IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام

المؤتمـــر العـــام

GC(55)/INF/5
٢٩ تموز/يوليه ٢٠١١

توزيع عام
عربي
الأصل: انكليزي

الدورة العادية الخامسة والخمسون

البند ١٧ من جدول الأعمال المؤقت
(الوثيقة GC(55)/1)

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١

تقرير من المدير العام

موجز

- تلبية لطلبات الدول الأعضاء، تصدر الأمانة كل عام استعراضاً شاملاً للتكنولوجيا النووية. ويرد مرفقاً بهذه الوثيقة التقرير الخاص بالعام الجاري، والذي يُسلّط الضوء على التطورات البارزة التي شهدها عام ٢٠١٠.

- *ويتناول استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١* المجالات التالية: تطبيقات القوى، وتقنيات الانشطار والاندماج المتقدمة، والبيانات الذرية والنووية، وتطبيقات المعجلات ومفاعلات البحوث، والتقنيات النووية المستخدمة في ميدان الأغذية والزراعة، والصحة البشرية، والبيئة، والموارد المائية، وإنتاج النظائر المشعة والتكنولوجيا الإشعاعية. وثمة وثائق إضافية مرتبطة بوثيقة استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١ متاحة، باللغة الإنكليزية، على الموقع الإلكتروني للوكالة،[١] وتتناول آخر التطورات في تكنولوجيا علاج الأورام الإشعاعي، وتعزيز أمان الأغذية وجودتها من خلال التقنيات النظيرية لتعقب أثر الأغذية وباستخدام النظائر بفعالية لدعم إدارة المياه الجوفية إدارة شاملة.

- ويمكن الاطلاع أيضاً على معلومات عن أنشطة الوكالة المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية في *التقرير السنوي لعام ٢٠١٠* (الوثيقة GC(55)/2)، لاسيما في القسم الذي يتناول "التكنولوجيا"، وفي *تقرير التعاون التقني لعام ٢٠١٠* (الوثيقة GC(55)/INF/2)، الصادرين عن الوكالة.

- وقد تم تعديل الوثيقة بحيث تراعي، بقدر المستطاع، تعليقات معينة أُدلي بها في مجلس المحافظين وتعليقات أخرى وردت من الدول الأعضاء.

[١] http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/Agenda/index.html

المحتويات

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١ ..... ١
موجز جامع ١
ألف- تطبيقات القوى ٤
ألف-١- القوى النووية اليوم ٤
ألف-٢- النمو المتوقّع للقوى النووية ٧
ألف-٣- دورة الوقود ٩
ألف-٣-١- موارد اليورانيوم وإنتاجه ٩
ألف-٣-٢- التحويل والإثراء وصنع الوقود ١١
ألف-٣-٣- المرحلة الختامية من دورة الوقود ١٣
ألف-٣-٤- التصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة ١٣
ألف-٤- الأمان ١٦
باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان ١٨
باء-١- الانشطار المتقدم ١٨
باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء ١٨
باء-١-٢- النظم النيوترونية السريعة ٢٠
باء-١-٣- المفاعلات المبرَّدة بالغاز ٢١
باء-١-٤- المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود الابتكارية (إنبرو) والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات ٢١
باء-٢- الاندماج ٢٢
جيم- البيانات الذرّية والنووية ٢٤
دال- التطبيقات الخاصة بالمعجلات ومفاعلات البحوث ٢٦
دال-١- المُعجّلات ٢٦
دال-٢- مفاعلات البحوث ٢٨
هاء- التكنولوجيات النووية في مجال الأغذية والزراعة ٣٠
هاء-١- تحسين إنتاجية الماشية والصحة البيطرية ٣٠
هاء-٢- مكافحة الآفات الحشرية ٣١
هاء-٣- تحسين المحاصيل ٣٣
هاء-٤- إدارة التربة والمياه ٣٥
هاء-٤-١- حدود جديدة لتقييم احتباس كربون التربة في الأراضي الزراعية ٣٥
هاء-٤-٢- استخدام النظائر الأكسجينية للفوسفات لاقتفاء أثر مصادر الفسفور ودوراته في التربة ٣٦
واو- الصحة البشرية ٣٧
واو-١- التغذية ٣٧
واو-٢- أوجه التقدّم في تطبيقات العلاج الإشعاعي للأورام ٣٧
واو-٣- تطورات جديدة في تكنولوجيا الطب النووي المتعلقة بدراسات القلب ٣٨
زاي- البيئة ٤٠
زاي-١- التكنولوجيا النووية للإنذار المبكّر بتكاثر الطحالب البحرية الضارة ٤٠
زاي-٢- استخدام النويدات المشعة الطويلة العمر لفهم العمليات البيئية ٤١
حاء- الموارد المائيّة ٤٢
طاء- إنتاج النظائر المشعة، والتكنولوجيا الإشعاعية ٤٣
طاء-١- النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية ٤٣
طاء-١-١- عوامل الاستهداف الجزيئي لأغراض التصوير والعلاج ٤٣
طاء-١-٢- أمن إمدادات الموليبدينوم–٩٩ والتكنِتيوم–٩٩م ٤٣
طاء-٢- تطبيقات التكنولوجيا الإشعاعية ٤٥
طاء-٢-١- النـُهـُج المتكاملة للاقتفاء الإشعاعي والمحاكاة الحاسوبية من أجل التصرّف في الترسبات ٤٥
طاء-٢-٢- معجلات حزم الأشعة الإلكترونية المنخفضة الطاقة ٤٥

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١

تقرير من المدير العام

موجز جامع

١- ما زال يجري تقييم الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما دايتشي للقوى النووية بسبب الكوارث الطبيعية غير العادية الناتجة عن الزلزال وموجات المد البحري (التسونامي)، التي ضربت اليابان يوم ١١ آذار/مارس ٢٠١١. وبما أن هذا التقرير يركِّز على التطورات التي طرأت في عام ٢٠١٠، فلن يُعالَج الحادث وتأثيراته هنا، ولكن سيتم تناول ذلك في تقارير مقبلة للوكالة.

٢- وفي عام ٢٠١٠، بدأت أعمال التشييد في ستة عشر مفاعلا جديداً من مفاعلات القوى النووية، وهو أكبر عدد تم تحقيقه منذ عام ١٩٨٥. ومع ربط خمسة مفاعلات جديدة بشبكات توزيع الكهرباء وسحب مفاعل واحد خلال العام، ارتفع إجمالي قدرة القوى النووية في العالم ليصل إلى ٣٧٥ غيغاواط(كهربائي). وظلّت التوقعات المنقحة في عام ٢٠١٠ لنمو القوى النووية مستقبلا تشير إلى آمال عالية في توسيع نطاق القوى النووية.

٣- وظلّت عمليات التوسع واحتمالات النمو في الأجلين القصير والطويل تتركز في آسيا. ويوجد في آسيا ثلثا المفاعلات التي يجري تشييدها حاليا، كما هو الحال أيضاً بالنسبة لثلاث عشرة عملية من عمليات بدء التشييد الست عشرة. ومن أصل هذه العمليات، كانت عشر عمليات من عمليات بدء التشييد تجري في الصين وحدها. وتواصلت في عام ٢٠١٠ التوجهات نحو رفع القدرات ونحو تجديد الرخص أو تمديدها بالنسبة للمفاعلات العاملة، لا سيما في عدد من البلدان الأوروبية حيث تواصل التوجه نحو إعادة النظر في السياسات التي تفرض قيوداً على استخدام القوى النووية في المستقبل. وظل الاهتمام عالياً باستهلال برامج جديدة للقوى النووية، إذ أعربت أكثر من ٦٠ دولة من الدول الأعضاء للوكالة عن اهتمامها بالنظر في البدء باستخدام القوى النووية.

٤- وفي طبعة عام ٢٠١٠ من 'الكتاب الأحمر' الصادر عن وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والوكالة، شهدت تقديرات موارد اليورانيوم التقليدية المعروفة بتكلفة تقل عن ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم انخفاضاً طفيفاً بالمقارنة مع ما ورد في الطبعة السابقة، ولكن إنتاج اليورانيوم على صعيد العالم ارتفع بشكل ملموس ويعود ذلك بشكل كبير إلى زيادة الإنتاج في كازاخستان. وأسعار اليورانيوم الفورية، التي تراجعت خلال عام ٢٠٠٩، حققت في نهاية عام ٢٠١٠ أعلى مستوياتها منذ أكثر من سنتين إذ تجاوزت ١٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، وذلك على الرغم من تذبذب الأسعار في مطلع السنة ومنتصفها بين ١٠٥ دولارات و١١٥ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم.

٥- ووافق مجلس المحافظين، في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، على إقامة مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، الذي ستملكه الوكالة وتديره، باعتباره مصدر ملاذ أخير للإمداد لأغراض توليد الكهرباء. كذلك في كانون الأول/ديسمبر، وتحت رعاية الوكالة تم فتح احتياطي من اليورانيوم الضعيف الإثراء في أنغارسك،

بالاتحاد الروسي، يحتوي على ١٢٠ طنا من اليورانيوم الضعيف الإثراء، بما يكفي لصنع شحنتين كاملتين من الوقود لقلب مفاعل قوى نووية بقدرة ١٠٠٠ ميغاواط.

٦- وتعكف أكثر من ٥٠ دولة من الدول الأعضاء على دراسة الخيارات أو بدأت فعلا بتطوير خيارات التخلص الملائمة لأرصدتها الخاصة من النفايات. وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٠، بدأ في سلوفينيا نفاذ مرسوم يؤكد الموقع المختار لإقامة مستودعها الخاص بالنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع.

٧- وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٠، أصدرت المفوضية الأوروبية اقتراحاً بتوجيه صادر عن المجلس الأوروبي بشأن التصرف في الوقود المستهلك والنفايات المشعة، وينطوي هذا التوجيه على الطلب من الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي أن تقوم بعرض برامجها الوطنية، مع الإشارة إلى متى وأين وكيف ستشيِّد وتدير المستودعات النهائية الرامية إلى ضمان الحدود العليا من معايير الأمان. وتعمل فنلندا والسويد على تحضير الوثائق اللازمة لرخص التشييد الخاصة بمرافق جيولوجية عميقة مصممة للوقود المستهلك. كما عرضت الهيئة الفرنسية للأمان النووي صيغة جديدة من خطتها الوطنية للتصرف في المواد المشعة.

٨- وفي الولايات المتحدة، أنشئت في كانون الثاني/يناير ٢٠١٠ 'لجنة الشريط الأزرق المعنية بالمستقبل النووي الأمريكي' بناء على قرار حكومة الولايات المتحدة المتخذ في عام ٢٠٠٩ بالتخلي عن مشروع المستودع الجيولوجي العميق في جبل 'يوكا ماونتن'. ومن المتوقع أن يصدر التقرير المؤقت الأول للجنة في تموز/يوليه ٢٠١١.

٩- وواصلت الوكالة تقديم الدعم إلى الدول الأعضاء والبرامج الدولية لإعادة وقود مفاعلات البحوث إلى بلد منشئه. وكجزء من برنامج إعادة وقود مفاعلات البحوث الروسي، أعيد ما يقارب ١٠٩ كلغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج و٣٧٦ كلغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستهلك إلى الاتحاد الروسي. وفي نهاية عام ٢٠١٠، جرى نقل ٢٥٠٠ كلغ من وقود مفاعلات البحوث المتدهور والمستهلك من فينسا في صربيا إلى الاتحاد الروسي. وقد سجلت أيضا أعمال الإعادة من فينسا إلى بلد المنشأ التنفيذَ الناجح لمشروع التعاون التقني الأعلى قيمةً في تاريخ الوكالة.

١٠- وفي الصين، بلغ المفاعل التجريبي الصيني السريع الحوضي بقدرة ٦٥ ميغاواط حراري (٢٠ ميغاواط (كهربائي)) درجة الحرجية للمرة الأولى في ٢١ تموز/يوليه ٢٠١٠. وفي اليابان، أعيد في ٦ أيار/مايو ٢٠١٠ تشغيل المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٢٨٠ ميغاواط(كهربائي)، وبدأت اختبارات التأكيد.

١١- وفيما يتعلق بالاندماج النووي، انتقل المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي (المفاعل التجريبي الدولي) رسمياً إلى مرحلة التشييد في تموز/يوليه ٢٠١٠. ومن المتوقع بلوغ حالة البلازما للمرة الأولى في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩. وأحرز أيضاً تقدمٌ ملموسٌ في العمل على مرفق الإشعال الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية حيث تم تحقيق نبض بقدرة ١ ميغاجول في كانون الثاني/يناير ٢٠١٠.

١٢- إن تطوير واختبار وتصديق وتطبيق تقنيات نووية وتقنيات ذات صلة بالمجال النووي على نحو سريع ودقيق لتشخيص الأمراض في مرحلة مبكرة أدى كل ذلك دورا هاما في تحسين الأمن الغذائي في ٢٠١٠. وعلى سبيل المثال، يجري تطوير لقاحات ضد داء البروسيلات (وهو مرض حيواني منتشر) في الأرجنتين وجورجيا؛ ولقاحات ضد عدوى الديدان الطفيلية في إثيوبيا والسودان وسريلانكا؛ وضد الثالليريا في الصين وتركيا؛ وضد داء المثقبيات في الهند وكينيا؛ وضد داء الأنابلازما في تايلند؛ وضد الطيفيليات المنقولة بالسمك في جمهورية إيران الإسلامية.

١٣- وإن زيادة الاستثمار في مكافحة الآفات سيكون أحد المكوّنات الاستراتيجية الهامة لزيادة الإنتاجية وضمان أمن غذائي عالمي. وقد تم في ٢٠١٠ نشر أعمال المشروع البحثي المنسق المشترك بين الفاو/الوكالة، الذي لمّ ١٨ أفرقة بحث من ١٥ بلدا. وتشير نتائج تلك الأعمال إلى سبل ابتكارية لتطبيق الإشعاعات المؤيِّنة لإضافة قيمة إلى تطبيق المراقبة البيولوجية باستخدام الحيوانات المفترسة والطفيليات كعوامل تكميلية لتقنية الحشرة العقيمة للتحكم في الآفات الحشرية بطريقة مواتية للبيئة.

١٤- في ٢٠١٠، استمر بنجاح استغلال الطفرات أو التغيرات الوراثية التي تحدث طبيعياً في المادة الوراثية للنباتات قصد تحديد واختيار السمات الهامة لتحسين المحاصيل. ويمكن للتقنيات النووية المستخدمة لحث الطفرات أن ترفع معدّلات التغيرات الوراثية وترفع بالتالي قابلية المحاصيل للتكيّف مع تغير المناخ وتقلباته. وتم تطوير المجموعات التكنولوجية النووية القائمة على حث الطفرات والتكنولوجيات الجزيئية والتكنولوجيات البيولوجية لتعزيز الكفاءة، بما في ذلك زراعة الأنسجة والتكنولوجيات الجزيئية العالية الإنتاجية لتساعد على تحديد واستغلال السمات الأساسية للتكيّف مع تغيرات المناخ وتقلباته.

١٥- وفي ميدان الصحة البشرية، تتيح الانجازات التي تواصلت في عام ٢٠١٠ في ميدان العلاج الإشعاعي للأورام تحسينَ دقة العلاجات بحيث بات اليوم من الممكن مواءمة الحجم المشعع مع شكل الورم وبالتالي الحفاظ بشكل أفضل على الأنسجة السليمة المحيطة. ويجري استخدام العلاج الإشعاعي المكيَّف الثلاثي الأبعاد لتصميم مجالات العلاج التي تركز على الورم المستهدف.

١٦- ويراعى العلاج الإشعاعي المتحكّم في الجهاز التنفسي العضو وتحرك الورم خلال عملية تنفس المريض. لا سيما في حالات الأورام التي تصيب الصدر، والحنجرة، والبطن، والبروستات والمثانة، وكذلك منطقة الحوض على العموم. وفي هذا العلاج الإشعاعي الموجّه بالحاسوب، يحلل البرنامج التحركات ويطلق الحزمة الإشعاعية العلاجية في الوقت المناسب.

١٧- وقد أدى التقدم المحرز خلال السنوات الثلاث الماضية في ميدان الطب النووي إلى تخفيض المدة اللازمة للمسح والجرعة الإشعاعية المعطاة للمرضى في آن معاً، فيما يساهم أيضاً في تحسين النوعية الإجمالية للصور الملتقطة ممّا يتيح تشخيص أمراض القلب والأوعية الدموية على نحو أوثق وأكثر فعالية. ويتم الآن استخدام مادة كشف جديدة، مثل تيلوريد زنك الكادميوم باتحاد مع التسديد المركّز الأحادي الفتحة وإعادة البناء الثلاثي الأبعاد، في التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد التقليدي من أجل الحد من مدة المسح.

١٨- ويمكن لتكاثر الطحالب الضارة في المناطق الساحلية أن يؤدي إلى خسائر اقتصادية فادحة نتيجة للأضرار التي يلحقها بالمأكولات البحرية المحصودة لأغراض الاستهلاك المحلي والتصدير على حد سواء. وتتيح التقنيات النووية المطوّرة حديثاً إجراء تقييم دقيق وسريع لحالات التكاثر هذه باعتباره وسيلة لدعم ما تبذله الهيئات الرقابية الوطنية من جهود لأجل كفالة أمان المأكولات البحرية. واعتبِر الاجتماع السنوي في عام ٢٠١٠ للرابطة العلمية المكرّسة للامتياز التحليلي، طريقة اختبار ربط أجهزة الاستقبال، وهي تكنولوجيا نووية تعتمد على استخدام التوكسينات المرقومة إشعاعياً، كواحدة من الطريقتين البديلتين المتطورتين اللتين تم اختبارهما بنجاح في دراسات التصديق المسبق.

١٩- وتستخدم النويدات المشعة الطويلة العمر لاستقصاء الموارد البحرية والعمليات الأوقيانوغرافية فضلا عن تقييم التلوث البحري دعماً لإدارة المناطق الساحلية. وبسبب اضمحلال النويدات المشعة مع مرور الوقت، فإنها تُتيح للباحثين تحديد تاريخ هذه العمليات البيئية الواسعة النطاق ودراستها، وكذلك الحصول على معلومات لا يمكن الحصول عليها لولا هذه الطريقة.

٢٠ ويجري استخدام النظائر المستقرة والمشعة في الدراسات التي لا تستغرق وقتا طويلا والمجدية من حيث التكاليف كما في مستجمع غواراني المائي في جنوب أميركيا، وحوض تادلة بالمغرب، والمستجمع المائي الصخري النوبي في أفريقيا الشمالية. وتم استخدام بيانات النظائر في ٢٠١٠ لتأكيد الدراسات الهيدرولوجية التقليدية وتقديم أفكار عن تدفق المياه الجوفية وديناميكيات مستجمعات المياه، التي تساهم كلها في إدارة شاملة للمياه الجوفية.

٢١- وفي ٢٠١٠ تواصل تزايد أهمية النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية. ويتزايد استخدام المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية ذات الخصائص العالية التحديد باعتبارها واسمات حيوية للعمليات التي تطرأ على الجزيئات عند المعاناة من مرض ما، وهو نهج معروف باسم "التصوير الجزيئي"، إذ يمكن استخدام هذه الواسمات كمؤشر مبكر للإصابة بالمرض أو كمعلمة موضوعية لقياس فعالية العلاج، لا سيما لدى مرضى السرطان.

