بالتصرف في النفايات المشعة والوقود المستهلك والإخراج من الخدمة والاستصلاح (بعثات ARTEMIS) في عام ٢٠٢٠.

٨٣- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، أصدرت شركة تيسير التعويض عن الأضرار النووية والإخراج من الخدمة في اليابان الخطة الاستراتيجية التقنية لعام ٢٠١٩ بشأن إخراج محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية من الخدمة، بما في ذلك توصيات بشأن تحديد أساليب استرجاع حطام الوقود للوحدة ٢، وهي أول وحدة سيُزال الحطام منها. وما زال العمل يتقدَّم في إخراج موقع محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية من الخدمة، بما في ذلك التحقيقات الداخلية عن الوحدة ٢ وإزالة الوقود من حوض الوقود المستهلَك في الوحدة ٣.

ألف-٤-٢- الاستصلاح البيئي

٨٤- حققت شركة ماغنوكس، مشغّلة الموقع، تقدُّماً جيداً في استصلاح محطة معالجة الدوافق السائلة السّابقة في موقع هارويل بالمملكة المتحدة (الشكل ألف-١٣). بدأ العمل في الموقع البالغة مساحته ٤,٢ هكتار في شباط/فبراير ٢٠١٨، وبحلول نهاية تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩، تمَّ بنجاح حفر ٥٤٠٠٠ طن من المواد وفحصها ونقلها إلى طرق التخلُّص المناسبة خارج الموقع. ويتمّ تجميع جميع النفايات الناجمة عن العمل في أكياس كبيرة مساحتها ٠,٩ متر مكعب، والتي تخضع جميعها للفحص باستخدام قياس أشعة غاما فائق الدقة. ومن المتوقع الانتهاء من أعمال الاستصلاح بحلول صيف عام ٢٠٢٠، مع العمل على إزالة الضوابط الرقابية وإعادة الموقع إلى سابق عهده بعد عام ٢٠٢١. وعند الانتهاء من ذلك، سيتم إعادة الموقع إلى مالك الأرض لإعادة استخدامه كجزء من تطوير حرَم هارويل.



الشكل ألف-١٣- صور جوية من طائرة مسيّرة تُظهر التقدم المحرز في استصلاح محطة معالجة الدوافق السائلة في موقع هارويل، المملكة المتحدة. (الصور من: شركة Magnox)

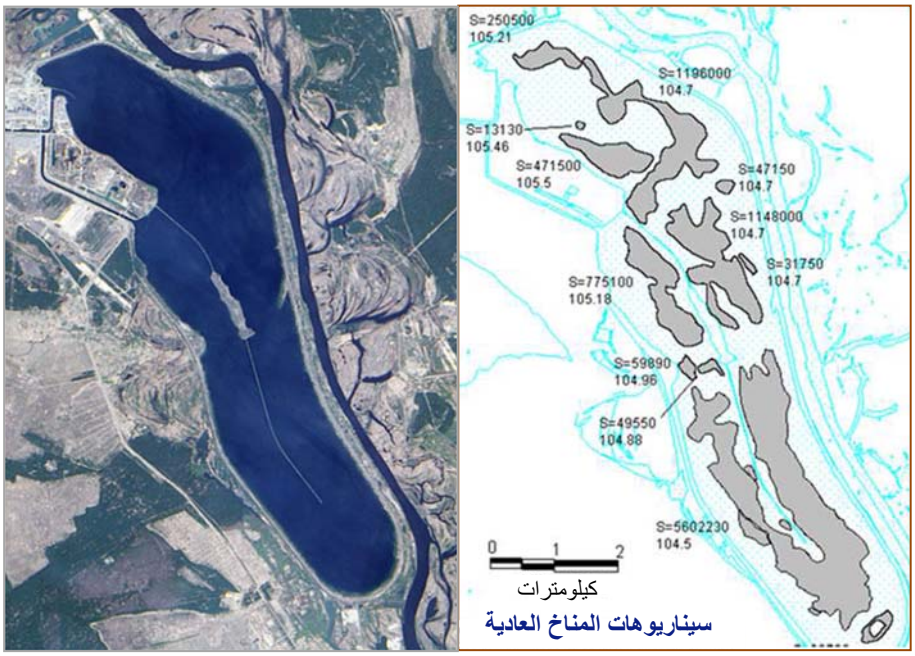
٨٥- وفي شباط/فبراير ٢٠١٩، أنهت شركة Energy Resources of Australia، مشغّل منجم رينجر لليورانيوم (الشكل ألف-١٤)، دراسة جدوى عن إغلاق منجم رينجر، تتضمّن جدولاً مفصلاً لعملية إعادة التأهيل والتكلفة التقديرية المترتبة والبالغة ٨٣٠ مليون دولار أسترالي. وتجري عملية إعادة التأهيل على مراحل منذ عام ٢٠١٢، وحتى الآن، تشمل المعالم المرحلية البارزة ردم الحفرة ١ بالمخلفات وصخور النفايات، وإخراج منحدر الاستكشاف تحت الأرض من الخدمة، وتجريف المخلفات من مرفق خزن المخلفات إلى حفرة ٣، وتشييد وتشغيل مركِز ماء مالحة لمعاجلة المياه والشروع في إعادة الغطاء النباتي. وبموجب الموافقات الحالية، يجب أن تتوقف أنشطة التعدين والمعالجة بحلول كانون الثاني/يناير ٢٠٢١، ويجب استكمال عملية إعادة التأهيل النهائية بحلول كانون الثاني/يناير ٢٠٢٦. ويتمثل أحد الأهداف الرئيسية لعملية إعادة التأهيل في جعل النظام البيئي للموقع متوافقاً مع مثيله في البيئة المحيطة بحيث يمكن إدماجه في نهاية المطاف ضمن متنزه كاكادو الوطني.

الشكل ألف-١٤- موقع منجم رينجر لليورانيوم. (الصورة من: شركة Energy Resources of Australia)

٨٦- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أكملت وكالة حماية البيئة تقريباً أنشطة استصلاح سمة رئيسية من موقع شركة مسيسيبي للفوسفات. وبتكلفة قاربت ٧٢ مليون دولار أمريكي، تم تثبيت نظام غطاء فريد فوق رصة الجبس الغربية، على مساحة تقارب ٢٣٥ هكتاراً. وأساس نظام الغطاء هو مادة البولي إيثيلين الخطية منخفضة الكثافة والتي ستحدُّ من تسرّب المطر وتقلّل من نضّ الملوثات الإشعاعية والكيميائية على السواء الناجمة عن الرصّة. يتيح نظام الغطاء الإغلاق الدائم للموقع مع تقليل المخاطر التي يتعرض لها الإنسان والبيئة. وأنتج الموقع، الذي بدأ عملياته في الخمسينيات، أسمدة فوسفات الديامونيوم. وتوقفت العمليات في عام ٢٠١٤ بسبب الإفلاس، ما أدى إلى وجود أكثر من ٧٠٠ مليون جالون من مياه الصرف الصحي الحمضية الملوثة المخزّنة في المرفق ونفايات الجص الفوسفوري التي تمّ التخلص منها في رصتين. والرصّة هي كومة تنشأ عن الجص الفوسفوري والجبس في الحالة الطينية.

٨٧- وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩، أحرزت إيطاليا تقدماً كبيراً في استصلاح موقع تريسيا من خلال استكمال إزالة هيكل خرساني مسلح يحتوي على نفايات مشعة. وكان الهيكل الرأسي، الذي شُيّد في أواخر الستينيات، على شكل موشور يقع على عمق ٦,٥ متر تحت الأرض، ويبلغ وزن كتلته حوالي ١٣٠ طناً وحجمه ٥٤ متراً مكعباً.

٨٨- وفي عام ٢٠١٩، تمَّ استكمال إخراج حوض تبريد محطة تشرنوبل للقوى النووية من الخدمة. وكان المشروع قد ابتدأ في عام ٢٠١٤ بعد الانتهاء من العديد من الدراسات الإشعاعية والإيكولوجية وإعداد دراسة جدوى وتقييم الأثر البيئي بدعم من الوكالة. وأوصت هذه الدراسات بوقف إمدادات المياه إلى أحواض التبريد للسماح بخفض منسوب المياه في تلك الأحواض. كما تمت التوصية بأنه، خلال عملية خفض منسوب المياه، يجب أن يحدث رصد بيئي وإشعاعي لضمان استمرار أمان الإنسان والبيئة. وخلصت بيانات الرصد إلى أن التغيُّرات الإيكولوجية وإعادة توزيع الملوثات الإشعاعية قد حدثت على نطاق واسع كما تنبأت بذلك دراسة الجدوى. قلّصت عملية الإخراج من الخدمة بشكل كبير التكاليف التشغيلية لمنطقة حوض التبريد وقلّلت مخاطر الفيضانات في المنطقة المحيطة. والحالة الإيكولوجية للموقع في تحسُّن متواصل كل عام، ويتم الحفاظ على الصحة والأمان من خلال القيود المعمول بها للمنطقة المحظورة (الشكل ألف-١٥).



الشكل ألف-١٥- إلى اليسار: صورة جوية لحوض تبريد محطة تشرنوبل للقوى النووية قبل الإخراج من الخدمة. إلى اليمين: محاكاة حاسوبية تُظهر المياه المتبقية بعد الإخراج من الخدمة. (الصورة من: محطة تشرنوبل للقوى النووية)

ألف-٤-٣- التصرُّف في النفايات المشعّة

التصرُّف في المصادر المشعة المختومة المهملة

يجري حاليا وعلى نحو نشط استكشاف خيارات إدارة نهاية عمر المصادر المشعة المختومة المهملة، بما في ذلك التخلص المشترك منها مع نفايات أخرى في مرافق مناسبة. وتُحرز مشاريع التخلص داخل حفر السبر تقدماً في عدة بلدان، منها غانا وماليزيا. ومنحت الهيئة الرقابية للوكالة النووية الماليزية في تموز/يوليه ٢٠١٩ رخصة مشروع التخلص داخل حفر السبر في ماليزيا.

٨٩- استُكملت في حزيران/يونيه ٢٠١٩ إجراءات الإدخال في الخدمة فيما يتعلّق بمرفق طقم الأدوات المتنقِّل لتكييف المصادر المشعّة المختومة المهمَلة من الفئة الدنيا (الفئات من ٣ إلى ٥) تمهيداً لمشروع التخلّص، وشُحن هذا المرفق إلى ماليزيا في أيلول/سبتمبر ٢٠١٩. ومن المتوقع ان تبدأ عمليات حفر الآبار في مطلع عام ٢٠٢٠.

٩٠- وفي عام ٢٠١٩، أكملت غانا بنجاح عملية تحديد خصائص المصادر المشعّة المختومة المهمَلة من الفئات من ٣ إلى ٥ وتكييفها، ونُقلت هذه المصادر إلى مرفق تخزين مركزي في انتظار وضعها داخل نظام تخلّص داخل حفر السبر في إحدى المواقع التابعة لهيئة الطاقة الذرية في غانا.

٩١- وأجريت في عام ٢٠١٩ عدّة عمليات ناجحة لإزالة مصادر مشعة مختومة مهملة من المرافق الخاصة بالمستخدمين وإخضاعها للتحكُّم في ظروف تخزين مأمونة وآمنة. وأزيل آخر مصدر مشع مختوم مهمل متبقّ من الفئة ١ من مقدونيا الشمالية، بينما أزيل مصدرين مشعين مختومين مهملين (الفئة ١ والفئة ٢) من ألبانيا.

٩٢- واستهلّت إجراءات إزالة المصادر من الفئة ١ و٢ في عدة دول أعضاء أخرى، بما في ذلك الأردن وتونس وسلوفينيا وقبرص وكرواتيا ونيبال ونيكاراغوا.

٩٣- واستُكملت عمليات تكييف المصادر المشعّة المختومة المهمَلة في كوراساو حيث تلقى الموظفون المحليون التدريب العملي والحضوري الملائم بشأن التصرّف في المصادر المشعة المختومة المهملة.

٩٤- وأُعدَّت و/أو حُدِّثت قوائم بالأرصدة الوطنية من المصادر المشعة المختومة المهملة وكذلك من المصادر المختومة المستعملة في بابوا غينيا الجديدة وسانت فنسنت وجزر غرينادين وغرينادا وهايتي وكوراساو.

٩٥- وعززت عدة دول أعضاء منها بربادوس وغيانا وكينيا وماليزيا قدراتها على البحث عن المصادر اليتيمة واستعادتها وذلك من خلال دورات تدريبية وطنية أو إقليمية.

٩٦- ويخضع الفهرس الدولي للمصادر والأجهزة المشعّة المختومة لعملية تحديث مكثف للبرامجيات الخاصة به باستخدام المدخلات التي قدّمتها الدول الأعضاء والجهات المعنية الداخلية. وتواصلت في عام ٢٠١٩ الجهود الرامية إلى إضافة المزيد من التفاصيل بشأن المصادر والأجهزة المذكورة.

التمهيد للتخلص

٩٧- أكمل القائمون على مشروع معالجة النفايات المختلطة المتقدمة الموجود في مختبر أيداهو الوطني التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية مهمتهم في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩. وأعدَّ القائمون على هذا المشروع الذي أُدخل في الخدمة للمرة الأولى في عام ٢٠٠٣ أكثر من ٦٥,٠٠٠ متراً مكعباً من نفايات ما وراء اليورانيوم متوسطة الإشعاع للتخلّص منها في المحطة التجريبية لعزل النفايات في نيو مكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية. واستَخدم القائمون على مشروع معالجة النفايات المختلطة المتقدمة توليفة من التكنولوجيات التقليدية وفائقة التقنية الخاصة بالاستعادة وتحديد الخصائص والمعالجة، بما في ذلك الربوطيات، لمعالجة النفايات متوسطة الإشعاع المتأتية من مختبر أيداهو الوطني ومن ١٥ موقعاً آخر من المواقع التابعة لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية.

٩٨- وفي تموز/يوليه ٢٠١٩، بدأت أعمالُ المعالجة في محطة معالجة النفايات السائلة التابعة لمحطة تشرنوبل للقوى النووية. وحتى أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، أُعدّت ١٢٠ عبوة نفايات لأغراض التخلص منها. وتمكّن القدرة التصميمية للمحطة من إعداد ٤٢ عبوة نفايات يومياً (تبلغ سعة كل واحدة منها ٢٠٠ لتراً). ونُقلت أولى عبوات النفايات البالغ عددها ١٢٠ عبوة إلى مجمع الإنتاج Vector لأغراض التخلّص منها.

٩٩- وفي فنلندا، وُضع حجر أساس محطة تغليف الوقود النووي المستهلك واستُهلّ تشييدها في أيلول/سبتمبر ٢٠١٩. وستُعِدُّ محطة التغليف الوقود النووي المستهلك لأغراض التخلص منه بشكل نهائي. وتُعدُّ محطة التغليف مكوناً أساسياً في تنفيذ برنامج التخلّص الفنلندي كما أنها ترتبط بمرفق التخلص الجيولوجي الجاري تشييده في أولكيلوتو بفنلندا (الشكل ألف-١٦).

الشكل ألف-١٦ - تشييد محطة Posiva لتغليف الوقود النووي المستهلك. (الصورة من: شركة Posiva)

١٠٠- وفي جورجيا، اقتُرح في إطار عملية تحديد المواقع موقعٌ لتشييد مرفقٍ للخزن المؤقت ومرفقٍ للمعالجة لأغراض التصرّف في النفايات الموروثة الموجودة في البلد. وتشمل هذه النفايات الموروثة التي نتجت عن الأنشطة المضطلع بها خلال الفترة الممتدة من خمسينات إلى ثمانينات القرن الماضي مصادر مشعة، ومواد مشعة، ومفردات أخرى ملوثة بالمواد المشعة. وقدم الاتحاد الأوروبي التمويل لتصميم مرفق المعالجة ومرفق الخزن المؤقت المزمع تشييدهما في الموقع المذكور. وتُنسِّق الهيئة السويدية للأمان الإشعاعي بالتعاون مع الوكالة السويدية للتعاون الإنمائي الدولي عمليات الشراء الدولية الداعمة للمشروع، كما أنها تقدّم المساعدة إلى الحكومة الجورجية. وفي مولدوفا، يُحرز مشروع يعنى بالتصرّف في النفايات المشعة الناتجة عن مرافق التخلص من الرادون تقدّماً. ويجري العامل حالياً على وضع خطة مفصّلة ووثائق تقنية داعمة خاصة بالاستعادة، والتصرف في النفايات المشعة، وإزالة التلوث فيما يتعلق بهذا المرفق.

١٠١- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، نشرت المملكة المتحدة استراتيجية متكاملة للتصرف في النفايات المشعة، تغطي التصرف في جميع النفايات المشعة التي تنجم داخل الممتلكات الخاضعة لولاية الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة، بما يشمل ١٧ موقعاً. وتشمل الأنشطة في هذا الصدد محطات القوى النووية، ومرافق إعادة معالجة الوقود المستهلك، والمؤسسات البحثية، ومواقع التخلّص. كما استُكملت، عقب سدت سنوات من العمل، عملية إزالة التلوث من المستودعات التي تحتوي على مواد ملوثة بالبلوتونيوم (PCM) في موقع مستودع النفايات ضعيفة الإشعاع. وشمل هذا العمل إعادة تعبئة المواد الملوثة بالبلوتونيوم ونقلها إلى مرافق التخزين المأمون في سيلافيلد بالمملكة المتحدة.

التخلص

١٠٢- ظلت مرافق التخلّص من النفايات ضعيفة الإشعاع والنفايات متوسطة الإشعاع مُشغَّلة طيلة عام ٢٠١٩ في العديد من الدول الأعضاء. وشملت هذه المرافق التخلّص في خنادق في حالة النفايات ضعيفة الإشعاع جداً (على سبيل المثال في إسبانيا والسويد وفرنسا) أو التخلص في مناطق قاحلة في حالة النفايات ضعيفة الإشعاع (على سبيل

المثال في جنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصمّمة هندسياً قرب سطح الأرض للتخلص من النفايات ضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال في الاتحاد الروسي وإسبانيا والجمهورية التشيكية وسلوفاكيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند واليابان)؛ والمرافق المصممة هندسياً للتخلص من النفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع والواقعة صلب تكوينات جيولوجية عند أعماق مختلفة (على سبيل المثال الاتحاد الروسي وألمانيا والجمهورية التشيكية وجمهورية كوريا وفنلندا والنرويج وهنغاريا والولايات المتحدة الأمريكية).

١٠٣- وعلاوة على ذلك، يجري العمل على تشييد مرافق تخلّص من النفايات ضعيفة الإشعاع في المرفق الوطني للتخلص (NDF) في موقع راديانا بالقرب من محطة كوزلودوي للقوى النووية في بلغاريا وفي مستودع النفايات النووية في موقع أناراك في جمهورية إيران الإسلامية. ومن المتوقّع استكمال المرحلة الأولى من مراحل تشييد المرفق الوطني للتخلص في نهاية تموز/يوليه ٢٠٢١، والبدء في عمليات التخلّص عقب استكمال مرحلة الإدخال في الخدمة في عام ٢٠٢٣ (الشكل ألف-١٧). وفي جمهورية إيران الإسلامية، يجري العمل على تشييد مرافق الدعم التشغيلي ومن المتوقع استكمال أعمال التشييد في عام ٢٠٢٢ ومن المزمع الحصول على رخصة التشغيل في عام ٢٠٢٥.

الشكل ألف-١٧ - تشييد المرفق الوطني للتخلص في موقع راديانا بالقرب من محطة كوزلودوي للقوى النووية تُظهر المجمع المعني بالإدارة (يساراً)، ومبنى منطقة استقبال النفايات ومنطقة التخزين العازلة (يميناً)، وأساس منصة التخلص ١ المُشيد بأسمنت-طفلة اللوس (أقصى اليمين).

١٠٤- وفي ليتوانيا، أُعلن في آذار/مارس ٢٠١٩ عن مناقصة لتشييد مرفق للتخلّص قرب سطح الأرض في محطة إغنالينا للقوى النووية ومن المزمع البدء في تشييده في عام ٢٠٢٠. وفي بلجيكا، قُدّم طلب الحصول على رخصة فيما يتعلّق بمرفق ديسيل في شباط/فبراير ٢٠١٩.

١٠٥- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، أفضت المفاوضات بين كرواتيا وسلوفينيا بشأن إمكانية تشييد مستودع مشترك للنفايات ضعيفة الإشعاع إلى إبرام اتفاق بشأن تشييد وتشغيل مستودعيْنِ وطنييْنِ منفصليْنِ. وستواصل سلوفينيا إعداد طلب رخصة لتشييد مستودع فربينا الموجود بالقرب من محطة كرشكو للقوى النووية، وستواصل كرواتيا مساعيها الهادفة إلى تشييد مستودع خرساني مهيئ في شكل قبو في تشركيزوفاتس.

١٠٦- واستُكمل التصميم التقني وتقييم الأمان ذو الصلة فيما يتعلّق بمستودع للنفايات ضعيفة الإشعاع موجود في التويثة بالعراق في صيف عام ٢٠١٩ وقُدِّما إلى وزارة العلوم والتكنولوجيا العراقية باعتبارها الجهة المشغّلة، وكذلك إلى وزارة البيئة العراقية. وموّلت المفوضية الأوروبية تكاليف عملية التصميم التقني.

١٠٧- وفي باكستان، اخْتِيرَ موقع في مرتفع بوتوار لأغراض تشييد مرفق قرب سطح الأرض للتخلّص من النفايات ضعيفة الإشعاع، واستُهلّت أعمال التصميم الأولي في هذا الشأن.

١٠٨- وفي ألمانيا، تتواصل أعمال تشييد مستودع كونراد للتخلص من النفايات متوسطة الإشعاع، واستُكملت أعمال الحفر المتعلّقة بالمهوى ٢ في محطة نقل النفايات حزيران/يونيه ٢٠١٩.

١٠٩- ويجري إحراز تقدّم كبير في مجال التخلص من النفايات قوية الإشعاع في عدة دول أعضاء. وتعمل فنلندا على تشييد مرفق للتخلّص الجيولوجي العميق، وتنتظر السويد القرار النهائي بشأن طلب الترخيص الذي تقدمت به في هذا الشأن، وتعمل فرنسا على استكمال الإجراءات المتعلقة بطلب الترخيص فيما يتعلّق بمرفق سيجيو. وفي فنلندا، مُنحت عقود تشييد أول اثنين من أنفاق نقل النفايات وأول خمسة من أنفاق الترسيب، أين سيتم التخلّص من الوقود النووي المستهلك المُغلّف. وتقرر البدء في أعمال حفر الأنفاق في مطلع عام ٢٠٢٠ وستتواصل هذه الأعمال لمدة عامين ونصف تقريباً. ووافقت الجهة الرقابية على المعلومات التكميلية التي قدّمتها الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية SKB والتي تقدم إجابات على الأسئلة التي أثارتها محكمة الأراضي والشؤون البيئية كجزء من عملية الترخيص لتشييد مستودع جيولوجي عميق. وسيعود القرار النهائي في هذا الشأن إلى الحكومة السويدية. وفي فرنسا، يُحرز مشروع تشييد مستودع جيولوجي عميق للتخلص من النفايات قوية الإشعاع في أعماق تكوينات الحجر الطَّفلي Callovo- Oxfordian تقدّماً صوب استكمال إجراءات طلب الترخيص المتوقع تقديمه في عام ٢٠٢٠.

١١٠- وبلغت دول أعضاء أخرى أيضاً معالم برامجية هامة في مجال التخلّص من النفايات قوية الإشعاع. وفي الصين، أُذِنَ في ٦ أيار/مايو ٢٠١٩ بتشييد مختبر بحثي جوفي في منطقة بايشان (Beishan) في صحراء غوبي (Gobi) (في أعماق تكوينات الصخور الغرانيتية). ويتمثّل الغرض من هذا المختبر البحثي الجوفي في دراسة استدامة تكوينات الصخور الغرانيتية المحلية فيما يتعلّق باستضافة مستودع جيولوجي عميق للتخلص من النفايات قوية الإشعاع. ومن المعتزم تشييده على عُمق ٥٦٠ متراً كما أنه سيكون متاحاً للدول الأعضاء الأخرى المهتمة التي تطلب إجراء البحوث في هذا المختبر أو المُشَارَكة فيها. وبالإضافة إلى ذلك، يمضي العمل قدماً على تحديد موقع يمكن أن يُشيَّد فيه مستودع في أعماق التكوينات الصلصالية في الصين. واستُكمل المشروع الأول في نهاية عام ٢٠١٨. وقبلت به الهيئة الصينية للطاقة الذرية في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩. وحُدِّدَ موقعان محتملان لنفس الغرض ستُجرى بشأنهما المزيد من الدراسات.

١١١- وفي المملكة المتحدة، استُهلَّ البرنامج الجديد الخاص بتحديد المواقع في إنكلترا (كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٨) وفي وايلز (كانون الثاني/يناير ٢٠١٩) فيما يتعلّق بتشييد مستودع جيولوجي عميق للتخلص من النفايات الأقوى إشعاعاً. وحالياً، تنخرط شركة RMW المحدودة (شركة التصرف في النفايات المشعة) (الجهة المشغلة) على نحو نشط مع المجتمعات التي يُحتمل أن تكون مهتمة ومع الجمهور الأوسع وذلك بغية زيادة الوعي والإجابة على الأسئلة المطروحة في هذا الصدد ومناقشة مسألة استضافة مرفق للتخلّص الجيولوجي. وأجرت شركة RMW استعراضاً رفيع المستوى للبيانات الجيولوجية ذات الصلة بأمان مرافق التخلص الجيولوجي لكي يُستنار بها خلال المناقشات الأولية.

١١٢- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، منحَ مكتبُ كارزباد الميداني (Carlsbad Field Office) وشركة Waste Partnership Nuclear التابعان لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية عقداً لتشييد مَهوَى خدمي جديد في المحطة التجريبية لعزل النفايات. ويُعدُّ هذا المَهوَى الجديد أحد العناصر الرئيسية اللازمة في إطار الجهود الرامية إلى استعادة القدرات التشغيلية كاملة في مستودع التخلّص من النفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع في كارزباد بنيو مكسيكو وذلك عقب إعادة افتتاحه في ٩ كانون الثاني/يناير ٢٠١٧ وقبوله استلام أول شحنة في ١٠ نيسان/أبريل ٢٠١٧.

باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان

باء-١- الانشطار المتقدم

١١٣- تكتسب مفاعلات القوى نووية المتقدّمة وتطبيقاتها زخماً في جميع أنحاء العالم حيث يُنظرُ لها على أنها نظم طاقة نووية قادرة على المساهمة في التحول على الصعيد العالمي إلى نُظم للطاقة تكون أكثر استدامة وأيسر من حيث التكلفة وأكثر موثوقية. كما أنّ هذه المفاعلات أكثر ملائمة من حيث قابلية إدماجها صلب نُظم القوى الخالية من الكربون التي سيؤخذ بها في المستقبل، والتي ستكون إحدى خصائصها توليدُها حصصا كبيرة من القوى من مصادر توليد القوى المتغيرة. وعلى وجه الخصوص، تتعلّق إحدى هذه التكنولوجيات الواعدة بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية التي يمكنها تلبية الاحتياجات من قوى الأحمال القاعدية النظيفة مع ضمان المرونة التشغيلية اللازمة لتكييف مصادر الطاقة المتجددة المتغيّرة وتلبية الطلب في هذا الشأن. كما أنها تُعدُّ ملائمة بوجه خاص للتطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية مثل تحلية المياه وإنتاج الهيدروجين، وتدفئة الأحياء السكنية والتبريد، وعدة تطبيقات كثيفة الاستخدام للطاقة.

باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء

١١٤- هنالك حالياً على الصعيد العالمي عدة تصاميم لمفاعلات مبردة بالماء قائمة على تكنولوجيات تطوُّرية وابتكارية، قيد التشييد أو الإدخال في الخدمة أو التشغيل. ويتواصل تطبيق العديد من الدروس المستفادة من الخمسين سنة الماضية في إطار تشغيل المفاعلات المبردة بالماء. وتشمل أوجه التقدّم الحديثة في مجال تكنولوجيا المفاعلات المبرَّدة بالماء التحسينات المدخلة على التصاميم القائمة ووضع تصاميم جديدة، وتقاسم الأهداف المشتركة لتعزيز الأمان، وزيادة كفاءة استخدام الموارد وتحسين الاقتصاديات. ومثلما هو الحال فيما يتعلّق بمعظم المفاهيم التطوّرية، تتميّزُ نُظُم الأمان بسمات كامنة لا تعتمد على الطاقة الكهربائية وتشمل مخزونات أكبر من المياه، مما يُتيح فترات تحمّل تدوم أياماً عوضا عن ساعات في حالة حصول ظروف غير مخطط لها من قبيل انقطاع التيار الكهربائي في المحطة لفترة مُطوَّلة. وثمّة جانب هام آخر من جوانب تطوير المفاعلات المبرَّدة بالماء هو تصميم واختبار وتشييد مفاعلات ماء مضغوط صغيرة نمطية متكاملة يتم تشييدها في المصانع (انظر القسم باء-٢-٢).

١١٥- وفي الأرجنتين، يجري التخطيط لتشييد مفاعل ماء ثقيل من طراز كاندو ٦، والنظر في تشييد مفاعل ماء مضغوط من طراز HPR1000. كما تُخطط الارجنتين إلى تعزيز جميع قدراتها في مجال إنتاج الوقود. وثمة مساع جارية لإقامة شراكات لاستئناف واستكمال تشييد محطة القوى النووية البرازيلية أنغرا ٣ (Angra 3) لأغراض التشغيل التجاري بحلول عام ٢٠٢٦.

١١٦- وفي كندا، من المتوقع اســـتكمال تجديد محطتي دارلينغتون وبروس للقوى النووية في أونتاريو بحلول عام ٢٠٣٢، بإجمالي اســـتثمارات يبلغ ٢٦ مليار دولار كندي، أما محطة بيكرنغ للقوى النووية، فمن المقرر إغلاقها بحلول عام ٢٠٢٥. وثمة مشـاريع تشييد منشـآت جديدة من طراز كاندو يجري النظر فيها في الأرجنتين ورومانيا والصين والمملكة المتحدة.

١١٧- ويظل لدى الصـــين البرنامج الوطني الأكثر طموحاً فيما يتعلّق بتطوير مفاعلات الماء الخفيف المتقدّمة. وقد استأنفت الحكومة عملية الموافقة على تشييد محطات جديدة وهي تنظر حالياً في تنفيذ خطة لتسعير الكربون. وسـتُشـغّلُ جميع المحطات الجديدة باسـتخدام التشـغيل الرقمي بالكامل، بما في ذلك فيما يتعلّق بالأجهزة والتحكم وبنُظُم حماية المفاعلات. وأبقت محطات القوى النووية التسـع في كينشـان منذ عام ٢٠١٣ مُعامِلَ القدرة مسـتقراً عند نسـبة تقارب ٩٠٪. وفيما يتعلّق بمفاعلات الماء الثقيل في الصـين، ينصـب التركيز على التشـغيل الطويل الأجل، والمسائل المتعلقة بتمديد عمر أنابيب الضغط، والتحضير لإعادة تركيب نظم الأنابيب [إعادة التنبيب].

١١٨- ومن الآن وحتى عام ٢٠٤٠، من المتوقّع أن يُمثِّلَ نمو الطلب على الطاقة في الهند ٢٥٪ من نمو الطلب العالمي على الطاقة. ويعُتمدُ في توســـيع الأســـطول الحالي على مفاعلات الماء الثقيل الهندية البالغة قدرتها ٧٠٠ ميغاواط (كهربائي) وعلى التكنولوجيات المســـتورَدة المتعلّقة بمفاعلات الماء المضـــغوط. ويعمل مركز بهابها للبحوث الذرية على تطوير مفاعل ماء مضـغوط متقدّم (مفاعل الماء المضـغوط الهندي) من ٤ حلقات تبلغ قدرته ٩٠٠ ميغاواط (كهربائي) وعلى تشـييد مرافق اختبار مخصـصـة. وقد تحسّـنت سـلسـلة الإمداد الخاصـة بالتصنيع في الهند.

١١٩- وفي باكســـتان، قُدِّمَ طلب جديد لإعادة ترخيص مفاعل الماء الثقيل في محطة كراتشـــي للقوى النووية للفترة ٢٠١٩-٢٠٢٤.

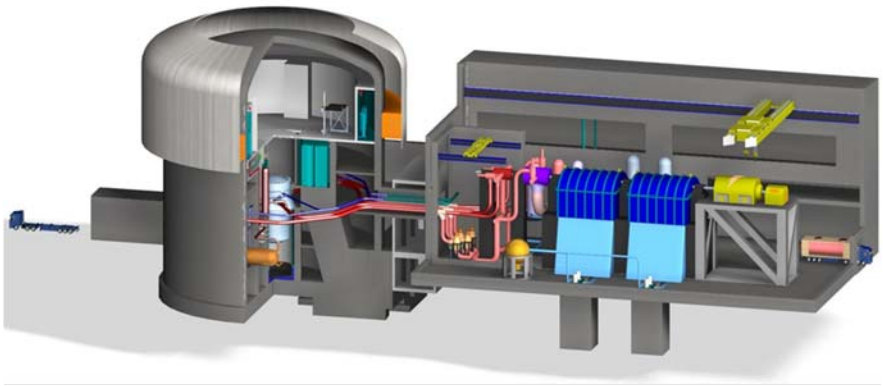
١٢٠- وتعكف شركة كوريا للقوى الكهربائية على تطوير مفاعلات الماء المضغوط الموجهة لأسواق التصدير، مع إضـافة مفاعلِ ماء مضـغوط ابتكاري ومتقدّم من طراز iPOWER قدرته ١٢٥٠ ميغاواط (كهربائي) ومفاعلِ ماء مضـــغوط ابتكاري خامل بالكامل إلى المفاعل القائم لديها من طراز APR1400. وتتصـــل أنشـــطة البحث والتطوير المتعلقة بمفاعلات الماء الثقيل أسـاسـاً بالتشـغيل الطويل الأجل، وإدارة عمر أنابيب الوقود (FCLM) وإعادة التنبيب، والمبادئ التوجيهية في التصـــدي للحوادث العنيفة. وقد تكون الوحدات ٢، و٣ و٤ في مجمع وولسونغ (Wolsung) للقوى النووية أولى المفاعلات من طراز كاندو ٦ التي تستفيد من إدارة عمر أنابيب الوقود لتمديد العمر التصميمي لأنابيب الضغط الخاصة بها.

١٢١- وفي رومانيا، من المعتزم اسـتهلال تجديد الوحدة ١ من محطة تشـرنافودا في عام ٢٠٢٦، وذلك عقِبَ تمديدِ عمر أنابيب الضغط بما يتجاوَزُ عمُرَها التصميمي الأصلي المقدَّرَ بـ ٢١٠ ٠٠٠ ساعة.

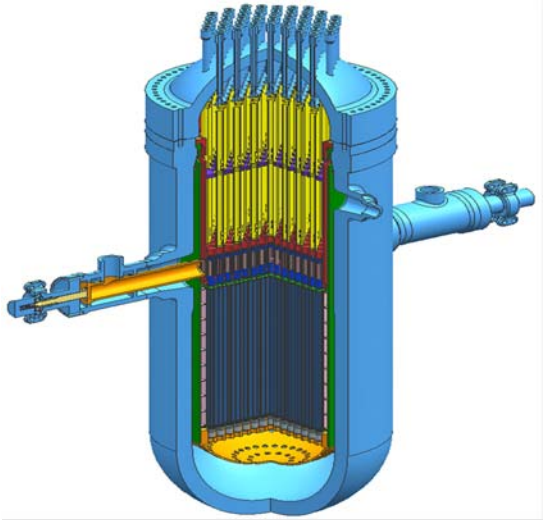
١٢٢- وواصـــل الاتحاد الروســـي تركيزه على تمديد عمر مفاعلاته المبردة والمهدئة بالماء البالغ عددها ٢٠ مفاعلاً، وعلى زيادة قدراتها على توليد الطاقة بنسبة تتراوح ما بين ٤ إلى ١٠٪. وتستند عمليات تمديد العمر إلى عوامل تقنية واقتصادية، وهو ما يُسفر عن التمديد في عمر المفاعلات بفترة تتراوح ما بين ١١ إلى ٣٠ سنة. وتلقّت روزاتوم ٣٦ طلبية على وحدات مفاعلات مبردة ومهدئة بالماء سـتُورَّدُ إلى جميع أنحاء العالم، وهي حالياً في مراحل مختلفة من المفاوضات والتخطيط والتشييد.

١٢٣- وثمة ما مجموعه ٩٨ مفاعلاً نووياً مُشـغّلاً في ٦٠ محطة للقوى النووية في الولايات المتحدة الأمريكية تُولِّدُ قرابة خمس إجمالي الكهرباء الذي يُولّدُ في هذا البلد سـنوياً. ويقدر متوسـط عمر هذه المفاعلات النووية بحوالي ٣٨ عاماً. ولقد بدأ التشـغيل التجاري لأقدم مفاعل نووي عامل في البلاد، أي الوحدة ١ التابعة لمحطة Nine Mile Point لتوليد الطاقة النووية في نيويورك في كانون الأول/ديسـمبر ١٩٦٩. أما أحدث مفاعل فهو الوحدة ٢ التابعة لمحطة Watts Bar لتوليد الطاقة النووية، وقد بدأ تشـغيله في عام ٢٠١٦. ومن المتوقع أن يبدأ تشـغيل المفاعلين الجديدين، قيد التشـييد — أي الوحدتين ٣ و٤ التابعتين لمحطة فوغتل في ولاية جورجيا، القائمينِ على تكنولوجيا مفاعلات وستينغهاوس AP1000 — بين عامي ٢٠٢١ و٢٠٢٢.

١٢٤- وسـتشـارك الاتحاد الروسـي والصـين وكندا واليابان والاتحاد الأوروبي، باعتبارها أطرافاً موقِّعةً على ترتيب النظام، في أعمال بحث وتطوير مشتركة في مجال وضـع المفاهيم المتعلّقة بالمفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج (الشـكلان باء-١ وباء-٢). ويتمثل الغرض الرئيسـي من المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج في توليد الكهرباء على نحو فعال ومأمون ومجد من الناحية الاقتصـادية. وتُصـمّم معظم محطات المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج لتوليد القوى بقدرة تفوق ١٠٠٠ ميغاواط (كهربائي) عند درجات ضـغط تشـغيلي تبلغ قرابة ٢٥ ميغاباسكال وتتراوح في ظلها درجات حرارة منافذ الغاز في المفاعل من ٥٠٠ درجة مئوية إلى ٦٢٥ درجة مئوية. ونتيجة لذلك، بإمكان المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج توليد الكهرباء بنسـب كفاءة حرارية تتراوح من ٤٣٪ إلى ٤٨٪، وهي نسـب أعلى بكثير من نسـب الكفاءة الحرارية التي يُولّدُ بها الأسـطول الحالي من المفاعلات النوويةِ الكهرباءَ. وتُيسِّـرُ درجات الحرارة العالية المتدفّقة من قلب المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج التوليدَ المشتركَ، بما يشمل إنتاج الهيدروجين والتدفئة وإنتاج البخار.



الشكل باء-١ - تصميم المفاعل المبرد بالماء فوق الحرج الكندي: مباني المفاعلات ومبنى التُربين (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)



الشكل باء-٢- مفهوم قلب المفاعل في تصميم المفاعل المبرد بالماء فوق الحرج الصيني (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

باء-٢- النظم النيوترونية السريعة

١٢٥- كان المفاعل المولِّد التجريبي الأول (Experimental Breeder Reactor-I) الذي شُـيِّدَ في عام ١٩٥١ في الولايات المتحدة الأمريكية أوّل مفاعل ينتج الكهرباء. وكان هذا المفاعل الذي تبلغ قدرته ١٠٠ كيلوواط (كهربائي) يُبرَّدُ بسبيكة الصوديوم-البوتاسيوم، وهو معدن سائل. وجرى منذ ذلك الحين في جميع أنحاء العالم تطوير تكنولوجيا المفاعلات السريعة الأكثر تطوراً وهي التكنولوجيا التي تستند إليها المفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم، حيث اكتُسِب في هذا الصدد ما يُقدَّرُ بأكثر من ٤٠٠ سنة من الخبرة التشغيلية في مجال المفاعلات، وذلك من خلال الوحدات التجريبية والنموذجية والإيضاحية والتجارية في العديد من البلدان، بما في ذلك الاتحاد الروسي وألمانيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان. ويجري العمل على الصعيدين الوطني والدولي على تطوير عدة مفاعلات ابتكارية (من الجيل الرابع) وهي المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم، والمفاعلات السريعة المبرَّدة بالرصاص وخليط الرصاص والبزموث المنصهرين، والمفاعلات السريعة المبردة بالغاز. كما يجري العمل على تطوير المفاعل السريع المبرد بالأملاح المصهورة باعتباره خياراً على المدى البعيد.

١٢٦- وفي جمهورية الصين الشعبية، بلغ المفاعل الابتكاري الإيضاحي السريع المبرّد بالصوديوم CFR-600 مرحلة التصميم والتشييد، ومن المزمع بدء تشغيل هذا المفاعل في عام ٢٠٢٥. وتعمل عدة معاهد على تطوير مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم أو نمطية مبرَّدة بالرصاص وسبيكة الرصاص-البزموث، بما في ذلك النُّظم العملية بواسطة المعجلات. وبلغ أول مفاعل صفري الطاقة دون حرج مبرّدة بسبيكة الرصاص-البيزموث تُطوّره الصين، وهو المفاعل Qixing (Venus) III، حرجيته الأولى في ٩ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩ (انظر الشكل باء-٣). وستُستخدم النُّظم صفرية الطاقة العاملة بواسطة المعجلات لإجراء بحوث بشأن تحويل النفايات المشعة من نفايات طويلة العمر إلى نفايات قصيرة العمر.

الشكل باء-٣- مفاعل Qixing (Venus) III يبلغ حرجيته الأولى (الصورة من: المعهد الصيني للطاقة الذرية)

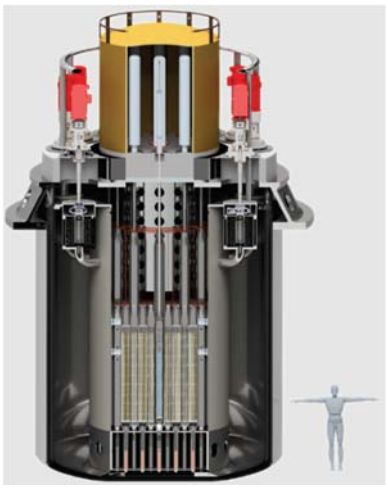
١٢٧- ووفقاً لبرنامج القوى النووية المتألّف من ثلاث مراحل الخاص بالهند، بلغ تشييد المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط (كهربائي) مرحلته النهائية؛ والمفاعل في مرحلة متقدّمة من مراحل الإدخال في الخدمة ومن المتوقع أن يبلغ حرجيه الأولى في عام ٢٠٢٠. وسيَحُلُّ المفاعلُ النموذجي السريع التوليد محلّ مفاعل اختبارات صغير قدرته ١٢-ميغاواط (كهربائي) شيده مركز إنديرا غاندي للبحوث الذرية في عام ١٩٨٥. ومن المخطط تشييد مفاعلين سريعي التوليد إضافيين في نفس الموقع في كالباكام.

١٢٨- ومنذ عام ١٩٨٠، شغَّل الاتحاد الروسي المفاعل السريع BN-600، وهو مفاعل نموذجي صناعي سريع مبرّد بالصوديوم. وثمة مفاعل سريع مبرّد بالصوديوم آخر قيد التشغيل التجاري منذ عام ٢٠١٦ وهو المفاعل السريع BN-800 بقدرة ٨٨٠ ميغاواط (كهربائي). وفي آب/أغسطس ٢٠١٩، استكملت الاختبارات الهيدروليكية لوعاء المفاعل آنف الذكر في مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض (الشكل باء-٤)، والذي سيحلُّ محلَّ المفاعل التجريبي BOR-60 في عام ٢٠٢٤. أما المفاعل السريع المبرد بالرصاص BREST-OD-300 والمفاعل المبرّد بالرصاص والبزموث SVBR-100، فهما قيد الترخيص.

الشكل باء-٤- مرفق مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض.

١٢٩- وقررت الحكومة الفرنسية تمديد برنامجها للبحث والتطوير الخاص بتكنولوجيا المفاعلات السريعة المبردة بالصوديوم وتأجيل خطط تشييد نموذج من المفاعل التكنولوجي المتقدم المبرّد بالصوديوم لأغراض الإيضاح الصناعي من الجيل الرابع (Astrid). وقررت بلجيكا تشييد نظام يعمل بالمعجلات من طراز MYRRHA، وهو مفاعل مبرد بالرصاص والبزموث بإمكانه أن يعمل في الأوضاع دون الحرجة والأوضاع الحرجة كنظام يعمل بواسطة المعجلات. ومن المتوقع أن يكون المرفق الأول مشغلاً بحلول نهاية عام ٢٠٢٤. وقُدّم تصميمُ المحطة SEALER-UK بقدرة ٥٥ ميغاواط (كهربائي) المستند إلى تصميم المفاعل السويدي المتقدم

السريع المبرّد بالرصاص (SEALER) (الشكل باء-٥) إلى وزارة الأعمال والطاقة والاستراتيجية الصناعية البريطانية لاستعراضه. ومن بين تصاميم المفاعلات السريعة الأخرى الجاري تطويرها في أوروبا ثمّة تصميم ALFRED، وهو نموذج الإيضاح الأوروبي للمفاعلات السريعة المبرَّدة بالرصاص من الجيل الرابع المزود بسمات المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية الذي اقترحت رومانيا تشييده في مدينة ميوفاني، ونظام ALLEGRO، وهو مفاعل تجريبي سريع مبرد بالغاز.



الشكل باء-٥ - تصميم المفاعل السريع المبرد بالرصاص SEALER-UK بقدرة ٥٥ ميغاواط (كهربائي)

١٣٠- وفي الولايات المتحدة الأمريكية أكملت شركة "تيرا باور" TerraPower تصاميم قلب المفاعل المفاهيمية لمفاعلات الموجات المتنقلة وفق مفهوم "توليد-حرق". وتعكف شركة ويستينغهاوس على تطوير مفاعل نمطي صغير ابتكاري مبرَّد بالرصاص بقدرة ٤٥٠ ميغاواط (كهربائي). وفي شباط/فبراير ٢٠١٩، أعلنت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة عن خطط لتشييد مفاعل اختبارات متعدد الاستعمالات (VTR) لإجراء دراسات متعلّقة بالتشعيع في ظل تدفقات نيوترونية ذات طاقة عالية جداً.

١٣١- وتدعم الوكالة الدول الأعضاء في تطوير تكنولوجيات المفاعلات السريعة عبر تنظيم وإجراء مشاريع بحثية منسقة، وحلقات عمل ودراسات حول القضايا الراهنة. ويجري على وجه الخصوص، الاضطلاع بمشروعين بحثيين منسقين رئيسيين اثنين يساهمان في المضي قدما بتكنولوجيات المفاعلات السريعة: يتعلّق الأول بالمعايير المرجعية النيوترونية لاختبارات بدء تشغيل المفاعل التجريبي الصيني السريع، ويتعلّق الثاني بتحليل متعدد المجالات [النماذج] الفيزيائية لاختبار بشأن حالات انقطاع التدفق غير المحميّ أجري في مرفق تجارب التدفقات السريعة في الولايات المتحدة الأمريكية.

باء-٢-١- المفاعلات المبرَّدة بالغاز

١٣٢- على الرغم من التاريخ الطويل للمفاعلات المبردة بالغاز، فإن المفاعلات الوحيدة من هذا النوع التي ظلت قيد التشغيل التجاري هي المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالغاز في الولايات المتحدة الأمريكية والبالغ عددها ١٤ مفاعلاً. ومن المتوقع أن تشغّل بعض هذه المفاعلات حتى أوائل ثلاثينات هذا القرن، حيث أنّ عمرها التشغيلي محدود بشكل أساسي جراء سلوك الغرافيت النووي.

١٣٣- وأما المفاعلات المبرَّدة بالغاز الجاري تطويرها لأغراض نشرها في الأمد القريب، فجميعها مفاعلات مرتفعة الحرارة مبردة بالغاز صغيرة نمطية. وتعتمد هذه التصاميم على سمات الأمان الكامنة وهي تغني عن الحاجة إلى معظم نُظم الأمان الهندسية النشطة؛ ويُؤمِّنُ وقود الجسيمات المغلَّفة احتواء النشاط الإشعاعي. وتستخدم هذه المفاعلات الهليوم كمبرّد والغرافيت كمهدئ وهي تعمل في درجات حرارة أعلى (تعادل ٧٠٠ درجة مئوية أو تفوقها) مقارنة بمفاعلات القوى النووية المُشغّلة حالياً، مما يعزز من كفاءة توليد الكهرباء ومن إمكانية توسيع نطاق السوق الذي تستخدم فيه التطبيقات الحرارية للمعالجة الصناعية.

١٣٤- وفي كندا، تُنفَّذُ عدة أنشطة متعلّقة بمرحلة ما قبل ترخيص المفاعلات النمطية الصغيرة، تشمل أربعة من تصاميم المفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز. وقد تلقت هيئة الأمان النووي الكندية أول طلب ترخيص لمفاعل مرتفع الحرارة مبرد بالغاز صغير نمطي. ويقترِحُ الطلب الذي قدّمته شركة Global First Power، بدعم من شركة أونتاريو لتوليد الكهرباء (Ontario Power Generation) وشركة Ultra Safe Nuclear Corporation، نشر محطة في منطقة تشالك ريفر في أونتاريو تتضمّن مفاعلا نمطياً صِغَرياً [مِكرُوياً] من نوع المفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز.

١٣٥- ومن المقرّر أن تدخل وحدة المفاعل المرتفع الحرارة الحصوي القاع (HTR-PM) في الصين مرحلة التشغيل التجاري في عام ٢٠٢٠. وتتألّف هذه المحطة الإيضاحية الواسعة النطاق بقدرة ٢١٠ ميغاواط (كهربائي) من وحدتي مفاعل اثنتين مقترنتين بتُربين قوى واحد. وفيما يتعلّق بعمليات النشر مستقبلاً وفي إطار تصميم المفاعلات مرتفعة الحرارة التجاري HTR-PM600، ستُربط نفسُ تشكيلة المفاعلات ومولّدات البخار (ست وحدات) بتُربين قوى واحد بقدرة ٦٥٠ ميغاواط (كهربائي)، وثمة في الصين عدة دراسات جدوى تتعلّق بالنشر قيد النظر. واستُكمل مشروع تجديد مفاعل الاختبار HTR-10 ومن المزمع في هذا الشأن إجراء اختبارات إضافية لإثبات الأمان.

١٣٦- وفي اليابان، من المتوقّع أن يُسند الإذن بإعادة تشغيل مفاعل الاختبارات الهندسية العالي الحرارة بقدرة ٣٠ ميغاواط (حراري) في السنة المقبلة. ومن المتوقّع خلال السنوات القليلة المقبلة إجراء اختبارات إضافية لإثبات الأمان، والربط بتُربين قوى هليوم، وإثبات إمكانية إنتاج الهيدروجين النووي في درجات حرارة عالية. كما تسعى اليابان على نحو نشط إلى نشر المفاعلات الصغيرة ومتوسطة الحجم أو النمطية على الصعيد الدولي، وذلك استناداً إلى ما طورته من تكنولوجيات خاصة بالمفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز من خلال الشراكات الدولية.

١٣٧- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ثمة أنشطة جارية تتعلّق بتأهيل الوقود (اختبارات التشعيع واختبارات الحرارة) تُؤكّدُ قدرة الوقود النظيري الثلاثي الهيكل (TRISO) المتميّزة على الاحتفاظ بنواتج الانشطار. ونُشِرت متطلبات التصميم العامة فيما يتعلّق بالمفاعلات المتقدمة والمفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز ومن شأنها أن تُيسِّرَ وضع إطار أنسب في البلد فيما يتعلّق بالترخيص. ويستمرّ العمل على تأهيل بعض المواد، في حين تتلقى مرافق الاختبار الدعم لتوضيح خصائص الأمان الخامل. ومازالت الأنشطة المتعلّقة بمرحلة ما قبل ترخيص المفاعل XE-100 بقدرة ٧٥ ميغاواط (كهربائي) وبتصميم قاعه الحصوي جاريةً.

١٣٨- وتنظر العديد من البلدان المستهلّة في نشر مفاعلات مرتفعة الحرارة مبرَّدة بالغاز. وأدرجت المملكة العربية السعودية نشر المفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز ضمن مشروعها الوطني للطاقة الذرية الخاص بالتطبيقات الحرارية للمعالجة الصناعية في مجال صناعة البيتروكيميائيات. وأدرجت الأردن المفاعلات المرتفعة

الحرارة المبردة بالغاز ضمن ما تقوم به من دراسات جدوى نشر المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية لإنتاج الكهرباء، وتحلية مياه البحر وإنتاج الحرارة للمعالجة الصناعية، وتُواصل بولندا تنفيذ خططها لنشر المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرد بالغاز لأغراض التطبيقات الحرارية للمعالجة الصناعية. وفي إندونيسيا، توقفت المساعي الرامية إلى تشييد مفاعل القوى التجريبي الحصوي القاع بقدرة ١٠ ميغاواط (حراري)، بيد أن أنشطة البحث والتطوير في هذا الشأن متواصلة ويجري العمل على مشروع بالاشتراك مع الصين لتطوير مفاعل ذي حجم تجاري.

١٣٩- وتواصل المفوضية الأوروبية الاضطلاع بالأنشطة المتعلّقة بنشر المفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز كجزء من برنامج GEMINI+ المزمع استكماله في عام ٢٠٢٠. ويجري العمل على تطوير التكنولوجيات في جمهورية كوريا والاتحاد الروسي. وفي جنوب أفريقيا، توقفت أعمال البحث والتطوير بشأن مفهوم جديد لمفاعل ذي قاع حصوي من طراز AHTR-100.

١٤٠- وتعمل الوكالة على وضع وتعهد قاعدة بيانات المعارف المتعلقة بالغرافيت فيما يخص الغرافيت المشعّع، وهي تتضمّن سجلات تاريخية ومعارف من شأنها تيسير نشر المفاعلات المهدئة بالغرافيت في المستقبل.

١٤١- وبالإضافة إلى ذلك، اختتمت الوكالة جميع المشاريع البحثية المنسقة بشأن أوجه عدم التيقّن في تحليل المفاعلات، ووضع معايير تصميم الأمان فيما يتعلّق بالمفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز النمطية، وتطبيق الحرارة التي تولدها المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرَّدة بالغاز لأغراض استخراج المعادن لضمان منتوج أنظف وأكثر استدامة، ويجري العمل الآن على إعداد التقارير النهائية في هذا الشأن.

١٤٢- ونظرا إلى تزايد اهتمام الدول الأعضاء وتزايد طلباتها، اضطلعت الوكالة بأنشطة محدودة بشأن مفاعلات الأملاح المصهورة. ويجري إعداد وثيقة بشأن حالة تكنولوجيات مفاعلات الأملاح المصهورة استناداً إلى أنشطة البحث والتطوير المضطلع بها في الدول الأعضاء. ومن بين بعض المجالات ذات الاهتمام المشترك فيما يتعلّق بالمفاعلات المبردة بالغاز ثمة المواد المرتفعة الحرارة، وسلوك الغرافيت ووقود الجسيمات المغلَّفة (المستخدم في تصاميم المفاعلات المبردة بالأملاح المصهورة).