٢٢- وأدّت التحديات التقنية إلى حالات إغلاق لمفاعلات البحوث بصورة متكررة ومطوّلة ومتواصلة في كثير من الأحيان مما أسهم في إطالة أمد أزمة إمدادات الموليبدينوم–٩٩ التي بدأت في أواخر عام ٢٠٠٧. وقدّمت الجهود المتناسقة والعالمية التي بُذلت في سبيل تحسين فعالية الطلب، وتقليل تحديات النقل والموافقة على المفاعلات القادرة على تشعيع الكبسولات المستهدفة مساعدة كبيرة في التخفيف من حدة الأزمة طيلة عام ٢٠١٠. وأصبحت جنوب أفريقيا المُنتج الرئيسي الأول الذي يورّد على نطاق صناعي كميات من الموليبدنوم–٩٩ المعتمد على اليورانيوم الضعيف الإثراء لأغراض التصدير في عام ٢٠١٠، كما بدأ إنتاج الموليبدنوم–٩٩ على نطاق واسع في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠ في معهد بحوث المفاعلات الذرية في ديميتروفغراد بالاتحاد الروسي. وعلاوة على ذلك، أدت حالات النقص في إمدادات الموليبدنوم–٩٩ المنتج بالانشطار، وبالتالي مولّدات التكنتيوم–٩٩م، إلى زيادة الاهتمام بتقصّي وتطوير تكنولوجيات بديلة لإنتاجهما، لا سيما تلك التي لا تستخدم اليورانيوم الشديد الإثراء. وبالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام النُهُج القائمة على المعجلات من شأنها أن تساعد في الحد من الاعتماد فقط على المفاعلات المتقادمة التي توفر الخدمات لصناعة الموليبدينوم-٩٩ الانشطاري. ويعمل باحثون كنديون على دراسة الإنتاج المباشر للتكنتيوم-٩٩م على أساس السيكلوترون كبديل في الأجل القريب في مراكز طبية تقع على مقربة من سيكلوترونات ذات طاقة منخفضة أو متوسطة.

٢٣- وتشمل التطورات الأخيرة في التطبيقات الصناعية للتكنولوجيا الإشعاعية نُهُجاً متكاملة للاقتفاء الإشعاعي والمحاكاة الحاسوبية من أجل التصرّف في الترسبات. وجرى خلال الفترة ٢٠٠٩-٢٠١٠ تنفيذ عمليات تقصٍّ على أساس الاقتفاء الإشعاعي باستخدام مسحوق زجاجي مرقوم بالسكانديوم-٤٦ بوصفه مادة اقتفائية في موقع لمكبٍّ قائم وموقعين لمكبين مقترحين في الهند. وأظهرت النتائج أن الموقع القائم وأحد الموقعين المقترحين ملائمان لكبّ الترسبات المجروفة، في حين أن الموقع المقترح الآخر غير ملائم.

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

٢٤- للسنة السابعة على التوالي، ارتفع عدد حالات البدء بتشييد المفاعلات الجديدة. ورغم أن ذلك يقل بكثير عن الذروة المحققة في عام ١٩٧٦ والتي بلغت أربعاً وأربعين حالة، فإن حالات بدء التشييد الست عشرة المسجلة عام ٢٠١٠، وهو الرقم الأعلى منذ عام ١٩٨٥، تبرز زيادة ملحوظة بالمقارنة مع الأرقام المسجلة في تسعينيات القرن العشرين وأوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين.

٢٥- ومنذ ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، كان هناك ٤٤١ مفاعلا للقوى النووية قيد التشغيل عبر العالم، بقدرة إجمالية تبلغ ٣٧٥ غيغاواط(كهربائي) (انظر الجدول ألف-١). ويشكل ذلك زيادة في القدرة الإجمالية تناهز ٤ غيغاواط(كهربائي) بالمقارنة مع نهاية عام ٢٠٠٩، ويعود ذلك بشكل كبير إلى خمس حالات ربط جديدة بشبكات توزيع الكهرباء وهي: مفاعل Lingao-3 (١٠٠٠ ميغاواط(كهربائي)) ومفاعل Qinshan 2–3 (٦١٠ ميغاواط(كهربائي)) في الصين؛ ومفاعل Rajasthan-6 (٢٠٢ ميغاواط(كهربائي)) في الهند؛ ومفاعل Rostov-2 (٩٥٠ ميغاواط(كهربائي)) في الاتحاد الروسي؛ ومفاعل Shin Kori 1 (٩٦٠ ميغاواط(كهربائي) في جمهورية كوريا. وحالة سحب واحدة فقط من الخدمة، أي مفاعل فينكس Phenix (١٣٠ ميغاواط(كهربائي)) في فرنسا.

٢٦- وشهد عام ٢٠١٠ حالات بدء تشييد عددها ١٦ حالة، وهي التالية: مفاعل Angra-3 في البرازيل؛ ومفاعلات Changjiang-1 وChangjiang-2 وFangchenggang-1 وFangchenggang-2 وFuqing-3 وHaiyang-2 وNingde-3 وNingde-4 وTaishan-2 وYangjiang-3 في الصين؛ ومفاعلا Kakrapar-3 وKakrapar-4 في الهند؛ ومفاعل Ohma في اليابان؛ ومفاعلا Leningrad 2-2 وRostov-4 في الاتحاد الروسي. ويتقارن ذلك مع اثنتي عشرة حالة بدء تشييد بالإضافة إلى إعادة بدء التشييد الفعلي في مفاعلين في عام ٢٠٠٩، ومع عشر حالات بدء تشييد في عام ٢٠٠٨.

٢٧- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، كان ما مجموعه ٦٧ مفاعلا قيد التشييد، وهو الرقم الأعلى منذ عام ١٩٩٠.

٢٨- وظلّت عمليات التوسع واحتمالات النمو في الأجلين القصير والطويل تتركز في آسيا. ومن أصل ١٦ عملية بدء تشييد في عام ٢٠١٠ كانت هناك ١٣ عملية بدء تشييد تجري في آسيا. وكما هو مبين في الجدول ألف-١، فإن ٤٥ مفاعلا من أصل ٦٧ مفاعلا قيد التشييد تقع في آسيا، التي تضم أيضاً ٣٤ مفاعلا من أصل ٤٣ مفاعلا جديداً جرى ربطها بالشبكة الكهربائية.

٢٩- واستمرت في عام ٢٠١٠ التوجّهات نحو رفع القدرات وتجديد الرخص أو تمديد أجلها بالنسبة لعدة مفاعلات قيد التشغيل. وفي الولايات المتحدة الأمريكية، جدّدت الهيئة الرقابية النووية رخصتي تشغيل محطة كوبر النووية في نبراسكا ومركز دوين آرنولد للطاقة في آيوا لفترة إضافية مدتها ٢٠ عاماً، ليصل بذلك العدد الإجمالي لعمليات تجديد الرخص الموافق عليها منذ عام ٢٠٠٠ إلى ٦١ تجديداً. وفضلاً عن ذلك، وافقت الهيئة الرقابية النووية في عام ٢٠١٠ على ٦ طلبات لرفع القدرات، وكان ١٢ طلباً لرفع القدرات من حيث القوى قيد الاستعراض، وشملت هذه الطلبات ما يناهز مجموعه ١٣٥٥ ميغاواط(كهربائي). وفي المملكة المتحدة، وافقت هيئة التفتيش على المنشآت النووية على تمديد الرخصة التشغيلية لمحطة ويلفا Wylfa للقوى النووية ذات الوحدتين التوأمين لفترة إضافية تصل إلى سنتين. وعلاوة على ذلك، وافقت الهيئة أيضاً على تمديد الرخص من ٣٠ إلى ٣٥ عاماً فيما يخص أربعة مفاعلات قائمة في Hartlepool وHeysham-1. وفي الاتحاد الروسي، أصدرت الهيئة الرقابية الروسية Rostechnadzor تمديداً للرخصة التشغيلية الخاصة بالوحدة ٤ من محطة لينينغراد للقوى النووية وذلك لمدة ١٥ عاماً.

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل أو قيد التشييد في العالم (حتى ٣١ كانون الثاني/يناير ٢٠١٠)[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٠		إجمالي الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٠	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	% من المجموع	الأعوام	الشهور
الاتحاد الروسي	٣٢	٢٢ ٦٩٣	١١	٩ ١٥٣	١٥٩,٤١	١٧,٠٩	١٠٢٦	٥
الأرجنتين	٢	٩٣٥	١	٦٩٢	٦,٦٩	٥,٩١	٦٤	٧
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٢٩	٣٩,٤٢	٣٦	٨
أسبانيا	٨	٧ ٥١٤			٥٩,٢٦	٢٠,٠٩	٢٧٧	٦
ألمانيا	١٧	٢٠ ٤٩٠			١٣٣,٠١	٢٨,٣٨	٧٦٨	٥
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	١٩٠٠	٨٣,٩٥	٤٨,١١	٣٨٣	٦
إيران (جمهورية-الإسلامية)			١	٩١٥				
باكستان	٢	٤٢٥	١	٣٠٠	٢,٥٦	٢,٦٠	٤٩	١٠
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٢٤٥	١٣,٩٠	٣,٠٦	٣٩	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩٢٦			٤٥,٧٣	٥١,١٦	٢٤٠	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٠٦	٢	١ ٩٠٦	١٤,٢٤	٣٣,١٣	١٤٩	٣
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٦٧٨			٢٦,٤٤	٣٣,٢٧	١١٦	١٠
جمهورية كوريا	٢١	١٨ ٦٩٨	٥	٥ ٥٦٠	١٤١,٨٩	٣٢,١٨	٣٦٠	١
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٠٠			١٢,٩٠	٥,١٨	٥٢	٣
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٧٠	١٩,٤٨	١٧	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٦	٢	٧٨٢	١٣,٥٤	٥١,٨٠	١٣٦	٧
سلوفينيا	١	٦٦٦			٥,٣٨	٣٧,٣٠	٢٩	٣
السويد	١٠	٩ ٣٠٣			٥٥,٧٣	٣٨,١٣	٣٨٢	٦
سويسرا	٥	٣ ٢٣٨			٢٥,٣٤	٣٨,٠١	١٧٩	١١
الصين	١٣	١٠ ٠٥٨	٢٨	٢٨ ٢٣٠	٧٠,٩٦	١,٨٢	١١١	٢
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٠٠	٤١٠,٠٩	٧٤,١٢	١ ٧٥٨	٤
فنلندا	٤	٢ ٧١٦	١	١ ٦٠٠	٢١,٨٩	٢٨,٤٣	١٢٧	٤
كندا	١٨	١٢ ٥٦٩			٨٥,٥٠	١٥,٠٧	٦٠٠	٢
المكسيك	٢	١ ٣٠٠			٥,٥٩	٣,٥٩	٣٧	١١
المملكة المتحدة	١٩	١٠ ١٣٧			٥٦,٨٥	١٥,٦٦	١ ٤٧٦	٨
الهند	١٩	٤ ١٨٩	٦	٣٧٦٦	٢٠,٤٨	٢,٨٥	٣٣٧	٣
هنغاريا	٤	١ ٨٨٩			١٤,٦٦	٤٢,١٠	١٠٢	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٧٥	٣,٣٨	٦٦	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	١٠٤	١٠١ ٢٤٠	١	١ ١٦٥	٨٠٧,٠٨	١٩,٥٩	٣ ٦٠٣	١١
اليابان	٥٤	٤٦ ٨٢١	٢	٢ ٦٥٠	٢٨٠,٢٥	٢٩,٢١	١ ٤٩٤	٨
المجموع [ب، ج]	٤٤١	٣٧٥ ٢٦٧	٦٧	٦٤ ٠٦٤	٢٦٢٩,٩٥	لا ينطبق	١٤ ٣٥٣	٤

أ- البيانات مأخوذة من نظام المعلومات عن مفاعلات القوى الخاص بالوكالة (http://www.iaea.org/pris)

ب- ملحوظة: يتضمن هذا المجموع البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين:

تايوان، الصين: ٦ وحدات، ٤٩٨٢ ميغاواط قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط قيد التشييد؛

٣٩.٨٩ تيراواط-ساعة من الكهرباء المولدة نووياً، أي ١٩.٣% من إجمالي حجم الكهرباء المولدة؛

ج- يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨١ عاماً) وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ شهور)، وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ شهور)، وتايوان، الصين (١٧٦ عاماً وشهر واحد).

٣٠- وفي بعض البلدان الأوروبية، حيث وُضِعت قيود في السابق على الاستخدام المستقبلي للقوى النووية، تواصلت في عام ٢٠١٠ التوجهات، التي كانت قد استُهلت في عام ٢٠٠٩، نحو إعادة النظر في هذه السياسات. وفي إسبانيا، وافقت الحكومة على تمديد رخصة محطة Almarez للقوى النووية ذات الوحدتين المزدوجتين ورخصة الوحدة ٢ من محطة Vandellos للقوى النووية، وذلك لمدة عشرة أعوام. وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٠، أطلقت المفوضية الأوروبية رسمياً المبادرة الصناعية النووية المستدامة الأوروبية دعما للخطة الاستراتيجية لتكنولوجيا الطاقة التي وضعتها المفوضية الأوروبية. وتتناول المبادرة المذكورة الحاجة إلى توضيح تكنولوجيات الجيل الرابع من المفاعل النيوتروني السريع، إلى جانب دعم البنى الأساسية للبحوث، ومرافق الوقود، وأعمال البحث والتطوير. وتركّز المبادرة على تصميم وتشييد نماذج من الجيل القادم من النظم النووية، وعلى أساليب تمديد الأعمار التشغيلية لمحطات القوى النووية القائمة، وعلى وضع حلول طويلة الأمد للتصرف في النفايات المشعة.

٣١ وظل الاهتمام عالياً بدراسة القوى النووية باعتبارها خياراً، إذ أعربت أكثر من ٦٠ دولة من الدول الأعضاء للوكالة عن اهتمامها بالنظر في البدء باستخدام القوى النووية. وتقدم الوكالة لهذه الدول الأعضاء طائفة واسعة من المساعدة بما في ذلك المعايير والمبادئ التوجيهية، وزيادة المساعدة التقنية، وخدمات الاستعراض، وبناء القدرات وإرساء شبكات المعارف. ونفذت الوكالة بعثة للاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية في تايلند في شهر كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠.

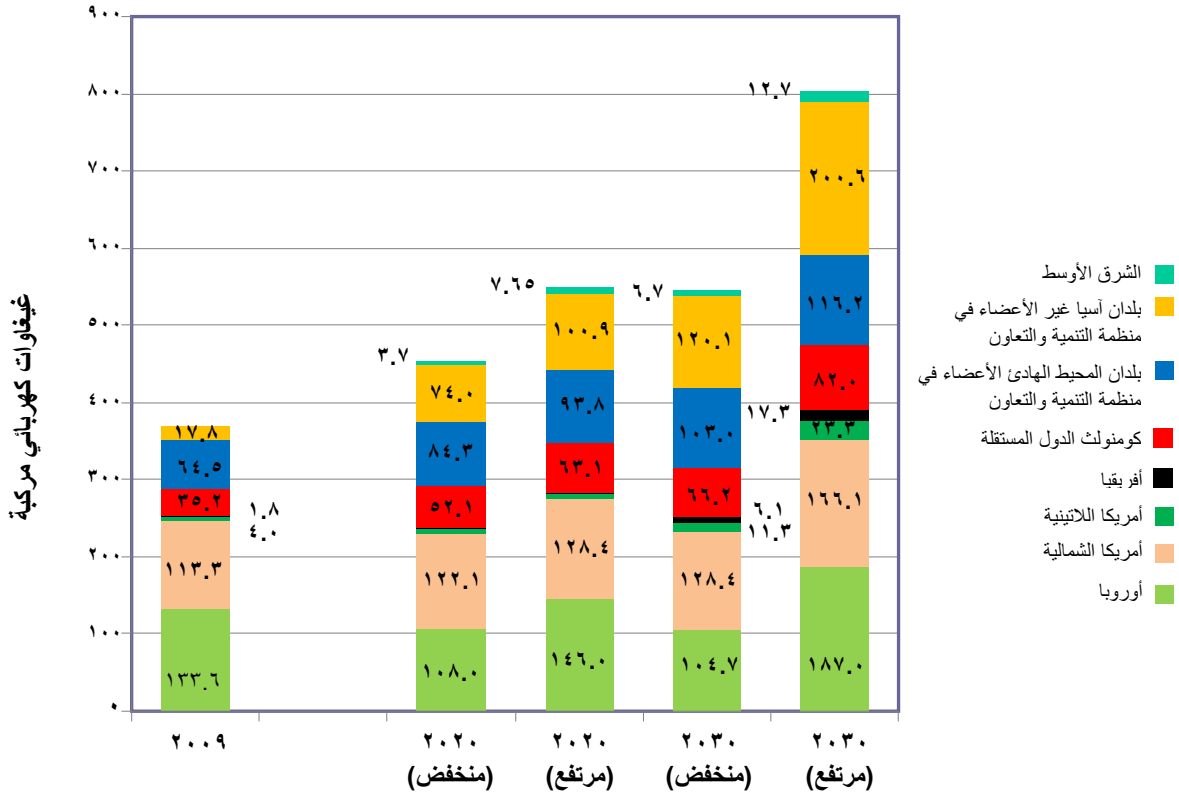
ألف-٢- النمو المتوقع للقوى النووية

٣٢- تستوفي الوكالة سنوياً توقعاتها المنخفضة والمرتفعة بشأن النمو العالمي في مجال القوى النووية. وفي عام ٢٠١٠، على الرغم من استمرار تباطؤ الاقتصاد العالمي، سادت التوقعات المرتفعة بشأن مستقبل التكنولوجيا. ويبرز ذلك في تنقيح التوقعات المنخفضة للوكالة في عام ٢٠١٠ بشأن القدرات العالمية، التي ارتفعت لتصل إلى ٥٤٦ غيغاواط(كهربائي) في عام ٢٠٣٠ مقارنة بالتوقع الصادر عام ٢٠٠٩ والبالغ ٥١١ غيغاواط(كهربائي). أمّا في استيفاء التوقع المرتفع، وصلت القدرات العالمية إلى ٨٠٣ غيغاواط(كهربائي)، وهو انخفاض طفيف مقارنة بالتوقع الصادر عام ٢٠٠٩ والبالغ ٨٠٧ غيغاواط(كهربائي). وظلّ الهامش بين التوقعين المرتفع والمنخفض لعام ٢٠٣٠ مرتفعاً على الرغم من انخفاضه إلى ٢٥٧ غيغاواط(كهربائي).