باء-٢-٢- المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية

١٤٣- يحرز تطوير تكنولوجيات المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية لأغراض نشرها آنياً أو في الأمد القريب تقدماً على الصعيد العالمي. وخلال المؤتمر الدولي بشأن تغيُّر المناخ ودور القوى النووية الذي نظمته الوكالة في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩، أشارت الدول الأعضاء المشاركة إلى أنّ من شأن المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية في حال وفّرت مخرجات نمطية بقدرة ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي) أن تكون المصدر الأكثر فعالية للكهرباء الخالية من ثاني أكسيد الكربون وأن تحُلَّ بذلك محلَّ المحطات المتقادمة العاملة بالوقود الأحفوري. وبالإضافة إلى ذلك، ونظراً إلى الحصة الأعلى من القوى التي تقدّمها مصادر الطاقة المتجدِّدة المتقطعة في جميع القارات، تُعتبر المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية عاملا لا يمكن الاستغناء عنه لكفالة تآزر عمليات التشغيل بالحمل الاساسي وعمليات التشغيل المرن مع مصادر الطاقة المتجددة بغية ضمان أمن إمدادات الطاقة.

١٤٤- وتتمثل التحديات الرئيسية الماثلة أمام نشر المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية على نطاق واسع في إثبات أنَّ عامل النمطية سيُحقّق التكاليف المعيارية الأدنى المتعهد بها من خلال الوفرة التي من شأن الإنتاج التسلسلي أن يدرّها، وما إذا كان تبسيط عملية التصميم والوقت القصير الذي يستغرقه التشييد يؤديان إلى وضع مخططات تمويل أيسر وأقل تكلفة. وتظل الفجوات بين البلدان الحائزة للتكنولوجيا والبلدان المستهلة ذات الاقتصادات النامية كبيرة فيما يتعلّق بالتوصل إلى فهم مشترك بشأن متطلبات ومعايير التصاميم والتكنولوجيات المجدية فيما يخص المفاعلات النمطية الصغيرة. ولذلك، من الأهمية بمكان أن توضع متطلبات المستخدم العامة الرفيعة المستوى الخاصة بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية، التي تتناول مختلف السياسات المتبعة في هذا الشأن.

١٤٥- وثمة أكثر من ٥٠ تصميماً ومفهوماً متعلّقين بالمفاعلات النمطية الصغيرة في مراحل مختلفة من التطوير لأغراض تطبيقات شتى.

١٤٦- واستُكمل في الصين والاتحاد الروسي تشييد محطتين اثنتين جديدتين من محطات القوى النووية تشملان مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم أو نمطية، ويجري العمل حالياً على بدء إدخالهما في الخدمة تحضيرا لربطهما بشبكة الكهرباء مع إمكانية تشغيلهما تجارياً في عام ٢٠٢٠.

١٤٧- وفي الأرجنتين، بلغت الوحدة النموذجية الخاصة بمفاعل CAREM-25 مرحلة متقدمة من التشييد، وذلك في موقع محطة Néstor Carlos Kirchner للقوى النووية، ويهدف القائمون عليها إلى تحميلها بالوقود وبدء إدخالها في الخدمة في أيلول/سبتمبر ٢٠٢٢. وهذه الوحدة النموذجية مصممة لتوليد ١٠٠ ميغاواط (حراري) و٣٤ ميغاواط (كهربائي) إجمالياً. وسيعمل مفاعل الماءِ المضغوطِ-المتكامل هذا وهو من نوع المفاعلات النمطية الصغيرة في وضع الدوران الطبيعي الكامل كما أنه سيعتمد سمات الأمان الخامل على نحو كامل. وقد طُوّر مفاعل CAREM-25 باستخدام التكنولوجيات المحلية، كما أن ما لا يقل عن ٧٠٪ من مكوناته ومن الخدمات ذات الصلة متأتية من شركات أرجنتينية.

١٤٨- وتُحدِّدُ خريطة الطريق التي رسمتها كندا والمتعلقة بالمفاعلات النمطية الصغيرة التطبيقات المحتملة لعمليات الإحلال من داخل الشبكة ومن خارجها لمحطات التوليد بوقود الديزل والوقود الأحفوري، بما يشمل المحطات المستخدمة في صناعات النفط والتعدين. وفي الوقت الحالي، يعمل ١٢ من المصمِّمين/البائعين للمفاعلات النمطية الصغيرة مع هيئة الأمان النووي الكندية، كما تسعى شركة Global First Power للحصول على ترخيص لتهيئة موقع من أجل مفاعل صغير ومتوسط الحجم أو نمطي في مختبرات تشوك ريفر.

١٤٩- وفي الصين، استكُمل تشييد المفاعل المرتفع الحرارة الحصوي القاع (HTR-PM) الذي سيولّد ٢١٠ ميغاواط (كهربائي) عبر وحدتين اثنتين موصّلتين بنظام توليد بتربين بخاري، وهو الآن قيد الإدخال في الخدمة. لمزيد من التفاصيل حول وحدة المفاعل المرتفع الحرارة الحصوي القاع (HTR-PM)، انظر القسم باء-٢-١. كما استهلّت الصين في تشانغ جيانغ بمحافظة هاينان مشروعَ تشييدٍ يتعلق بالمفاعل ACP100، الذي يُعرف أيضاً باسم "Linglong One"، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل بقدرة ١٢٥ ميغاواط (كهربائي) مصمم كمفاعل قوى صغير متعدد الأغراض. وتقدّر المدة التي سيستغرقها التشييد بخمس سنوات، ويُتوقّعُ البدء في مرحلة الإدخال في الخدمة فيما يتعلّق بتوليد الكهرباء ولتطبيقات الحرارية للمعالجة الصناعية والمياه المحلاة، في عام ٢٠٢٥. وفيما يتعلّق بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية البحرية القائمة على تكنولوجيا

مفاعلات الماء المضغوط، عكفت الصين على تطوير تكنولوجيا خاصة بثلاثة من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة وهي المفاعل ACPR50S، والمفاعل ACP100S- والمفاعل CAP-F.

١٥٠- وخلال الدورة العادية الثالثة والستين للمؤتمر العام للوكالة في أيلول/سبتمبر ٢٠١٩، أعلن كونسورتيوم وطني فرنسي يضم المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة وهيئة كهرباء فرنسا (Électricité de France)، وشركة TechnicAtome عن إطلاق مفاعل NUWARD، وهو مفاعل نمطي صغير-متكامل من نوع مفاعلات الماء المضغوط يُشغّل بالحمل القسري ومجهّز بنظم أمان متقدّمة، بالإمكان نشره في الأسواق الخارجية في أوائل ثلاثينات هذا القرن.

١٥١- وتضافرت جهود جمهورية كوريا والمملكة العربية السعودية لاستكمال التصميم التفصيلي لمفاعل SMART، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل بقدرة ١١٠ ميغاواط (كهربائي) (٣٦٥ ميغاواط (حراري)) يشترك في ملكيته كلا البلدين. وسيُشيَّدُ هذا المفاعل في المملكة العربية السعودية لأغراض التوليد المشترك للكهرباء وتحلية مياه البحر. ومكّن هذا التصميم الجديد المُحسّن من زيادة القوى المُولّدة وإدماج سمات الأمان الخامل على نحو كامل. وبمجرّد استكماله، سيُقدَّم هذا التصميم إلى الهيئة المعنية في جمهورية كوريا لأغراض اعتماده، وسيقدَّم كذلك طلب ترخيص بشأن استخدامه في المملكة العربية السعودية.

١٥٢- وفي الاتحاد الروسي، وصلت محطة أكاديميك لومونوسوف للقوى النووية العائمة (الشكل باء-٦) المجهزة بمفاعل نمطي صغير مدمج من نوع مفاعلات الماء المضغوط ومن طراز KLT-40S compact، إلى بيفيك في منطقة تشوكوتكا في منتصف أيلول/سبتمبر، بعد أن تم جرّها لمسافة ٤٩٠٠ كم انطلاقا من مرفأ التزويد بالوقود في مورمانسك. وحصُلت محطة القوى النووية العائمة على رخصة التشغيل في تموز/يوليه ٢٠١٩ ووُصِّلت بالشبكة الكهربائية في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩، وهي مجهزة بوحدتي مفاعل من طراز KLT40S بقدرة ٣٥ ميغاواط (كهربائي) تُولدان مجتمعتين ما يزيد عن ٧٠ ميغاواط (كهربائي) و٥٠ غيغا كالوري من الطاقة الحرارية في الساعة، بما يكفي لتزويد مدينة يبلغ عدد سكانها حوالي ١٠٠٠٠٠ نسمة بالطاقة. ويتمثل الغرض من محطة القوى النووية العائمة في أن تحِلَّ محلَّ محطة Bilibino للقوى النووية ومحطات القوى المتقادمة التي تعمل بالفحم في Bilibino، وذلك لتشغيل مجمع تعديني وتزويد منصات نفط في القطب الشمالي بالكهرباء. كما يمكن لمحطة القوى النووية العائمة إنتاج المياه المحلاة.

الشكل باء-٦ - محطة أكاديميك لومونوسوف للقوى النووية العائمة (الصورة من: روزاتوم)

١٥٣- وفي الاتحاد الروسي، يُنظرُ في إمكانية تشييد المفاعل RITM-200، وهو مفاعل نمطي صغير متكامل من نوع مفاعلات الماء المضغوط، في جمهورية ساخا (ياكوتيا). وفي الأصل، صُمم هذا المفاعل ونُشر في السفن النووية الكاسحة للجليد بيد أنه يجري تطوير نسخته البرية الموصولة بالشبكة الكهربائية لأغراض نشرها في الأمد القريب.

١٥٤- وفي عام ٢٠١٩، واصلت المملكة المتحدة العمل على تطوير تكنولوجيا الخاصة بالمفاعل النمطي الصغير البريطاني، وهو تصميم يتعلّق بمفاعل نمطي صغير ثلاثي الحلقات من نوع مفاعلات الماء المضغوط قادر على توليد ٤٥٠ ميغاواط من الكهرباء، وذلك بهدف الحصول على الموافقة على التصميم لأغراض النشر على الصعيد المحلي في ثلاثينات هذا القرن.

١٥٥- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأت شركة NuScale في الربع الأول من عام ٢٠١٧ بالاشتراك مع الهيئة الرقابية النووية عملية استعراض طلب اعتماد التصميم الخاص بمفاعلها، ومن المتوقع أن تحصل على اعتماد التصميم بحلول نهاية عام ٢٠٢٢. ووحدة القوى نوسكايل (NPM) هي عبارة عن مفاعل ماء مضغوط متكامل يعمل بالدوران الطبيعي الكامل ويعتمد سمات الأمان الخامل على نحو كامل. وتولّد وحدة قوى نوسكايل بقدرة ٦٠ ميغاواط (كهربائي) الطاقة بتزايُديّة يُمكن تحجيمها إلى ٧٢٠ ميغاواط (كهربائي) إجماليا، وذلك في محطة قوى نووية واحدة. ويُعدُّ حجم التشكيلة المكونة من ١٢ وحدةً حجم المحطات المعياري المعتمد حالياً فيما يتعلّق بأنشطة التصميم والترخيص، ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل المحطة في مختبر أيداهو الوطني في منتصف عام ٢٠٢٠.

١٥٦- وإنّ معظم المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية المبردة بالماء هي من مفاعلات الماء المضغوط وتعمل إما على نحو مدمج، أو متكامل أو حلقي. بيد أن اليابان والولايات المتحدة الأمريكية عززتا مشاريع تطوير التصاميم والتكنولوجيات الخاصة بمفاعل BWRX-300، وهو مفاعل ماء مغلي يعمل بالدوران الطبيعي مُصَمّمٌ لتوليد ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي) بسيطُ التصميم ويعتمد سمات الأمان الخامل. ويجري تطوير هذا

المفاعل النمطي الصـغير من نوع مفاعلات الماء المغلي التي تعمل في دورة بخار مباشـرة اسـتناداً إلى تصـميم مفاعل الماء المغلي الاقتصادي المبسط بقدرة ١٥٢٠ ميغاواط (كهربائي) المرخص من قبل الهيئة الرقابية النووية.

١٥٧- وخلال عام ٢٠١٩، أحرزت مجموعة فرعية من المفاعلات الصـغيرة والمتوسـطة الحجم أو النمطية تُعرف أيضـاً باسـم المفاعلات النمطية الصِـّغَرية [المِكرُوية] تقدماً في عدة بلدان، بما في ذلك كندا والولايات المتحدة الأمريكية. ومن الأمثلة على ذلك المفاعل النمطي الصِـّغَري [المِكرُوي] ذي القلب المرتفع الحرارة المبرَّد بالغاز والمزوّد بكتلة موشـورية الجاري تصـميمه لتبلغ قدرته الإنتاجية التقريبية ٥ ميغاواط (كهربائي). وقد قُدِّم هذا المفاعل إلى هيئة الأمان النووي الكندية بغية اسـتعراض تصـاميم المورد. ولا يوجد بعد توافق آراء عالمي بشـأن تعريف المفاعلات النمطية الصِـّغَرية [المِكرُوية] ومدى قدرتها. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، ثمة تصميمُ مفاعل ماء مضغوط متكامل يعرف باسم SMR-160 خاضع هو أيضاً لتقييمات التصميم.

١٥٨- وفي عام ٢٠١٩، اسـتهلّت الوكالة مشـروعاً جديداً يهدف إلى دعم الدول الأعضـاء المهتمة بنظم الطاقة الهجينة الخالية من الكربون في إدماج مصادر الطاقة المتجدّدة المتغيرة، والمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم والنمطية، وتخزين الطاقة والتطبيقات غير الكهربائية.

باء-٢-٣- المبادرات الدولية بشأن نُظم الطاقة النووية الابتكارية

١٥٩- يجمع المشـروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود النووي الابتكارية، الذي وضـعته الوكالة في عام ٢٠٠٠، مُطوّري التكنولوجيات ومورّديها وزبائنها للنظر في الإجراءات الدولية والوطنية الهادفة إلى تحقيق الابتكارات المرجوَّة فيما يتعلَّق بالمفاعلات النووية ودورات الوقود النووي لأغراض اسـتدامة القوى في الأجل الطويل. ويضـم مشروع إنبرو حالياً ٤٢ عضـواً — ٤١ دولة عضـواً والمفوضـية الأوروبية — وهو يوفِّرُ محفلاً دوليا للنظر في القضـايا التي تثير الاهتمام وتنسـيق السـياسـات، وتمكين حائزي التكنولوجيا ومستخدميها من التعاون والتواصل بشأن اهتماماتهم واحتياجاتهم في المجالات ذات الصلة.

١٦٠- وفيما يتعلّق بتعزيز الرؤية الشـاملة بشـأن التنمية المستدامة للطاقة النووية في القرن الحادي والعشـرين، بلغت الوثائق المتعلّقة بالأدوات الخاصة بنمذجةِ سيناريوهات نُظم الطاقة النوويةِ وتحليلها ورسمِ خرائط طرق لها المراحل الأخيرة من عملية النشـر. وفي عام ٢٠١٩، أجريت في الاتِّـحاد الروسـي والمكسـيك حلقات عمل وفعاليات تدريبية باسـتخدام هذه الأدوات، ومن المعتزم إجراء إحداها في تايلند في عام ٢٠٢٠. كما عُقد في جمهورية كوريا في عام ٢٠١٩ محفل من محافل مشروع إنبرو للحوار حول "الفرص والتحديات في المفاعلات النمطية الصـغيرة". وتُمكِّنُ محافل الحوار مشـروع إنبرو من إشـراك الدول الأعضـاء في الحوار بشـأن القضـايا الناشئة فيما يتعلّق باستدامة نظم الطاقة النووية.

باء-٢-٤- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

وسواء تَنَزَّلَ استخدام الطاقة النووية لأغراض التطبيقات غير الكهربائية في إطار التوليد المشترك أو كان مدمجاً مع مختلف موارد الطاقة المتجددة، من شأنه اقتحام طائفة واسعة من القطاعات بما في ذلك: تحلية المياه، والنقل (على سـبيل المثال فيما يتعلّق بإنتاج الهيدروجين للمركبات العاملة بالخلايا الوقودية)، والسـكن (تدفئة الأحياء السـكنية والتبريد)، والصـناعة (صـناعات إنتاج البتروكيميائيات والفولاذ والوقود الاصطناعي).

١٦١- في عام ٢٠١٩، استُخدم ما مجموعه ٧٤ مفاعل قوى نووية عاملاً (١٥ في آسيا و٥٩ في أوروبا) في جميع أنحاء العالم لتوليد ٢١٢٢,٩٢ غيغاواط-ساعة من المكافئ الحراري الكهربائي بغية دعم التطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية. ومن بين هذه المفاعلات، دعم ١١ منها تحلية المياه (باستخدام ٣١,٤ غيغاواط-ساعة)، و٥٨ منها تدفئة الأحياء السكنية (باستخدام ١٩٧٩,٢٧ غيغاواط-ساعة) و٣٣ منها التطبيقات الحرارية للمعالجة الصناعية (باستخدام ١٣١٣,٨٦ غيغاواط-ساعة). ولا يزال الاهتمام بالتطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية يتزايد في جميع أنحاء العالم. ويُوفّر استخدام الطاقة النووية في خدمة هذه القطاعات مساراً مستداماً لضمان أمن الطاقة ومكافحة تغيُّر المناخ. ومن شأن استرداد الحرارة الضائعة الناتجة من محطات القوى النووية (أي الحرارة المبدَّدة التي تطردها مُكثِّفات محطات القوى النووية) واستخدامها في التطبيقات غير-الكهربائية أن يؤدي إلى زيادة إجمالية في الكفاءة الحرارية للمحطات وأن يُقلّل من التأثير البيئي لهذه الحرارة عندما تُفرّغُ في الأنهار أو غيرها من الأجسام المائية. وبإمكان التوليد المشترك باستخدام الحرارة المبدَّدة المُستردّة أن يعوِّض جزءاً كبيراً من تكاليف توليد القوى النووية. فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام الحرارة المبدَّدة المُستردّة من المفاعلات المرتفعة الحرارة المبردة بالغاز في تحلية مياه البحر، مما يُسفر عن استرداد في التكلفة مقارنة بسعر المياه المنتجَة عبر تحلية المياه في محطات القوى العاملة بالغاز أو النفط. وبالفعل، يمكن لمحطات القوى النووية أيضاً أن توفر الحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية أو البخار على نحو ملائم وفعال من حيث التكلفة. ويمكن استخدام هذه التقنية فيما يتعلّق بعدة تطبيقات أخرى، بما يشمل تدفئة الأحياء السكنية والتبريد.

١٦٢- وفي الصين، أعلن في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩ أن هاييانغ هي أول مدينة في الصين تُزوَّدُ بالحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية والتي تُولّدها وحدتان من طراز AP1000 في محطة هاييانغ للقوى النووية. ووفقاً لشركة شاندونغ للقوى النووية (SDNPC)، وهي الجهة المالكة لمحطة هاييانغ للقوى النووية، فإنّ هذا المشروع سيتوسّع ليشمل مدينة هاييانغ بأكملها بحلول عام ٢٠٢١. وتُقدّر شركة شاندونغ للقوى النووية أنّه بإمكان هاتين الوحدتين تلبية الطلب المستقبلي فيما يتعلق بتدفئة الأحياء السكنية الممتدة على مساحة تصل إلى ٢٠٠ مليون متر مربع، مما سيوفر ٦,٦ مليون طن من الفحم سنوياً. وتتوافر في الوقت الحالي حلول تكنولوجية لنقل كميات كبيرة من الحرارة (~ غيغاواط) لمسافات طويلة (~ ١٠٠ كم) بأدنى المستويات من حيث فقدان الحرارة.

١٦٣- وتُعتبرُ تحلية مياه البحر باستخدام الحرارة المفرّغة من مكثّفات محطات القوى النووية أو الحرارة المستخرجة في شكل بخار يُولَّدُ عبر عملية منخفضة الجودة خلال المراحل الأخيرة من تشغيل التوربينات ذات الضغط المنخفض ويُلقَّم في نظام للترشيح وتحلية المياه متعدّد التأثيرات خياراً مجدياً عند النظر في استهلال مشاريع محطات القوى النووية. وتُلبي/تدعم هذه العملية الاحتياجات من المياه في محطات القوى على امتداد دورة حياتها أي: مراحل التشييد، والتشغيل، والإخراج من الخدمة. وتُعزز أوجه التقدّم المحرزة في مجال التكنولوجيات ذات الصلة بالتحلية من قبيل نُظُم التشغيل في درجات حرارة منخفضة، ونُظُم استرداد الحرارة المبدَّدة، ونُظم الطاقة والعمليات المتسمة بالكفاءة، وتحقيق المستوى الأمثل للعمليات الابتكارية، من إمكانيات التحلية النووية. وتُعتبر التحلية الحرارية والغشائية المتكاملة والهجينة الخيار الأمثل فيما يتعلّق بالتحلية النووية. ومن شأن ذلك أن يقلّص من استهلاك الطاقة، وحجم مأخذ مياه البحر وتكاليف مخارج التصريف. وأعربت عدّة دول أعضاء، بما في ذلك الأردن، وباكستان، والبرازيل، والصين، ومصر، والمملكة العربية السعودية، والهند، عن اهتمامها بالتحلية النووية أو جدّدت اهتمامها بهذا المجال.

١٦٤- ومن شأن استخدام الطاقة النووية لإنتاج الهيدروجين تمكين أسطول المفاعلات النووية المرن من أداء دور رئيسي، مستقبلاً، فيما يتعلّق باقتصاد الهيدروجين والتخفيف من حدَّة تغيُّر المناخ. وبوسع محطات القوى النووية العاملة حالياً إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي المتقدّم للمياه في درجات حرارة منخفضة. ويمكن تحسين اقتصاديات هذه العملية عبر استخدام الكهرباء المولّدة خارج ساعات الذروة. وفي السنوات الأخيرة، أحرزت عدة تكنولوجيات أخرى خاصة بإنتاج الهيدروجين تقدماً، بما في ذلك التحليل بالكهرباء في درجات حرارة منخفضة، ودورات إنتاج الهيدروجين الحرارية الكيميائية أو الحرارية الكهربائية-الكيميائية. وبالإمكان إدماج هذه التكنولوجيات في تصاميم المفاعلات المرتفعة الحرارة مستقبلاً.

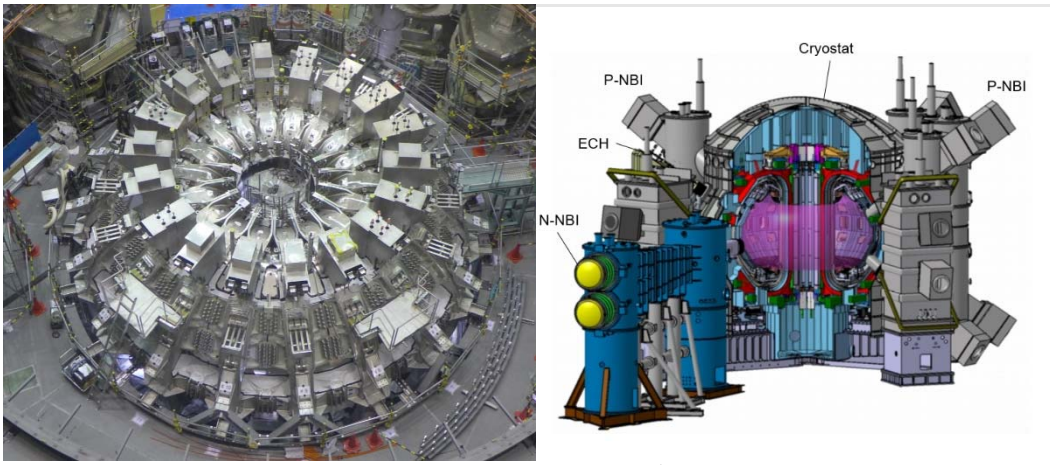
باء-٣- الاندماج

١٦٥- أحرز تقدّم كبير في أعمال تشييد المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، حيث استكملت أكثر ٧٣٪ من الأعمال المدنية (الشكل باء-٧). ومؤخراً، أُعيد تأكيدُ الجدول الزمني المنقح المتعلّق بأعمال التشييد، الراجع تاريخه إلى عام ٢٠١٦، مما أدى إلى الحفاظ على الموعد الأصلي المحدّد لإنتاج أول بلازما بحلول نهاية عام ٢٠٢٥. أما مبنى التوكاماك، فهو جاهز لأعمال تركيب ترموستات للحرارة المنخفضة، المزمع تنفيذها في آذار/مارس ٢٠٢٠، وستستغرق أعمال تركيب هذا المكوّن أكثر من أربع سنوات. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي بكامل طاقته من حيث قوى الاندماج في عام ٢٠٣٥.

الشكل باء-٧- صور لموقع تشييد المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في نيسان/أبريل ٢٠١٤ (يساراً) وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩ (يميناً) (الصورة من: المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

١٦٦- وفي حزيران/يونيه ٢٠١٩، عززت الوكالة والمنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي علاقتهما التعاونية طويلة الأمد من خلال التوقيع على ترتيبات عملية. وفي إطار هذه الترتيبات الجديدة، ستَتَقاسم المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي مع الوكالة ومع الدول الأعضاء في الوكالة البالغ عددها ١٧١ دولة خبراتها ذات الصلة بأمان الاندماج النووي والوقاية من الإشعاعات. كما ستُنفّذُ هاتان المنظمتان مبادرات تثقيفية بشأن فيزياء البلازما وهندسة الاندماج، وستُنسّقان أنشطة تواصل خارجي مع الجمهور، وستتعاونان في مجالي إدارة المعارف وتنمية الموارد البشرية.

١٦٧- وبُلِغَ معلم هام آخر فيما يتعلّق بتطوير مجال الاندماج كمصدر من مصادر الطاقة في المستقبل هو تشييدُ جهاز JT-60SA (الشكل باء-٨)، وهو عبارة عن توكاماك فائق التوصيل جار تشييده في ناكا باليابان في إطار تعاون دولي بين أوروبا واليابان.



الشكل باء-٨- تمثيل بياني لجهاز JT-60SA (يميناً) مع صورة لعمليات التجميع الطوقي المشارفة على الانتهاء. (الصورة من: بياترو باراباسكي وآخرين، قُدّمت خلال مؤتمر الوكالة المعني بطاقة الاندماج لعام ٢٠١٨)

١٦٨- وبما أنه يُتوقّعُ إدخال جهاز JT-60SA في الخدمة في عام ٢٠٢٠، من المتوقع أن يصبح هذا الجهاز مشغلا قبل خمس سنوات من تشغيل المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي وذلك لكي تدعم الاختبارات التي ستجرى بواسطته عمليةَ إدخال المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في الخدمة وتشغيله. ومن بين المواضيع البحثية التي سيُمكّن جهاز JT-60SA من التطرق إليها فيزياءُ الجسيمات العالية الطاقة، وهندسة الاندماج، وتطويرُ نظم التشغيل، والأهم من كل ذلك، إنتاجُ البلازما والمخططاتُ الرقابية. كما أنَّ الاختبارات التي ستُجرى بواسطة جهاز JT-60SA ستُكمّلُ أعمال البحوث المشتركة مع المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي عبر معالجة بعض من أصعب المسائل المادية والتكنولوجية التي قد تواجهها محطات قوى الاندماج الإيضاحية المزمع تشييدها مستقبلاً، مثلما هو الحال بالنسبة إلى محطة قوى الاندماج الإيضاحية DEMO.

١٦٩- ومن المواضيع التي نُوقشت خلال حلقة العمل السادسة الخاصة بمحطة قوى الاندماج الإيضاحية التي عقدت تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٩ في موسكو بالاتحاد الروسي، استقرارُ البلازما، وعلومُ المواد، وتأثير الظروف التشغيلية فيما يتعلّق بمحطة القوى الإيضاحية. وشارك في هذه الفعالية قرابة ٦٠ خبيراً من ١٤ بلداً، ومنظمة Fusion for Energy التابعة للاتحاد الأوروبي والمنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي. وخلال حلقة العمل[٢] المذكورة التي تُنظّمُ مرة كل سنتين، تُناقشُ التحديات العلمية والتقنية الرئيسية التي تواجهها محطة قوى الاندماج الإيضاحية، وتُحَلّلُ البرامج والمهام ومختلف مسارات العمل المحتملة في هذا الشأن. ورغم أن كل مشارك يمكن أن تكون له أولوياته الخاصة فيما يتعلّق بالبحوث، يتمثّل الهدف من حلقات العمل هذه في تنسيق الجهود ذات المنفعة المتبادلة وفي تيسير التعاون الدولي.