٣٣- وقد سُجِّلت أعلى الزيادات في كلا التوقعين في عام ٢٠١٠ بالنسبة لآسيا، وهي منطقة لا تشمل بلداناً تملك حالياً برامج قوى نووية تجارية مثل باكستان وجمهورية كوريا والصين والهند واليابان فحسب، بل تشمل أيضاً العديد من البلدان المستجدة التي يُعقل أن يُتوقَّع امتلاكها لمحطات قوى نووية قيد التشغيل بحلول عام ٢٠٣٠ (أنظر الشكل ألف–١). وفي التوقع المنخفض، تمثل المنطقة وحدها ٨٥% من صافي النمو في القدرات النووية بين عامي ٢٠٠٩ و٢٠٣٠. ويعود ارتفاع الطلب على الطاقة — لا سيما على الكهرباء — إلى النمو السكاني المطرّد، وتطلعات التنمية الاقتصادية المسرّعة، والشواغل بشأن أمن الطاقة. وهذا الارتفاع في الطلب على الطاقة، مقروناً بمستقبل سيسوده على الأرجح ارتفاع أسعار الوقود الأحفوري وتطايرها بالإضافة إلى اعتبارات بيئية، شجّع السعي إلى تحقيق إمدادات طاقة ذات انبعاث قليل من الكربون، ومنها القوى النووية.

٣٤- ووفقاً لتوقعات عام ٢٠١٠، لا تشهد بقية أرجاء العالم، باستثناء بلدان كومنولث الدول المستقلة حيث الزيادة المتوقعة أعلى، سوى زيادة طفيفة متوقعة في القدرة على توليد القوى النووية. وقد أدّى انعدام اليقين بخصوص الطلب على الكهرباء — نتيجة لبطء الانتعاش الاقتصادي، ونقص اليقين بشأن اتفاق بيئي دولي جديد

حول تغيّر المناخ والمستقبل بشكل عام، واستمرار التحفظ المالي غداة الأزمة المالية — إلى موقف يتميّز بالانتظار والترقّب في أوروبا وأمريكا الشمالية. وبالنسبة إلى أمريكا الشمالية، قد تكون للطفرة المسجلة أخيراً في إمدادات غاز الطفال الرخيص مساهمة في تباطؤ التوقعات.

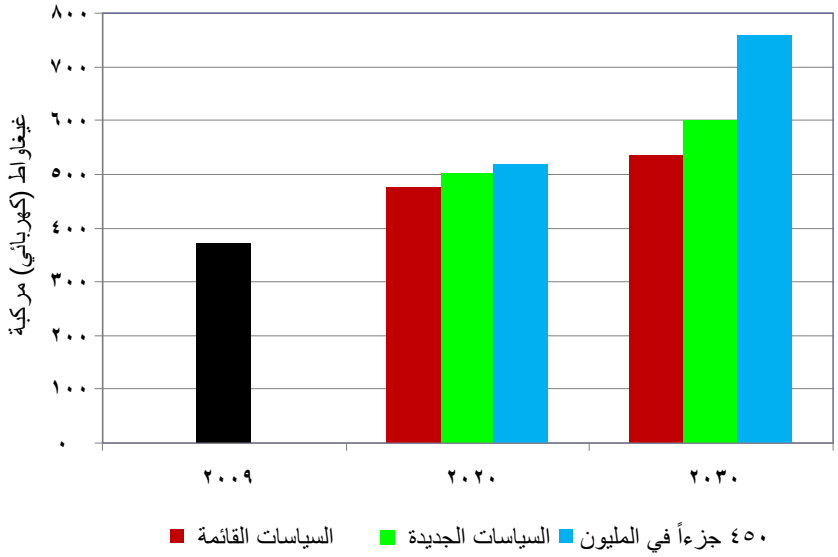


الشكل ألف–١ – تطوّر قدرات التوليد النووي الإقليمية في الفترة ٢٠٠٩–٢٠٣٠، توقعات ٢٠١٠ المنخفضة والمرتفعة.

٣٥- يوحي التوقع المرتفع بأن العوامل المتوسطة والطويلة الأجل التي تحفّز تنامي التوقعات عادت مجدداً في عام ٢٠١٠ لتشكل قوة مهيمنة، وعلى وجه التحديد استمرار المستوى الجيد في أداء محطات القوى النووية وأمانها، وتواصل الشواغل بشأن الاحترار العالمي وأمن إمدادات الطاقة وارتفاع أسعار الوقود الأحفوري وتطايرها، بالإضافة إلى الاستمرار المتوقع في تنامي الطلب على الطاقة على الأمدين المتوسط والبعيد. وينتج عن تسارع الانتعاش الاقتصادي في توقعات ٢٠١٠ ارتفاعٌ في الطلب على الكهرباء، ممّا يؤدي إلى توسّع حجم التوليد النووي في جميع المناطق. ومع ذلك، فإن آسيا تستحوذ على حوالي ٦٠% من زيادة القدرات العالمية لتهيمن مجدداً على التوقع المرتفع. وتسجَّل بقية التوسع في البلدان التقليدية النشطة في ميدان القوى النووية الأعضاء في منظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي وفي رابطة الدول المستقلة، في حين تُظهر البلدان المستجدة بوادر دخول قوي إلى السوق في حوالي الفترة ٢٠٢٥–٢٠٣٠.

٣٦- أمّا التوقعات الواردة في الوثيقة المعنونة *توقعات الطاقة العالمية لعام ٢٠١٠*، الصادرة عن وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي (الشكل ألف–٢)، فتتبع مساراً يشبه بشكل كبير

مسار توقعات الوكالة لعام ٢٠١٠، إذ يتنبأ 'سيناريو السياسات الجارية' قدرة عالمية مركّبة إجمالية تبلغ ٥٣٥ غيغاواط(كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠ (مقارنة بالقدرة البالغة ٥٤٦ غيغاواط(كهربائي) في توقع الوكالة المنخفض)، فيما ينص سيناريو ٤٥٠ جزءاً في المليون[٢] على أن قدرات القوى النووية ستصل إلى ٧٦٠ غيغاواط(كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠ (وهذه القيمة قريبة من توقع الوكالة المرتفع البالغ ٨٠٣ غيغاواط(كهربائي)).



الشكل ألف–٢ – أثر السياسات المختلفة على التوسع العالمي للقوى النووية بين عامي ٢٠٠٩ و٢٠٣٠ (المصدر: توقعات الطاقة العالمية لعام ٢٠١٠).

ألف-٣- دورة الوقود[٣]

ألف-٣-١- موارد اليورانيوم وإنتاجه

٣٧- في عام ٢٠١٠، نشرت وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التنمية والتعاون في الميدان الاقتصادي أحدث طبعة من 'الكتاب الأحمر'، بعنوان *اليورانيوم في عام ٢٠٠٩: موارده وإنتاجه والطلب عليه*. وقدّر الكتاب المذكور موارد اليورانيوم التقليدية المعروفة، التي يمكن استخلاصها بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، بحوالي ٥.٤ مليون طن من اليورانيوم. وتقل هذه الكمية عن تلك المقدّرة في الطبعة السابقة بما نسبته ١.٢%. وفضلا عن ذلك، تتوافر كمية تقديرية تبلغ حوالي ٠.٩ مليون طن من اليورانيوم من موارد تقليدية معروفة يمكن استخلاصها بتكلفة تتراوح بين ١٣٠ و٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، ليصل بالتالي إجمالي الموارد المعروفة القابلة للاستخلاص بتكلفة تقل عن ٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم إلى ٦.٣ مليون طن من اليورانيوم. ولأغراض المرجعية، شهد السعر الفوري لليورانيوم

٢ يضع سيناريو ٤٥٠ جزءاً في المليون الحدّ الأقصى لتركيز غازات الدفيئة في الجو بـ ٤٥٠ جزءاً في المليون، وهو يعرض ضمنياً فكرة إدخال تعديل جذري على منظومة الطاقة العالمية.

٣ ترد معلومات أكثر تفصيلا عن أنشطة الوكالة بشأن دورة الوقود في الأقسام ذات الصلة من آخر تقرير سنوي للوكالة (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010) وعلى الموقع http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html.

في عام ٢٠١٠ تقلبات تراوحت ما بين ١٠٥ دولارات و١١٥ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم حتى أواسط العام، قبل أن يشهد ارتفاعاً قوياً ليتجاوز ١٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم بحلول نهاية العام، وهي أعلى قيمة تم تسجيلها منذ عامين.

٣٨- وبلغ إجمالي الموارد غير المكتشفة (الموارد التكهنية والتخمينية) المشار إليها في الكتاب الأحمر ما يفوق ١٠.٤ مليون طن من اليورانيوم، مسجلا انخفاضاً طفيفاً عن الرقم المشار إليه في الطبعة السابقة (المنشورة عام ٢٠٠٨) والذي بلغ ١٠.٥ مليون طن من اليورانيوم. وقدِّرت الموارد التقليدية غير المكتشَفة بأكثر من ٦.٥ مليون طن من اليورانيوم بتكلفة أقل من١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم، بالإضافة إلى ٠.٣٧ مليون طن من اليورانيوم بتكلفة تتراوح بين ١٣٠ و٢٦٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم. وتشمل هذه الموارد تلك التي يُتوقع ظهورها إما داخل ترسبات معروفة أو على مقربة منها، كما تشمل مزيداً من الموارد التخمينية التي يُعتقَد بوجودها في مناطق واعدة جيولوجياً ولكنها لم تُستكشف بعد. وتتوافر أيضاً موارد تخمينية إضافية تقدَّر بنحو ٣.٦ مليون طن من اليورانيوم لم تكن تكاليف إنتاجها قد حدّدت.

٣٩- وتشهد قاعدة الموارد مزيداً من التوسّع بفضل موارد اليورانيوم غير التقليدية والثوريوم. وتشمل الموارد غير التقليدية اليورانيوم الموجود في مياه البحر والموارد التي لا يمكن استخلاص اليورانيوم منها إلا كمنتَج ثانوي غير هام. وقليلة جداً هي البلدان التي تُبلِّغ في الوقت الراهن عن الموارد غير التقليدية. وتبلغ الأرقام التقديرية السابقة لليورانيوم القابل للاستخلاص والمرتبط بأنواع الفوسفات والخامات غير الحديدية والكربوناتيت، والشست الأسود والليغنيت نحو ١٠ مليون طن من اليورانيوم. ويقدَّر حجم الموارد العالمية من الثوريوم بحوالي ٦ ملايين طن. ورغم استخدام الثوريوم كوقود على أساس إيضاحي، فإن الطريق لا يزال طويلاً قبل أن يمكن النظر إليه على قدم المساواة مع اليورانيوم.

٤٠- ولا تشمل البيانات الواردة في الكتاب الأحمر، بشأن النفقات المرتبطة بالتنقيب وبتطوير المناجم على صعيد العالم، سوى الفترة حتى نهاية عام ٢٠٠٨. وبلغ إجمالي هذه النفقات ١.٦٤١ بليون دولار في عام ٢٠٠٨، بزيادة نسبتها ١٣٣% مقارنةً بأرقام عام ٢٠٠٦ الواردة في الطبعة السابقة من الكتاب الأحمر.

٤١- وفي عام ٢٠٠٩، بلغ إنتاج اليورانيوم في العالم أكثر من ٥٠٧٧٠ طناً، أي ما يزيد بنسبة ١٦% على الكمية المنتجة في عام ٢٠٠٨ والتي بلغت ٨٠٠ ٤٣ طن. ومن المقدّر أن يرتفع الإنتاج في عام ٢٠١٠ ليصل إلى ٠٠٠ ٥٥ طن من اليورانيوم. واستحوذت أستراليا وكازاخستان وكندا على ما نسبته ٦٣% من الإنتاج العالمي في عام ٢٠٠٩، فيما استحوذت هذه البلدان، مع الاتحاد الروسي وأوزبكستان وناميبيا والنيجر والولايات المتحدة الأمريكية، على ٩٣% من الإنتاج. وفي كازاخستان، شهد إنتاج اليورانيوم ارتفاعاً في عام ٢٠٠٩ بنسبة فاقت ٧٠% بالمقارنة مع عام ٢٠٠٨ فأصبحت في عام ٢٠٠٩ أكبر منتج عالمي لليورانيوم على الإطلاق (متقدّمة من المركز الخامس في عام ٢٠٠٣ والمركز الثاني في عام ٢٠٠٨). وفضلا عمّا تقدّم، من المتوقع أن يشهد إجمالي إنتاج اليورانيوم في كازاخستان ارتفاعاً بنسبة ٣٠% في عام ٢٠١٠ بالمقارنة مع ما كان عليه في عام ٢٠٠٩. وفي مالاوي، بدأ إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠٠٩ مع ١٠٠ طن من اليورانيوم. وقد ارتفع في ٢٠١٠ إلى ٦٦٠ طنا.

٤٢- لم يغط إنتاج اليورانيوم في عام ٢٠٠٩ سوى نحو ٨٢% فقط من احتياجات المفاعلات المقدّرة في العالم والتي بلغت ٦١ ٧٣٠ طناً من اليورانيوم. وتمت تغطية الكمية المتبقية بواسطة خمسة مصادر ثانوية، هي: مخزونات اليورانيوم الطبيعي، ومخزونات اليورانيوم المثرى، واليورانيوم الذي تعاد معالجته من الوقود

المستهلك، ووقود مزيج الأكسيدين (موكس) مع الاستعاضة عن جزء من اليورانيوم-٢٣٥ بالبلوتونيوم-٢٣٩ من الوقود المستهلك المعادة معالجته، وإعادة إثراء مخلفات اليورانيوم المستنفد (اليورانيوم المستنفد يحتوي على أقل من ٠.٧% من اليورانيوم-٢٣٥). واستناداً إلى معدل الاستهلاك المقدّر لعام ٢٠٠٩، يبلغ العمر التشغيلي المتوقع للكمية ٥.٤ ملايين طن من اليورانيوم الممكن استخلاصه من موارد تقليدية معروفة بتكلفة أقل من ١٣٠ دولاراً للكيلوغرام الواحد من اليورانيوم حوالي ٩٠ عاماً. ويرجّح ذلك كفئة موارد اليورانيوم لدى مقارنتها بالاحتياطيات التي تتراوح أعمارها التشغيلية بين ٣٠ و٥٠ سنة فيما يتعلق بسلع أساسية أخرى (مثل النحاس والزنك والنفط والغاز الطبيعي).

٤٣- ووفقاً للتوقعات المتاحة في عام ٢٠١٠، كان من المتوقّع أن تشهد الاحتياجات العالمية السنوية من اليورانيوم لأغراض مرتبطة بالمفاعلات ارتفاعاً لتصل إلى ما بين ٨٧٣٧٠ طناً و١٣٨١٦٥ طناً من اليورانيوم بحلول عام ٢٠٣٥. ويمكن للقدرات المتوقعة حالياً لإنتاج اليورانيوم من المصادر الأولية بما يشمل مراكز الإنتاج القائمة والملتزم بها والمخطط لها والممكنة، أن تلبي الطلب العالمي المتوقع على اليورانيوم حتى عام ٢٠٢٨ في حال الحاجة إلى الكمية القصوى المذكورة، أو حتى عام ٢٠٣٥ في حال الحاجة إلى الكمية الدنيا. وليتمكن الإنتاج، بعد هذين التاريخين، من توفير الوقود لجميع المفاعلات طوال أعمارها التشغيلية، بما يشمل المفاعلات الجديدة المربوطة بشبكات توزيع الكهرباء حتى عام ٢٠٣٥، سينبغي تحديد موارد إضافية، كما سيلزم تطوير مناجم جديدة وتوسيع المناجم القائمة على نحو موقوت.

ألف-٣-٢- التحويل والإثراء وصنع الوقود

٤٤- حافظت القدرة التحويلية العالمية الإجمالية على استقرارها في عام ٢٠١٠ عند نحو ٠٠٠ ٧٦ طن من اليورانيوم الطبيعي في السنة فيما يخص سادس فلوريد اليورانيوم، و٤٥٠٠ طن من اليورانيوم في السنة فيما يخص ثاني أكسيد اليورانيوم. كما بقي الطلب على تحويل سادس فلوريد اليورانيوم مستقراً عند حوالي ٠٠٠ ٦٢ طن في السنة.

٤٥- وتبلغ قدرة الإثراء العالمية الإجمالية حالياً نحو ٦٠ مليون وحدة فصل في السنة، مقارنة بطلب إجمالي قدره نحو ٤٥ مليون وحدة فصل في السنة. ومن أجل الاستعاضة عن المرافق القديمة التي تستخدم الانتشار الغازي وتوقعاً للتوسع العالمي الذي ستشهده القوى النووية، يجري العمل على تطوير أو تشييد أربعة مرافق إثراء جديدة تجارية النطاق، وتستخدم جميعها الإثراء باستخدام الطاردات المركزية، وهي: محطة جورج بيس الثانية (Georges Besse II) في فرنسا، ومحطة الطرد المركزي الأمريكية (ACP) ومرفق إيغل روك التابع لشركة أريفا (Areva Eagle Rock facility) ومرفق يورينكو (URENCO USA) (الذي كان يعرف فيما مضى باسم مرفق الإثراء الوطني) في الولايات المتحدة الأمريكية. وقد بدأ التشغيل التجاري لمحطة جورج بيس الثانية في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠ مع تسليم أول حاوية يورانيوم. وبالنسبة لمرفق URENCO USA، بدأت العمليات التجارية في حزيران/يونيه ٢٠١٠. وفضلا عن ذلك، فقد أصدرت الهيئة الرقابية النووية الأمريكية تقريراً إيجابياً بشأن تقييم الأمان بالنسبة لمركز للإثراء بالليزر مقترح بقدرة ٣-٦ مليون وحدة فصل تابع لشركة الإثراء الشامل بالليزر في ولاية كارولينا الشمالية. وقد نجحت شركة الإثراء الشامل بالليزر في استكمال المرحلة الأولى من برنامج الأنشوطة الاختبارية لتكنولوجيا الإثراء بواسطة فصل النظائر عن طريق التنشيط بالليزر.

٤٦- وتتوقع الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي الشروع في العمليات التجارية للسلاسل التعاقبية للطرد المركزي المحسّنة في روكاشو-مورا في عام ٢٠١١-٢٠١٢ وتوسيع قدرتها الحالية البالغة ٠٠٠ ١٥٠ وحدة فصل لتصل إلى ١.٥ مليون وحدة فصل بحلول عام ٢٠٢٠. وفي عام ٢٠١٠، انضمت أرمينيا وأوكرانيا إلى الاتحاد الروسي وكازاخستان كأعضاء في المركز الدولي لإثراء اليورانيوم الذي أقيم عام ٢٠٠٧ في أنغارسك بالاتحاد الروسي. وعملت الأرجنتين على إجراء أعمال بحث وتطوير بشأن تكنولوجيات الإثراء الجديدة، مثل تكنولوجيا الطرد المركزي والإثراء بالليزر، وفي الوقت ذاته إعادة تشييد قدراتها على الإثراء بالانتشار الغازي في محطة بيلكانيو. ومن المتوقّع أن تُصبح محطة بيلكانيو التي أعيد تشييدها قابلة للتشغيل في عام ٢٠١١.

٤٧- وشهد عام ٢٠١٠ بدء تشغيل ثلاثة مرافق لإعادة التحويل، اثنان منها في الولايات المتحدة الأمريكية (في بادوكا بولاية كونتاكي، وفي بورتكاوث بولاية أوهايو) وواحد (W-ECP في كرازنويارسك) في الاتحاد الروسي. وتبلغ القدرة العالمية الحالية في ميدان إعادة التحويل حوالي ٠٠٠ ٦٠ طن في العام.

٤٨- وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، وافق مجلس المحافظين على إقامة مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء، الذي ستملكه الوكالة وتديره، باعتباره مصدر ملاذ أخير للإمداد بغرض توليد القوى النووية. وفي حال إعاقة إمداد إحدى الدول الأعضاء باليورانيوم الضعيف الإثراء وعدم التمكن من استعادة الإمداد بواسطة السوق التجارية أو بواسطة الترتيبات المعقودة بين الدول أو بواسطة أية طرائق أخرى، يجوز للدولة العضو أن تلجأ إلى مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء لضمان إمداداتها باليورانيوم الضعيف الإثراء. وإنشاء مصرف لليورانيوم الضعيف الإثراء هو صك إضافي يهدف إلى ضمان الامداد باليورانيوم الضعيف الإثراء ويتبع الاتفاق المعتمد بواسطة المجلس في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠٠٩، المبرم بين الوكالة والاتحاد الروسي في آذار/مارس ٢٠١٠، بشأن إقامة احتياطي من اليورانيوم الضعيف الإثراء لتوريده إلى الدول الأعضاء في الوكالة. وفي كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠، أكملت الشركة الحكومية الروسية للطاقة الذرية إنشاء مخزون احتياطي الوقود وفقاً للقدرة المخطط لها والبالغة ١٢٠ طناً من اليورانيوم الضعيف الإثراء، وأخضع المخزون لضمانات الوكالة في مرفق أنغارسك النووي بسيبيريا.

٤٩- وبقيت القدرة العالمية الإجمالية على صنع الوقود تناهز ٠٠٠ ١٣ طن من اليورانيوم في السنة (اليورانيوم المثرى) لوقود مفاعلات الماء الخفيف، و٤٠٠٠ طن من اليورانيوم في السنة (اليورانيوم الطبيعي) لمفاعلات الماء الثقيل المضغوط. كما بقي الطلب الإجمالي مستقراً عند حوالي ٤٠٠ ١٠ طن من اليورانيوم في السنة. ويجري العمل على توسيع المرافق القائمة في الصين وجمهورية كوريا والولايات المتحدة الأمريكية، فيما يجري التخطيط لمرافق تصنيع جديدة في كل من أوكرانيا وكازاخستان. ومرفق التصنيع المخطط له في كازاخستان، بقدرة متوقعة تبلغ ٤٠٠ طن من اليورانيوم في السنة، هو مشروع مشترك بين شركة آريفا AREVA وشركة كازاتومبروم Kazatomprom، ويتوقع استكماله في عام ٢٠١٤.

٥٠- وتبلغ القدرة الحالية على صنع وقود موكس حوالي ٢٥٠ طناً من المعادن الثقيلة، وتتركز هذه القدرة في المرافق الرئيسية بفرنسا والمملكة المتحدة والهند وبعض المرافق الأصغر حجماً في اليابان والاتحاد الروسي. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٠، شرعت الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي بتشييد مرفق جديد لتصنيع وقود موكس (١٣٠ طناً من المعادن الثقيلة موكس) في قرية روكاشو بولاية آوموري. ومن المتوقع استكمال عملية التشييد في آذار/مارس ٢٠١٦. وكما يجري التخطيط لإنشاء مرفق مماثل في سيفيرسك Seversk (تومسك–٧ Tomsk-7) بالاتحاد الروسي. وخطط الاتحاد الروسي أيضاً لإنشاء مرفق تجاري لتصنيع وقود موكس بقدرة ٦٠ طناً في السنة ومرفق لتصنيع الوقود النتريدي الكثيف المخلوط للمفاعلات النيوترونية السريعة

بقدرة ١٤ طناً في السنة. وفي المملكة المتحدة، يضاف إلى مصنع سيلافيلد لإنتاج وقود موكس مرفق جديد لتصنيع وقود موكس، وذلك لإتاحة الوفاء بالعقود الجديدة الطويلة الأمد لتوريد هذا الوقود. ويجري إنشاء قدرة إضافية لصنع وقود موكس في الولايات المتحدة الأمريكية لاستخدام الفائض من البلوتونيوم الصالح للاستعمال في صنع الأسلحة. وبدأ المفاعلان Ikata–3 وFukushima Daiichi–3 في اليابان باستخدام وقود موكس في عام ٢٠١٠. ويُستخدم وقود موكس حالياً في ٣٣ مفاعلاً حرارياً عبر العالم.

ألف-٣-٣- المرحلة الختامية من دورة الوقود

٥١- تبلغ الكمية الإجمالية من الوقود المستهلك المفرّغة على صعيد العالم ما يناهز ٣٢٠ ٠٠٠ طن من المعادن الثقيلة، وقد خضع ٩٥ ٠٠٠ طن منها لإعادة المعالجة فيما يتم خزن حوالي ٢٢٥ ٠٠٠ طن من المعادن الثقيلة في أحواض خزن الوقود المستهلك داخل المفاعلات أو في مرافق خزن تقع بعيداً عن المفاعلات. ويجري بانتظام توسيع مرافق الخزن البعيدة عن المفاعلات. وتبلغ قدرة إعادة المعالجة العالمية نحو ٥٠٠٠ طن من المعادن الثقيلة سنوياً. وقد بدأت الاختبارات النهائية للإدخال في الخدمة في مرفق روكاشو الجديد لإعادة المعالجة في اليابان، والذي يتوقع الآن استكماله في عام ٢٠١٢. وتعكف الصين على تشييد محطة تجريبية لإعادة المعالجة وقد استُكمل اختبار التشغيل الساخن في نهاية عام ٢٠١١. وتُخطِّط الصين أيضاً لتشييد مرفق تجاري لإعادة المعالجة وما زالت عملية تحديد موقعه جارية.

٥٢- وبدأت عملية إيضاح الاستخدام المباشر لليورانيوم المعاد تدويره كوقود في مفاعل كاندو، وذلك في محطة كينشان للقوى النووية بالصين.

٥٣- وفي الهند، يجري العمل قدماً على تشييد أول مرفق لدورة وقود المفاعلات السريعة، ويشمل المرفق محطة لتصنيع الوقود وإعادة المعالجة، ومصنعاً للمجمعات الفرعية الخاصة بقلوب المفاعلات، ومحطة لأكسيد اليورانيوم المعادة معالجته، ومحطة للتصرف في النفايات وكلها معدّة لخدمة المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط المقبل.

ألف-٣-٤- التصرف في النفايات المشعة والإخراج من الخدمة

٥٤- يبلغ الرصيد العالمي من النفايات المشعة المبلّغ عن وجوده في المخازن في عام ٢٠٠٨ (آخر الأعوام التي تتوافر بشأنها بياناتٌ) ما يناهز ١٧.٦ مليون متر مكعّب[٤] (الجدول ألف–٢). وتصل كمية النفايات المشعة المتخلص منها إلى نحو ٦٤٠ ٠٠٠ متر مكعب في السنة، وهي مكوّنة بشكل رئيسي من نفايات ضعيفة الإشعاع ونفايات ضعيفة الإشعاع جداً (ويشار إلى النوعين بعبارة نفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع – قصيرة العمر[٥]). وبلغ إجمالي الحجم المتخلص منه حتى عام ٢٠٠٨ ما يناهز ٢٤.٦ مليون متر مكعب. ويتسم التراكم السنوي

---

٤ رقم تقديري تم التوصل إليه باستخدام قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة التابعة للوكالة، وسواها من المصادر المفتوحة بالنسبة للبلدان التي لا تقدم تبليغات إلى قاعدة البيانات المذكورة.

٥ يتم حالياً التبليغ عن الأرصدة في قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة بناء على توصيات الوكالة المستعاض عنها بشأن تصنيف النفايات كما وردت في العدد 111-G-1.1 من سلسلة وثائق الأمان بعنوان *تصنيف النفايات المشعة* (١٩٩٤). وقد استعيض عن تلك التوصيات بمخططِ تصنيفٍ جديدٍ يرد في دليل الأمان العام رقم GSG-1، بعنوان *تصنيف النفايات المشعة* (٢٠٠٩). والبيانات الواردة في قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة تخضع حالياً لعملية تحويل إلى مخطط التصنيف الجديد.

للنفايات القوية الإشعاع المعالجة بقدر لا بأس به من الثبات، إذ يصل متوسط معدل التراكم إلى نحو ٨٥٠ متراً مكعباً في السنة للعالم بأسره.

الجدول ألف-٢- رصيد النفايات المشعة التقديري على صعيد العالم لعام ٢٠٠٨

فئة النفايات	خزن [أمتار مكعبة]	تخلص تراكمي [أمتار مكعبة]
نفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع قصيرة العمر	٣ ٦١٨ ٠٠٠	٢٤ ٣٤٩ ٠٠٠
نفايات ضعيفة ومتوسطة الإشعاع طويلة العمر	١٣ ٦٠٩ ٠٠٠	٢٠٨ ٠٠٠
نفايات قوية الإشعاع	٣٨٤ ٠٠٠	٤ ٠٠٠

المصدر: قاعدة بيانات التصرف في النفايات المتاحة على الشبكة، ٢٠١٠.

٥٥- وما زالت النفايات القوية الإشعاع تخضع للتزجيج في العديد من البلدان باستخدام الحث ضمن بوتقة على الساخن أو باستخدام الصاهرات المسخّنة بالتيار الكهربائي (على طريقة جول). ولا يزال استخدام جهاز الصهر العامل بالحث ضمن بوتقة على البارد، في محطة R7 في لاهاغ بفرنسا، يشكل مثالا عن التقدّم المحرز في هذا المجال. وفي المملكة المتحدة، بلغت محطة التزجيج في سيلافيلد معلماً مرحلياً رئيسياً في عام ٢٠٠٩ عندما انتهت من إنتاج الحاوية رقم ٥٠٠٠ من النفايات الصلبة القوية الإشعاع. وبقيت الشركة اليابانية المحدودة للوقود النووي تواجه التحديات في عام ٢٠١٠ فيما يتعلق بوحدة التزجيج الخاصة بها، وقد اضطرت إلى تأجيل التشغيل التجاري لمحطة روكاشو لإعادة المعالجة لفترة سنتين إضافية. وفي هانفورد بالولايات المتحدة الأمريكية، باتت عملية تشييد أكبر محطة لمعالجة النفايات في العالم مكتملة بنسبة ٥٠% تقريباً. وستقوم هذه المحطة، البالغة كلفتها ١٢ بليون دولار والتي يتوقع أن يبدأ تشغيلها في عام ٢٠١٩، بمعالجة وتثبيت نحو ٢٠٠ ٠٠٠ متر مكعب من مجموعة مختلفة من النفايات الموروثة الشديدة التنوّع عن طريق إخضاعها لمعالجة أولية ومن ثم تزجيجها.

٥٦- وتعكف أكثر من ٥٠ دولة من الدول الأعضاء على دراسة الخيارات أو بدأت فعلا بتطوير خيارات التخلص الملائمة لأرصدتها الخاصة من النفايات. وتشمل الخيارات الخاضعة للدراسة ما يلي: التخلص في خنادق من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً (أسبانيا وفرنسا)، أو نفايات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية (الجمهورية العربية السورية وماليزيا)، أو النفايات الضعيفة الإشعاع في المناطق القاحلة (جمهورية إيران الإسلامية وجنوب أفريقيا والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والبنى الاصطناعية القريبة من سطح الأرض للنفايات الضعيفة الإشعاع (بلجيكا وبلغاريا ورومانيا وسلوفينيا وليتوانيا)؛ والتخلص في أعماق متوسطة من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع (جمهورية كوريا وهنغاريا واليابان) ومن نفايات المواد المشعة الموجودة في البيئة الطبيعية (النرويج)؛ بالإضافة إلى التخلص في حفر الدفن من النفايات الضعيفة الإشعاع (الولايات المتحدة الأمريكية) ومن المصادر المختومة المهملة (جمهورية إيران الإسلامية وغانا والفلبين). وتعمل السويد وفنلندا على تحضير الوثائق اللازمة لرخص تشييد مرافق جيولوجية عميقة مصممة للوقود المستهلك.

٥٧- وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١٠، بدأ في سلوفينيا نفاذ مرسوم يؤكد موقع مستودعها المخصص للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع، الواقع بالقرب من محطة القوى النووية الوحيدة القائمة في سلوفينيا. ومن المزمع بدء عملية التشييد في غضون سنتين أو ثلاث سنوات. وفي كندا، بدأت هيئة التصرف في النفايات النووية، في أيار/مايو ٢٠١٠، عملية تهدف إلى انتقاء موقع خزن دائم لإقامة مستودع جيولوجي عميق لخزن وقودها النووي المستخدم، وذلك عن طريق توجيه دعوةٍ إلى التجمعات السكنية المهتمة للإعلان عن اهتمامها. وفي ألمانيا، بدأ تشييد مستودع جوفي للنفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في منجم كونراد للحديد سابقاً في سكسونيا السفلى. وفي السويد، قدّمت الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية، في آذار/مارس ٢٠١١، طلبها الخاص بمستودع جيولوجي نهائي للوقود المستهلك من المتوقع إقامته في أوستهامار Östhammar. وينبغي لعملية تشييد مستودع الوقود النووي أن تبدأ في عام ٢٠١٥، كما يُتوقع أن تبدأ عمليات التخلص في عام ٢٠٢٥. وفي موقع أولكيلووتو Olkiluoto بفنلندا، تم حفر نفق الوصول إلى أونكالو Onkalo، بحلول نهاية ٢٠١٠، بطول بلغ ٤٥٧٠ متراً، وعلى عمق التخلص النهائي بلغ ٤٣٤ متراً. وفي مرحلة أولى، سيعمل موقع أونكالو باعتباره مرفقاً لتحديد خصائص الطبقات الصخرية الجوفية بغية التحقق من ملاءمة الموقع. وبعد ذلك، سيتم استخدام نفق الوصول والبنى الجوفية الأخرى للتخلص من النفايات. ويتوقع تقديم طلب الحصول على رخصة البناء خلال عام ٢٠١٢، وإجراءات الحصول على رخصة التشغيل في حوالي عام ٢٠٢٠.

٥٨- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، أنشئت في كانون الثاني/يناير ٢٠١٠ 'لجنة الشريط الأزرق المعنية بالمستقبل النووي الأمريكي' بناء على قرار حكومة الولايات المتحدة المتخذ في عام ٢٠٠٩ بالتخلي عن مشروع المستودع الجيولوجي العميق في جبل 'يوكا ماونتن'. وتخطط هذه اللجنة – المُنشأة بغية تقديم التوصيات بشأن إيجاد حل طويل الأمد للتصرّف في ما لدى الولايات المتحدة من وقود نووي ونفايات نووية – لتناول مسألة الخزن المؤقت للوقود المستهلك طوال فترات زمنية تتراوح ما بين ١٢٠ عاماً و٣٠٠ عام. ومن المقرر أن يكون أول تقرير مؤقت متاحاً في تموز/يوليه ٢٠١١، ومن المتوقّع أن يصدر التقرير النهائي للجنة في عام ٢٠١٢. وفضلا عن ذلك، فقد أصدر رئيس الهيئة الرقابية النووية أوامره إلى موظفي الهيئة المذكورة بالكفّ عن دراسة طلب الترخيص الخاص بموقع 'يوكا ماونتن' في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٠.

٥٩- وقد عرضت الهيئة الفرنسية للأمان النووي صيغة جديدة من خطتها الوطنية للتصرف في المواد المشعة. وهي تشمل مشروعاً للتخلص الجيولوجي الطويل الأمد والقابل للعدول عنه للنفايات القوية والمتوسطة الإشعاع، ومشروعاً للتخلص الطويل الأمد من النفايات الضعيفة الإشعاع في مستودعات ضحلة. وتمضي فرنسا قدماً في تحضيراتها لتشييد مستودعها الجيولوجي للنفايات القوية الإشعاع؛ علماً بأن المرفق سيستوعب أيضاً النفايات المتوسطة الإشعاع الوطنية.

٦٠- وقد أطلق العديد من المبادرات الثنائية والمتعددة الأطراف بمشاركة الوكالة لتحسين التحكم بهذه المصادر المشعة المختومة وكذلك لإزالتها من الأماكن غير المأمونة وغير الآمنة. وتثير المصادر العالية النشاط مشاكل خاصة نظراً للقيود الصارمة التي تحظر تحركها بسهولة. وفي عام ٢٠١٠، شهدت أوروغواي نشر تكنولوجيا الخلية الساخنة المتنقلة، التي طورتها شركة الطاقة النووية في جنوب أفريقيا بناء على عقد مبرم مع الوكالة، لاستخراج ١٤ مكوناً يحتوي على مصادر عالية النشاط من الأجهزة التي كانت تحويها، وتوضيبها داخل حاويات نقل لإعادتها إلى بلد المنشأ.

٦١- وفي تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٠، أصدرت المفوضية الأوروبية مقترحاً بشأن توجيهٍ صادر عن المجلس الأوروبي حول التصرف في الوقود المستهلك والنفايات المشعة، وينطوي هذا التوجيه على الطلب من الدول الأعضاء في الاتحاد الأوروبي أن تعرض برامجها الوطنية، مع الإشارة إلى متى وأين وكيف ستشيّد وتدير المستودعات النهائية الرامية إلى ضمان الحدود العليا من معايير الأمان.

الإخراج من الخدمة

٦٢- لم تشهد إحصائيات إخراج مفاعلات القوى من الخدمة على صعيد العالم أي تغيّرات ملموسة في عام ٢٠١٠. وفي نهاية العام، كان قد تم إغلاق ١٢٤ مفاعلا من مفاعلات القوى. ومن أصل هذه المفاعلات، كان ١٥ مفاعلا قد فكك تفكيكاً تاماً، وكان ٥٢ مفاعلا قيد التفكيك أو كان من المخطط تفكيكها على المدى القصير، فيما وُضِع ٤٨ مفاعلا في حالة تطويق مأمون، وتم إقبار ٣ مفاعلات، فيما لم تكن استراتيجيات الإخراج من الخدمة قد حُدّدت بعدُ بالنسبة لستة مفاعلات.

٦٣- وبدأت في تموز/يوليه ٢٠٠٩ عملية تفكيك مفاعل مُواتا للبحوث التابع للمنظمة الأسترالية للعلم والتكنولوجيا النوويين، وهو أول مفاعل على الإطلاق يخرج من الخدمة في استراليا، كما بدأ التفكيك التمهيدي لجميع المكونات الداخلية وإزالتها. وبدأ تفكيك الدرع البيولوجي في آذار/مارس ٢٠١٠ واستُكملت هذه العملية في أيلول/سبتمبر ٢٠١٠. واستُكملت بنجاح عملية الإخراج من الخدمة لمفاعل من نوع آرغونوت تبلغ قدرته ١٠٠ كيلوواط (حراري) في حدود الميزانية المعتمدة (٤.٢ مليون دولار أسترالي) وخلال مدة إجمالية للمشروع بلغت سنتين من تاريخ تلقي الرخصة بالإخراج من الخدمة حتى رفع التحكم الرقابي عن الموقع.

٦٤- وفي أوروبا الوسطى والشرقية، بدأ إخراج المفاعلات المغلقة من الخدمة بغية تسريع تنفيذ المشاريع الجارية في أوكرانيا وبلغاريا وسلوفاكيا وليتوانيا. وقد انتهت جميع محطات القوى النووية القائمة في أوروبا الوسطى والشرقية من إعداد الخطط الأولية للإخراج من الخدمة، أو باتت على وشك الانتهاء من إعدادها، بناء على توصيات الوكالة.