١٧٠- وفي عام ٢٠١٩، أطلقت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية برنامجاً محلياً خاصاً بالاندماج يركّز على التطورات التكنولوجية الرئيسية، بما في ذلك عددا من المبادرات الخاصة بتمويل وتعزيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص. وتهدف هذه المبادرة إلى أن تكون بمثابة برنامج تجريبي للاستفادة من الفرص المتاحة في مجالات البحث والتطوير فيما يتعلّق بالاندماج الحرج، والإسراع بوتيرة التقدم نحو تطوير طاقة الاندماج.

[٢] لمزيد من المعلومات، يرجى الاطلاع على الموقع التالي https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DEMO_landing.aspx.

١٧١- وفي غضون ذلك، أنشئ في السنوات الخمس الأخيرة عدد كبير من الشركات الخاصة وأقيم عدد كبير من الشراكات بين القطاعين العام والخاص، في كندا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية بالأساس، وأيضاً في بلدان أوروبية أخرى وفي الصين. وفي هذا السياق، أُنشأت رابطة صناعة الاندماج في الولايات المتحدة الأمريكية بمثابة شبكة دولية من الشركات التي تعمل على تزويد العالم بالكهرباء باستخدام طاقة الاندماج بهدف الترويج للاندماج باعتباره مصدراً جديداً من مصادر الطاقة.

١٧٢- ومن المحتمل أن يؤدّي ظهور هذه الكيانات الجديدة، المدعومة جزئياً من رأس المال الخاص، إلى تغيير السيناريو التقليدي فيما يتعلّق بتطوير مجال الاندماج، حيث أن التقدّم المحرز في هذا الشأن كان مستنداً إلى مشاريع تموّلها إلى حد كبير الحُكوماتُ. ولذلك، ستكون ثمة حاجة إلى وضع مبادئ توجيهية ومعايير دولية في هذا المجال بغية المساعدة في التصميم، وتيسير عملية الترخيص، وإجراءات الأمان والأمن، وخطط التصرف في النفايات، وكافة دراسات الجدوى المتعلّقة بمفاعلات الاندماج المستقبلية، بما يشمل تحليل التكاليف والمنافع وسيناريوهات تقييم الآثار الاجتماعية والاقتصادية.

جيم- المعجِّلات ومفاعلات البحوث

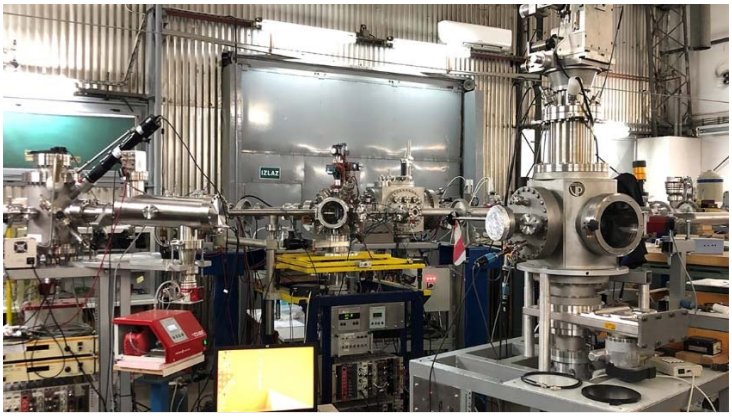
جيم-١- المعجِّلات والأجهزة المرتبطة بها

١٧٣- يعرض هذا القسم التطورات الرئيسية في تكنولوجيا المعجِّلات وتطبيقاتها والأجهزة المرتبطة بها. وتشمل تطبيقات المعجلات الأكثر شيوعاً إنتاج نظائر مشعة للتشخيص الطبي للسرطان وعلاجه؛ ومصادر مكثفة للأشعة السينية لتعقيم المعدات الطبية والمنتجات الغذائية؛ وحزم الجسيمات المشحونة لتحليل علوم المواد وتشعيعها؛ وتحديد العمر باستخدام الكربون المشع؛ وإنتاج النيوترون القائم على المعجلات مع تطبيقات تتراوح من التنقيب عن المعادن والنفط إلى قياسات البيانات النووية أو مصادر التشظية الشديدة باستخدام النيوترونات.

جيم-١-١- مرفق الحُزم المزدوجة يفتح فرصاً جديدة لأبحاث المواد

١٧٤- دُشّن في زغرب مرفقُ للحُزم الأيونيّة المزدوجة (الشكل جيم-١) يُمكِّن من دمج حُزْمَتين أيونيَّتين من معجِّلات مختلفة على نحو متزامن، الأمر الذي يعزّز بحوث الاندماج النووي في كرواتيا ويوسّع النطاق العالمي للمرافق التي لديها مثل هذه القدرات الفائقة.

١٧٥- ومرفق المصادر الأيونية والحُزم المزدوجة "He Ion Source and DiFU Dual-Beam Facility" التابع لمعهد رودر بوكوفيتش، والذي تمّ تركيبه بدعم من الوكالة، سيساعد العلماء على اختبار وتطوير موادّ هيكليّة جديدة تستخدم في العديد من تكنولوجيات الطاقة. ولا تولِّد التفاعلات الانشطارية والاندماجية النيوترونات النشطة للغاية فحسب، بل يمكنها أيضاً إنتاج غاز (الهيدروجين والهيليوم) من شأنه أن يُتْلِف هياكل المفاعلات ومكوناتها بعد مرور بعض الوقت من التعرض له. ويمكن لتكنولوجيا الحُزم الأيونية محاكاة هذه الظروف القاسية والمساعدة في تطوير مواد جديدة قوية بما يكفي لتحمل هذه الظروف.



الشكل جيم-١ - مرفق المصادر الأيونية والحُزم المزدوجة "He Ion Source and DiFU Dual-Beam Facility" في معهد رودر بوكوفيتش بكرواتيا. (المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

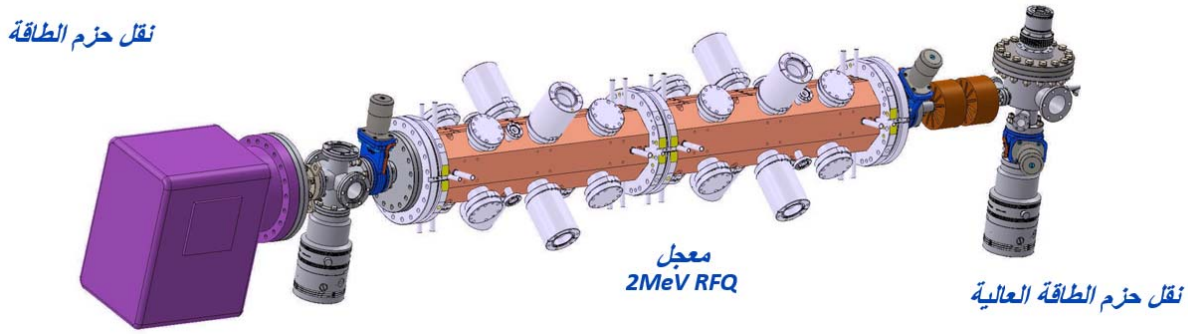
١٧٦- وفي هذا المرفق، يتم توجيه حزمتين نحو عينة فولاذية المادة المستخدمة عادةً في المفاعلات الاندماجية بسبب متانتها - لمحاكاة كيفية تفاعُل نواتج التفاعلات الانشطارية أو الاندماجية مع هذه المادة وتعديلها. وهذا التفاعل النووي، بالإضافة إلى احتمال إتلاف البنية البلورية للمادة، ينجم عنه نواتج غاز التحويل مثل الهليوم والهيدروجين. وقد يقود ذلك إلى تشكُّل فقاعات داخل الفولاذ، مما قد يؤدي إلى تضخُّم المادة. وبمعرفة كيف ومتى تحدث مثل هذه التفاعلات، يمكن للعلماء تكييف المواد لمواجهة هذه الآثار غير المرغوب فيها.

جيم-١-٢- المعجل المتحرك للتحليل غير المتلِف للتراث الثقافي في الموقع "ماكينا"

١٧٧- المعجّل "ماكينا" هو معجل جسيمات مدمج من الجيل التالي، تم تطويره من خلال التعاون الدولي بين المعهد الوطني للفيزياء النووية في إيطاليا والمنظمة الأوروبية للبحوث النووية في سويسرا، ولديه القدرة على تحقيق طفرة في التحليل الموقعي لعناصر قطع التراث الثقافي. ويعالج هذا المعجل طلب أمناء المتاحف ومؤرخي الفنون والمسؤولين عن الترميم بإجراء تحليلات للأعمال الفنية بحزم الأيونات غير الغازية في الموقع — وهو عامل رئيسي في دراسة الأعمال الفنية التي لا يمكن نقلها والتي لا تقدر بثمن، مثل اللوحات الجدارية الهشة واللوحات الكبيرة أو الحساسة للنقل.

١٧٨- وكما هو مبين في الشكل جيم-٢، يعد المعجل "ماكينا" نظاماً مدمجاً وقابلاً للنقل يستند إلى تكنولوجيا التردد اللاسلكي الرباعي الأقطاب العالي التردد التي طورتها المنظمة الأوروبية للبحوث النووية. وهو منخفض الوزن (حوالي ٣٠٠ كغ)، ويسهل نقله ويستغرق ساعتين فقط لتفكيك/إعادة تجميع النظام بأكمله. وهو قوي ومدمج للغاية (يبلغ حجمه ٢,٥ م × ٠,٦ م، وارتفاعه قابل للتعديل حتى حوالي ١ م) واستهلاكه للطاقة منخفض للغاية (إجمالي الطاقة المستهلكة من ٧ إلى ٨ كيلوواط). وسيستخدم النموذج الأول[٣] في مؤسسة Opificio delle Pietre Dure في فلورنسا بإيطاليا، ويتوقع إتاحته للمختبرات والمتاحف الأوروبية الأخرى.

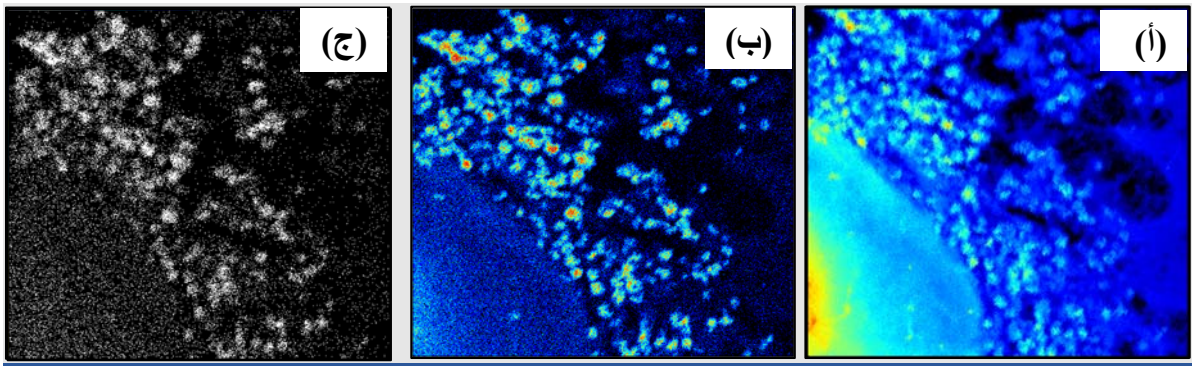
[٣] لمزيد من المعلومات، انظر http://home.infn.it/en/media-outreach/2015-03-26-11-50-59/2693-piccolo-preciso-e-potente-arriva-machina-l-acceleratore-per-i-beni-culturali-2.



الشكل جيم-٢ - رسم تخطيطي للمكونات الرئيسية للمعجل "ماكينا" . ويمكن استخراج الحزم الأيونية في الجانب العالي الطاقة من المعجل لتحليل القطع الأثرية. وتعتمد التطبيقات الأولى على تقنية انبعاث الأشعة السينية المستحث بالجسيمات، حيث تتولد الأشعة السينية بسبب تفاعلات الجسيمات. ثم يتم الكشف عن الأشعة السينية المنبعثة، وبعد تقييم البيانات، يتم تحديد تكوين العينة. (الصورة من: مشروع المعجل "ماكينا")

جيم-١-٣- تصوير الخلايا بأكملها باستخدام حُزم أيونية ذات طاقات تقدر بالملايين من الإلكترون فلط

١٧٩- القدرة على رؤية هياكل الصور داخل الخلايا بأكملها باستبانة حيزية أقل من ١٠٠ نانومتر مهمة لمجموعة واسعة من التطبيقات في علم الأحياء، بما في ذلك سُبُل إعطاء الأدوية والبيولوجيا الإشعاعية والعلاج بالجسيمات (المحاسيس الإشعاعية). وتوفر الحزم الأيونية الشديدة التركيز الناتجة عن المعجلات ذات الطاقات الأيونية التي تقدر بملايين الإلكترون فلط فرصاً فريدة لهذه التطبيقات. ومن خلال الكشف المتزامن عن طاقة الأيونات المنبعثة (الفحص المجهري عن طريق مسح الأيونات المنبعثة) والضوء المرئي الذي تولده، يمكن للباحثين تسجيل الصور لاستكشاف كل من تركيب الجسيمات وموضعها. ويمكن أن يكون هذا النوع من الفحص المجهري الكمي المترابط أداة قوية لدراسة هيكل الخلايا ووظيفتها. ويوضح الشكل جيم-٣ أن الجسيمات النانوية تواجه صعوبة في دخول نواة الخلية، لذلك قد يتعرقل التلف المباشر للحمض النووي أثناء التشعيع اللاحق للخلية في تجارب البيولوجيا الإشعاعية.



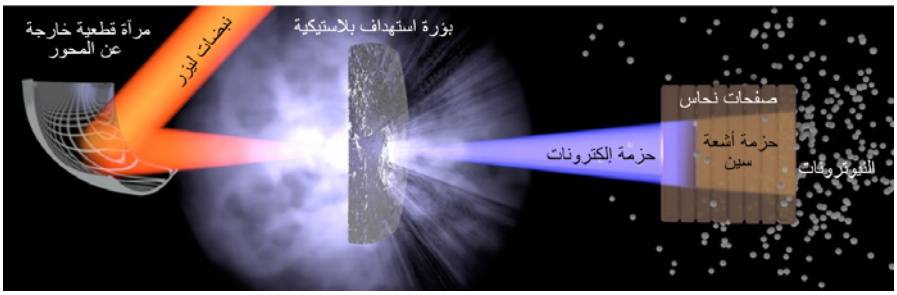
الشكل جيم-٣- صورة (فحص بحجم ١٣ ميكرون) لامتصاص فوتونات الجسيمات النانوية من عناصر الأتربة النادرة المحوَّلة من فوتونات منخفضة الطاقة إلى فوتون واحد عالي الطاقة في خلية هيلا. ويتم استكشاف تراكم قضبان نانوية قطرها ١٠٠ نانومتر على حافة نواة الخلية باستخدام ثلاث طرق للتصوير الإشعاعي بالحزم الأيونية: (أ) فحص مجهري عن طريق مسح الأيونات المنبعثة على المحور يظهر الكثافة؛ (ب) فحص مجهري عن طريق مسح الأيونات المنبعثة خارج المحور يظهر تناثراً محسّناً للجسيمات النانوية؛ (ج) التألق المستحث بجسيمات ألفا. واستخدمت حزمة من جسيمات ألفا قدرها ١,٦ مليون إلكترون فلط لتصوير هذه الخلية باستبانة حيزية أقل من ٥٠ نانومتر. (الصور مهداة من آندرو باتيول، مركز تطبيقات الحزم الأيونية، إدارة الفيزياء، جامعة سنغافورة الوطنية)

١٨٠- وبالفعل، يمكن استخدام الجسيمات النانوية لاستهداف مناطق معينة من الخلية مثل المُتَقَدَّرات. وعند إجراء تجربة للتوعية بالإشعاع (في حالة العلاج بالجسيمات)، قد يكون من المرغوب فيه تصور تأثير التلف

الإشعاعي على الحمض النووي للمُتَقَدَّرات والذي تم تعزيزه بواسطة هذه الجسيمات النانوية. ومُتَقَدَّرات الخلية تبلغ تقريباً حجم ميكرون واحد، لذا من المهم للغاية أن يكون التصوير باستبانة عالية. ويمكن استهداف المُتَقَدَّرات في وقت واحد بالمسابير الفلورية والجسيمات النانوية، وبالتالي فإن اتباع نهج مترابط للتصوير مفيد في تحديد أماكن المُتَقَدَّرات والجسيمات النانوية. ويمكن بعد ذلك إجراء دراسة منهجية لموقع الجسيمات النانوية وتأثير جرعات التشعيع المختلفة.

جيم-١-٤- تكنولوجيا المعجِّلات القائمة على الليزر تَعِدُ بتطبيقات متنوعة

١٨١- أدت التطورات الأخيرة في تكنولوجيا الليزر[٤] عالية الطاقة إلى تطوير أشعة ليزر تنتج نبضات ضوئية قصيرة للغاية في نطاق الفيمتو ثانية بدرجات كثافة عالية للغاية تتجاوز ٢١١٠ واط/سم٢. ومن خلال توجيه هذه النبضات على رقائق صلبة، يمكن توليد مصادر مكثفة للفوتونات والأيونات والنيوترونات (الشكل جيم-٤)، والتي يمكن استخدامها لاحقاً في مجموعة واسعة من التطبيقات، مثل طرق الاختبار غير المتلف في الفضاء الجوي؛ والتصوير الإشعاعي للأجسام الكبيرة؛ وتشخيص بطاريات الليثيوم-أيون أثناء التشغيل؛ ومعالجة الإشعاع لتصنيع مواد ذكية وتشغيلية؛ والسبر النشط للمواد النووية الحساسة، بما في ذلك تحديد خصائص النفايات النووية.



الشكل جيم-٤- تمثيل بياني للإلكترونات والنيوترونات الثانوية التي يتم إنتاجها باستخدام تكنولوجيات التعجيل القائمة على الليزر.
(الصورة من: إيشاي بوميرانتس، جامعة تل أبيب، إسرائيل)

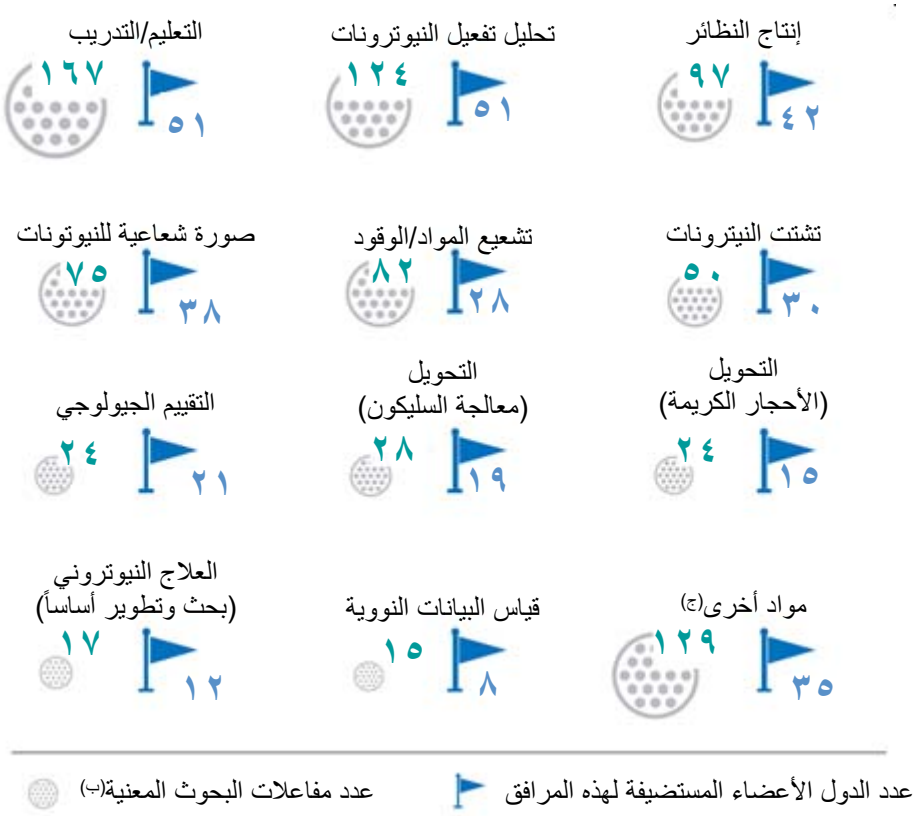
١٨٢- وحتى الآن، تُظهر التقنيات القائمة على الليزر إمكانية دعم تعجيل المجالات الكهربائية بدرجة أكبر أربع مرات على الأقل عن تلك الموجودة في المعجلات التقليدية، ويبدو أن هدف المجتمع العلمي الدولي المتمثل في إنتاج معجلات الجسيمات المصغَرة والمحمولة أصبح أمراً ممكناً خلال العقد المقبل.

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٨٣- تَرِدُ في الشكل جيم-٥ التطبيقات الأكثر تواتراً لمفاعلات البحوث. ويمكن أن تتراوح قدرة هذه المفاعلات بين الصفر (على سبيل المثال، المجمعات الحرجة أو دون الحرجة) وما يقرب من ٢٠٠ ميغاواط (حراري)، وهي قدرة صغيرة مقارنة بالقدرة البالغة ٣٠٠٠ ميغاواط (حراري) لمحطة القوى النووية النمطية. وتصميم

[٤] المصدر: فعالية جانبية نظمتها ألمانيا في الدورة العادية الثالثة والستين للمؤتمر العام للوكالة بعنوان "المصادر النيوترونية القائمة على الليزر لأغراض التطبيقات النووية".

مفاعلات البحوث أكثر تنوعاً بكثير من تصميم مفاعلات القوى، ولها أيضاً وضعان مختلفان للتشغيل، إما ثابت أو نبضي.



الشكل جيم-٥- الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم(أ)

(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، ٢٠١٤).
(ب) من بين ٢٣٧ مفاعل بحوث تمت دراستها (٢٢٤ عاملة، و١٣ في حالة إغلاق مؤقت؛ حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٩).
(ج) تشمل التطبيقات الأخرى معايرة الأجهزة واختبارها وتجارب التدريع وإنشاء مصادر بوزيترونية ودراسات حرق النفايات النووية.

وفقاً لقاعدة بيانات مفاعلات البحوث التابعة للوكالة، تمَّ تشييد ٨١٨ مفاعل بحوث في ٦٧ بلداً، منها ٢٥٠ مفاعل بحوث قيد التشغيل في ٥٤ بلداً. ولدى الاتحاد الروسي أكبر عدد من مفاعلات البحوث العاملة حيث يمتلك (٥٩) مفاعل بحوث، تليه الولايات المتحدة الأمريكية (٥٠)، والصين (١٧) وألمانيا (٧). وعلى نطاق العالم، يعمل ٦٣ مفاعل بحوث عند مستويات قدرة بـ ٥ ميغاواط أو أعلى، وبالتالي فإن هذه المفاعلات توفّر تدفقات نيوترونية كبيرة لأغراض المنتجات والخدمات الصناعية والطبية. وفي المجمل، هناك ٩ مفاعلات بحوث قيد الإنشاء في ٦ بلدان، ومن المزمع إنشاء ١٤ مفاعل بحوث في ١١ بلداً.

١٨٤- ولا يمكن الاستغناء عن مفاعلات البحوث لتوفير النظائر المشعّة لقطاعَي الطب والصناعة، وتوفير الحُزم النيوترونية للبحوث المتعلقة بالمواد والاختبارات غير المتلِفة، وتقديم الخدمات التحليلية وخدمات التشعيع

للقطاعين الخاص والعام، وتقديم الخدمات الخاصة بدراسات الإرث الثقافي والبيئة. وهي تسهم إسهاما استراتيجيا فيما يتعلّق بالتعليم والتدريب. وبما أنه ثمة العديد من مفاعلات البحوث المتقادمة التي يتم سحبها، يجب للمرافق المتبقية والجديدة أن تُستخدم بكفاءة، وأن تُدار على نحو جيد، وأن تُشغَّل على نحو مستدام وكفء. وتشجع الوكالة مشغِّلي مفاعلات البحوث على وضع أو تحديث خطط استراتيجية فيما يتعلّق باستخدام مرافقهم. وفي السنوات الثلاث الماضية، قدم ٢٣ مرفقاً خططه إلى الوكالة للحصول على المزيد من المشورة. وفي عام ٢٠١٩، استحدثت الوكالة الاستعراض المتكامل لاستخدام مفاعلات البحوث لمساعدة الدول الأعضاء في الاستفادة المثلى من استخدام مفاعلات البحوث التي لديها، وأجرت في إيطاليا أول بعثة تجريبية في إطار الاستعراض المذكور.

١٨٥- ويزيد عمر أكثر من نصف مفاعلات البحوث العاملة في العالم عن ٤٠ عاماً. ويمكن أن تبلغ دورات حياتها ٦٠ سنة أو أن تتجاوز هذه المدّة، غير أنه من المهم للغاية أن يتم في الوقت المناسب وضع برامج مناسبة فيما يتعلّق بإدارة التقادم والتجديد والتحديث. ونظراً للاتجاه العام صوب التخفيض في تمويل مثل هذه المرافق والتخطيط المحدود فيما يتعلّق بالتعاقب، ستمثّل نُظُم الإدارة السليمة، والبرامج الخاصة بالتشغيل والصيانة وإدارة الأعمار التشغيلية، عاملاً حيوياً حتى تتمكّن من أداء مهامها على نحو فعَّال من حيث التكلفة. وفي هذا الصدد، كانت بعثات استعراض النظراء الخاصة بتقييم تشغيل وصيانة مفاعلات البحوث مفيدة للغاية وتولت إجراءها كل من إندونيسيا وأوزبكستان والبرتغال وبنغلاديش وتايلند وجمهورية الكونغو الديمقراطية. ومن المتوقع أن يبدأ العديد من ٥٨ مفاعل بحوث في حالة إغلاق دائم في ٢٣ دولة عضواً أعمال التحضير للإخراج من الخدمة في المستقبل القريب.

١٨٦- ويجري العمل على تشييد مفاعلات بحوث جديدة في الأرجنتين، وفرنسا، وجمهورية كوريا، والاتحاد الروسي، والمملكة العربية السعودية، وأوكرانيا (نظام يعمل بالمعجلات). ولدى عدة دول أعضاء خطط رسمية لتشييد مفاعلات جديدة، بما في ذلك بلجيكا وبوليفيا وبيلاروس وتايلند وزامبيا وطاجيكستان (استكمال مفاعل أرغوس-FTI) وفييت نام ونيجيريا وهولندا والولايات المتحدة الأمريكية. وتنظر دول أعضاء أخرى، مثل إثيوبيا وأذربيجان وبنغلاديش وتونس وجمهورية تنزانيا المتحدة وجنوب أفريقيا والسنغال والسودان وغانا والفلبين وكينيا وماليزيا ومنغوليا وميانمار والنيجر في تشييد مرافق جديدة. وتقدم الاستعراضاتُ المتكاملة للبنية الأساسية النووية لمفاعلات البحوث الجديدة الدعمَ والإرشادات للدول الأعضاء التي تستهل مشروع مفاعل بحوث جديد. ولقد أُوفِدَتْ بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية إلى نيجيريا وفييت نام وهناك بعثات جارية في تايلند وزامبيا.

١٨٧- وواصلت الدول الأعضاء التي تخطط لبناء قدراتها النووية الوطنية أو المحافظة عليها لأغراض برامجها الخاصة بالعلوم والتكنولوجيا، بما يشمل القوى النووية، إبداء اهتمامها بإمكانية الاستفادة من مفاعلات البحوث. وبناءً عليه، عزّزت ووسَّعت الوكالة في عام ٢٠١٩ صكوكها وأدواتها الأربع وهي: مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت، وهو بمثابة أداة للتدريب عن بُعد تستخدم أساساً لأغراض التعليم الأكاديمي (تواصلت جلسات البث في عام ٢٠١٩ لمنطقتي أمريكا اللاتينية والكاريبي؛ وأدخل في الخدمة مفاعل مُضيف للاتصال مع مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت في المغرب وأُحْرِز تقدم كبير في إنشاء مفاعلات مُضيفة للاتصال بالمختبر المذكور في منطقة آسيا والمحيط الهادئ وفي أوروبا)؛ والدورات الدراسية الإقليمية عن مفاعلات البحوث، لتقديم التدريب الأساسي؛ ومبادرة أوروبا الشرقية بشأن مفاعلات البحوث، لتقديم التدريب العملي المتقدّم، في المقام الأول لفائدة المهنيين الشباب (في عام ٢٠١٩، نُظِّمت دورة دراسية بشأن مفاعلات البحوث في اليابان، وعقدت الدورة التدريبية الخامسة عشرة في إطار مبادرة أوروبا الشرقية بشأن مفاعلات البحوث في

النمسا وسلوفينيا وجمهورية التشيك)؛ ومخطط مراكز الامتياز الدولية القائمة على مفاعلات البحوث المسمَّاة من الوكالة، لتقديم التدريب المتخصص المتقدِّم للمهنيين الشباب وكبار المهنيين.

١٨٨- وقد تم حتى اليوم تحويل ٩٩ مفاعل بحوث وأربعة من مرافق إنتاج النظائر المشعة الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء، أو تأكيد أنها في حالة إغلاق. وفي عام ٢٠١٩، بدأت الاستعدادات لإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء من مفاعل بحوث IVG.1M الموجود في كازاخستان إلى الاتحاد الروسي بعد تحويل المفاعل المذكور إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. كما بدأت الاستعدادات لتخفيف درجة إثراء وقود اليورانيوم الشديد الإثراء في مفاعل بحوث IGR في كازاخستان إلى مستوى إثراء دون ٢٠٪.

١٨٩- وبحلول نهاية عام ٢٠١٩، استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الأمريكي المصدر إزالةُ حوالي ١٦٠٠ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلك الخاص بمفاعلات البحوث، وفي إطار برنامج إزالة الفجوات تمت إزالة ٢٨٧٥ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء أو تم تأكيد التخلص منها، كما استُكملت في إطار البرنامج الخاص بإعادة الوقود الروسي المصدر إزالة حوالي ٢٣٠٠ كغ من الوقود.

١٩٠- واستمرت الجهود الدولية لتحويل منتجي النظائر المشعة الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي عام ٢٠١٩، أسفرت حالات الانقطاع لفترات قصيرة في بعض مرافق تشعيع ومعالجة المواد المستهدفة المصنوعة من الموليبدينوم-٩٩ في العالم عن حدوث بعض حالات النقص في الإمدادات الإقليمية. وقد عوَّضت جهود هيئات إدارة سلسلة الإمداد والمنتجين الدوليين الرئيسيين، فضلاً عن جهود التخفيف الفعّالة من قبل الممارسين الصحيين، بعض التقلبات في الإنتاج. ويتم إنتاج ما يقرب من ٧٥٪ من الموليبدينوم-٩٩ الذي يباع في العالم الآن دون استخدام وقود اليورانيوم الشديد الإثراء أو كبسولاته المستهدفة. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، بدأ مُنْتِجُ جديد للموليبدينوم-٩٩ التشغيل التجاري في عام ٢٠١٨ باستخدام الكبسولات المستهدفة غير القائمة على اليورانيوم وشرع في عام ٢٠١٩ في توسيع مرافق إنتاجه.

دال- النظائر المشعة والتكنولوجيات الإشعاعية

دال-١- مواجهة عبء البلاستيك: تطبيق التقنيات النووية

١٩١- الإنتاج السريع النمو من البلاستيك والنفايات البلاستيكية اللاحقة يسبب مشاكل هائلة للبيئة. وأدى الاستخدام المكثف للبوليمرات الاصطناعية المتاحة بسهولة وغير المكلفة نسبياً، بما في ذلك اللدائن الحرارية (يشار إليها عموماً باسم "البلاستيك") والمطاط، إلى توليد كميات هائلة من نفايات البوليمرات وخلق تحديات مقابلة في التصرف في النفايات في البيئات الخارجية.

١٩٢- وتستخدم البوليمرات على نطاق واسع بسبب كلفتها المنخفضة وسهولة تصنيعها ووزنها الخفيف وخصائصها الميكانيكية الجيدة. وأدى تزايد عدد سكان العالم، بالإضافة إلى مزايا هذه المواد، إلى زيادة هائلة في العبء البيئي للبلاستيك في جميع أنحاء العالم. وعلى مدار العشرين عاماً الماضية، زاد إنتاج البوليمرات

الاصطناعية بنسبة ٢٤٠٪. وإذا استمر هذا الاتجاه، بحلول عام ٢٠٥٠، سينتهي الأمر بحوالي ١٢ مليار طن من نفايات البوليمر في مواقع الطمر أو في البيئة.[٥]

١٩٣- وتمثل العديد من نفايات البوليمرات تركيبات من مواد مختلفة يصعب فصلها، أو حتى لا يمكن فصلها، مما يجعل إعادة استخدامها أمراً إشكالياً. وعلى عكس البوليمرات الطبيعية، تتحلل البوليمرات الاصطناعية ببطء وتنقسم تدريجياً إلى جزيئات صغيرة، تعرف باسم المواد البلاستيكية الدقيقة، التي تلوث النظام البيئي. وتظهِر أحدث البيانات الإحصائية عن كمية النفايات البلاستيكية التي تم إنتاجها على الإطلاق أنه منذ عام ٢٠١٥، تم إنتاج ما يقرب من ٦٣٠٠ مليون طن من نفايات البوليمرات (٥٨٠٠ مليون طن في الإنتاج الأولي و٥٠٠ مليون طن في الإنتاج الثانوي)، تم إعادة تدوير حوالي ٩٪ منها، وترميد ١٢٪، وجرى التخلص من ٧٩٪ من هذه النفايات وتراكمت في مواقع طمر النفايات أو البيئة الطبيعية.

١٩٤- وفي الوقت الحالي، يعتمد تخفيف عبء النفايات هذا على تكنولوجيات متعددة يعتمد تطبيقها على القوى المحركة المحلية والإقليمية والوطنية للتصرف في النفايات والتخفيف منها. ولا يزال متوسط معدل إعادة التدوير في جميع أنحاء العالم منخفضاً ويتغير من بلد لآخر (الجدول دال-١).

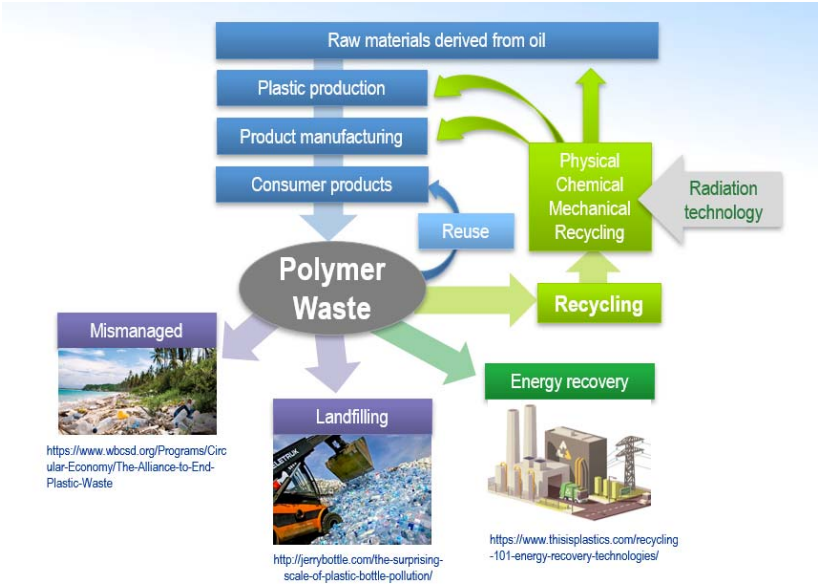
الجدول دال-١- إعادة تدوير البلاستيك على المستوى العالمي

المنطقة/البلد	إعادة التدوير (٪)	استعادة الطاقة (٪)	جرى التصرف فيها: الطمر (٪)	لم يُتصرَّف فيها (غير معروف) (٪)
أفريقيا	١٢	١	٢٦	٦٢
آسيا وأوقيانوسيا	٢٤	٢٥	١٥	٣٧
أوروبا (بما في ذلك تركيا)	٢٧	٣١	٣٣	٩
أمريكا الشمالية	١١	١٣	٧٢	٤
أمريكا الجنوبية وأمريكا الوسطى (بما في ذلك المكسيك)	١٥	١١	٣٠	٤٤

مصدر البيانات: الاستقصاء المعنون "تدفق البلاستيك عالمياً" (Global Plastics Flow) لعام ٢٠١٨ (شركة Conversio Market & Strategy، شباط/فبراير ٢٠١٨، https://www.conversio-gmbh.com/res/Global_Plastics_Flow_Feb10_2020.pdf)

١٩٥- وحتى الآن، تتولى منشآت كبيرة إعادة تدوير نفايات البوليمر ونادراً ما تستخدم المعالجة الإشعاعية. وتفي التكنولوجيات الإشعاعية (الشكل دال-١) بالمبادئ الأساسية للكيمياء "الخضراء" وتوفر إمكانيات متعددة في معالجة المواد من خلال التكوين أو الانقسام الخاضع للرقابة للروابط الكيميائية.

[٥] غيير، ر.، جامبك، ج.ر.، لو، ك. ل.، إنتاج جميع ما قد صُنِع من المواد البلاستيكية، واستخدامها، ومصيرها، مجلة Science Advances، المجلد ٣(٧): الإصدار ١٧٠٠٧٨٢ (٢٠١٧).



الشكل دال-١: دورة حياة المنتجات البلاستيكية وإنتاج النفايات البلاستيكية ومعالجتها.

(المصدر: الوكالة)

١٩٦- وتطلب الدول الأعضاء بشكل متزايد تكييف التكنولوجيات الإشعاعية مع التحدي العالمي المتمثل في إعادة تدوير نفايات البوليمرات. وتتمتع التكنولوجيات النووية بالقدرة على المساهمة في إنشاء اقتصاد دائري بلاستيكي ويمكن أن تكمل النُهُج التقليدية لتقليل أحجام النفايات البلاستيكية. وهذه التكنولوجيات الإشعاعية قابلة للتطوير، أي يمكن استخدامها لتشعيع كميات كبيرة من نفايات البوليمر. ويمكن استخدام عملية التشعيع هذه لأمرين: تعديل بنية البلاستيك وخصائصه أو لتحطيم البلاستيك لإنتاج مواد تلقيم. وفي كلتا الحالتين، تُستَخدم المادة الجديدة المعدلة أو الموظَّفة أو مواد التلقيم لإنتاج منتجات استهلاكية بلاستيكية معاد تدويرها مجدية من الناحية التجارية، مما يترتب عليه تحقيق فوائد مربحة مع تقليل أحجام النفايات.

١٩٧- ويتمتع استخدام التكنولوجيات الإشعاعية بميزة إضافية مميزة تتمثل في أن الإشعاع عبارة عن تكنولوجيا "مراعية للبيئة"، تتجاوز المذيبات المستخدمة في إعادة تدوير البوليمرات الكيميائية، والتي من شأنها أن تساهم في التلوث البيئي وانبعاثات الكربون. وإعادة التدوير إلى منتجات جديدة باستخدام التكنولوجيات الإشعاعية أمر جذاب بشكل خاص عندما لا تكون إعادة التدوير الأولية للنفايات البلاستيكية ممكنة، حيث لا يمكن إعادة تدوير العديد من اللدائن الحرارية إلا مرة أو مرتين باستخدام التكنولوجيا التقليدية. وعلى هذا النحو، فإن إعادة تدوير النفايات البلاستيكية باستخدام التكنولوجيا الإشعاعية تُعدُ مساهمة مبتكرة يمكن أن تكمل نُهُج إعادة تدوير النفايات البلاستيكية التقليدية.

١٩٨- وتوفر التقنيات النووية أيضاً رصداً وتقييماً موثوقاً ودقيقاً لتأثيرات اللدائن البحرية الدقيقة في البيئة باستخدام القافيات النظيرية. وتتمتع القافيات النظيرية بدرجة لا مثيل لها من الدقة والحساسية اللازمة للوصول إلى تحديد دقيق لظهور النفايات البلاستيكية في البيئة، ورصد حركتها وتقييمها. ويمكن الاسترشاد بهذه المعلومات في القرارات السياساتية.

١٩٩- ومع ذلك، لا يمكن أن تُنْقَل مباشرة نُهُج التكنولوجيا الإشعاعية الراسخة المستخدمة في توليف مواد جديدة وتطهير السوائل والغازات السامة إلى نفايات البوليمرات. وبالتالي، هناك حاجة لإجراء بحث وتطوير

جديدين. وعندما يكون ذلك ممكناً، ستكون إعادة تدوير البوليمرات وإعادة استخدامها أمراً مرغوباً فيه وتعد كفاءة عملية إعادة التدوير واقتصادها واستدامتها أموراً بالغة الأهمية.

يتمثل تطبيق ناشئ يحوّل النفايات البلاستيكية إلى مادة للتطبيقات المستدامة والقابلة للتطوير في استخدام هذه النفايات لتحسين الأداء الميكانيكي ومتانة معجون الأسمنت والخرسانة. ويمثل الإنتاج العالمي للأسمنت ثالث أكبر مصدر لانبعاثات الكربون، وبالتالي فإن استخدام البلاستيك المعاد تدويره في الخرسانة يمكن أن يكون له أيضاً تأثير بيئي إيجابي إضافي.[٦]

٢٠٠- ويجب أن تَستخدِم المرافق الإشعاعية المستقبلية لإعادة تدوير المواد البلاستيكية معدات الحُزم الإلكترونية المتكاملة الفعالة من حيث التكلفة المتاحة من الشركات الصغيرة والمتوسطة الحجم. وسيكون من الأفضل إجراء التعديل الإشعاعي للبوليمرات في الهواء الطلق، دون ضغط زائد، باستخدام معالجة الحزم الإلكترونية مع البارامترات المحسنة. ويجب النظر في المبادئ التوجيهية التنظيمية القياسية لتتبع المواد من اللحظة الأولى لتطوير نُظُم جديدة للمواد حسب نفايات البوليمر المعاد تدويره.

دال-٢- طفرة في تكنولوجيا المعجِّلات تقدم العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون إلى المستشفيات

دال-٢-١- التقدم المحرز في مصادر النيوترونات المدمجة القائمة على المعجلات

ما العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون؟

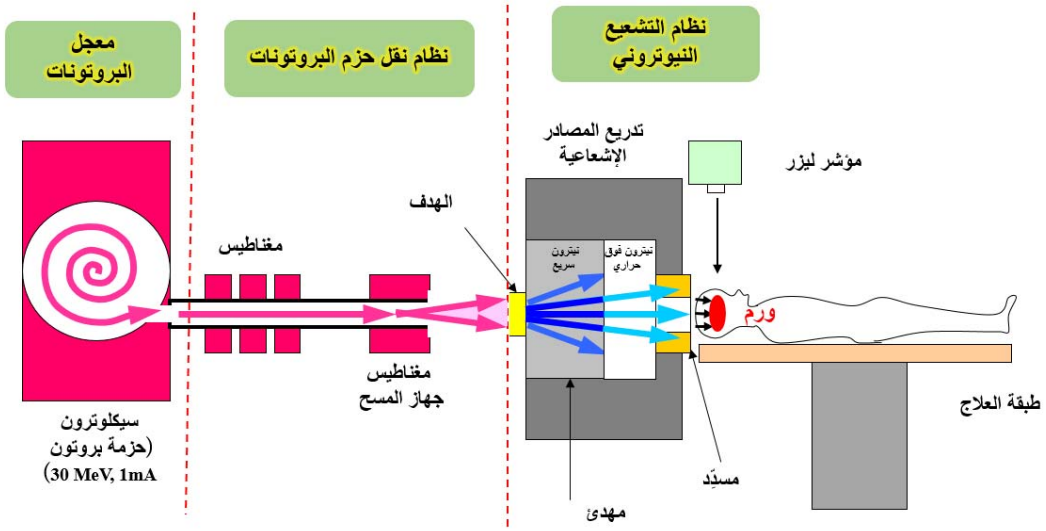
العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون هو علاج فريد يعتمد على فكرة توصيل مركبات البورون بشكل انتقائي في أنسجة الورم، والتي يتم تشعيعها لاحقاً بالنيوترونات. ويتم أسر هذه النيوترونات من خلال البورون، الذي يتبعه انبعاث جسيمات ألفا وارتداد نواة الليثيوم، وكلاهما يتميز بنقل مرتفع للغاية للطاقة ضمن مسافات توقف قصيرة جداً يمكن مقارنتها بحجم خلية واحدة. والميزتان الرئيسيتان للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون في العلاج الإكلينيكي هما الفعالية البيولوجية العالية داخل الخلايا وإتلاف الخلايا السرطانية المحدد موقعها بدقة على المستوى الخلوي. ومع التطورات الحديثة في تكنولوجيا المعجلات، أصبح العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون على بعد خطوة واحدة ليكون خياراً ممكناً للعلاج إكلينيكياً من السرطان.

٢٠١- وأجري العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون حتى الآن بشكل رئيسي في مفاعلات البحوث القادرة على تقديم الحزم النيوترونية بالكثافة والنوعية المطلوبتين لتشعيع المرضى. وفي العقدين الأخيرين، عولج أكثر من ١٠٠٠ مريض في جميع أنحاء العالم في مثل هذه المرافق، وأحرز تقدم كبير في تحسين مركبات البورون، بما في ذلك استخدامها والتحكم في تراكمها في خلايا الورم. ومع ذلك، تم إغلاق العديد من هذه المفاعلات أو أوقفت أنشطتها المتعلقة بالعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون، ولا سيما بسبب صعوبة الجمع بين بيئة

[٦] شايفر، تش. إ.، وآخرون، البلاستيك المشع المعاد تدويره كمادة إضافية للأسمنت لتحسين الخواص الكيميائية الميكانيكية وخفض بصمة الكربون، التصرف في النفايات ٧١ (٢٠١٨) ٤٢٦-٤٣٩.

المفاعلات والمتطلبات الإكلينيكية. وهناك في الوقت الحاضر أربعة مفاعلات فقط لا زالت تقدم العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون كعلاج ممكن للسرطان. ومع ذلك، كانت هناك زيادة كبيرة في عدد منشآت ومشاريع العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون التي تهدف إلى إنشاء وتشغيل مصادر نيوترونية مدمجة، تعتمد على معجلات الجسيمات، والتي تقع جميعها في المستشفيات الجامعية أو مراكز علاج السرطان. وبدأت بعض هذه المرافق بالفعل في إجراء تجارب إكلينيكية، وهناك المزيد من المرافق قيد الدراسة في جميع أنحاء العالم.

٢٠٢- ويوضح الشكل دال-٢ المكونات التكنولوجية المختلفة للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على المعجلات، والتي توضح تعجيل البروتونات إلى طاقات تتراوح من بضعة ملايين الإلكترون فلط إلى ٣٠ مليون إلكترون فلط، بتيارات حزم متوسطة من بضع إلى عشرات الملي أمبير، والتي تصطدم بأهداف العناصر الخفيفة، مثل الليثيوم أو البريليوم. ونتيجة لذلك، يتم إنتاج النيوترونات السريعة، والتي بدورها يتم تسديدها وإدارتها وتوجيهها إلى منطقة تشعيع المريض كما يتم تمثيلها بشكل بياني. وترد بعض العناصر الرئيسية للمرفق في الشكل دال-٣.



صورة مهداة من (*Sumitomo Heavy Industry Ltd.*)

الشكل دال-٢ - تمثيل بياني للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على المعجلات. (المصدر: سوميتومو للصناعات الثقيلة، اليابان).

الشكل دال-٣ - معجل والمكونات المستهدفة (يميناً) مع موضع تشعيع المريض (يساراً) في مركز للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على المعجلات. (الصورتان من: مركز كانساي الطبي للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون، اليابان).

٢٠٣- وتستعرض الوكالة حالياً وتحدِّث وثيقتها التقنية المعنونة "الوضع الحالي للعلاج بالأسر النيوتروني" (الوثيقة التقنية الصادرة عن الوكالة ١٢٢٣)، التي نُشرت في عام ٢٠٠١، لتبرز جميع النتائج التي تم الحصول عليها من مرافق العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائمة على المفاعلات خلال العقدين الأخيرين، ولتشمل اتجاهات جديدة والتقدم المحرز في مراكز العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على المعجلات في المستشفيات. ويلخص الجدول دال-٢ مختلف مرافق العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على المعجلات مع البارامترات التقنية وحالة الاستكمال.

الجدول دال-٢ - قائمة بمرافق العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على المعجلات وحالة الاستكمال. (المصدر: الوكالة).

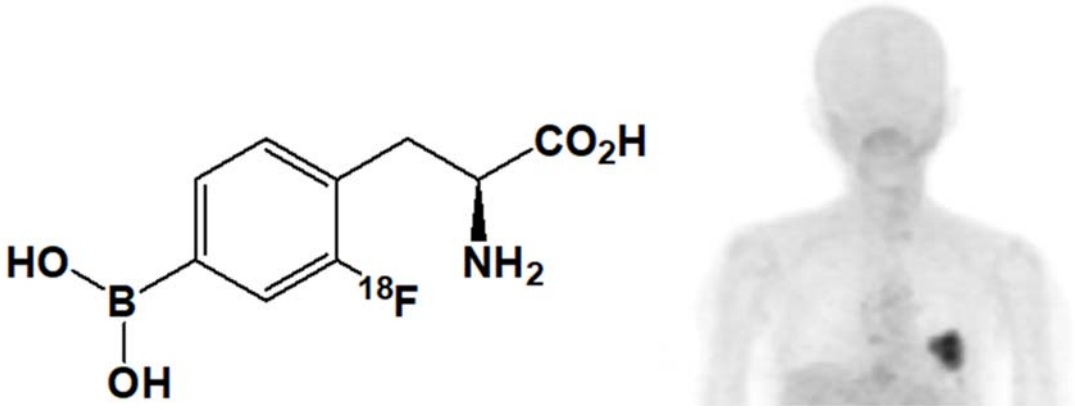
البلد	المرفق	المُعجِّل	مقذوفة (طاقة ساقطة) + الهدف	الحد الأقصى المصمَّم (الحالي) للتيار (مللي أمبير)	الوضع الحالي
اليابان	جامعة كيوتو	سيكلوتروني	P(٣٠,٠ مليون إلكترون فلط) +البريليوم	١ (١)	التجارب الإكلينيكية
	مركز بحوث جنوب توهوكو للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون				
	مركز كانساي الطبي للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون				
	جامعة تشوكوبا	خطي	P(٨ مليون إلكترون فلط) +البريليوم	٥ (١,٨)	يجري إدخاله في الخدمة
	مستشفى المركز الوطني للسرطان	خطي	P(٢,٥ مليون إلكترون فلط) +الليثيوم	٢٠ (١٢)	التجارب الإكلينيكية *
	مركز العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون التابع لمستشفى إيدوغاوا				التشييد
	جامعة ناغويا	إلكتروستاتي	P(٢,٨ مليون إلكترون فلط) +الليثيوم	١٥ (١)	يجري إدخاله في الخدمة
فنلندا	مستشفى جامعة هلسنكي	إلكتروستاتي	P(٢,٦ مليون إلكترون فلط) +الليثيوم	٣٠ (٢٠)	التجارب الإكلينيكية *
الأرجنتين	مركز باريلوشي الذري	إلكتروستاتي	d(١,٤ مليون إلكترون فلط) +البريليوم	٣٠ (١)	التشييد
الاتحاد الروسي	معهد بادكر للفيزياء النووية	إلكتروستاتي	P(٢,٠ مليون إلكترون فلط) +الليثيوم	١٠ (٢)	التطوير

البلد	المرفق	المُعجِّل	مقذوفة (طاقة ساقطة) + الهدف	الحد الأقصى المصمَّم (الحالي) للتيار (ملّي أمبير)	الوضع الحالي
إسرائيل	مرفق سوريق لمعجلات البحوث التطبيقية	خطي	P(٤,٠ مليون إلكترون فلط) +الليثيوم	٢٠ (٢)	التطوير
الصين	مستشفى شيامين الإنساني	إلكتروستاتي	P(٢,٥ مليون إلكترون فلط) +الليثيوم	١٠ (-)	التطوير
إيطاليا	المعهد الوطني للفيزياء النووية	خطي	P(٤,٠ مليون إلكترون فلط)+البريليوم	٣٠ (-)	التطوير
جمهورية كوريا	أ-العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون	خطي	P(١٠,٠ مليون إلكترون فلط)+البريليوم	٨ (-)	التطوير

* المرفق والتجارب الإكلينيكية مخططة بالفعل.

دال-٢-٢- المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية التشخيصية والعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون

٢٠٤- يمكن استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية العلاجية التشخيصية كمزيج من العلاج والتشخيص اللذين يوفران نقلة من الطب التقليدي إلى نهج الطب المشخصن والدقيق. وتعتمد فعالية العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون إلى حد كبير على تركيز البورون وتوزيعه في خلايا الورم المستهدفة. وفي معظم الحالات، يستخدم البورونوفينيل ألانين كحامل للبورون-١٠ في العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون. وتم تطوير البورونوفينيل ألانين الموسوم بالفلور-١٨ وتطبيقه بنجاح لرصد الحراكية الدوائية للبورونوفينيل ألانين باستخدام التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني. ونتيجة لذلك، فإن التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني باستخدام البورونوفينيل ألانين الموسوم بالفلور-١٨ لم يسمح فقط بالحصول على معلومات عن الورم ولكنه أيضاً أتاح تقييم تراكم البورون في كل من الورم والأنسجة الطبيعية والإشارة إلى استجابة الورم للعلاج بأسر النيوترون في نواة البورون. وحالياً، يتم تطبيق العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون القائم على التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني المستخدم للبورونوفينيل ألانين الموسوم بالفلور-١٨ على مختلف أنواع السرطان، مثل الورم الخبيث، وسرطان الرأس والعنق، وسرطان الجلد، وورم المتوسطة، وسرطان الكبد وأورام الرئة (الشكل دال-٥).



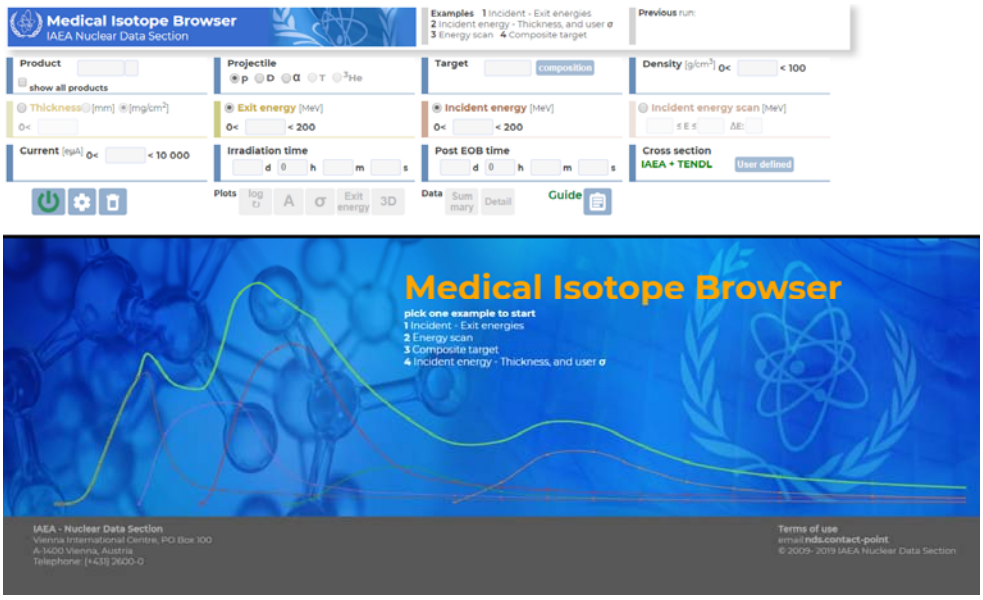
الشكل دال-٥- إلى اليسار: التركيب الجزيئي للبورونوفينيل ألانين الموسوم بالفلور-١٨ (^{18}F-BPA). إلى اليمين: صورة التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني لتراكم مركب البورون في سرطان الجلد الخبيث المنتشر في الرئة. (المصدر: جامعة أوساكا، اليابان).