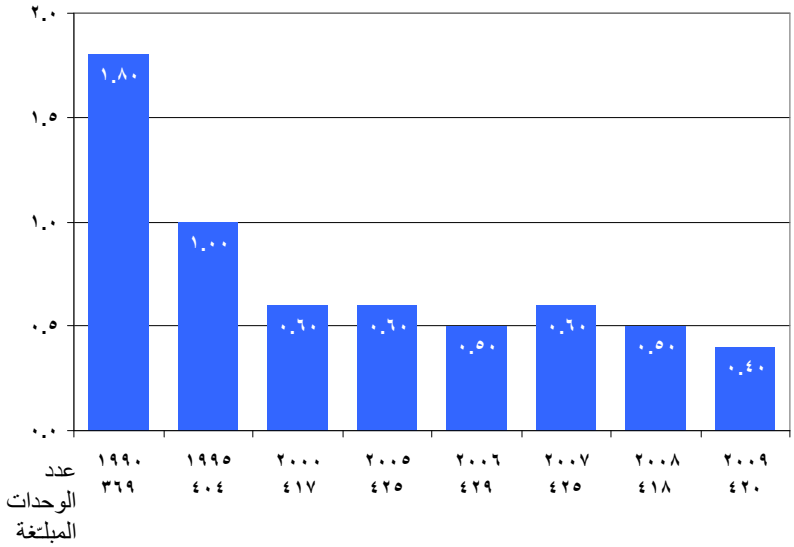
٦٥- تجري المبادرات على قدم وساق لتناول مسألة النفايات المشعة الموروثة والتي تراكمت خلال المراحل الأولى من أعمال تطوير العلوم والصناعات والتكنولوجيات الدفاعية النووية. وقد برهن فريق خبراء الاتصال، الذي أنشأته الوكالة في عام ١٩٩٦، عن كونه محفلا فعالاً لتبادل المعلومات وتنسيق برامج الإرث النووي في الاتحاد الروسي. وفي نهاية عام ٢٠١٠، كان الاتحاد الروسي قد سحب الوقود من ١٩١ غواصة نووية مخرجة من الخدمة وقام بتفكيكها، بمساعدة ضخمة من جانب شركاء دوليين غطّوا زهاء ثلث التمويل اللازم للبرنامج. ويجري العمل حالياً على تفكيك أربع غواصات فيما يتوقع تفكيك خمس غواصات أخرى بحلول نهاية عام ٢٠١٢. أمّا وحدات مفاعلات الغواصات، المنطوية عموماً على مفاعلين تم سحب الوقود منهما، فيتم ختمها ووضعها في مرافق خزن طويل الأجل. والعمل جارٍ على إنشاء مركزين إقليميين لتكييف النفايات المشعة وخزنها على الأجل الطويل. وفضلا عن ذلك، فالعمل جارٍ أيضاً على تنفيذ برنامج مشترك يهدف إلى استعادة مولّدات كهربائية حرارية قوية تعمل بالنظائر المشعة كانت تستخدم لأغراض الملاحة على طول ساحل الاتحاد الروسي، وقد استعيدت غالبية هذه المولّدات الروسية البالغ عددها ٨٧٠ مولّداً، إذ لم يتبقَّ منها سوى ٢٤٨ مولّداً.

ألف-٤- الأمان[٦]

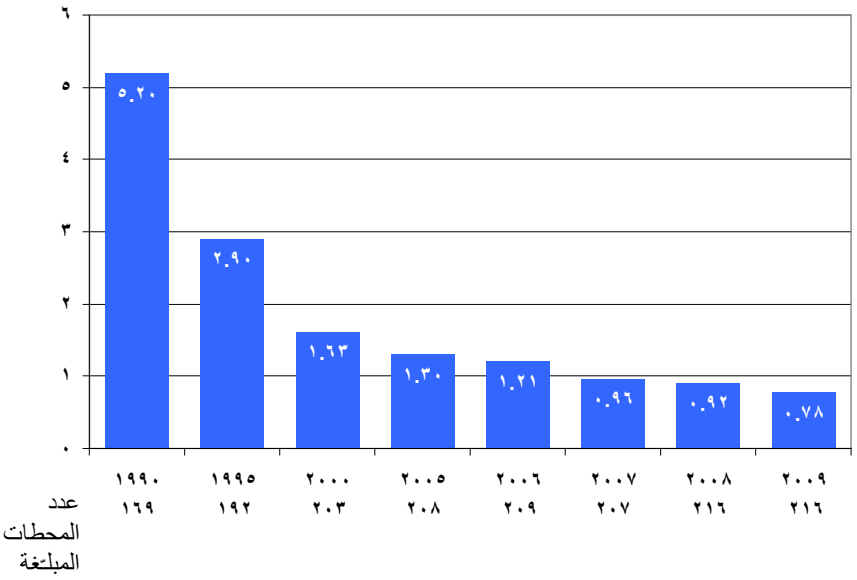
٦٦- خلال تسعينيات القرن العشرين، طرأ تحسُّن ملحوظ على مؤشرات الأمان، كتلك التي تنشرها الرابطة العالمية للمشغلين النوويين وترد مستنسخة في الشكلين ألف–٣ وألف–٤. وفي الأعوام الأخيرة، استقر الوضع في غالبية المناطق، وشهد عام ٢٠٠٩ تحسّناً إضافياً. بيد أن الفجوة ما زالت واسعة بين الأفضل أداءً والأسوأ أداءً، بما يتيح مجالا واسعاً لمواصلة التحسين. وتتضمن وثيقة *استعراض الأمان النووي لعام ٢٠١٠* معلوماتٍ أكثر إسهاباً عن الأمان وعن التطورات الأخيرة المتعلقة بجميع التطبيقات النووية حتى نهاية عام ٢٠١٠.

---

٦ ترد معلومات أكثر تفصيلا عن أنشطة الوكالة بشأن الأمان النووي في الأقسام ذات الصلة من آخر تقرير سنوي (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010) وعلى الموقع http://www-ns.iaea.org/.



الشكل ألف-٣- حالات الإيقاف التلقائي دون تخطيط مسبق لكل ٧٠٠٠ ساعة من الحرجية (المصدر: مؤشرات أداء الرابطة العالمية للمُشغّلين النوويين لعام ٢٠٠٩).



الشكل ألف-٤- معدل حوادث الأمان في محطات القوى النووية — العدد لكل ١ ٠٠٠ ٠٠٠ ساعة عمل (المصدر: مؤشرات أداء الرابطة العالمية للمُشغّلين النوويين لعام ٢٠٠٩). ملحوظة: هذه الحوادث ليست بالضرورة ذات طابع إشعاعي.

باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان

باء-١- الانشطار المتقدّم[٧]

باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء[٨]

٦٧- في مجال المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، بدأت الأرجنتين الاستعداد لتشييد مفاعل قوى نموذجي تبلغ قدرته ٢٥ ميغاواط (كهربائي) استنادا إلى "مفهوم مفاعل CAREM". ومن المتوقع أن يكون المفاعل قابلاً للتشغيل مع حلول منتصف العقد. وتجري دراسات الجدوى التمهيدية لتشييد وحدة تبلغ قدرتها ١٥٠ ميغاواط (كهربائي).

٦٨- وفي عام ٢٠١٠، شرعت الصين بتشييد ثمانية مفاعلات جديدة. وتشمل هذه المجموعة مفاعلات ماء مضغوط تطورية بقدرة ٦٥٠ ميغاواط(كهربائي) و١٠٠٠ ميغاواط(كهربائي) يقوم تصميمها على أساس تكنولوجيا محطات قائمة قيد التشغيل، فضلا عن تصميمات أكثر حداثة لمفاعل AP-1000 وتصميمات مفاعل الماء المضغوط الأوروبي. وتدأب الصين حالياً على تطوير التصميمين CAP-1400 وCAP-1700، وهما نسختين أكبر حجماً عن المفاعل AP-1000. وفي الوقت ذاته، توظف الصين الأموال في مجال البحوث المتعلقة بتصميم مفاعل صيني فائق الحرجية مبرّد بالماء.

٦٩- وفي فرنسا، تواصل شركة آريفا AREVA تسويق مفاعل الماء المضغوط الأوروبي بقدرة ١٦٠٠ ميغاواط(كهربائي) وأكثر للتطبيقات المحلية والدولية. وتعمل آريفا أيضاً، بالاشتراك مع شركة ميتسوبيشي للصناعات الثقيلة Mitsubishi Heavy Industries، على تطوير مفاعل الماء المضغوط ATMEA بقدرة ١١٠٠ ميغاواط(كهربائي) وأكثر، كما تعمل على تطوير مفاعل الماء المغلي KERENA بقدرة ١٢٥٠ ميغاواط(كهربائي) وأكثر بالشراكة مع شركة E.ON الألمانية.

٧٠- وفي عام ٢٠١٠، شرعت اليابان بتشييد مفاعل ماء مغلي متقدّم جديد. وتواصل هيتاشي تطوير نسخ بقدرة ٦٠٠ و٩٠٠ و١٧٠٠ ميغاواط(كهربائي) من المفاعلات ABWR، بالإضافة إلى المفاعل ABWR-II بقدرة ١٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). وقد طوّرت شركة ميتسوبيشي للصناعات الثقيلة نسخة بقدرة ١٧٠٠ ميغاواط(كهربائي) من مفاعل الماء المضغوط المتقدم APWR للسوق الأمريكية، ويشار إليها بلفظة APWR-US، وقد بلغت النسخة المذكورة مرحلة المصادقة على التصميم بواسطة الهيئة الرقابية النووية. ويجري العمل أيضاً على تطوير نسخة أوروبية من المفاعل APWR ويشار إليها بلفظة EU-APWR، وستخضع للتقييم بغية تحديد مدى امتثالها لمتطلبات شركات توزيع الكهرباء الأوروبية. وفضلا عن ذلك، تواصل اليابان أيضاً تطوير تصميم ابتكاري لمفاعل فائق الحرجية مبرّد بالماء.

---

٧ ثمة معلومات أكثر تفصيلا عن أنشطة الوكالة بشأن المفاعلات الانشطارية المتقدّمة متاحة في الأقسام ذات الصلة من آخر تقرير سنوي للوكالة (http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010/).

٨ ترد معلومات أكثر تفصيلا بشأن جميع تصميمات المفاعلات المتقدّمة المذكورة في هذا القسم ضمن نظام المعلومات الخاصة بالمفاعلات المتقدّمة التابع للوكالة على الموقع التالي: http://aris.iaea.org.

٧١- وتم في عام ٢٠١٠ ربط مفاعل جديد محلي الصنع من طراز OPR-1000 بشبكة الكهرباء في جمهورية كوريا. وتتواصل عملية تشييد أول مفاعل قوى متقدم من طراز APR-1400 وفقاً للخطة الموضوعة وكانت عقود قد أسندت في أواخر عام ٢٠٠٩ لتشييد أربعة مفاعلات إضافية من طراز APR-1400 في الإمارات العربية المتحدة. وتدأب جمهورية كوريا على تطوير نسخة أوروبية من المفاعل APR-1400، ويشار إليه بـ EU-APR-1400، وستخضع هذه النسخة للتقييم بغية التحقق من وفائها بمتطلبات شركات توزيع الكهرباء الأوروبية. وتعمل أيضاً على تطوير نسخة مخصصة لسوق الولايات المتحدة، ويشار إليها بـ US-APR-1400، وسيتم تقديمها إلى الهيئة الرقابية النووية للمصادقة على التصميم. وبموازاة ذلك، تواصل في عام ٢٠١٠ تطوير المفاعل +APR بقدرة ١٥٠٠ ميغاواط(كهربائي)، كما تم الإعلان عن استهلال تصميم المفاعل APR-1000. وفي ميدان المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، ضاعفت جمهورية كوريا جهودها لتطوير مفاعل الماء المضغوط المتقدم النموذجي المتكامل النظم SMART بقدرة ٣٣٠ ميغاواط(حراري).

٧٢- وفي عام ٢٠١٠، بدأت في الاتحاد الروسي عملية تشييد مفاعلين إضافيين، بما فيهما مفاعل مبرّد ومهدّأ بالماء من طراز WWER-1200. وتم الإعلان أيضاً عن خطط لتطوير المفاعل WWER-1200A، وكذلك المفاعلين WWER-600 وWWER-1800، استناداً إلى تصميم المفاعل الحالي من طراز WWER-1200. وإلى جانب ذلك، يعمل الاتحاد الروسي على مفاعل ابتكاري فائق الحرجية مبرّد بالماء من طراز WWER-SC، ويتواصل تشييد المفاعل KLT 40S، وهو مفاعل صغير طافٍ يستخدم لتطبيقات تخصصية.

٧٣- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تحرز الهيئة الرقابية النووية تقدّماً في عملية المصادقة على التصميم بالنسبة لتصاميم خمسة مفاعلات متقدّمة مبرّدة بالماء وهي كالآتي: المفاعلات AP-1000 وUS-APWR وUS-EPR، ومفاعل Westinghouse الصغير والمتوسط الحجم، ومفاعل الماء المغلي الاقتصادي المبسط ESBWR. وتقوم الهيئة الرقابية النووية باستعراض شهادة مصادقة منقّحة على تصميم المفاعل AP-1000، الذي حصل على شهادة المصادقة على تصميمه في عام ٢٠٠٦. والمفاعل ESBWR هو أول مفاعل من هذه السلسلة يحظى بالموافقة (تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٠). وبالإضافة إلى ذلك، من المتوقع أن يتم تقديم المفاعل US-APR1400 ومفاعل الماء المضغوط النمطي المتكامل mPower من صنع شركة بابكوك وويلكوكس بقدرة ١٢٥ ميغاواط(كهربائي) ومفاعل الماء المضغوط المتكامل من صنع نوسكيل باور NuScale Power بقدرة ٤٥ ميغاواط(كهربائي) إلى الهيئة الرقابية النووية للمصادقة على تصميمها في المستقبل القريب.

٧٤- وفي كندا، استكملت هيئة الأمان النووي الكندية في عام ٢٠١٠ المرحلة الأولى من استعراض المشروع التمهيدي لتصميم المفاعل CANDU–6 المعزز بقدرة ٧٠٠ ميغاواط(كهربائي)، وهو تصميم من الجيل الثالث ينطوي على ابتكارات عديدة مستندة إلى تصميم المفاعل CANDU-9 بالإضافة إلى الخبرات الحديثة المكتسبة من وحدات CANDU-6 التي تم تشييدها في الصين وجمهورية كوريا. ومن المقرر أن تُستَكمل في مطلع عام ٢٠١٢ المرحلة الثانية الجارية حاليا من استعراض المشروع التمهيدي لتصميم المفاعل CANDU–6. وواصلت شركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة كذلك تطوير المفاعل CANDU المتقدم (طراز ACR-1000)، وهو تصميم من الجيل الثالث +، وهو ينطوي على مستوى عالٍ جداً من التوحيد القياسي للمكوّنات وعلى استخدام يورانيوم طفيف الإثراء للتعويض عن استخدام الماء الخفيف كمبرّد أساسي. وفي كانون الثاني/يناير ٢٠١١، استكملت هيئة الأمان النووي الكندية المرحلة الثالثة من استعراض المشروع التمهيدي لتصميم مفاعل CANDU المتقدم (طراز ACR-1000)، مما يجعله مفاعل القوى النووية المتقدم الأول الذي تستكمل الهيئة المذكورة ثلاث مراحل من استعراض تصميمه. وتعمل شركة الطاقة الذرية الكندية المحدودة بفعالية على تطوير مفاعل الماء فوق

الحرج CANDU، وهو تصميم من الجيل الرابع وسيعزز قيادة كندا لبرنامج المفاعلات الحرجة المبرّدة بالماء التابع للمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات.

٧٥- وفي الهند، جرى في عام ٢٠١٠ ربط مفاعل جديد يعمل بالماء الثقيل المضغوط بقدرة ٢٢٠ ميغاواط(كهربائي) بالشبكة. وتسوّق الهند هذا المفاعل لتشييده في بلدان ذات شبكات توزيع كهرباء صغيرة. والعمل جارٍ على تشييد ستة مفاعلات إضافية، بما فيها مفاعل من طراز مفاعلات الماء الثقيل المضغوط البالغة قدرته ٢٢٠ ميغاواط (كهربائي)، ومفاعلان متطوران من مفاعلات الماء الثقيل المضغوط بقدرة ٧٠٠ ميغاواط (كهربائي)، ومفاعلان من طراز WWER-1000 والمفاعل النموذجي السريع التوليد البالغة قدرته ٥٠٠ ميغاواط (كهربائي). وقد طوّرت شركة القوى النووية الهندية المحدودة مفاعلاً تطورياً يعمل بالماء الثقيل المضغوط بقدرة ٧٠٠ ميغاواط(كهربائي). وانطلقت في عام ٢٠١٠ أربعة مشاريع تنطوي على ثماني وحدات من مفاعلات الماء الثقيل المضغوط البالغة قدرتها ٧٠٠ ميغاواط (كهربائي). ويضع مركز بهابها للبحوث الذرية اللمسات الأخيرة على تصميم مفاعل متقدم يعمل بالماء الثقيل بقدرة ٣٠٠ ميغاواط(كهربائي)، وسيستخدم هذا المفاعل الثوريوم مع التهدئة بالماء الثقيل، والتبريد بالماء الخفيف المغلي داخل أنابيب ضغط عامودية، ونظم أمان خامل.

باء-١-٢- النظم النيوترونية السريعة

٧٦- في الصين، بلغ المفاعل التجريبي الصيني السريع الحوضي بقدرة ٦٥ ميغاواط(حراري) (٢٠ ميغاواط(كهربائي)) درجة الحرجية للمرة الأولى في ٢١ تموز/يوليه ٢٠١٠. ويجري حالياً تنفيذ برنامج فيزيائيات الإطلاق الخاص بالمفاعل المذكور.

٧٧- وتجري على قدم وساق أعمال تشييد المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط(كهربائي) في كالاباكام بالهند: إذ تم تركيب أوعية الأمان والأوعية الرئيسية والداخلية. وقد تم إغلاق مبنى المفاعل. ومن المزمع إدخاله في الخدمة في الفترة المتراوحة بين أواخر عام ٢٠١٢ ومطلع عام ٢٠١٣.

٧٨- وأعادت اليابان، في أيار/مايو ٢٠١٠، تشغيل المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٢٨٠ ميغاواط(كهربائي). وقد بدأت اختبارات التأكيد.

٧٩- وفي الاتحاد الروسي، يتواصل التقدم في تشييد المفاعل السريع من طراز BN-800 في بيلويارسك. وقد تم طلب جميع المكوّنات تقريباً وعملية التصنيع جارية على قدم وساق. ومن المزمع إدخاله في الخدمة عام ٢٠١٣.