٢٠٥- ويمكن تحسين كفاءة العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون إذا كان من الممكن زيادة تركيز البورون في الخلايا المستهدفة. ونظراً لأن البورونوفينيل ألانين يحتوي على ذرة واحدة فقط من البورون-١٠ في كل جزيء، فهناك حاجة لتطوير عوامل استهداف الخلايا التي تحتوي في بنيتها على عدد أكبر من ذرات البورون-١٠. وهناك العديد من الدراسات البحثية الجارية لإدخال مثل هذه الجزيئات في جميع أنحاء العالم؛ ومع ذلك، بالنظر إلى العملية الطويلة لتطوير الدواء، سوف يستغرق الأمر بعض الوقت لاختبار الجزيئات الجديدة وتطبيقها في العلاج بأسر النيوترون في نواة البورون.

دال-٣- التطبيق "Medical Isotope Browser": أداة لطرق إنتاج النظائر المشعة الحديثة في مكافحة السرطان والأمراض الأخرى

٢٠٦- طورت الوكالة أداة جديدة تعتمد على شبكة الإنترنت تتيح إمكانية التنبؤ مباشرة بإنتاج نظير طبي على أساس مدخلات المستخدمين. ويمكن استخدام التطبيق الطبي "Medical Isotope Browser" من جانب علماء الطب وصناعة المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية لاكتشاف طرق إنتاج النظائر المشعة التي لم يتم استكشافها بعد. وسوف يسهم هذا بشكل كبير في مكافحة السرطان والأمراض الأخرى. ويعتمد إنتاج النظائر المشعة الطبية للعلاج أو التشخيص على عمليات التفاعل النووي المعقدة للغاية، والتي لا تتاح إلا للفيزيائيين النوويين من خلال القياسات ونظريات التفاعل النووي. ويجعل التطبيق الطبي "Medical Isotope Browser" هذه المعلومات الأساسية في متناول العديد من المستخدمين غير المتخصصين من خلال واجهة مستخدم رسومية.

٢٠٧- وتم إصدار التطبيق الطبي "Medical Isotope Browser" رسمياً خلال الندوة الدولية المعنية بالاتجاهات المتعلقة بالمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية، التي عقدتها الوكالة في فيينا في تشرين الأول/أكتوبر - تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩. ويقتصر الإصدار الأول لهذا التطبيق على النظائر التي تنتجها معجلات الجسيمات المشحونة. ويمكن للمستخدمين تحديد خصائص المعجل، مثل المقذوف (البروتون، أو الديوتيرون، أو التريتيوم، أو الهليوم -٣، أو جسيمات ألفا)، والتيار بالمللي أمبير وطاقة الحدث والخروج، وكذلك المواد المستهدفة والنظائر المشعة المُنْتَجة المطلوبة. ويمكن الحصول على العائد النظيري المطلوب كدالة للإشعاع ووقت التبريد بالإضافة إلى وصف كامل لجميع الشوائب المنتجة على الفور تقريباً. وسيتضمن الإصدار التالي أيضاً إنتاج النظائر المشعة الطبية باستخدام مفاعلات البحوث وحزم الإلكترونات (الشكل دال-٦).



الشكل دال-٦ - الصفحة الرئيسية للتطبيق الطبي "Medical Isotope Browser" متاح في http://nds.iaea.org/mib

هاء- الصحة البشرية

هاء-١- طريقة القافيات النظيرية المزدوجة الجديدة لتقييم جودة البروتين لدى البشر

هاء-١-١- البروتين وآثاره على نمو الطفل ونمائه

٢٠٨- إن توفير البروتين في أول عامين من العمر لا يحدد النمو فحسب، بل إنه يؤثر أيضاً على خطر الإصابة بالسمنة اللاحقة والأمراض غير المعدية ويمكن أن يكون له تأثير على معدل الشفاء من سوء التغذية الحاد. وتتكون البروتينات من الأحماض الأمينية التي يمكن الاستغناء عنها وتلك التي لا يمكن الاستغناء عنها. ويمكن تصنيع الأحماض الأمينية التي يمكن الاستغناء عنها في الجسم بينما يجب توفير الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها من خلال النظام الغذائي. وغالباً ما يستهلك الأطفال المعرضون لخطر كبير من تأخر النمو الأطعمةَ التي يعتريها نقص في معظم الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها، بما في ذلك التربتوفان والمثيونين والثريونين والفينيل ألانين والليسين. ومع ذلك، فإنه ليس هناك ما يكفي من البيانات المتاحة عن متطلبات الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها لنمو الطفل في وقت مبكر والقدرة على هضمها.

هاء-١-٢- جودة البروتين

هل تعلم؟

هضم البروتين يختلف وفقاً لمصدر البروتين؛ فالبروتينات ذات الأصل الحيواني تميل إلى أن تكون أكثر هضماً مقارنةً بالبروتينات من النظم الغذائية النباتية.

٢٠٩- وتُعرَّف جودة البروتين بأنها مقياس فائدة البروتين المعطى لتوفير، عند استهلاكه، كمية كافية من الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها المتاحة حيوياً للحفاظ على صيانة الجسم والنمو والاحتياجات الفسيولوجية والنشاط البدني والقدرة على مكافحة العدوى. وتكوين الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها من البروتين، والقدرة على هضمه وامتصاص الأحماض الأمينية اللاحقة أمور مهمة. ويتم الجمع بين هذه الخصائص في تقييم جودة البروتين في طعام معين. فعلى سبيل المثال، يوجد الليسين والثريونين بكميات دون المستوى الأمثل في معظم الحبوب، بينما يوجد المثيونين بكميات غير كافية في البقوليات.

هاء-١-٣- طريقة القافيات النظيرية المزدوجة لتقييم جودة البروتين لدى البشر

٢١٠- تعتبر الطرق المتاحة حالياً لقياس قابلية هضم الأحماض الأمينية في الأمعاء العليا طرقاً غازية، حيث إنها تتطلب الوصول إلى الدوافق الخارجة من الأمعاء الدقيقة، ويتحقق ذلك عن طريق التنبيب المعوي عند البشر. ومع ذلك، يمكن القيام بذلك بطريقة غير غازية نسبياً عن طريق تقنية القافيات النظيرية المزدوجة باستخدام الديوتيريوم والكربون-١٣، حيث يتم التغذية ببروتين اختبار موسوم في ذاته بنظير في وقت واحد مع نظير مختلف موسوم ببروتين "قياسي". والبروتين "القياسي" هو إما مزيج من الأحماض الأمينية الحرة (التي لا تتطلب أي هضم) أو بروتين كامل يتم تحديد قابلية هضمه مسبقاً (على سبيل المثال، السبيرولينا الموسوم بنظير). وبعد ذلك تسمح النسبة الموجودة بعد الأكل من الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها الموسومة بشكل مختلف في الدم بتقييم قابلية هضم هذه الأحماض الصحيح لبروتين الاختبار. وتم تطوير هذه التقنية استجابة لدعوة من الفاو في سياق برنامج للتجارب الكيميائية المدعومة من الوكالة، بعنوان "التوافر البيولوجي للبروتينات من النظم الغذائية المعتمدة على النبات". وكجزء من المشروع البحثي المنسق، تم تقييم جودة البروتين، بناءً على درجة الحمض الأميني القابل للهضم الذي لا يمكن الاستغناء عنه والذي أوصت به منظمة الفاو، في مجموعة واسعة من البقوليات المزروعة محلياً في باكستان والبرازيل وتايلند وجامايكا والمغرب والمكسيك والهند بدعم تقني من خبراء من فرنسا والمملكة المتحدة. وتتضمن الطريقة مرحلتين، كما هو موضح أدناه.

هاء-١-٤- الوسم الذاتي للبقوليات بأكسيد الديوتريوم أثناء النمو في الحقل

٢١١- يتم إنتاج البقوليات الموسومة ذاتياً عن طريق وضع بُلعة من أكسيد الديوتيريوم كجزء من روتين ري نباتات البقوليات. وتترك النباتات لتنمو حتى مرحلة النضج ثم تحصد البذور الجافة (الشكل هاء-١).

الشكل هاء-١ - الوسم الذاتي للبقوليات باستخدام أكسيد الديوتيريوم أثناء النمو.
(الصورة من: السيدة ونتاني كريانغسنيوس، جامعة ماهيدول، تايلند).

هاء-١-٥- دراسة بشرية بوجبات اختبار أعدت من البقوليات الموسومة ذاتياً

٢١٢- يتم إجراء طريقة القافيات النظيرية المزدوجة إما في بروتوكول تغذية لمدة ثماني ساعات (مع البالغين) أو لمدة ست ساعات (مع الأطفال). وفي البروتوكولات الخاصة بالبالغين، يتم جمع خمس عينات من الدم (في خط الأساس ثم كل ساعة بعد مرور خمس وست وسبع وثماني ساعات على تناول وجبة الاختبار)، بينما في البروتوكولات الخاصة بالأطفال الصغار جداً، يتم جمع ثلاث عينات فقط، واحدة في خط الأساس والأخريان في الفترة من الساعة الخامسة إلى السادسة. وعلى سبيل المثال، يتم وسم البقوليات أو الطعام قيد الاختبار ذاتياً باستخدام أكسيد الديوتيريوم، في حين يتم تضمين كمية صغيرة من البروتين "القياسي" الموسوم بالكربون-١٣ من أجل مقارنة مظهر الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها بالبقوليات الخاضعة للاختبار مع البروتين القياسي الذي يُعطى في وقت واحد. ويمكن استخدام بروتين وحيد الخلية شديد الإثراء بالكربون-١٣ المتاح تجارياً (بالكربون-١٣-السبيرولينا) كبروتين قياسي. ويستخدم ظهور الأحماض الأمينية الموسومة في الدم المتعلقة بوجبة الاختبار لحساب قابلية هضم البروتين البقولي (الشكل هاء-٢). وبالإضافة إلى ذلك، يمكن تقدير درجة امتصاص الأحماض الأمينية، عن طريق إضافة حمض أميني موسوم (الكربون-١٣- الفينيل ألانين) إلى وجبة الاختبار، من ظهور هذا الحمض الأميني الموسوم في الدم.

الشكل هاء-٢ - وجبة اختبار ومشاركة في الدراسة تتناول هذه الوجبة.
(الصور من: وانتاني كرينغسينيوس، جامعة ماهيدول، تايلند).

هاء-١-٦- أهمية هذه الطريقة

٢١٣- لقد تم بالفعل تطبيق هذه الطريقة في الهند لتقدير القدرة الفعلية لدى مجموعة من الرُضَّع والأطفال الصغار الذين تقل أعمارهم عن عامين على هضم الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها في أربعة أغذية شائعة الاستخدام. وأظهرت النتائج أن القدرة على هضم الأحماض الأمينية التي لا يمكن الاستغناء عنها الرئيسية، مثل المثيونين والثريونين، كانت منخفضة للغاية. وأظهرت الدراسة أيضا وجود علاقة إيجابية بين درجة القدرة على هضم الأحماض الأمينية من الأطعمة وطول الأطفال. وستساهم المعلومات المستقاة عن القدرة على هضم الأحماض الأمينية إسهاماً كبيراً في إرشاد توصيات الفاو بشأن جودة البروتين للبشر في جميع الأعمار، تمشياً مع الهدف ٢ من أهداف التنمية المستدامة — القضاء التام على الجوع في كل أنحاء العالم. وفي ظل الأزمة الناشئة لتغير المناخ وندرة المياه، من المحتمل أن يتناقص كل من محتوى البروتين ومحصول مصادر بروتين الحبوب، في حين أن محتوى بروتين البقوليات قد يكون أقل تأثراً. وهناك فرصة لتحديد محتوى

البروتين والقدرة على هضم أصناف النباتات المقاومة للجفاف وللتنبؤ بالإمدادات المستقبلية من البروتين العالي الجودة باستخدام تقنيات دقيقة، مثل طريقة القافيات النظيرية المزدوجة.

هاء-٢- قياس الجرعات البيولوجية كأداة تشخيصية/تنبؤية مفيدة لحالات الطوارئ الإشعاعية والطب الإشعاعي

يساعد قياس الجرعات البيولوجية على تحديد جرعة الإشعاع التي يتلقاها الفرد أو المريض. وتستخدم هذه الطريقة واسمات بيولوجية مثل التشوهات الصبغِيَّة، والتي يمكن رؤيتها باستخدام المجهر.

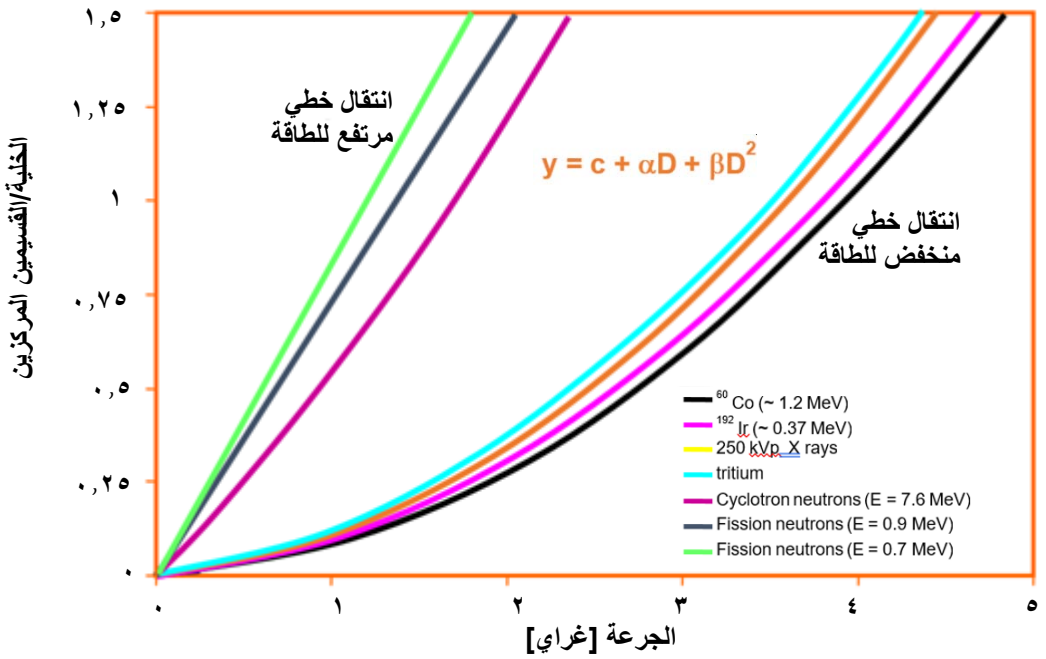
٢١٤- ويستخدم قياس الجرعات البيولوجية عينات بيولوجية، مثل الدم، والتي تؤخذ عادة من الأفراد الذين تعرضوا للإشعاع، لتقييم التعرض الذي تلقوه، على سبيل المثال، من خلال الاستنشاق أو الابتلاع. ويستخدم الرنين الإلكتروني البارامغنطيسي لمينا الأسنان أو العظام أيضاً لقياس الجرعات بأثر رجعي، ويشار إلى هذه الطريقة أحياناً باسم قياس الجرعات البيولوجية. وفي حالة حدوث أي طارئ إشعاعي أو نووي، يعد قياس الجرعات البيولوجية ضرورياً لتحديد جرعة الإشعاع التي تلقاها الأفراد المعرضون في الوقت المناسب (مثل العمال المعرضون لذلك أو عامة الجمهور). وقد يساعد قياس الجرعات البيولوجية بأثر رجعي في الكشف عن التعرض للإشعاع من سنوات سابقة، كما في حادث تشرنوبل أو حتى القنابل الذرية التي ألقيت على هيروشيما وناغازاكي. ويمكن أيضاً استخدام قياس الجرعات البيولوجية لأغراض التطبيقات الإكلينيكية، مثل مساعدة أخصائيي علاج الأورام الإشعاعي على تحسين النتائج الطبية.

هاء-٢-١- قياس الجرعات البيولوجية يربط الواسمات الحيوية بالجرعات

٢١٥- قياس الجرعات البيولوجية هو أحد أكثر فروع البيولوجيا الإشعاعية تطوراً حيث إن جوانبه التقنية محسنة بشكل جيد وبلغت مرحلة التوحيد الدولي.[٧] وهناك أربعة معايير للمنظمة الدولية لتوحيد المقاييس بخصوص قياس الجرعات البيولوجية توفر إرشادات دولية لتنفيذ خدمات قياس الجرعات البيولوجية: المعيار رقم ISO 19238:2014، والمعيار رقم ISO 21243:2008، والمعيار رقم ISO 17099:2014، والمعيار رقم 20046:2019.

٢١٦- وباختصار، يتم استخدام منحنيات المعايرة لربط الواسمات الحيوية بالجرعة التي يتلقاها المريض (الشكل هاء-٣). وتحديد الجرعة مهم في اختيار الاستراتيجية الطبية الصحيحة لعلاج الفرد الذي يتعرض للإشعاع في الحوادث. ومنحنيات المعايرة هي نتيجة النمذجة الرياضية القائمة على البيانات التجريبية؛ ولا تَظهَر فيها الأخطاء.

[٧] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، قياس الجرعات للوراثيات الخلوية: التطبيقات في التأهب والتصدي للطوارئ الإشعاعية، التأهب والتصدي للطوارئ - قياس الجرعات البيولوجية ٢٠١١ (٢٠١١)، ص. ١٤٢.



الشكل هاء-٣- منحنيات الاستجابة للجرعات الخطية والتربيعية الخطية ذات القسيمين المركزيين للإشعاعات ذات الانتقال الخطي المرتفع والمنخفض للطاقة. (المصدر: قياس الجرعات للوراثيات الخلوية: التطبيقات في التأهب والتصدي للطوارئ الإشعاعية - مواد تدريبية، التأهب والتصدي للطوارئ الإشعاعية، التأهب والتصدي للطوارئ الإشعاعية/T 2012، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠١٣.)

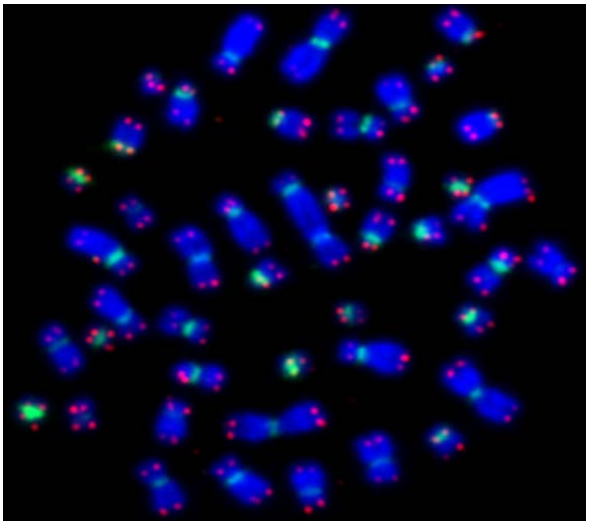
هاء-٢-٢- طرق قياس الجرعات البيولوجية القياسية

٢١٧- هناك أربعة طرق موحدة يجري استخدامها لقياس الجرعات للوراثيات الخلوية: (١) تحليل انحرافات الكروموسومات غير المستقرة (ذات القسيمين المركزيين)؛ (٢) قياس انحرافات الكروموسومات المستقرة باستخدام طريقة التهجين التألقي في الموضع (تحليل تغير الموضع)؛ (٣) تحليل التكثّف الكروموسومي الخديج؛ (٤) مقايسة النواة الصغيرة لكتلة الحَرائِك الخَلَوِيَّة.

هاء-٢-٣- الملامح الرئيسية في الطرق الجديدة لقياس الجرعات البيولوجية التي تم تطويرها منذ عام ٢٠٠٠

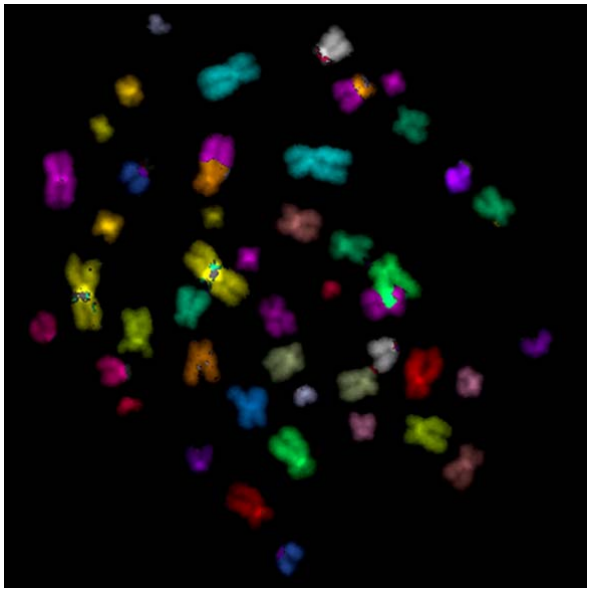
٢١٨- استُحْدِثت عدة طرق جديدة مؤخراً لممارسة قياس الجرعات البيولوجية تحدث ثورة في هذا المجال.[٨] ويمكن الكشف عن الكروموسومات ذات القسيمين المركزيين التي يستحثها الإشعاع في الخلايا اللمفاوية البشرية باستخدام طريقة الحمض النووي الببتيد - التهجين التألقي في الموضع (الشكل هاء-٤). وهذا يشكل طريقة محسّنة لتحديد الانحرافات الكروموسومية غير المستقرة، والتي تسمح بتسجيل الانحرافات ذات القسيمين المركزيين. واستخدام مسابير القُسَيم الطَرَفِيّ والقُسَيم المركزي في التهجين يمكن أن يعزز دقة اكتشاف الكروموسوم ذي القسيمين المركزيين في التحليل.

[٨] زيجرس، د.، وآخرون، الواسمات الحيوية للتعرض للإشعاعات المؤينة: نهج متعدد البارامترات، وحدة الجينوم ٨(١) (٢٠١٧).



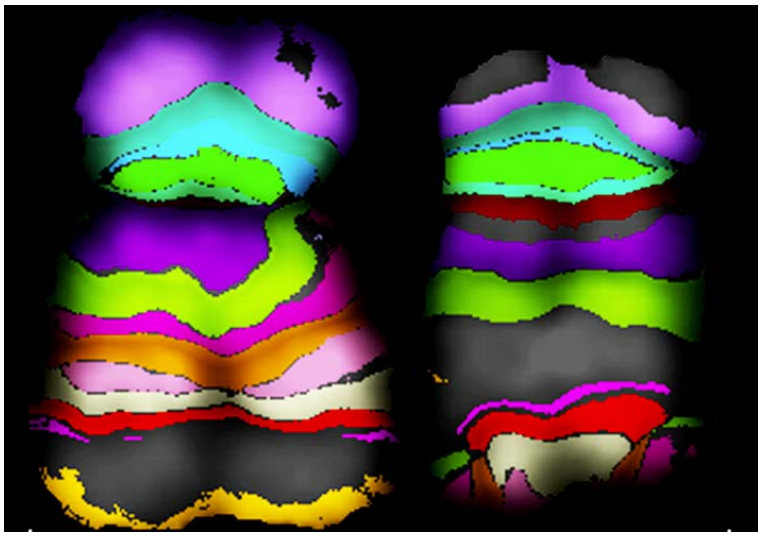
الشكل هاء-٤- الحمض النووي البيتيد – التهجين التألقي في الموضع سيانين ٣ (القُسَيم الطَرَفِيّ) وإيزوثيوسيانت الفلورسين (القُسَيم المركزي) مسابير الحمض النووي البيتيد، مصورة بالإشارات الحمراء والخضراء، مصبوغة بلون مباين ٤ '، ٦ -ديامدينو-٢ -فينيليندول وتظهر باللون الأزرق. (الصورة من: البروفيسور هاند، جامعة سنغافورة الوطنية.)

٢١٩- وتعد تقنية التهجين التألقي المتعدد الألوان في الموقع طريقة أخرى تسمح باكتشاف الانحرافات بين الكروموسومات في شكل تغيّر الموضع الكروموسومي الناجم عن الإشعاع المؤين في الخلايا اللمفاوية البشرية (الشكل هاء-٥).



الشكل هاء-٥ - في تقنية التهجين التألقي المتعدد الألوان في الموقع، يتم تلوين كل كروموسوم (من ١ إلى ٢٢ ، س وص) بلون مختلف باستخدام الوسم التوافقي مما يؤدي إلى حدوث تهجين مكون من ٢٤ لوناً بحيث تتم ملاحظة أي حالة فردية من حالات تغيّر المواضع بين الكروموسومات كوصلات ملونة على الكروموسومات الفردية. (الصورة من: البروفيسور هاند، جامعة سنغافورة الوطنية.)

٢٢٠- وأخيراً، يمكن القول إن تقنية الربط المتعدد الألوان للكروموسومات هي أكثر طرق قياس الجرعات البيولوجية تقدماً، حيث تسمح باكتشاف الانحرافات داخل الكروموسومات. ويعتبر هذا النوع من الواسمات الحيوية بصمة فريدة للإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة (الشكل هاء-٦).[٩]



الشكل هاء-٦ - انحرافات داخل الكروموسومات تم اكتشافها في الكروموسوم ٥ باستخدام طريقتي الربط المتعدد الألوان للكروموسومات والتهجين التألقي في الموضع باستخدام ألوان لمناطق معينة في الكروموسومات. (الصورة من: البروفيسور هاند، جامعة سنغافورة الوطنية.)

هاء-٢-٤- الاتجاهات المستقبلية

٢٢١- تساعد طرق قياس الجرعات البيولوجية الجديدة في تحديد التعرض للإشعاعات عند البشر، وتحديد حجمه وتوضيح المصدر والطابع المحتمل للتعرض. وأدخلت طرق قياس الجرعات البيولوجية مؤخراً في العلاج الإشعاعي للأورام والطب النووي، وكذلك علم الأشعة التشخيصي والتدخلي.[١٠] وأطلقت الوكالة مشروعاً بحثياً منسقاً يتناول مسألة تيسير الحوار بين أخصائيي قياس الجرعات البيولوجية وأخصائيي علاج الآورام الإشعاعي.[١١] ومن المتوقع أن يسمح التحسن الملحوظ في طرق قياس الجرعات البيولوجية بإجراء تقييم أكثر شمولاً لعواقب التعرض الطبي للإشعاعات المخطط أو العرضي.

---

[٩] فيننيكوف، ف. وبيلياكوف، و.، التطبيقات الإكلينيكية للواسمات الحيوية للتعرض للإشعاعات: القيود والحلول الممكنة من خلال البحوث المنسقة. مجلة Radiat Prot Dosimetry (قياس الجرعات لأغراض الوقاية من الإشعاعات)، ٢٠١٩.

[١٠] فيننيكوف، ف وبيلياكوف، و.، الواسمات الحيوية للتعرض للإشعاع في ممارسة الطب الإشعاعي: البحوث التعاونية ودور الوكالة الدولية للطاقة الذرية، قياس الجرعات البيولوجية/ مختبر البيولوجيا الإشعاعية. الفيزياء الصحية، ٢٠٢٠.

[١١] المرجع نفسه.

واو- الأغذية والزراعة

واو-١- التطبيقات المعززة لتقنية الحشرة العقيمة للوقاية من الآفات الحشرية الغازية والقضاء عليها

واو-١-١- معلومات أساسية

٢٢٢- يمكن أن تتداخل الأنواع الغازية في خدمات النظم الإيكولوجية أو تعطل النظم الإيكولوجية بأكملها وتتسبب في تراجع العديد من الكائنات الحية المحلية المدرجة الآن على أنها ستتقرض أو مهددة بالانقراض.[١٢] ويأتي تأثير الأنواع الغازية في المرتبة الثانية بعد تدمير الموائل كسبب لفقدان التنوع البيولوجي العالمي.[١٣] وتعتبر التكاليف الكبيرة لمكافحة الآفات الغازية والناتج الضائع مسألة عابرة للحدود تتطلب تنسيقاً إقليمياً ودولياً فعالاً.

٢٢٣- وزادت احتمالات إدخال آفات غازية إلى مناطق جديدة زيادة ملحوظة بسبب معدلات النقل والتجارة الدولية المتزايدة بسرعة، وهجرة السكان، ونقل الماشية والسلع الزراعية بين المناطق الجغرافية. ونما معدل إدخال الأنواع الدخيلة خلال المائتي عام الماضية من ٧,٧ في المتوسط سنوياً بين عامي ١٥٠٠ و١٨٠٠ إلى ٥٨٥ في عام ١٩٩٦.[١٤] وبمرور الوقت، أصبحت المفصليات واللافقاريات الأخرى آفات غازية فعالة بشكل متزايد، مع زيادة هائلة في عمليات إدخال هذه الآفات في السنوات الخمس والأربعين الماضية. وتشير التقديرات إلى أن الأضرار التي لحقت بالاقتصاد العالمي بسبب الأنواع الغازية تبلغ حوالي ١,٤ تريليون دولار، وهو ما يمثل في عام ٢٠٠٢ حوالي ٥٪ من إجمالي الاقتصاد العالمي.

واو-١-١-١- العلاقة بين الآفات الحشرية الغازية وتغير المناخ

٢٢٤- لا يؤدي تغير المناخ الناتج عن انبعاثات غازات الدفيئة البشرية المنشأ إلى إحداث تغييرات في توزيع العديد من الأنواع فحسب، بل إنه يسهل أيضاً زيادة بقاء الآفات الغازية في المناطق التي كانت عَسِرَة عليها سابقاً.[١٥] وفي حين تؤدي الزيادة في حركة السلع وتبادلها إلى تسريع إعادة توزيع العديد من الآفات الحشرية، فإن التغيرات المناخية وما يرتبط بها من استخدام الأراضي من المحتمل أن تخلق مجالات بيئية جديدة، مما يسمح بتوطن آفات جديدة في مناطق جديدة وتحولات كبيرة في مجموعات الأنواع (الشكل واو-١).

---

[١٢] تشارلز، هـ.، ديوكس، ج.، تأثيرات الأنواع الغازية على خدمات النظم الإيكولوجية، الدراسات الإيكولوجية ١٩٣ (٢٠٠٧) ٢١٧-٢٣٧.

[١٣] بيمنتل، د. (المحرر) الغزوات البيولوجية: التكاليف الاقتصادية والبيئية لأنواع النباتات والحيوانات والميكروبات الدخيلة، الطبعة الثانية (٢٠١١) دار نشر CRC Press، بوكا راتون، ٣٦٩. ويشار إلى هذا المنشور عدة مرات في القسم واو.

[١٤] هالم، ب.إ.، التجارة والنقل والمشاكل: إدارة مسارات الأنواع الغازية في عصر العولمة، مجلة Applied Ecology 46 (2009) 10-18 (علم البيئة التطبيقي).

[١٥] زيسكا، ل.هـ.، ديوكس، ج. س.، (محررون) الأنواع الغازية وتغير المناخ العالمي، (٢٠١٤) منظمة CABI، والينجفورد، ٣٦٨.

الشكل واو-١- مثال على آفة الحشرات الغازية (عثة الصبار، Cactoblastis cactorum (بيرغ)).
(الصورة من: إغناسيو بايز، مركز علوم وتكنولوجيا الصحة النباتية، وزارة الزراعة في الولايات المتحدة)

٢٢٥- وتتنبأ توقعات تغير المناخ حتى عام ٢٠٥٠ بزيادة متوسطة صافية قدرها ١٨٪ في حدوث آفات المفصليات الغازية. ولا ينطبق هذا التوسع على الآفات النباتية فحسب، بل ينطبق أيضاً على الأمراض التي تنقلها ناقلات الأمراض، والتي لا تؤثر فقط على التوزيعات المكانية والزمنية والديناميات الخاصة بمجموعات ناقلات الأمراض، ولكن أيضاً على تسريع دورات حياتها، بما في ذلك دورات حياة الطفيليات وطرق انتقالها وفرص النمو في أماكن مضيفة جديدة. ويمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى زيادة معدل نمو الآفات ومسببات الأمراض، وتقصير أوقات أجيالها وبالتالي زيادة عدد الأجيال في السنة، والذي بدوره يمكن أن يؤدي إلى زيادة أحجام مجموعات مسببات الأمراض/الطفيليات واحتمال حدوث طفرات لسلالات أكثر ضراوة. ولتخفيف أو معالجة مشاكل الآفات الجديدة التي يسببها المناخ والعولمة، هناك حاجة إلى تشريعات وسياسات جديدة.[١٦] ومن بين هذه الاحتياجات الحاجة إلى دعم تطوير نُهج مكافحة ابتكارية، مثل تقنية الحشرة العقيمة، للتخفيف من هذه التوغلات البيولوجية وإدارتها، واحتواء التوسع الجغرافي لمجموعات الآفات الدخيلة.

واو-١-١-٢- تقنية الحشرة العقيمة كأداة لمنع الآفات الحشرية الغازية والقضاء عليها

٢٢٦- غالباً ما تفتقر حملات القضاء على الآفات الحشرية الغازية إلى الأدوات اللازمة لإزالة جميع عناصر المجموعات المستهدفة جذرياً ويجب عليها أن تعتمد على التطبيق العشوائي والواسع النطاق لرش المبيدات الحشرية، وكذلك الإزالة التامة للحيوانات والنباتات المصابة، أو حتى القضاء الشامل على جميع القطعان والمحاصيل والبساتين.

---

[١٦] برينغز، ك.، دهنن-شمز، ك.، توزا، ج.، ويليامسون، م.، How to manage biological invasions under globalization, Trends in Ecology and Evolution "كيفية إدارة الغزوات البيولوجية في ظل العولمة، الاتجاهات في علم البيئة والتطور" ٢٠(٥) (٢٠٠٥) ٢١٢–٢١٥.

نشر تقنية الحشرة العقيمة

تستطيع تقنية الحشرة العقيمة، التي يتم نشرها باعتبارها مكوناً مهماً لنهج الإدارة المتكاملة للآفات على نطاق مناطق كاملة، منع توطن مجموعات الآفات الغازية واحتوائها واستئصالها دون إثارة معارضة الجمهور أو ترك بصمة إيكولوجية. ونظراً لأنها خاصة بالأنواع، وبالتالي لا تؤثر على الكائنات الأخرى المفيدة أو غير المستهدفة، فهي أداة مثالية للمساعدة في القضاء على مجموعات الآفات الحشرية الغازية. وإن تكاملها، لا سيما في المراحل اللاحقة من حملات الاستئصال، فعال بشكل خاص بالنظر إلى اعتمادها المعاكس على الكثافة: كلما انخفض عدد المجموعات المستهدفة، كان الوصول إلى هدف الاستئصال أسرع. كما أنه تتكامل بشكل جيد مع طرق مكافحة بيولوجية أخرى. ويمكن تطبيقها عن طريق الجو، وبالتالي فهي فعالة على التضاريس غير المنتظمة والمناطق ذات الوصول المحدود.

واو-١-٢- تحسين تقنيات واستراتيجيات تقنية الحشرة العقيمة

٢٢٧- في العقود الماضية، عززت بشكل كبير التقنيات والبروتوكولات المحسنة للإنتاج الكبير للحشرات العقيمة وتعقيمها وإطلاقها من فعالية تكلفة الإدارة المتكاملة للآفات على نطاق مناطق كاملة مع استخدام مكون تقنية الحشرة العقيمة. وقد أسفر ذلك عن فتح الباب أمام التوسُّع في استخدام هذه التكنولوجيا لمكافحة آفات حشرية رئيسية أخرى، بما في ذلك آفات غازية بارزة تصيب النباتات والحيوانات وتضرّ بالصحة البشرية. وهذا يشمل استخدام تقنية الحشرة العقيمة للقضاء على تفشي الأمراض من توغلات الآفات والتوطن الناشئ مؤخراً للآفات. وإذا واجهت الدول الأعضاء إدخال أحد الأنواع الغازية، يجري جمع البيانات الخاصة بالجرعات الموصى بها لتعقيم الحشرات وإتاحتها لأكثر من ٣٦٠ نوعاً من الحشرات في قاعدة البيانات الدولية عن القضاء على الحشرات وتعقيمها.

٢٢٨- وبرامج الإطلاق الوقائي ضد ذبابة الفاكهة المتوسطية في كاليفورنيا وفلوريدا هي أحد الأمثلة على نهج تقنية الحشرة العقيمة الوقائي.[١٧] وتعرضت هاتان الولايتان الأمريكيتان بشكل متزايد لتوغلات ذبابة الفاكهة المتوسطية، مما أدى إلى اكتشافات متكررة وتفشي في المناطق الحضرية، وخاصة تلك التي لديها مطارات دولية. وقد تم الربط بين هذه التوغلات وتهريب الفاكهة، فضلاً عن الحجم المتزايد بسرعة للشحنات والحركة الجوية. وقد أدى ذلك إلى استخدام برامج واسعة النطاق ومكلفة من أجل القضاء على هذه الآفة، استندت في البداية إلى حد كبير على رش طُعْم الملاثيون جواً فوق المناطق الحضرية التي تسببت في غضب الجمهور بشكل كبير. واستجابة لذلك، تم إطلاق برنامج الإطلاق الوقائي في كاليفورنيا ضد ذبابة الفاكهة المتوسطية في عام ١٩٩٤ والذي يغطي الآن ٤٥٨٢ كم مربع في حوض لوس أنجلوس ومقاطعة أورانج. ومقارنةً بالسنوات السابقة لهذا البرنامج، تم تقليل تفشي المرض في كاليفورنيا بأكثر من ٩٨٪. وفي المناطق التي استهدفها هذا

[١٧] دويل، ر. ف.، صديقي، إ. أ.، ميير، ف.، سبوغي، إ.ل.، برنامج الإطلاق الوقائي ضد ذبابة الفاكهة المتوسطية في جنوب كاليفورنيا، ٣٦٩-٣٧٥. إن تان، ك. هـ.، (المحرر) Proceedings: Area-Wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests "الإجراءات: المكافحة على نطاق المنطقة بالكامل لذباب الفاكهة والآفات الحشرية الأخرى". المؤتمر الدولي بشأن المكافحة على نطاق المنطقة بالكامل للآفات الحشرية، والندوة الدولية الخامسة بشأن ذبابة الفاكهة ذات الأهمية الاقتصادية، ٢٨ أيار/مايو-٥ حزيران/يونيه ١٩٩٨، (٢٠٠٠) بنربيت يونيفرسيتي سينز ماليزيا (Penerbit Universiti Sains Malaysia)، ماليزيا.

البرنامج في فلوريدا، لم يحدث أي تفشٍ لذبابة الفاكهة المتوسطية.[١٨] ونتيجة لذلك، على الرغم من التوغلات المستمرة لهذه الآفة الغازية، لا يزال الإقليم القاري للولايات المتحدة الأمريكية يحظى بالاعتراف الدولي بأنه خالٍ من ذبابة الفاكهة المتوسطية.

٢٢٩- وأحد الأمثلة على استخدام تقنية الحشرة العقيمة للقضاء على تفشي الأمراض من توغلات الآفات والتوطن الناشئ مؤخراً للآفات هو القضاء على ذبابة الفاكهة المتوسطية في الجمهورية الدومينيكية. وقد تم الإبلاغ عن وجود ذبابة الفاكهة المتوسطية في آذار/مارس ٢٠١٥ في الجمهورية الدومينيكية. وعلى الفور فرض الشركاء التجاريون الرئيسيون للجمهورية الدومينيكية حظراً على الواردات، مما أدى إلى خسارة تقدر بنحو ٤٠ مليون دولار في صادرات الفواكه والخضروات وتعريض الآلاف من فرص العمل للخطر. وللتصدي لهذه الحالة الطارئة، أنشأت حكومة الجمهورية الدومينيكية برنامج إبادة ذبابة الفاكهة المتوسطية-الجمهورية الدومينيكية.

٢٣٠- وقدمت الشعبة المشتركة بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، بالتعاون الوثيق مع وزارة الزراعة في الولايات المتحدة الأمريكية وبرنامج إبادة ذبابة فاكهة البحر الأبيض المتوسط المشترك بين غواتيمالا والمكسيك والولايات المتحدة الأمريكية، مساعدة تقنية إلى الجمهورية الدومينيكية لقمع هذه الآفة الغازية الرئيسية ولتنفيذ تقنية الحشرة العقيمة على أن تكون هي الأداة الرئيسية للاستئصال. ومن المنظمات الأخرى التي شاركت في هذا الجهد الكبير لمساعدة الجمهورية الدومينيكية المنظمةُ الإقليمية الدولية لصحة النبات والحيوان ومعهد البلدان الأمريكية للتعاون في ميدان الزراعة. ومن تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٥ حتى أيار/مايو ٢٠١٧، تم شحن أكثر من ٤ مليارات من الذباب العقيم من مرفق إل بينو في غواتيمالا وتم إطلاقها في المناطق المصابة (الشكل واو-٢). وتم الإعلان رسمياً عن القضاء على ذبابة الفاكهة المتوسطية في تموز/يوليه ٢٠١٧.[١٩] ولو سمح لهذه الآفة الغازية المدمرة أن توطن نفسها، لكانت منطقة البحر الكاريبي بأكملها وجميع شركائها التجاريين معرضين لخطر شديد من التفشي المدمر لهذه الآفة والخسائر الهائلة في عائدات التصدير.

---

[١٨] وزارة الزراعة في الولايات المتحدة، ٢٠١٤ استعراض مرافق إطلاق الحشرات العقيمة: ساراسوتا، وفلوريدا ولوس ألاميتوس، كاليفورنيا. برنامج الإطلاق الوقائي ضد ذبابة الفاكهة المتوسطية، (٢٠١٤) ٣٠.

[١٩] زاباله لوبيز، ج.ل.، مارت دياز، ج.، مارتينيز بوخولس، ف.، Successful area-wide Mediterranean fruit fly eradication in the Dominican Republic "القضاء على ذبابة الفاكهة المتوسطية على نطاق المنطقة بالكامل في الجمهورية الدومينيكية". إن ج. السيد هندريكس، ر. بيريرا وم. ج. ب. فريسين (محررون)، Area-wide integrated pest management: development and field application "الإدارة المتكاملة للآفات على نطاق مناطق كاملة: التطوير والتطبيق الميداني" (من المقرر نشرها).

الشكل واو-٢ - التحضير لإطلاق جوي للحشرات العقيمة. (الصورة من: برنامج إبادة ذبابة فاكهة البحر الأبيض المتوسط في غواتيمالا.)

واو-١-٣- التحوط والتأهب لمكافحة الآفات الحشرية الغازية

٢٣١- بالنسبة للعديد من المناطق أو البلدان الخالية حالياً من أنواع معينة من الآفات، فإن الأمر يتعلق بالوقت الذي ستغزوها فيه هذه الآفات بدلاً من ما إذا كانت ستغزو أم لا (الشكل واو-٣). وتزيد الاتجاهات المتبعة في السفر والتجارة العالمية من احتمال وصول أي نوع من الآفات إلى أي مكان في العالم.

الشكل واو-٣ - تفتيش حقائب للتحقق من الصحة النباتية عند نقطة دخول عن طريق كلب قادر على اكتشاف مراحل غير مكتملة من الحشرات الغازية. (الصورة من: مؤسسة FUNBAPA*، الأرجنتين.)*

٢٣٢- وتُظهر تحليلات التكاليف والفوائد عموماً أن الاستعدادات للتوغلات التي تُمَكِّن من التصدي السريع والفعال لها أرخص بكثير من الاضطرار إلى إدارة حملات استئصال كبيرة ومكلفة من غير المؤكد أنها ستنجح، أو ترك آفة كبرى متوطنة بشكل دائم تتطلب بعد ذلك مكافحة طويلة الأجل. وهناك إمكانية كبيرة لتطبيق تقنية الحشرة العقيمة ضد الآفات الحشرية الغازية الكبرى؛ ومع ذلك، غالباً ما تكون حزمة تقنية الحشرة العقيمة متاحة

جزئياً أو غير متوفرة عند حدوث تفشـــي جديد للآفات الغازية. ولذلك، من المهم تطوير حزمة تقنية الحشـــرة العقيمة لمكافحة أسوأ الآفات الدخيلة المحتملة التي تكون قابلة لتطبيق تقنية الحشرة العقيمة.[٢٠]

٢٣٣- وإن تحسين التقنية المستخدمة في تطبيقات تقنية الحشرة العقيمة على نطاق مناطق بأكملها، بالإضافة إلى تنويعها لمكافحة الآفات الحشرية البارزة الأخرى، سيزيد من توسيع استخدام التقنية وسيشكل أداة استراتيجية لمكافحة الإدخال المتزايد للآفات الغازية بسبب عوامل مثل زيادة السفر والتجارة، وتغير المناخ.

واو-٢- استخدام التقنيات النووية لدعم نظم اقتفاء أثر الأغذية

واو-٢-١- معلومات أساسية

٢٣٤- تباع العديد من الأطعمة بأسعار مرتفعة بسبب مطالبات الوسم "ذات القيمة المضافة" المتعلقة بأصول جغرافية محددة وطرق الإنتاج والخصائص الفريدة. ويمكن أن تكون المنتجات التي يجري ربطها بأصلها جزءاً من حلقة قوية من الجودة المســـتدامة تعتمد على الحفاظ على الموارد المحلية والعوامل الأخرى الموضـــحة في منشور الفاو المعنون Linking people, places and products "الربط بين الأشخاص والأماكن والمنتجات"[٢١].

٢٣٥- وتتضـــمن أكثر الطرق التحليلية الواعدة للتحقق من المؤشـــرات الجغرافية التحليلَ القائم على النظائر المستقرة والعناصر النزرة؛ الرنين المغنطيسي، بما في ذلك الرنين المغنطيسي النووي، والرنين شبه المغنطيسي الإلكتروني أو الرنين الإلكتروني الدوراني شـبه المغنطيسـي؛ وتحديد سـمات قياس الطيف الكتلي. وعلاوة على ذلك، هناك توصية من الاتحاد الأوروبي بضرورة أن تتضمن المؤشرات الجغرافية المسجلة حديثاً إشارة إلى إجراء تحليلي مناسب للتحقق من مصدر و/أو الصفات الأساسية للمنتج.

ما المؤشرات الجغرافية؟

تُعرّف المؤشرات الجغرافية أصل و/أو طريقة إنتاج طعام ما، حيث تُعزى جودة أو سمعة الغذاء أو أي خاصية أخرى من خصائصه بشكل أساسي إلى أصله أو مَحله. وتشمل مزايا المؤشرات الجغرافية ضمان الجودة (السمعة)، والمنافسة العادلة، وحماية الاسم في الأسواق (المحلية أو الدولية)، وارتفاع الأســـعار، وربط المنتجات القيّمة بالمناطق الريفية، وإعادة الربط بين المســـتهلكين والمنتجين، وحماية التقاليد. ويمكن الاطلاع على لمحة عامة عن المنتجات التي تحمل علامة المؤشـرات الجغرافية المسـجلة في قاعدة بيانات الاتحاد الأوروبي بشـأن منشـأ وتســـجيل المنتجات الزراعية والمواد الغذائية التي تضـــم عدة آلاف من المنتجات الغذائية من جميع أنحاء العالم.

[٢٠] الفرقة المتخصصة في الأنواع الغازية، قاعدة بيانات الأنواع الغازية على المستوى العالمي، البرنامج العالمي للأنواع الغازية (٢٠١٨). http://www.issg.org/database/species/search.asp?st=100ss&fr=1&str=&lang=EN.

[٢١] الفاو، Strengthening sustainable food systems through geographical indications: An analysis of economic impacts "تعزيز النظم الغذائية المستدامة من خلال المؤشرات الجغرافية: تحليل الآثار الاقتصادية" (٢٠١٨).

واو-٢-٢- التقنيات النووية

٢٣٦- يرد وصف التقنيات النووية أو النظيرية الرئيسية المطبقة على اختبار منشأ الأغذية في الفقرات أدناه. وتشمل هذه التقنيات، في جملة أمور، تحليل نسبة النظائر المستقرة للعناصر الثقيلة باستخدام قياس الطيف الكتلي بالتأيُّن الحراري وقياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث والمتعدد المجمّعات؛ والتحليل المتعدد العناصر باستخدام قياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث، والقياس الكتلي البلازمي المقرون بالحث لطيف الانبعاثات، وتألق الأشعة السينية، والتحليل بالتنشيط النيوتروني والتقنيات ذات الصلة. وبالإضافة إلى ذلك، قد تُسْتَخْدَم تقنيات مثل قياس الطيف بالرنين المغنطيسي النووي والمطياف الكتلي لتحديد سمات المستقلبات أو الفحص غير المُسْتَهْدِف، إلى جانب الطرق النووية السريعة الأخرى المستخدمة للاختبار المفترض مثل قياس طيف حركة الأيونات.

٢٣٧- وتوفر الطبيعة الواسعة والمتكاملة لهذه التقنيات أساساً قوياً لتحديد أصل الأغذية وأصالتها لدعم نظم اقتفاء أثر الأغذية والأطعمة ذات القيمة المضافة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن سجل كل تقنية في المساهمة الناجحة في اكتشاف أصل الأغذية والغش فيها أمر بالغ الأهمية فيما يتعلق بنقل المعارف والتنفيذ السريع والتدريب في البلدان والمناطق التي تفتقر حالياً إلى حل تحليلي.

قياسات النظائر المستقرة

٢٣٨- تستغل التقنيات النووية الاختلافات العالمية المنهجية في نسب النظائر المستقرة للعناصر البيولوجية للهيدروجين والكربون والنتروجين والأكسجين والكبريت المقاسة باستخدام قياس الطيف الكتلي لنسبة النظائر والتغيرات النظيرية الثقيلة في السترُنشيوم وغيرها من المؤشرات الجيوكيميائية الحيوية. وكتقريب أولي، توفر قياسات النظائر المستقرة ذات الوفرة الطبيعية معلومات عن التمثيل الضوئي النباتي أو النظام الغذائي (نسب نظائر الكربون والنتروجين)، والأصل الجغرافي (نسب نظائر الهيدروجين، والأكسجين، والكبريت والسترُنشيوم). وعلى سبيل المثال، إن قياس نسب النظائر المستقرة التي تحدث بشكل طبيعي للعناصر البيولوجية للهيدروجين والكربون والنتروجين والأكسجين والكبريت في الأغذية يمكن أن يوفر معلومات عن الأصل الجغرافي أو تقنية إنتاج الغذاء من خلال إقامة روابط بنسب النظائر في البيئة أو، على سبيل المثال، بنظم تغذية الحيوانات. وتوفر نظائر السترُنشيوم، المقاسة من خلال قياس الطيف الكتلي بالتأيُّن الحراري أو المطياف الكتلي البلازمي المقرون بالحث والمتعدد المجمّعات، أيضاً معلومات متعلقة بجيولوجيا منطقة الإنتاج، والتي يتم نقلها من خلال الأجزاء المتاحة بيولوجياً في التربة إلى النباتات والحيوانات. ونظراً لأن "بصمات" النظائر المستقرة للطعام ترتبط ارتباطاً جوهرياً بخصائص منطقة الإنتاج، فليس من المجدي اقتصادياً التلاعب بها وتزييفها.

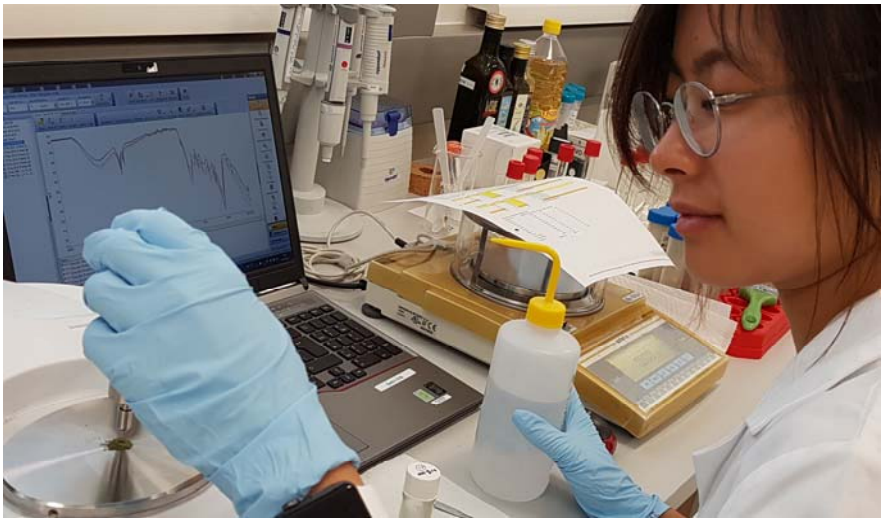
تحديد سمات العناصر

٢٣٩- يوفر تحديد سمات عناصر الأطعمة باستخدام قياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث معلومات مهمة حول تركيز العناصر الكلية والجزئية والنادرة التي تربط الغذاء بمكان إنتاجه وأي معالجة تكنولوجية قد تؤدي إلى تغيير سماته العنصرية، مثل الطحن أو الجرش. ولدى النباتات سمة الانعكاس التراكمي للعناصر الغذائية المتوفرة والمتحركة حيوياً الموجودة في التربة الأساسية التي تم زراعتها منها. على سبيل المثال، يتم تعبئة المعادن القلوية، وخاصة الروبيديوم والسيزيوم، بسهولة في التربة ونقلها إلى النباتات، وبالتالي فهي مؤشرات جيدة للهوية الجغرافية.

٢٤٠- ويعتمد توفر العناصر النزرة على عدة عوامل، مثل درجة الحموضة في التربة والرطوبة والمسامية، وكذلك محتوى الطين والدبال في التربة. وبالتالي، فإن مجموعة التُرَب الموجودة، إلى جانب التوافر البيولوجي، تعني أن التركيب العنصري قد يوفر مزيجاً فريداً من الواسمات في الأغذية التي تميز المنشأ الجغرافي واقتفاء أثر الأغذية. وبالمثل، تعكس السمات المتعددة العناصر للأنسجة الحيوانية، إلى حد ما، النبات الذي تأكله الحيوانات ويمكن ربطه بمناطق إنتاج معينة، على سبيل المثال في حالة الألبان المستمدة من حيوانات تتغذى على المراعي وفي حالة لحوم الأبقار. وبالإضافة إلى ذلك، يوفر تحديد سمات العناصر معلومات عن سلامة الأغذية فيما يتعلق بتركيز العناصر السامة المحتملة مثل الزرنيخ والكادميوم والرصاص والزئبق.

البصمات الأيضية (الأيض)

٢٤١- يعد تحليل المستقلبات في الأغذية طريقة مهمة أخرى شائعة الاستخدام لاختبار الأصالة. وتنتج المستقلبات من العمليات الخلوية أو الجزيئية في الكائن الحي ويمكن تحديد خصائصها بالرنين المغنطيسي النووي وقياس الطيف الكتلي. ويمكن استهداف الأيض، مع التركيز على مجموعات من المستقلبات ذات الصلة لتوفير معلومات وظيفية مباشرة لنمذجة الأيض، أو الكشف عن أنماط غير مستهدفة في الأيض يمكن أن تفرق بين مجموعات العينات ويمكن استخدامها لإنشاء نماذج لتصنيف عينات غير معروفة بناءً على نمط أو بصمة التمثيل الغذائي. وتعتمد كل هذه التقنيات اعتماداً كبيراً على التحليل الإحصائي المتعدد المتغيرات لمعالجة النتائج وتفسيرها (الشكل واو-٤).