٨٠- وأنشأت بلجيكا، في إطار الاتحاد الأوروبي للطاقة الذرية (اليوراتوم)، فريقاً معنياً بمتابعة أعمال تصميم المفاعل MYRRHA (وهو مفاعل بحوث هجين متعدد الأغراض يُستخدم في التطبيقات التكنولوجية المتقدمة) ومفاعل سريع اختباري من الطراز دون الحرِج. وفي عام ٢٠١٠، خصصت الحكومة البلجيكية، خلال الفترة الممتدة حتى عام ٢٠١٤، مبلغ ٦٠ مليون يورو لتمويل المرحلة الأولى من مشروع المفاعل MYRRHA. وتقدّر التكلفة الإجمالية للمشروع، الذي يتمتع بدعم من اليوراتوم، والمفوضية الأوروبية، والمحفل الاستراتيجي الأوروبي بشأن البنى الأساسية للبحوث، والمبادرة الصناعية النووية المستدامة الأوروبية، بمبلغ ٩٦٠ مليون يورو. ولاختبار رصد المستويات دون الحرجة، تم تشييد مرفق اختباري، هو مرفق GUINEVERE، يجمع بين معجّل ديوتيروني متواصل وبين هدف يتألف من مزيج التيتانيوم والتريتيوم مركّب داخل نظام مضاعفة دون حرجي سريع مبرّد بالرصاص. ويتوقع أن يصبح مرفق GUINEVERE قيد التشغيل في عام ٢٠١١.

باء-١-٣- المفاعلات المبرَّدة بالغاز

٨١- في الصين، وافقت الحكومة على خطة التنفيذ الخاصة بالمفاعل الإيضاحي المرتفع الحرارة المبرد بالغاز. وتخضع رخصة المشروع للدراسة حالياً، ويُتوقع أن تبدأ أعمال صب الخرسانة في عام ٢٠١١.

٨٢- وفي جنوب أفريقيا، التي تعتبر البلد الرائد في مجال تشييد المفاعلات المرتفعة الحرارة المبرّدة بالغاز، أوقفت أعمال التخطيط الخاصة بالمفاعل النمطي الحصوي القاع PBMR في عام ٢٠١٠ كنتيجة لجملة أمور منها، القيود المالية في أعقاب الأزمة الاقتصادية المالية العالمية. وخضع المشروع لما يسمى 'خطة عناية وصيانة' ترمي إلى الحفاظ على الملكية الفكرية والأصول إلى أن تتخذ الحكومة قرارها بشأن خطط إضافية.

٨٣- وفي اليابان، استكملت اختبارات أشدّ صرامة — فترة إجمالية تدوم ٩٠ يوماً، منها ٥٠ يوماً عند حرارة ٩٥٠ درجة مئوية — على مفاعل الاختبارات الهندسية المرتفع الحرارة. وتعكف الحكومة اليابانية على دراسة جدوى ربط هذا المفاعل بنظام لإنتاج الهيدروجين بغية إنتاج الهيدروجين على نطاق ضيق.

٨٤- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تواصلت الاختبارات على أمان الوقود النظيري الثلاثي الهياكل، المقاس استناداً إلى حالات أعطال الوقود أثناء فترات التشعيع الطويلة، وذلك في المفاعل الاختباري المتقدّم (ATR) في مختبر آيداهو الوطني. وبدأت أعمال الفحص بعد التشعيع في تجربة الوقود الأولى (AGR-1)، وأدرجت تجربة الوقود الثانية (AGR-2) في المفاعل الاختباري المتقدّم (ATR) في منتصف عام ٢٠١٠. وتأخر مشروع المحطة النووية من الجيل المقبل NGNP تأخيراً بسيطاً، مع استكمال دراسات التصميم المفاهيمي في مطلع عام ٢٠١١. وعلى وجه العموم، يركّز مشروع NGNP على إنتاج تطبيقات حرارة المعالجة المرتفعة الحرارة بدرجات حرارية تصدر من فتحات المفاعل تفوق ٧٥٠ درجة مئوية. وفي عام ٢٠١١، سيُركّز العمل على إقامة شراكة بين القطاعين العام والخاص للشروع في تصميم مفاعل إيضاحي وترخيصه وتشييده.

٨٥- وقد دأبت جمهورية كوريا، على مدى الأعوام الستة السابقة، على الاستثمار في عدد من المرافق الاختبارية لإجراء الاختبارات الهندسية على النظم والمكوّنات الخاصة بمفاعل مرتفع الحرارة مقرون بمرفق لإنتاج الهيدروجين. ويجري التخطيط أيضاً لتطبيقات الاستفادة من الحرارة المتولّدة عن العمليات، إذ يتعاون عدد من مستخدمي الحرارة الصناعية مع المجتمع البحثي النووي من أجل إيجاد الطرائق المثلى لإنتاج الحرارة والهيدروجين بواسطة مفاعل مرتفع الحرارة. ومن المخطط له تنفيذ عملية انتقاء مفهوم المفاعل بحلول عام ٢٠١٥، عندما تكون غالبية اختبارات النظم الأخرى قد استكملت. ويحظى مشروع تطوير الهيدروجين النووي وإيضاحه NHDD بدعم راسخ من جانب الصناعة والحكومة معاً.

باء-١-٤- المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود الابتكارية (إنبرو) والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات

٨٦- احتفل المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود الابتكارية (مشروع إنبرو)، الذي يدعم الدول الأعضاء في تطوير ونشر نظم الطاقة النووية المستدامة، بذكراه السنوية العاشرة في عام ٢٠١٠ ورحّب بعضو جديد يتمثل في بولندا، مما يزيد من عدد أعضائه ليصل مجموع الأعضاء ٣٢ عضواً. ودعم محفل إنبرو للتحاور، الذي انعقد مرتين في عام ٢٠١٠، سير مناقشات جارية بشأن طائفة متنوعة من المواضيع

فيما بين أصحاب مصلحة منتمين إلى جميع مراحل التطور النووي. وأجري تقييمان لنظم الطاقة النووية، من طرف بيلاروس وكازاخستان على التوالي، وصدر منشور للوكالة بعنوان "*التعريف باستخدام منهجية إنبرو في تقييم نظم الطاقة النووية*" ، وذلك كجزء من توليفة الدعم المقدّم إلى الدول الأعضاء في سياق تقييمات نظم الطاقة النووية. واستُكمل في عام ٢٠١٠، مشروعان تعاونيان هما، "*مقاومة الانتشار: تحليل مسارات الاقتفاء/التحريف*" و"*استقصاءات إضافية لدورة وقود اليورانيوم-٢٣٣/الثوريوم*" . ورداً على زيادة اهتمام الدول الأعضاء بالنمذجة المشتركة للاتجاهات العالمية والإقليمية في نشر الطاقة النووية، واصل المشروع التعاوني المعني *بالنسق الهندسي العالمي لنظم الطاقة النووية الابتكارية القائمة على المفاعلات الحرارية والسريعة بما يشمل دورات الوقود المغلقة* (مشروع *GAINS*) دراسات المحاكاة المنهجية التي يجريها للاستراتيجيات الانتقالية من نظم الطاقة النووية الحالية إلى النظم المقبلة.

٨٧- وينسّق المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات (محفل الجيل الرابع)، من خلال نظام قائم على عقود واتفاقات، أنشطة البحوث بشأن النظم الستة للطاقة النووية من الجيل المقبل التي اختيرت في عام ٢٠٠٢ وهي مبينة في *خارطة الطريق لتكنولوجيا الجيل الرابع من نظم الطاقة النووية*: أي المفاعلات السريعة المبرّدة بالغاز، والمفاعلات السريعة المبرّدة بالرصاص، ومفاعلات الملح المصهور، والمفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم، والمفاعلات فوق الحرجة المبرّدة بالماء، والمفاعلات الفائقة الحرارة. وتستخدم النظم الستة المختارة مجموعة متنوعة من تكنولوجيات المفاعلات وتكنولوجيات دورة تحويل الطاقة ودورة الوقود. وتصوّر تصاميمها أطياف النيوترونات الحرارية والسريعة، ودورات الوقود المغلقة والمفتوحة، وطائفة واسعة من أحجام المفاعلات، من الصغيرة جداً إلى الضخمة جداً. واستناداً إلى درجة النضج التقني لكل نظام على حدة، من المتوقع أن تكون نظم الجيل الرابع من المفاعلات متاحة لعرضها تجارياً في الفترة المتراوحة بين ٢٠١٥ و٢٠٣٠ أو فيما بعد. ويضم هذا المحفل في الوقت الراهن ١٣ عضواً.[٩]

٨٨- وتتعاون الوكالة والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات في مجالات المخاطر والأمان، ومقاومة الانتشار والحماية المادية، ونمذجة ومنهجيات التقييم الاقتصادي، وكذلك في مواضيع أخرى مثل المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم، وانعكاسات الثوريوم ودورة الوقود. وفي عام ٢٠١٠، ركّزت حلقة عمل مشتركة بين الوكالة والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات على جوانب الأمان التشغيلي للمفاعلات السريعة المبرَّدة الصوديوم (SFRs)، مما أدى إلى تحسين فهم قضايا الأمان المتعلقة بهذه المفاعلات.

باء-٢- الاندماج

٨٩- اتفقت جميع الأطراف على الخصائص التصميمية الأساسية لأجهزة ومرافق المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي ITER (المفاعل التجريبي الدولي)، وذلك خلال الاجتماع الاستثنائي الذي عقده مجلس المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الدولي في تموز/يوليه ٢٠١٠. ومنذ ذلك الحين، انتقل المفاعل التجريبي الدولي رسمياً من مرحلة استعراض التصميم إلى مرحلة التشييد. وبناء على جدول مستوفى، سيتم تحقيق حالة البلازما للمرة الأولى في تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٩، وسيبدأ التشغيل باستخدام الديوتيريوم والتريتيوم بحلول

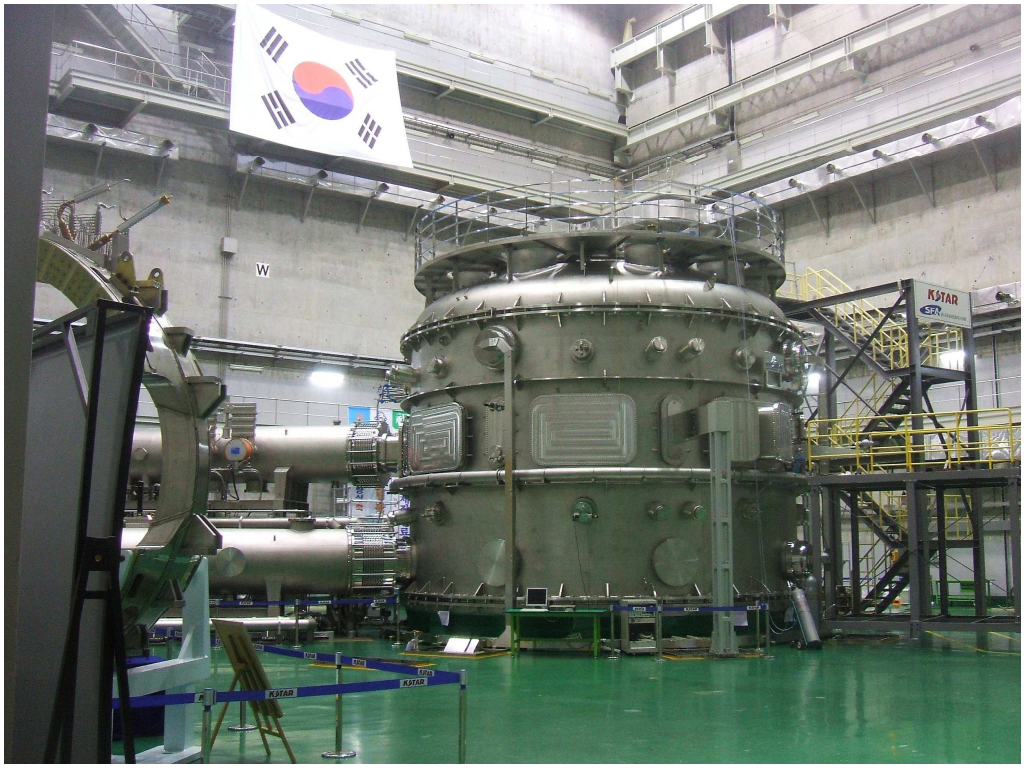
---

٩ الأرجنتين والبرازيل وكندا والصين واليوراتوم وفرنسا واليابان وجمهورية كوريا وجنوب أفريقيا وسويسرا والاتحاد الروسي والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية.

شهر آذار/مارس ٢٠٢٧، ليتمكن المفاعل التجريبي الدولي في نهاية المطاف من توليد قوى بقدرة ٥٠٠ ميغاواط.

٩٠- وقد حقّق مرفق الإشعال الوطني، القائم ضمن مختبر لورانس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية، تقدّماً ملحوظاً منذ تدشينه في أيار/مايو ٢٠٠٩. وتم تحقيق نبضة بقوة ١ ميغاجول في كانون الثاني/يناير ٢٠١٠، كما بدأت في أيلول/سبتمبر ٢٠١٠ اختبارات الإشعال المتكامل، مقرونة بمجموعة كاملة من الكواشف المشغلة تشغيلاً تاماً. وتشمل هذه الاختبارات بحوث أساسية في ميدان علوم كثافة الطاقة العالية في مجالات مثل الفيزياء الفلكية، والفيزياء النووية، ونقل الإشعاعات، وديناميات المواد، وديناميات السوائل.

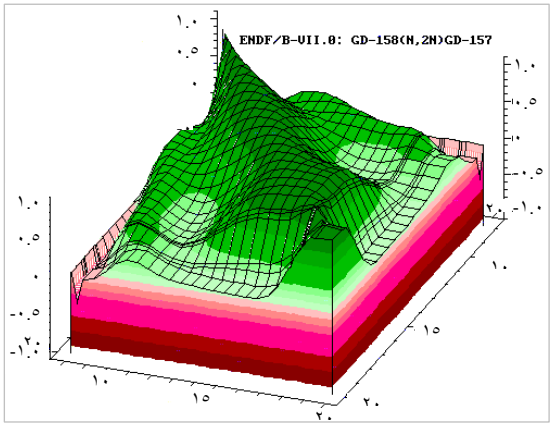
٩١- وبدأ الآن التشغيل التام لمفاعلين جديدين متوسطي الحجم فائقي التوصيل من طراز توكاماك، وهما مرفق توكاماك البحثي المتقدم الفائق التوصيل KSTAR في جمهورية كوريا (الشكل باء–١) ومرفق توكاماك التجريبي المتقدّم الفائق التوصيل EAST في الصين. ويرمي اختبارا النبض الطويل المتصلان بالمفاعل التجريبي الدولي إلى استقصاء القضايا ذات الصلة بالمفاعل التجريبي الدولي فيما يتعلق بالتشغيل الثابت. وكلا الاختبارين بدآ تشغيلا عالي القوة باستخدام تسخين إضافي للبلازما. وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٠، استضاف المعهد الوطني الكوري لبحوث الاندماج، حيث يقع مرفق KSTAR، *الدورة الثالثة والعشرين من مؤتمر الوكالة للطاقة الاندماجية (FEC 2010)*، وقد شهد المؤتمر تقديم تقارير بشأن آخر أوجه التقدّم المحرزة في إطار جميع الاختبارات الرئيسية في ميدان بلازما الاندماج.



الشكل باء-١- جهاز KSTAR في المعهد الوطني الكوري لبحوث الاندماج في دايجون، جمهورية كوريا.

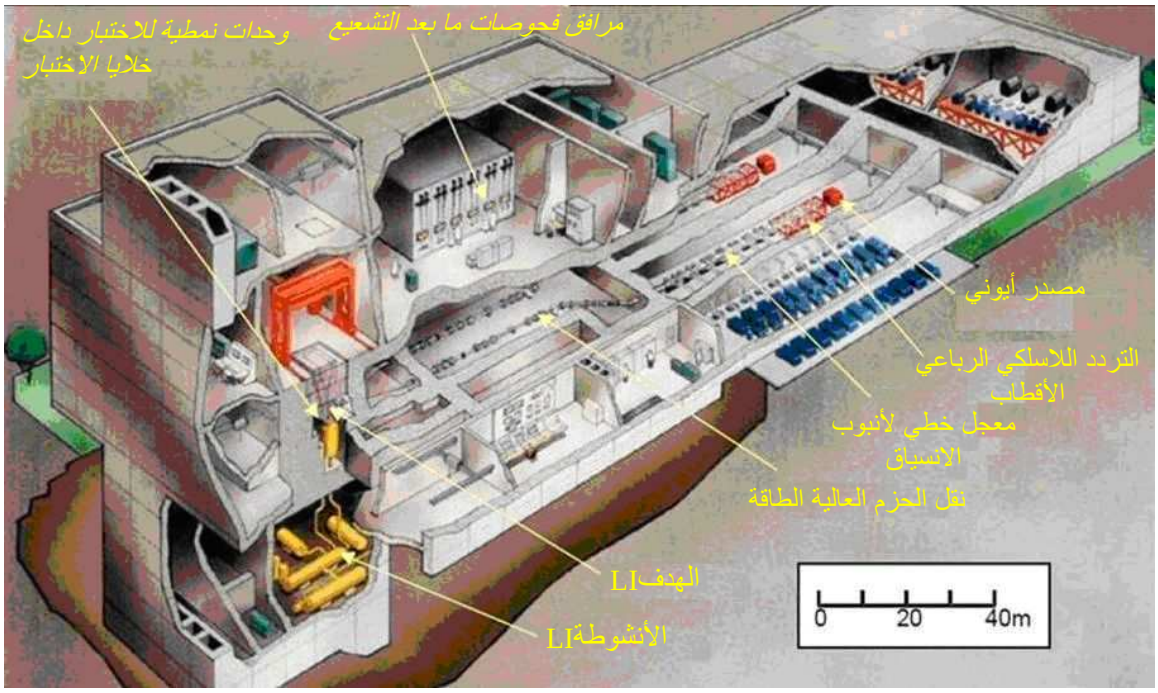
جيم- البيانات الذرّية والنووية

٩٢- يتواصل بشكل مستمر تحسين أهم قواعد البيانات النووية التي أعدّتها الشبكة الدولية لمراكز بيانات المفاعلات النووية والشبكة الدولية لمقيّمي بيانات التكوين والاضمحلال النوويين، والتي تنسّقها الوكالة. ومن أبرز ما شهده عام ٢٠١٠، تعزيز نظام الاسترجاع من شبكة الويب لتقديم بيانات بشأن التفاعلات النووية وتغايراتها المختلفة الأشكال، بما يشمل قراءة البيانات على شكل رسوم بيانية.



الشكل جيم-١ - تصوير ثلاثي الأبعاد لأوجه الترابط بين مختلف الطاقات، فيما يتعلق بالمقاطع المستعرضة للتفاعلات النووية.

٩٣- المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية هو مشروع دولي قيد التطوير حالياً يهدف إلى اختبار المواد المزمع استخدامها في المفاعل الإيضاحي DEMO أو مفاعل القوى الاندماجية التجاري. وقد أطلقت أسبانيا في الآونة الأخيرة مشروعاً وطنياً يدعى TechnoFusiòn، ويرمي هذا المشروع إلى تقديم الدعم التقني إلى المرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية والمفاعل الإيضاحي DEMO بغية محاكاة الأضرار المادية الفائقة عبر استخدام الأيونات الخفيفة والثقيلة. ولتوفير البيانات النووية اللازمة لهذين المرفقين وغيرهما من المرافق، يلزم إجراء توسيع ملموس لمكتبة البيانات النووية المقيّمة المتعلقة بالاندماج بصيغتها ٢–١ (FENDL-2.1) بحيث تشمل مستويات أعلى من الطاقة، فضلا عن الجسيمات المشحونة العرضية وتقييم ما يتصل بذلك من أوجه عدم اليقين.