الشكل واو-٤- موظفة في الوكالة، تحلل عينة من الشاي الأخضر (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

٢٤٢- ويمكن تطبيق الرنين المغنطيسي النووي والرنين شبه المغنطيسي الإلكتروني على دراسات المخاليط المعقدة في الأطعمة التي تحتوي على فصل بسيط أو دون فصل مسبق للمكونات ويمكن أن توفر معلومات عن الأصل الجغرافي، ووجود مواد مغشوشة، والنوعية، والمعالجة التكنولوجية للأغذية. وأحد الأمثلة على تطبيق هذا النوع من التقنية هو تحديد السمات باستخدام قياس الطيف بالرنين المغنطيسي النووي العالي البروتون لتحديد منشأ المواد المغشوشة ووجودها في العسل وعصائر الفاكهة والنبيذ. وتتم مقارنة نتائج عينة غير معروفة بقاعدة بيانات للعينات الأصلية ذات الأصل المعروف، والتي تظهر إما تطابقاً إيجابياً، إذا كانت العينة أصلية، أو بصمة غير طبيعية، إذا لم تكن العينة كذلك. وإحدى نقاط القوة الإضافية لهذه التقنيات هي أنه يمكن إجراء تحليل إضافي

لمنطقة التشـــوهات الطيفية لتحديد المادة الكيميائية أو المواد الكيميائية المســـتخدمة في الغش. وعلاوة على ذلك، يوفر تحديد الخصـائص بالرنين الإلكتروني شبه المغنطيسي تقنية قياس حساسة ودقيقة للكشف عن أنواع الجذور العضـوية، مع إلكترونات غير مقترنة، تحت مجال مغنطيسـي يُظهر أن مزارعي الفاكهة والخضـروات ومنتجي التوابل وســلاســل توريد المنتجات المماثلة الأخرى يســتوفون معايير ضــمان الجودة والســلامة. ويؤكد الرنين الإلكتروني شبه المغنطيسـي استخدام تشعيع الأغذية عن طريق الكشف عن مضـادات الأكسدة وجذور السليلوز وجذور الســكر البلورية في عينات الطعام. وتشـــعيع الغذاء هو عملية معالجة الأطعمة بمســـتويات معتمدة من الإشـعاع المؤيّن للقضـاء على الكائنات الحية المسـببة للأمراض وإطالة العمر التخزيني لهذه الأطعمة. ويُسـتخدَم أيضـاً لضـمان السلامة الميكروبية لإبطال نشاط الطفيليات والكائنات الدقيقة المسببة للأمراض من خلال القضـاء على الحشرات والبكتيريا الضـارة، مثل الإشريكية القولونية في اللحوم والدواجن، والتي توجد غالباً في مجموعة متنوعة من المنتجات الغذائية من خلال تطبيق تكنولوجيا معالجة تهدف إلى تحسين سلامة الأغذية.

تقنية الفحص

٢٤٣- تجعل التطورات الأخيرة التي شـــهدتها الأجهزة التحليلية بعض التقنيات النووية والإلكترونية شـــبة المغنطيسية أكثر قابلية للحمل ويمكن الوصول إليها. وأصبحت فئات مختلفة من الأدوات التي كانت تُستخدم سابقاً فقط في المختبرات متوفرة بإصدارات أكثر سهولة من حيث التكلفة، المتنقلة أو المحمولة باليد، والتي لديها القدرة على فحص الأطعمة بحثاً عن خصـائص غير طبيعية أو تشـوهات. وعلى سـبيل المثال، أصـبحت أدوات الرنين المغنطيسـي النووي والرنين الإلكتروني شبه المغنطيسـي ذات الأسعار المعقولة نسبياً متاحة مؤخراً والتي يمكنها إجراء تحليلات الفحص التي كان يجري تشـغيلها في الســابق باســتخدام أدوات الرنين المغنطيســي ذات التكافؤ العالي والباهظة الثمن التي تتطلب بنية أساسية متخصصة وموظفين متخصصين.

٢٤٤- وبالمثل، قد يكون لمطياف تألق الأشـــعة الســـينية المتنقل والمحمول باليد تطبيقات في اختبار الأغذية للتعرف على بصـمات العناصـر إذا كان من الممكن تحسـين حساسـيتها النسـبية. وهناك تقنية أخرى متنقلة ولديها إمكانات كبيرة في فحص أصـــالة الطعام وهي التحليل الكروماتوغرافي الغازي-قياس طيف حركة الأيونات الذي يستخدم مصدر إشعاع بطاقة منخفضـة للغاية. وتم استخدام قياس طيف حركة الأيونات على نطاق واسع لسنوات عديدة للكشـف عن المتفجرات والعقاقير غير القانونية في المطارات، ولم يطبق إلا في الآونة الأخيرة للتحقق من صـحة الأغذية وتأكيد منشـئها عن طريق فحص المكونات العضـوية المتطايرة في الطعام. ومن الأمثلة على ذلك فحص صـحة ومنشـأ منتجات الألبان والأرز والخضـروات ذات القيمة العالية وزيوت البذور والجوز، مثل زيت أركان المغربي.

واو-٢-٣- قواعد البيانات

٢٤٥- من أجل تطبيق التكنولوجيا المذكورة أعلاه على منشأ الأغذية والتحقق المستقل من جانب نظم اقتفاء أثر الأغذية، من الضـروري وصـف الاختلاف الطبيعي في التحليلَ القائم على النظائر المسـتقرة والعناصـر النزرة و"البصـمات" الأيضـية للمنتجات الغذائية ذات الدلالة الجغرافية الأصـيلة خلال عدد من الدورات السـنوية أو دورات الحصـــاد. ويمكن بعد ذلك دمج هذه المعلومات في مكتبة مرجعية أو قاعدة بيانات منشـــأ الأغذية لمقارنة المنتجات الغذائية المزيفة أو المغشـوشـة المشـتبه فيها. وعلى الرغم من توفر المنهجية والتكنولوجيا، فإن الافتقار إلى قواعد البيانات الحالية و/أو قابلية التشغيل البيني المحدودة بينهما يعد حجر عثرة رئيسي أمام تمكين المنهجية

من تنفيذ التحليلَ القائم على النظائر المستقرة والعناصر النزرة وبصمات المستقلبات من أجل اختبار منشأ الأغذية وأصالتها.

هل تعلم؟

قاعدة بيانات منشأ الأغذية هي مجموعة منظمة من البيانات، يتم تحليلها باستخدام بروتوكولات ثابتة ويتم الحصول عليها من عدد تمثيلي من العينات الأصلية.

٢٤٦- والغرض من قاعدة البيانات هذه هو تحديد التباين الطبيعي (والمسموح به تكنولوجياً) لخصائص معينة ومحددة من المواد الغذائية. ويؤخذ هذا التباين "الطبيعي" كمرجع للمقارنة عند اختبار العينات المشتبه بها أو إجراء مراقبة روتينية لعينات السوق للكشف عن الاحتيال في الأغذية، مثل وضع علامات مضللة والغش. وبالنظر إلى الهدف النهائي لقواعد البيانات هذه من أجل دعم نظم اقتفاء أثر الأغذية (مثل عمليات الاسترجاع المستهدفة أو المجزأة) والآثار المترتبة في الحالات التي يتعذر فيها مطابقة الأغذية المختبرة، فمن الضروري أن تكون قواعد البيانات هذه مدعومة بشكل جيد من جانب قاعدة بيانات مستقلة وعالمية ومضيف موثوق به يمكن أن تستخدمه الدول الأعضاء بشكل روتيني لمقارنة الأطعمة المغشوشة والمزيفة المشتبه بها.

٢٤٧- وتتوفر مجموعة من التقنيات النووية والتقنيات التحليلية ذات الصلة لاختبار منشأ الأغذية لدعم نظم اقتفاء أثر الأغذية أو التحقق منها بشكل مستقل. ومن المتوقع أن تشمل التطورات القادمة مزيداً من تصغير الأدوات التحليلية للفحص من الدرجة الأولى، باستخدام التقنيات الحديثة والناشئة مثل المواد النانوية وأدوات معالجة البيانات المتقدمة لتطوير الأجهزة المحمولة والسريعة وغير الغازية، مما سيزيد بشكل كبير من عدد عينات المواد الغذائية التي يمكن اختبارها. وعلى سبيل المثال، تم تطوير أجهزة مسح الطعام النموذجية بالفعل باستخدام الهواتف الذكية العادية كأجهزة فحص. وتعني فعالية هذه التقنيات من حيث التكلفة وإمكانية الوصول إليها أنه يمكن أن يستخدمها أصحاب المصلحة في صناعة الأغذية والجهات الرقابية وحتى المستهلكون لفحص الأغذية في نقاط متعددة على طول سلسلة القيمة الغذائية، مما سيزيد بشكل كبير من فعالية نظم التحكم.

٢٤٨- ومن المتوقع أن يؤدي دمج هذه الأدوات في نظم اختبار الأغذية إلى حدوث نقلة نوعية حيث ستنتقل بسببها المختبرات التي تطبق التقنيات النووية والنظيرية الحساسة للغاية والمحددة التي توفر معلومات مهمة من التعامل مع أعداد كبيرة من العينات المتوافقة إلى عينات أقل عدداً وأكثر ملاءمة يجري التعرف على أنها مشبوهة.

واو-٣- التقنيات النووية لرصد غازات الدفيئة للتخفيف من آثار تغير المناخ

واو-٣-١- معلومات أساسية

٢٤٩- تساهم انبعاثات غازات الدفيئة الرئيسية، بما في ذلك ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز في الاحترار العالمي و تؤثر في استدامة نظم الإنتاج الزراعي. وتُظهر البيانات الحديثة الصادرة عن الهيئة الحكومية

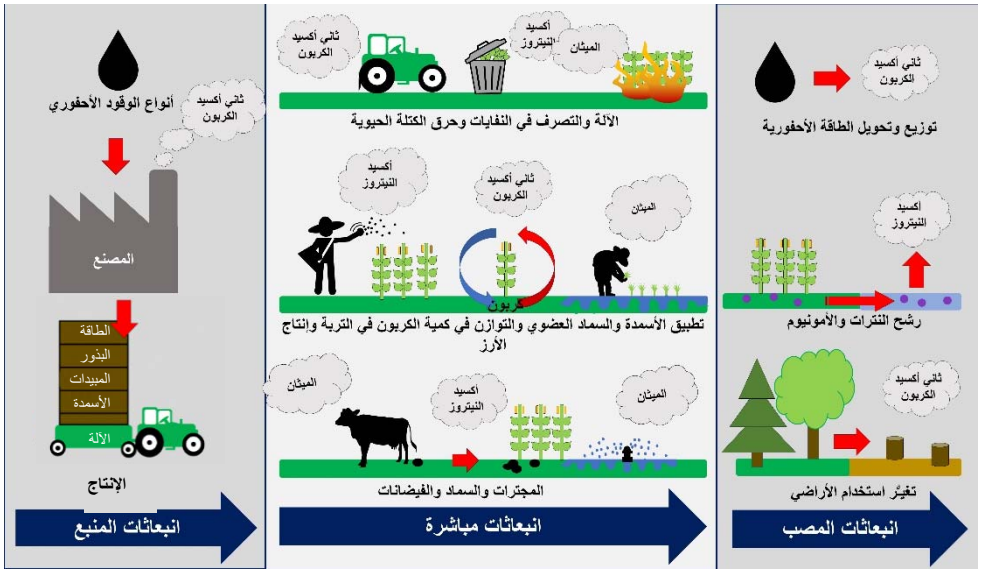
الدولية المعنية بتغير المناخ بوضوح أن انبعاثات غازات الدفيئة البشرية المنشأ هي الأعلى في التاريخ[٢٢]. ومنذ عام ١٩٠٠، زاد متوسط درجة حرارة الهواء السطحي للأرض بنحو ٠,٨ درجة مئوية، مع حدوث معظم هذه الزيادات منذ منتصف السبعينيات. وتساهم التغييرات في الزراعة واستخدام الأراضي في حوالي ٢٥٪ من إجمالي انبعاثات غازات الدفيئة، ويرجع ذلك أساساً إلى الاستخدام غير الفعال للأسمدة الكيميائية والسماد الحيواني والرعي الجائر وإزالة الغابات. وفي حين أن الزراعة تساهم بشكل كبير في تغير المناخ من خلال انبعاثات غازات الدفيئة، فهي أيضاً ضحية لتغير المناخ بسبب التأثير السلبي لتغير المناخ على توافر المياه وخصوبة التربة وجودتها وإنتاجية المحاصيل.

٢٥٠- وإلى جانب المصادر المباشرة، تأتي غازات الدفيئة أيضاً من مصادر غير مباشرة مختلفة بما في ذلك تطاير الأمونيا في النظم الزراعية (الشكل واو-٥). وتم الإبلاغ عن مجموعة واسعة من انبعاثات الأمونيا (١٠٪ إلى ٦٠٪ من النتروجين المطبق) في النظم الزراعية الإيكولوجية المختلفة[٢٣]. ولهذه الخسائر الفادحة للأمونيا في قطاع الزراعة آثار زراعية وبيئية واقتصادية. وعلى سبيل المثال، تسبب الأمونيا المنبعثة مشاكل صحية وبيئية، بما في ذلك التهاب الجهاز التنفسي، واتخام الماء بالمغذيات وتحمض التربة. وبالإضافة إلى ذلك، تعمل الأمونيا كمصدر ثانوي لأكسيد النيتروز، وهو غاز دفيئة قوي يساهم في الاحتباس الحراري. وبالإضافة إلى ذلك، فإن التغير المكاني والزماني لانبعاثات غازات الدفيئة يفرض تحديات كبيرة على قياسها وإدارتها داخل وعبر مختلف النظم الزراعية الإيكولوجية واستخدامات الأراضي، فضلاً عن عدم التجانس المكاني المتأصل لهذه الأراضي. وتوفر التقنيات النظيرية الأدوات اللازمة لتحديد مسارات الانبعاثات، وبالتالي توفر معلومات عن تقنيات التخفيف الفعالة.

---

[٢٢] الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (٢٠١٤) تغير المناخ ٢٠١٤: التقرير التجميعي. مساهمة فرق العمل الأولى والثانية والثالثة في تقرير التقييم الخامس للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ [فريق الكتابة الأساسي، جمهورية كوريا باشوري ول. أ. ماير (محرران)]. الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، جنيف، سويسرا، ص ١٥١، الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، ٢٠١٩. المنشورات [وثيقة إلكترونية]. الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ - فرقة العمل المعنية بقوائم الجرد الوطنية لغازات الدفيئة. العنوان الإلكتروني: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html.

[٢٣] زمان، م.، وساغار، س.، ستافورد، أ. د.، Mitigation of ammonia losses from urea applied to a pastoral system: The effect of nBTPT and timing and amount of irrigation "التخفيف من خسائر الأمونيا الناجم عن اليوريا الموضوعة في نظام رعوي: تأثير (ن- بوتيل) ثيوفيد الفوسفيد وتوقيت وكمية الري"، وقائع جمعية المراعي النيوزيلندية ٧٥ (٢٠١٣) ٢٠٩-٢١٤.



الشكل واو-٥- تمثيل بياني لانبعاثات غازات الدفيئة المباشرة (من نظام المحاصيل) وانبعاثات غازات الدفيئة غير المباشرة (من المنبع والمصب) من إنتاج المحاصيل.

واو-٣-٢- تطوير تكنولوجيا الكربون-١٣ للمستوى الميداني

٢٥١- يسمح لنا الابتكار في مجال الكربون-١٣ الآن بتطوير دراسات بخصوص دورة الكربون من التجارب المعملية الصغيرة إلى المستوى الميداني. ولتحقيق هذا الارتقاء، فإن وجود أدوات متقدمة لتحليل الكربون-١٣ في الوقت الفعلي أمر ضروري، مثل جهاز تحليل النظائر بالليزر العامل بثاني أكسيد الكربون.[٢٤] وبالإضافة إلى ذلك، من خلال وسم المواد النباتية بنظائر الكربون-١٣، من الممكن تقييم معدل دوران المواد العضوية في التربة وعزلها وتثبيتها في النظم الإيكولوجية الزراعية. ولا يزال مختبر إدارة التربة والمياه وتغذية المحاصيل التابع للوكالة يضطلع بأعمال البحث والتطوير بشأن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وأصبحت المواد النباتية التي تحمل وسم الكربون-١٣ متاحة الآن للدول الأعضاء. وهذه الأدوات التكنولوجية، المستندة إلى استخدام نظائر الكربون-١٣، لن تساعد فقط على تحسين مرونة إدارة التغير المناخي في مواجهة تغير المناخ، بل ستساعد أيضاً في فهم كيف ستؤثر سيناريوهات المناخ المستقبلية (تغير درجات الحرارة، والهطول المختلف للأمطار) على تخزين الكربون وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. وتوفر هذه التقنيات تقديراً لا لبس فيه لمقدار الكربون الذي يتم عزله في التربة أو يتم إطلاقه من مختلف أحواض الكربون في التربة.[٢٥]

واو-٣-٣- تقنية اقتفاء أثر النتروجين-١٥ لقياس أكسيد النيتروز وتحديد مصادره

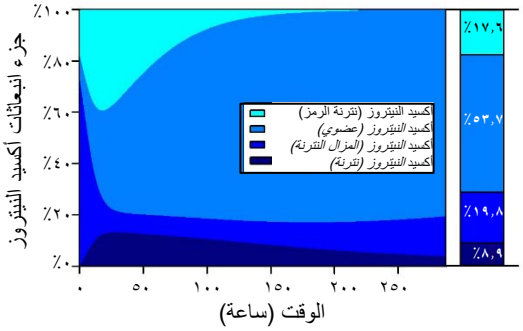
٢٥٢- لفهم انبعاثات أكسيد النيتروز، من المهم للغاية تقدير فقدان النتروجين عن طريق انبعاثات ثنائي النتروجين، وهو ليس من غازات الدفيئة وينبعث بكميات أكبر بكثير من أكسيد النيتروز. ومن أجل قياس انبعاثات غازات الدفيئة بدقة من التربة، عمل علماء من البرنامج المشترك بين الفاو والوكالة لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة وجامعة يوستوس ليبيش في غيسن، بألمانيا، معاً وأجروا العديد من التجارب المختبرية والميدانية. وكانت نتيجة هذه الدراسات هي تطوير أداة اقتفاء أثر النتروجين، والتي تختلف عن تقنية تخفيف

[٢٤] مولر، ك.، وآخرون، القياس الكمي لمسارات انبعاث أكسيد النيتروز عبر نموذج اقتفاء باستخدام النتروجين-١٥. بيولوجيا التربة والكيمياء الحيوية ٧٢ (٢٠١٤) ٤٤-٥٤.

[٢٥] كيدل، ل.، وآخرون، الاستجابة المعتمدة على العمق للتربة ككل ومحتوى الكربون العضوي في التربة لثاني أكسيد الكربون المرتفع على المدى الطويل في تربة الأراضي العشبية المعتدلة، وبيولوجيا التربة والكيمياء الحيوية ١٢٣ (٢٠١٨) ١٤٥-١٥٤.

النظائر ويمكنها قياس انبعاثات غازات الدفيئة بدقة وتحديد مصـــدرها في التربة في دراســـات ميدانية قصـــيرة وطويلة الأجل.[٢٦،٢٧]

٢٥٣- وقد أبرزت الأعمال الحديثة أهمية التقنيات النظيرية التي توفر نظرة ثاقبة لحركة ومصـــير النتروجين والكربون في النظم الإيكولوجية الزراعية فيما يتعلق بتخزينها في التربة والانبعاثات في الغلاف الجوي. وإن فهم الطبيعة المعقدة للتربة والعوامل المتفاعلة التي تسـهم في خصـوبة التربة وإنتاج غازات الدفيئة هو شـرط أسـاسـي لتطوير ممارسات الزراعة الذكية مناخيًّا. ويقدم الشكل واو-٦ مثالاً على النتائج من طريقة اقتفاء الأثر هذه لتحديد مسـارات أكسـيد النيتروز من أراض عشـبية دائمة. وتتوفر طرق مماثلة لتحديد عمليات إنتاج واسـتهلاك الميثان وثاني أكسيد الكربون من خلال تطبيق مصادر الكربون-١٣ المناسبة.



الشكل واو-٦ - إعداد حضّانة المختبر لدراسة اقتفاء أثر النتروجين-١٥ (يساراً) ونتائج دراسة اقتفاء أثر النتروجين-١٥ لتحديد مسارات انبعاثات أكسيد النيتروز من أرض عشبية دائمة؛ أكسيد النيتروز (نترنة) = نترنة، أكسيد النيتروز (إزالة النترنة) = إزالة النترنة، أكسيد النيتروز (عضوي) = نترنة متغايرة التغذية، أكسيد النيتروز (نترنة الرمز) = نترنة الرمز.
(المصدر: مولر وآخرون (٢٠١٤)).[٢٨]

واو-٣-٤- التطورات الجديدة في قياسات الأمونيا على نطاق الميدان

٢٥٤- الافتقار إلى تقنيات القياس غير المكلفة والمنخفضـــة التكنولوجيا يعني بأنه قد أجريت دراســـات ميدانية محدودة فقط لقياس خسـائر الأمونيا في جميع أنحاء العالم. وتتوفر بالفعل العديد من الأسـاليب المعقدة، مثل أنفاق الرياح، وقياس طيف اضـــمحلال الرنين في التجاويف وتقنيات الأرصـــاد الجوية الدقيقة. ومع ذلك، فإن هذه التقنيات غالية الثمن وتتطلب تقنيّين ذوي مهارات عالية لتشـغيلها. وهذا يجعل الوصـول إليها غير ممكن بالنسـبة للعديد من البلدان النامية والمؤسسات التي ترغب في قياس خسائر الأمونيا في نظم الإدارة الزراعية المختلفة.

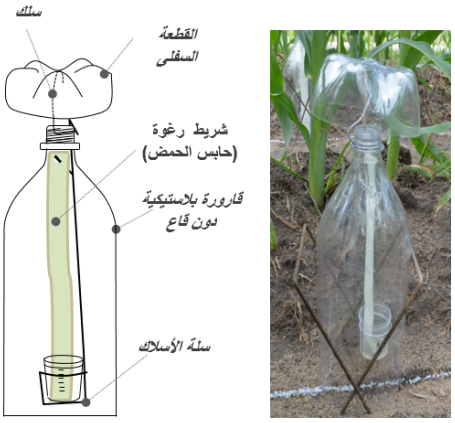
٢٥٥- ولتطوير طريقة منخفضـــة التكلفة وقوية لقياس الأمونيا، عملت الوكالة مع الشـــركة البرازيلية للبحوث الزراعية ومعهد بارانا للزراعة، لتطوير غرفة أمونيا بسيطة باستخدام زجاجة بلاستيكية (الشكل واو-٧).

---

[٢٦] مولر، ك.، وآخرون، القياس الكمي لمسارات انبعاث أكسيد النيتروز عبر نموذج اقتفاء باستخدام النتروجين-١٥. بيولوجيا التربة والكيمياء الحيوية ٧٢ (٢٠١٤) ٤٤-٥٤.

[٢٧] ٢٦: موزير، ج.، وآخرون، شرح مضاعفة انبعاثات أكسيد النيتروز في ظل ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في واجهة غيسين عبر اقتفاء النتروجين-١٥ في الميدان. بيولوجيا التغيرات الشاملة ٢٤ (٢٠١٤) ٣٨٩٧-٣٩١٠.

[٢٨] مولر، سي، وآخرون، القياس الكمي لمسارات انبعاثات أكسيد النيتروز عبر نموذج اقتفاء أثر النتروجين-١٥، بيولوجيا التربة والكيمياء الحيوية ٧٢ (٢٠١٤) ٤٤-٥٤.



الشكل واو-٧- منظر للغرفة المفتوحة البسيطة المستخدمة لقياس تطاير الأمونيا. وقدم أراوخو وآخرون (٢٠٠٩)[٢٩] وخانتاليا وآخرون (٢٠١٢)[٣٠] وصفاً لتفاصيل هذه الغرفة.

٢٥٦- ومن أجل اختبار وتأكيد دقة هذه الطريقة المطورة حديثاً لقياس الأمونيا، أُستخدِمت طريقة النتروجين-١٥. ووضِعت اليوريا الموسومة بالنتروجين-١٥ على سطح مقياس مثبت في الفضاء بين صفوف محاصيل الذرة. وتم تركيب غرف مفتوحة مصنوعة من قنيات التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني (الشكل واو-٧) على كل مقياس بأربعة معدلات مختلفة لتطبيق النتروجين، مع مسافات مختلفة بين كل غرفة وسطح التربة، مع أو دون نقل موضع الغرفة (ثابت مقابل ديناميكي) خلال فترة الرصد.

٢٥٧- ويعد استخدام طريقة الغرفة المفتوحة البسيطة هذه طريقة مناسبة وموثوقة لتقدير خسائر تطاير الأمونيا من التربة الزراعية وتكلف كل غرفة أقل من دولار واحد لتكوينها. ويجري طرح هذه الطريقة الجديدة لقياس الأمونيا لكي تستخدمها كل من البلدان المتقدمة والنامية للمساعدة في رصد التأثير البيئي لانبعاثات الأمونيا في صناعات الثروة الحيوانية والزراعة والاستجابة له. وقورنت كفاءتها مع العديد من المنهجيات الأخرى الموجودة في هذا المجال باستخدام تقنية النتروجين-١٥، وأسفرت عن نتائج مشابهة جداً. ونتيجة لذلك، تكتسب هذه الطريقة تقديراً سريعاً لأنها تتسم بالعملية والدقة والموثوقية، واستخدمها بنجاح العلماء في إسبانيا وباكستان والبرازيل وكوستاريكا وجمهورية إيران الإسلامية وشيلي والصين والولايات المتحدة الأمريكية. ويمكن لهذا الجهاز قياس خسائر الأمونيا بدقة من أجل اتباع الممارسات الزراعية الذكية مناخياً لتوسيع نطاق تقليل غازات الدفيئة والتأثير على البيئة.

واو-٣-٥- التطلع إلى المستقبل

٢٥٨- في ظل هذه التطورات في أدوات القياس والنمذجة، من المتوخى إجراء المزيد من أنشطة البحث والتطوير لإجراء تجارب في هذا المجال، وكذلك لتعزيز التطبيقات الملموسة على مستوى النظم الإيكولوجية الزراعية. وسيطلق مشروعٌ بحثي منسق جديد حول هذا الموضوع في عام ٢٠٢٠ لزيادة تحسين فهم العمليات المعقدة لانبعاثات غازات الدفيئة ولتطوير المزيد من خيارات التخفيف لخفض غازات الدفيئة، وكذلك خيارات عزل الكربون.

---

[٢٩] أراوخو، إ. س. وآخرون، معايرة غرفة ثابتة شبه مفتوحة لتقدير كمية الأمونيا المتطايرة من التربة، Pesquisa Agropecuária Brasileira 44(7) (2009) 769–776.

[٣٠] خانتاليا، سي. بي. وآخرون، تأثيرات مصادر النتروجين على تطاير الأمونيا كما تم قياسها باستخدام الغرف شبه الثابتة، مجلة الهندسة الزراعية ١٠٤(٦) (٢٠١٢) ١٥٩٥-١٦٠٣.

IAEA
الوكالة الدولية للطاقة الذرية

www.iaea.org

International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre, P.O. Box 100
1400 Vienna, Austria
الهاتف: ٠-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
الفاكس: ٧-٢٦٠٠ (١-٤٣+)
البريد الإلكتروني: Official.Mail@iaea.org

GC(64)/INF/2

20-02434A