الشكل جيم-٢ - التصميم المفاهيمي للمرفق الدولي لتشعيع المواد الاندماجية.

٩٤- في عام ٢٠١٠، عُقِد *المؤتمر الدولي بشأن البيانات النووية لأغراض العلوم والتكنولوجيا* الثلاثي السنوات، وذلك في جمهورية كوريا، وضمّ عدة مئات من العلماء والمهندسين المشاركين في إنتاج أو استخدام البيانات النووية لأغراض الطاقة الانشطارية والاندماجية، وتكنولوجيا المعجّلات، وتحديد الجرعات والتدريع، والفيزياء الفلكية، وما سواها من مجالات ذات صلة. وقدّم هذا المؤتمر، الذي يشمل تطورات النماذج النظرية بالإضافة إلى أنشطة قياس البيانات وتقييمها ومعالجتها وتصديقها ونشرها، مساهمات كبرى في تحسين نوعية البيانات النووية.

٩٥- أمّا المركز الافتراضي للبيانات الذرية والجزيئية VAMDC، فهو كناية عن مشروع دام لفترة ٣ سنوات ونصف السنة، بتمويل من *البرنامج الإطاري السابع للبحث والتنمية التكنولوجية*، ويهدف إلى توفير واجهة بينية موحّدة لأكثر من عشرين قاعدة بيانات ذرية وجزيئية. وقد عقد المشروع اجتماعه السنوي الأول في عام ٢٠١٠. ويشكل مخطط لغة الترميز الموسعة XML للذرات والجزيئات والمواد الصلبة، الذي يتم إعداده بتنسيق من جانب الوكالة، عاملاً أساسياً لكفالة القدرة على التشغيل المشترك.

٩٦- وسجّل ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية Linac Coherent Light Source (LCLS)، الذي بدأ تشغيله في نيسان/أبريل ٢٠٠٩، نجاحاً هائلا في عام ٢٠١٠، فهو ينتج بيانات ذرية اختبارية بكميات لم تكن متاحة فيما مضى. وتفوق ذروة بريق هذا الليزر بضعفين أو ثلاثة أضعاف سِعة بريق أجهزة الليزر ذات الإلكترونات الطليقة السابقة، ممّا يتيح إمكانية دراسة المواد في ظروف شبيهة بتلك التي تنشأ عند انفجار المستعرات العظمى (سوبرنوفا)، وداخل الحيزات الداخلية للنجوم، وفي البلازما المنتجة بواسطة الليزر.

الشكل جيم-٣- ليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية LCLS

دال- التطبيقات الخاصة بالمعجلات ومفاعلات البحوث

دال-١- المُعجّلات

٩٧- أتاحت أوجه التقدم المُحرَزة في تكنولوجيا المُعجّلات فرصة لاستحداث أساليب تحليلية مناسبة لدراسة تكنولوجيا تصنيع أدوات جديدة مقاومة للإشعاعات.

٩٨- وقد حصل نظام مدفوع بالمُعجّلات يرمي إلى توفير البروتونات والنيوترونات لاستخدامها في تطبيقات متنوعة في مجال البحث والتطوير على دعم مالي من بلجيكا في عام ٢٠١٠ في إطار مشروع نظام MYRRHA. وسيُستخدم مُعجّل بروتوني مقرون بقلب سريع دون حرجي في جملة أغراض منها دعم أنشطة البحث والتطوير الجديدة في مجال تحويل النفايات. ومن عام ٢٠٢٢ فصاعداً، سيُساهم نظام MYRRHA في صوغ حلول ابتكارية في مجال التكنولوجيات النووية، والتطبيقات الطبية، والصناعة النووية، ومصادر الطاقة المتجدّدة.

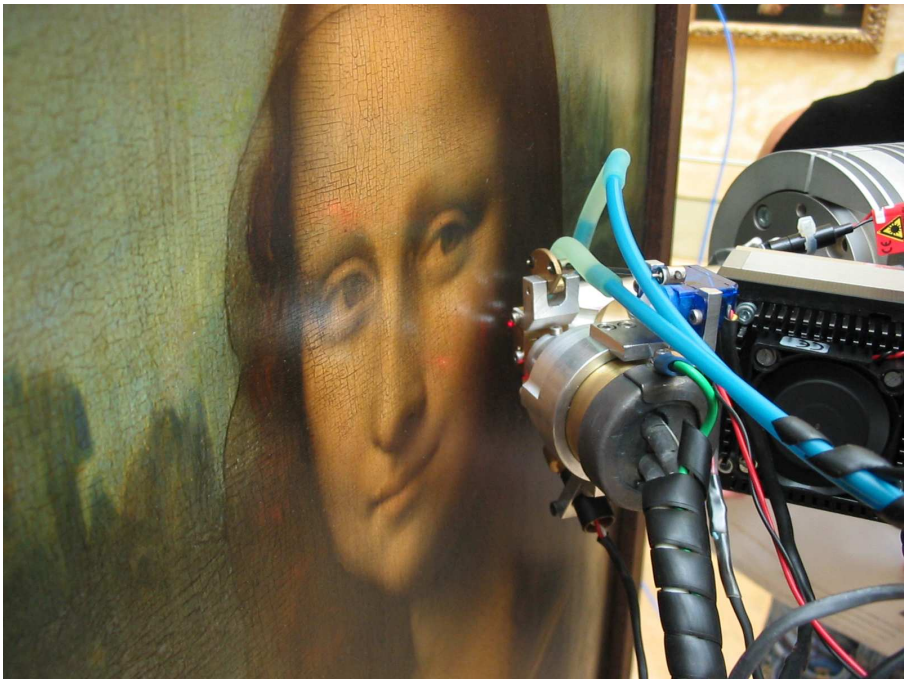
٩٩- وباتت التقنيات المعتمدة على الأشعة السينية أدوات أساسية في قياس الطيف وفي التصوير في العديد من المجالات، من الطب إلى الهندسة. وأدت أوجه التقدّم المُحرَزة في تركيز حزم الأشعة السينية ومناولة النماذج وأتمتة القياسات في مصادر الأشعة السينية السنكروترونية في السنتين الماضيتين إلى توسيع تطبيق هذه التكنولوجيات لدعم البحوث المتعلقة بالإصابة بفيروس نقص المناعة البشرية، وأسباب السرطان، ووظيفة الجهاز العصبي والاستشعار الخلوي، والتمثيل الضوئي، إلخ. واستحدث الباحثون على سبيل المثال في مرفق SPring-8 في اليابان تقنية لجمع الضوء تمكّن من توليد حزم من الأشعة السينية شديدة اللمعان يبلغ قطرها ٧ نانومتر. وقد يؤدي ذلك إلى تطوير مجهر يعمل بالأشعة السينية باستبانة نانومترية، ويمكن استخدامه مباشرة لملاحظة هيكل الجزيئات والذرات. ويُتيح الجيل الجديد من تكنولوجيا مصادر الأشعة السينية، مثل المعجّل الخطي لاستعادة الطاقة، الكائن في جامعة كورنيل بالولايات المتحدة الأمريكية (ERL, Cornell University, USA)، واستكمال

عدة مرافق في العالم خاصة بليزر الإلكترونات الطليقة العامل بالأشعة السينية، فرصاً جديدة لدراسة سلوك الذرات والجزيئات في ظروف قصوى.

١٠٠- ويعتبر المسح السطحي المجهري الإشعاعي السينكروتروني بالأشعة السينية الحادة العالية الاستبانة، الذي طُبّق بنجاح في عام ٢٠١٠ في المرفق الأوروبي للإشعاعات السنكروترونية، الطريقة الوحيدة القادرة في الوقت الحالي على تقديم معلومات ثلاثية الأبعاد تدعم دراسة المواد الابتكارية لاستخدامها في مفاعلات الاندماج النووي.

١٠١- وفي دراسات الرصد البيئي، استخدم العلماء من جامعة لايسيستر ومصلحة المسح الجيولوجي البريطانية مرفق دايموند لمصادر الضوء لدراسة الأوصاف الكيميائية للجسيمات وإمكانية انتقالها البيولوجي وقابليتها على الحركة، وهي جسيمات أخِذت من الغبار والتربة التي تم جمعها حول محطات معالجة اليورانيوم.

١٠٢- ولأول مرة في عام ٢٠١٠، استخدم علماء من مختبر مركز البحث والترميم المعني بالمتاحف الفرنسية والمرفق الأوروبي للإشعاعات السنكروترونية تقنية كمية كيميائية للتألق بالأشعة السينية لتحديد سمات سبع لوحات بأسلوب غير اقتحامي وفي الموقع (بما في ذلك لوحة الموناليزا)، وذلك مباشرة في قاعات متحف اللوفر. وساعدت النتائج التي نُشِرت في تموز/يوليه ٢٠١٠ على تحديد ودراسة التقنيات التي استخدمها قدماء الأساتذة الكبار، ومنها تقنية 'السفوماتو' الشهيرة التي كان يستخدمها ليوناردو دا فينتشي.



الشكل دال-١ - تقنية تألق الأشعة السينية المطبّقة لتحديد سمات لوحة الموناليزا بأسلوب غير اقتحامي وفي الموقع في متحف اللوفر بفرنسا (تكرّم بتقديم الصورة مختبر مركز البحث والترميم المعني بالمتاحف الفرنسية، © C2RMF)

دال-٢- مفاعلات البحوث

١٠٣- تفكّر في الوقت الراهن أكثر من ٢٠ دولة عضواً في تشييد مفاعلات بحوث جديدة، وذلك بالنسبة للعديد من هذه الدول كخطوة أولى في برامجها الوطنية للأخذ بالقوى النووية موازاة مع التطبيقات السلمية الأخرى للتكنولوجيات النووية. وفي الأردن، دخلت عملية تطوير مفاعل البحوث الأول المتعدد الأغراض الذي تبلغ قدرته ٥ ميغاواط مرحلة متقدّمة من التصميم، وستبدأ عملية التشييد عما قريب.

وعقدت الأرجنتين والبرازيل، في إطار برنامجها التعاوني الثنائي، اتفاقاً يتعلق بتطوير وتشييد مفاعلات بحوث متقدّمة التصميم وذات قدرة كبيرة على إنتاج النظائر المشعة، وذلك في كلّ من هذين البلدين.

١٠٤- وتشير قاعدة بيانات مفاعلات البحوث الخاصة بالوكالة[١٠] إلى أنه في نهاية عام ٢٠١٠ كان هناك ٢٤٩ مفاعلا للبحوث حول العالم، ٢٣٧ منها يجري تشغيلها، و١٢ منها قد أُغلِقت مؤقتاً. وثمة ٥ مفاعلات إضافية يجري تشييدها أو من المقرّر تشييدها. ودخل في الخدمة في عام ٢٠١٠ مفاعلان للبحوث فقط، هما: المفاعل البحثي الصيني المتقدّم والمفاعل التجريبي الصيني السريع، وهما مفاعلان يوجدان معاً في المعهد الصيني للطاقة الذرية بالقرب من بيجين. وقد بلغ المفاعل البحثي الصيني المتقدّم مرحلة الحرجية لأول مرة في ١٣ أيار/مايو ٢٠١٠ بينما بلغها المفاعل التجريبي الصيني السريع في ٢١ تموز/يوليه ٢٠١٠.

الشكل دال-٢ - المفاعل البحثي الصيني المتقدّم

١٠٥- ونظراً للاستعاضة عن المفاعلات القديمة المغلقة بعدد أقل من المفاعلات ذات الأغراض الأكثر تعدداً، فمن المتوقع أن ينخفض عدد مفاعلات البحوث المشغّلة والمرافق الحرجة إلى ما يتراوح بين ١٠٠ و١٥٠ مفاعلاً بحلول عام ٢٠٢٠. وسيكون من الضروري التعاون أكثر على الصعيد الدولي لضمان الاستفادة على نطاق واسع من هذه المرافق واستخدامها على نحو فعال. وقد برهنت الشبكات التعاونية أيضاً على أنها مُفيدة في

[١٠] http://nucleus.iaea.org/RRDB/

الارتقاء بالمرافق القائمة واستحداث مرافق جديدة. لذلك فبالإضافة إلى التحالفات الخمسة القائمة في مجال مفاعلات البحوث في أوروبا الشرقية، والكاريبي، وآسيا الوسطى، ومنطقة البلطيق، ومنطقة البحر الأبيض المتوسط، من المتوقّع إقامة تحالفات وشبكات جديدة لزيادة عمليات تشغيل مفاعلات البحوث واستخدامها ولجعل المفاعلات مُجدية حقاً.

١٠٦- وواصلت مبادرة الولايات المتحدة العالمية لتقليص التهديدات جهودها في سبيل تحويل وقود مفاعلات البحوث والكبسولات المستهدفة المستخدمة في مرافق إنتاج النظائر، من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء إلى وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وفي عام ٢٠٠٩، توسّع نطاق المبادرة المذكورة من ١٢٩ مفاعل بحوث إلى ٢٠٠ مفاعل بحوث، ومع نهاية عام ٢٠١٠، كان ٧٢ مفاعل بحوث عبر العالم من المفاعلات التي كانت تستخدم وقود اليورانيوم الشديد الإثراء قد تحوّل إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء أو أُغلِق قبل التحويل خلال الثلاثين عاماً من جهود التعاون الدولي للتحويل. ومن بين هذه المفاعلات، شهد ٣٣ مفاعل بحوث هذا التحوّل منذ تعزيز البرنامج عام ٢٠٠٤.

١٠٧- وتواصل الدعم الذي تقدّمه الوكالة إلى الدول الأعضاء والبرامج الدولية لإعادة وقود مفاعلات البحوث إلى بلد منشئه. وكجزء من برنامج إعادة وقود مفاعلات البحوث الروسي، أعيد توطين خمس شحنات يناهز وزنها ما يقرب من ١٠٩ كلغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج من بيلاروس والجمهورية التشيكية وأوكرانيا بموجب تعاقدات نظَّمتها الوكالة. وساعدت الوكالة أيضاً في إعادة توطين حوالي ٣٧٦ كلغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستهلَك من بيلاروس وبولندا وصربيا (١٣.٢ كلغ من فينشا) وأوكرانيا.

١٠٨- وفي نهاية عام ٢٠١٠، جرى نقل ٢٥٠٠ كلغ من وقود مفاعلات البحوث المتدهور والمستهلك، معظمه وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء، من فينسا في صربيا إلى الاتحاد الروسي. وسجّل هذا التنفيذ الناجح لمشروع التعاون التقني الأعلى قيمة في تاريخ الوكالة الحصيلة التراكمية للجهود التعاونية التي بذلتها الوكالة، كما سجّل عدداً من الجهات المالية المانحة ومنظمات الدعم التقني. وسيتواصل العمل على دعم الجهود الرامية إلى إخراج المرفق من الخدمة كلياً.

١٠٩- وما زالت جنوب أفريقيا تتصدّر الركب فيما يخص تحويل الكبسولات المستهدفة ومعدات المعالجة الكيميائية (من اليورانيوم الشديد الإثراء إلى اليورانيوم الضعيف الإثراء) المستخدمة في إنتاج الموليبدنوم-٩٩ لفائدة المنتجين على نطاق واسع، لتُصبح جنوب أفريقيا، في عام ٢٠١٠ ، أول مُنتج رئيسي يُنتج على نطاق صناعي كميات من الموليبدنوم-٩٩ المعتمد على اليورانيوم الضعيف الإثراء لأغراض التصدير. كما شرع معهد بحوث المفاعلات النووية الكائن في ديميتروفغراد بالاتحاد الروسي في عملية إنتاج واسعة النطاق من الموليبدنوم-٩٩ في عام ٢٠١٠، وسُلّمت الدفعة الأولى (التي استوفت جميع المتطلبات) إلى شركاء في الخارج في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٠. وكان من المتوقّع أن تصل مستويات الإنتاج ٨٠٠ كوري في الأسبوع مع نهاية أيار/مايو ٢٠١١ و٢٥٠٠ كوري في الأسبوع بعد استكمال المرحلة الثانية من المشروع في عام ٢٠١٢. وكانت الأرجنتين قد نجحت في السابق، في عام ٢٠٠٢، في تحويل إنتاج الموليبدنوم-٩٩ على نطاق ضيق، وقامت بعدئذ بتطوير وتصدير هذه التكنولوجيا إلى أستراليا ومصر. وخلال عام ٢٠١٠ كذلك، أفادت أستراليا بإحراز تقدم مطرد في الجهود الرامية إلى زيادة إنتاج الموليبدنوم-٩٩ المعتمد على انشطار اليورانيوم الضعيف الإثراء.

١١٠- وأدت التحديات التقنية إلى حالات إغلاق لمفاعلات البحوث بصورة متكررة ومُطوّلة ومتواصلة في كثير من الأحيان مما أسهم في زيادة إطالة أمد أزمة إمدادات الموليبدنوم-٩٩، التي بدأت في أواخر عام ٢٠٠٧.[١١] وقدّمت الجهود المتناسقة والعالمية التي بُذلت في سبيل تحسين فعالية الطلب، وتقليل تحديات النقل والموافقة على المفاعلات القادرة على تشعيع الكبسولات المستهدفة مساعدة كبيرة في التخفيف من حدة الأزمة طيلة عام ٢٠١٠ إلى أن أُعيدت إلى الخدمة المفاعلات التي انقطعت عن العمل لأمد طويل بصورة مخطط لها وغير مخطط لها. وضاعفت الهيئة الوطنية للطاقة الذرية في الأرجنتين إنتاجها من الموليبدنوم-٩٩، مما ضمن للأرجنتين اكتفاءها الذاتي وساعد على تلبية احتياجات البلدان الأخرى في المنطقة. وفي بلجيكا، عمل مركز البحوث النووية في مول على زيادة قدرة مفاعله BR 2 على تشعيع الكبسولات المستهدفة من اليورانيوم الشديد الإثراء وأجرى دورة تشغيلية إضافية بينما قام المعهد الوطني للعناصر الإشعاعية الكائن في فلوراس بزيادة قدرته على معالجة الكبسولات المستهدفة. ولكن تقرير وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي،[١٢] الذي نُشر في أيلول/سبتمبر ٢٠١٠ بالاستعانة بمدخلات من الوكالة، خلص إلى أن التهديدات التي تخيّم على أمن إمدادات الموليبدنوم-٩٩ ستظل ماثلة إلى أن تتم تسوية جميع القضايا التقنية والقضايا المتصلة بالأسواق والسياسات.

١١١- ولتحويل مفاعلات البحوث الكثيرة الفيض والعالية الأداء، يلزم توفير أنواع متقدمة فائقة الكثافة من وقود اليورانيوم-الموليبدينوم التي يجري تطويرها في الوقت الراهن. وفي هذا الصدد، أُحرز تقدم هائل في السنوات الماضية القليلة. ويجري بحث سلوك وأداء وقود اليورانيوم-الموليبدينوم في إطار تعاوني من طرف الفريق العامل الدولي المعني بتطوير الوقود. وفي الولايات المتحدة، تُركّز الجهود على تطوير وقود اليورانيوم-الموليبدينوم الأحادي الكتلة لاستخدامه في مفاعلات بحوث كثيرة الفيض. وقد أُحرز تقدم هائل مع نضوج تكنولوجيا التصنيع. وفي عام ٢٠٠٩، تم توحيد مبادرة أوروبية جديدة لتأهيل وقود اليورانيوم-الموليبدينوم المشتت والمحتوي على اليورانيوم الضعيف الإثراء ذي الكثافة العالية جداً، لأغراض المفاعلات الأوروبية العالية الفيض التي تتحوّل إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء. وعلى الرغم من التقدّم الملموس المحرز في ميدان تطوير وتأهيل وقود اليورانيوم-الموليبدينوم في عام ٢٠١٠، يلزم إحراز مزيد من التقدّم وإجراء قدر هائل من الاختبارات للتوصل إلى تحقيق وفرة تجارية وفي الوقت المناسب من وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء ذي الكثافة العالية جداً.

هاء- التكنولوجيات النووية في مجال الأغذية والزراعة[١٣]

هاء-١- تحسين إنتاجية الماشية والصحة البيطرية

١١٢- كان لتطوير واختبار واعتماد وتنفيذ التقنيات النووية السريعة والدقيقة والتقنيات المتصلة بالمجال النووي لتشخيص الأمراض في وقت مبكر دور رئيسي في تحسين الأمن الغذائي. ومن الأمثلة على ذلك الحملة العالمية للقضاء على الطاعون البقري المتوقّع أن تعلن عنها منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو) والمنظمة العالمية لصحة الحيوان رسمياً في عام ٢٠١١. ورغم ذلك، ما زال العالم يواجه تحديات ناجمة عن

---

١١ انظر أيضا القسم أولا-١ حول النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية.

١٢ http://www.nea.fr/med-radio/reports/MO-99.pdf

١٣ يمكن الاطلاع، في الموقع GovAtom، على معلومات إضافية في الوثائق ذات الصلة بوثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١*.

أمراض حيوانية أخرى عابرة للحدود، ويُحتمل أن يُؤثر بعضها في بني البشر. ومن الضروري أن يتم تشخيص هذه الأمراض بسرعة وبدقة، ويُفضّل أن يتم ذلك في الميدان وأن تُنفذ بعدئذ الإجراءات الرقابية المناسبة. ويجري في الوقت الراهن استحداث تكنولوجيات إشعاعية جديدة من أجل تطوير لقاحات آمنة وفعالة، ووضع بطاقات ترقيم إشعاعي مستقرة، ورسم مسارات المنصات المتعلقة بتحديد كائنات مُمرضة حساسة ومحددة، وكذلك استخدام نظائر مستقرة لرصد الحيوانات المهاجرة.

١١٣- وعندما تضعف المكوّنات المُمرضة للقاحات أو عندما تُصبح غير مُعدية، فإن اللقاحات المشعة تحتفظ بقدرتها على تحفيز استجابة مناعية قوية. وتتلقى بعض الدول الأعضاء الدعم لاستحداث مثل هذه اللقاحات لاستخدامها في عدد من الأمراض الحيوانية العابرة للحدود التي لا توجد بشأنها حالياً أي لقاحات فعالة. وعلى سبيل المثال، يجري تطوير لقاحات ضد داء البروسيلات (وهو مرض حيواني منتشر) في الأرجنتين وجورجيا؛ ولقاحات ضد عدوى الديدان الطفيلية في إثيوبيا والسودان وسريلانكا؛ وضد الثالليريا في الصين وتركيا؛ وضد داء المثقبيات في الهند وكينيا؛ وضد داء الأنابلازما في تايلند؛ وضد الطفيليات المنقولة بالسمك في جمهورية إيران الإسلامية.

١١٤- ومن أجل اكتشاف أسباب الآثار السلبية للقاح الجُدَرِي[١٤] أو اكتشاف أسباب فشل هذا اللقاح، أُجري تسلسل كامل لجينوم عدة سلالات ميدانية وسلالات اللقاح من أجل تحديد وجود أو عدم وجود الجينات التي قد تكون مسؤولة عن ذلك. وستمكّن الدراسات المتعلقة باستخدام تكنولوجيات القياسات الدقيقة لحمض د.ن. أ. في جينومات الخرفان والماعز ومن خلال وضع بطاقات ترقيم للفوسفور-٣٢ والكبريت-٣٥ من اكتساب فهم أكبر لمقاومة الأمراض ودور مختلف الجينات المرتبطة بالاستجابة المناعية لأمراض الحيوانات. وهذه خطوة هامة لفهم الاختلافات النمطية الظاهرية والاختلافات النمطية الجينية في الحيوانات الزراعية .

١١٥- وقد أُحرز تقدّم كبير خلال عامي ٢٠٠٩ و٢٠١٠ في وضع خريطة هجينية إشعاعية (RH Maps3) خاصة بالماعز باستخدام التشعيع بالكوبالت-٦٠. وتم ذلك بالتعاون مع عدة مؤسسات حول العالم (المعهد الوطني للبحث الزراعي في فرنسا وجامعة Texas A&M في الولايات المتحدة الأمريكية، وجامعة هاوزهونغ الزراعية في وسط الصين، وشركة DNA LANdMARKS في كندا). وسيمكّن ذلك من تحديد الواسمات الجينية ذات السمات الإنتاجية من الناحية الاقتصادية التي يمكن استخدامها في الاستيلاد.

هاء-٢- مكافحة الآفات الحشرية

١١٦- إن الاستثمار في الأرض والبذور والماء والأسمدة والعمالة وغير ذلك من المدخلات لكي تُدمَّر الحصيلة الزراعية في نهاية المطاف جزئياً أو كلياً بسبب الآفات الحشرية هو استخدام عديم الجدوى للموارد المحدودة المُتاحة لتغذية سكان تتزايد أعدادهم. لذلك فإن زيادة الاستثمار في مكافحة الآفات سيكون أحد المكوّنات الاستراتيجية الهامة لزيادة الإنتاجية وضمان أمن غذائي عالمي. ولكن الاعتماد حالياً على المبيدات الحشرية يضر بالتوازن الطبيعي ويترك مخلّفات في الأغذية ويؤدي دائماً إلى تطوير المقاومة لدى الآفات الحشرية. ونتيجة لذلك، تتزايد الطلبات على مزيد من النُهج الناجعة والملائمة للبيئة والمستدامة لمكافحة الآفات.

١١٧- وفي مجال مكافحة الآفات الحشرية، كان الطلب على التقنيات النووية يقتصر في الماضي إلى حد كبير على تعقيم الحشرات فيما يتعلق بتطبيق تقنية الحشرة العقيمة تطبيقاً متكاملا على نطاق مناطق شاسعة وما يتصل

١٤ تتسبّب فيروسات الجدري في جدري الماعز وجدري الخرفان ومرض الجلد الكتيلي.

بذلك من أساليب المكافحة الوراثية. ورغم ذلك، هناك إمكانات هائلة بالنسبة لمكافحة الآفات الحشرية بيولوجياً، وهي إمكانات يُتيحها تطبيق الإشعاعات لزيادة الفعالية من حيث التكلفة وتعزيز أمان إدراج وإطلاق أعداء طبيعيين (أشباه الطفيليات والحيوانات المفترسة)، ولتسهيل الاتجار في هؤلاء الأعداء الطبيعيين.

الشكل هاء-١ - أشباه الطفيليات الإناث تسبر بناقل بيضها الطويل في الفاكهة بغية تفريغ بيضها في الفاكهة المُضيفة.

١١٨- وتناول ١٨ فريقَ بحث من ١٥ بلداً، في إطار مشروع بحثي منسّق بين الفاو والوكالة تـوّج في عام ٢٠١٠، مختلف القيود المتصلة بمختلف نُظم الإنتاج والمناولة المتعلقة بعوامل المراقبة البيولوجية، بما في ذلك احتمال وجود كائنات آفات مصاحبة لعملية الشحن. وتشير الاستنباطات إلى وجود عدد كبير من الأساليب الابتكارية التي يمكن للإشعاعات المؤيّنة، مثل أشعة غاما أو الأشعة السينية، أن تُضيف فيها قيمة إلى تنفيذ المراقبة البيولوجية، ومنها مثلا تمديد صلاحية الأعداء الطبيعيين أو العناصر المضيفة وتقليص تكاليف ولوجيستيات الاحتفاظ بأشباه الطفيليات والآفات البالغة غير الطفيلية وفصلها قبل التمكّن من شحنها إلى العملاء.

١١٩- وبالإضافة إلى ذلك، يمكن تطبيق الإشعاعات لتعقيم العناصر المُضيفة أو الفريسة جزئياً أو كلياً لنشرها ميدانياً من أجل زيادة القدرة الأولية على البقاء والقيام في وقت مبكّر بإنشاء عوامل المراقبة البيولوجية الطبيعية أو التي أُطلقت قبل أن تنشأ تجمعات السلالات الموسمية للآفات، وكذلك استخدام عناصر مُضيفة لا يمكنها التوالد كحرس في الميدان. ويمكن لتطبيق الإشعاعات أن يساعد أيضاً على تقليص الأخطار المرتبطة بإدراج عوامل المراقبة البيولوجية الدخيلة، التي يمكن أن تُصبح آفات لكائنات غير مُستهدفة إذا لم يتم فحصها بدقة في ظل ظروف طبيعية أو شبه طبيعية. ويمكن اختبار عوامل المراقبة البيولوجية المُعقَّمة فيما يتعلق بخصوصية العناصر المُضيفة في ظل الظروف الميدانية دون وجود أي خطر لتكوين تجمّعات.

١٢٠- كما أن الإشعاعات مُفيدة لدراسة التفاعلات الفيسيولوجية لأشباه الطفيليات المُضيفة، كأنواع الاستجابة المناعية المضيفة، من خلال مكافحة التفاعلات الدفاعية للعناصر المُضيفة الطبيعية أو المصطنعة. وأخيراً، فقد

ثبتت جدوى إدراج أعداء طبيعيين وعمليات إطلاق حشرات عقيمة في برامج المكافحة المتكاملة للآفات على نطاق مناطق شاسعة.

الشكل هاء-٢ - أشباه طفيليات إناث تضع بيضها على حمية غذائية تضمّ يرقات مُضيفة كجزء من عملية التربية المكثّفة.

١٢١- ويجري بالفعل تنفيذ بعض هذه التطبيقات النووية على نطاق واسع، وذلك في باكستان على سبيل المثال، حيث يتم نشر عوامل المراقبة البيولوجية لمكافحة الآفات الرئيسية لمحاصيل القطن وقصب السكر.[١٥]

هاء-٣- تحسين المحاصيل

١٢٢- أفادت تقديرات البنك الدولي في ٢٠٠٩ بأن البلدان النامية ستتحمّل نسبة تتراوح بين ٧٠% و٨٠% من تكاليف أضرار تغيّر المناخ، علماً بأن الزراعة ستكون أكثر القطاعات تضرّراً. ويُحتمل أن تُعزى التأثيرات الأساسية لتغيّر المناخ في الزراعة إلى ارتفاع تقلبات درجة الحرارة، وتغيرات أنماط هطول الأمطار، بما في ذلك زيادة حدة وتواتر الأحداث العنيفة (الفيضانات والجفاف)، وكذلك ارتفاع مستوى البحر مما يؤثّر في المناطق الساحلية حيث توجد مساحات شاسعة من الأراضي المزروعة (وقد تتأثر هذه الأراضي تأثراً كبيراً من تسرّب المياه المالحة).

١٢٣- ومن أساليب التصدي الممكنة لهذه المسألة تحسين الصفات الوراثية للمحاصيل. وقد كانت الطفرات أو التغيرات الوراثية التي تحدث طبيعياً في المادة الوراثية للنباتات تُستَغلّ دائماً بنجاح لتحديد واختيار السمات الهامة لتحسين المحاصيل. ويمكن للتقنيات النووية المستخدمة لحث الطفرات أن ترفع معدّلات التغيرات الوراثية وترفع بالتالي قابلية المحاصيل للتكيّف مع تغير المناخ وتقلباته عن طريق ما يلي:

---

١٥ نُشِرت جميع هذه التطبيقات في طبعة خاصة من ٣٦٢ صفحة من المجلة التي يستعرضها النظراء والمعنونة *علوم وتكنولوجيا المراقبة البيولوجية*. يرجى الاطّلاع على الموقع الشبكي: http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/crp/Biocontrol_final.pdf.

- استغلال التنوع الوراثي من السلالات المستحثّة الموجودة لتقييم مقاومة حالات الإجهاد المرتبطة بتغير المناخ من حيث الغلة ومكونات الغلة؛

- تطبيق الأدوات القائمة لتحديد خصائص أساليب التصدي الفيسيولوجية والبيوكيميائية لحالات الإجهاد هذه من خلال تطبيق تقنيات النظائر المستقرة؛

- تحليل واستغلال الطفرات باستخدام مختلف الأدوات الجزيئية، وكذلك باستخدام أدوات علم المعلومات البيولوجية ذات الصلة لتقييم مجموعات كبيرة من البيانات وتصوّر المسارات الأيضية المتضررة من حالات الإجهاد و/أو الأنماط الوراثية.

الشكل هاء-٣- استغلال الطفرات المستحثة بالإشعاعات لتحسين المحاصيل وتعزيز فهم وظائف الجينات. وينطبق تنوع الألوان على مختلف الطفرات. وهذه طفرات متقدّمة، تم تخزينها وسيتم في وقت لاحق فحصها استناداً إلى نوع محدد من الإجهاد لاختيار الطفرات الإيجابية (صورة مقدّمة من السيد د. تشو، الصين).

١٢٤- ولدى عدة دول أعضاء سلالات طافرة من المحاصيل الغذائية الرئيسية وهي سلالات مستعدة لتحديد مظاهرها الموروثة وخصائصها الجزيئية. وبغية تعزيز كفاءة التقنيات النووية لحث الطفرات، ستنطوي الجهود المُقبلة على مواءمة أكثر التكنولوجيات تطوراً، ووسم السلالات المستحثّة الموجودة ومن ثم توسيع نطاق تكيّف المحاصيل مع تغيرات المناخ وتقلباته. وتنطوي هذه التكنولوجيات الجديدة لتعزيز الكفاءة على ما يلي: إجراء تسلسل حراري إنتاجي مرتفع أو تسلسل عميق مباشر للجينومات التي يُتاح لها بالفعل تسلسل لعنصر وثيق الصلة بها، وتحليل الانصهار العالي الاستبانة، وهي تقنية تستخدم التفاعل البوليميري المتسلسل وأصباغ الإقحام الفلورية للكشف عن الطفرات النادرة في الجينات التي تحتوى على إنترونات واسعة. ويمكن الكشف عن حالات انعدام التجانس المفردة باستخدام نـُظم الرصد الفلوري ويمكن اعتبار ذلك تمديداً لتحديد تعدد أشكال النويدات المفردة في النباتات. ومما يدعم هذه الأساليب أكثر انخفاض تكاليف الانتفاع بتسلسل حمض د.ن.أ. مما يؤدي إلى الإفراط في أخذ العينات من المناطق الجينومية، والقضاء على الأخطاء، والإسراع في اكتشاف الطفرات في الاصناف المتعددة الصيغة، مثل القمح، إلى جانب تجمّع السلالات المحوّلة وراثياً. وقد يؤدي تغير المناخ إلى حدوث أضرار هائلة في التنوع الوراثي في الأصناف المزروعة. وثمة اليوم نماذج متطوّرة للتنبؤ بآثار تغير المناخ ومحاكاتها ويمكن تكييفها وفقاً للمحاصيل المختارة في المناطق المستهدفة، وهو ما يطلق عليه "علم المعلومات البيولوجية". وتتيح الاستفادة من قواعد البيانات الجينومية ومواد المحاصيل الوراثية في مصارف

الجينات حول العالم من خلال الصكوك المتعددة الأطراف أدوات قيّمة للتغلّب على هذه التحديات الرئيسية التي تواجهها الأغذية والزراعة.

١٢٥- ويمكن لمجموعات التكنولوجيات النووية القائمة على حث الطفرات والتكنولوجيات البيولوجية لتعزيز الكفاءة، أن تساعد على تحديد واستغلال السمات الأساسية للتكيّف مع تغيرات المناخ وتقلباته. ويمكن توسيع نطاق هذه التقنيات لتشمل الغابات، التي تؤدي دوراً جوهرياً في استقرار المناخ.

هاء-٤- إدارة التربة والمياه

هاء-٤-١- حدود جديدة لتقييم احتباس كربون التربة في الأراضي الزراعية

١٢٦- يعتبر كربون التربة العضوي مكوّناً هاماً لمواد التربة العضوية التي تؤدي إلى توفير المغذيّات الأساسية لنمو المحاصيل، وزيادة القدرة على الصمود ضد تآكل التربة وتحسين حفظ المياه. وتساعد زيادة خزن كربون التربة العضوية، والمعروف أيضاً باحتباس الكربون، في التعويض عن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من الأنشطة الزراعية، مثل إنتاج المحاصيل والإنتاج الزراعي، وتساعد في الوقت ذاته في تحسين جودة التربة وحفظ المياه، وتقليص الخسائر في المغذيات. ويشكّل احتباس كربون التربة التوازن القائم بين مدخلات الكربون في التربة، من خلال الكتلة الحيوية النباتية، وبين إطلاق الكربون من التربة في شكل ثاني أكسيد الكربون، من خلال النشاط الميكروبي وانحلال المخلفات العضوية. ويمكن أن يساعد تحديد كمية ثاني أكسيد الكربون التي تطلقها التربة وتحديد مصدرها في تحديد العوامل الإدارية التي تؤثّر في عمليات التربة المؤثّرة في إطلاق ثاني أكسيد الكربون.

١٢٧- وتُستخدم نظائر الكربون المستقرة (الكربون-١٣ والكربون-١٢)، الموجودة في ثاني أكسيد الكربون الذي تطلقه التربة، لتقييم ديناميات المواد العضوية، واحتمال احتباس الكربون واستقرار الكربون في التربة. ولكن الدراسات التي أُجرِيت في عام ٢٠١٠ (فيليبس وآخرون، ٢٠١٠)[١٦] بيّنت أن قياسات الكربون-١٣ تتأثر بالتربة والأحوال الجوية في الموقع المحدد وخلال وقت القياسات. ويمكن معالجة حالات عدم التيقن من قِيم الكربون-١٣ المقترنة بالموقع والوقت بإجراء قياسات متواصلة وفي الوقت الحقيقي للكربون-١٣. وقد تم وضع أجهزة لتحليل الغازات، باستخدام أجهزة الليزر المقاربة للأشعة دون الحمراء ذات الحساسيات التحليلية العالية (نيكيرسون وريسك، ٢٠٠٩)[١٧]، وذلك من أجل قياس الكربون-١٣ والكربون-١٢ في ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو. ولا تحتاج أجهزة التحليل المحمولة هذه إلى معايرة متكررة ويمكن نشرها في الميدان. وبفضل هذه الدقة والمتانة، تُحدّد أجهزة التحليل هذه بدقة أكبر كمية عمليات كربون التربة في الأراضي الزراعية على صعيد مقاييس مكانية وزمانية مختلفة، وتفتح بالتالي حدوداً جديدة في تقييم احتباس كربون التربة في الأراضي الزراعية.

---

١٦ Phillips, C.L., Nickerson, N., Risk, D., Kayler, Z.E., Andersen, C., Mix, A., Bond, B., 2010, Soil moisture effects on the carbon isotope composition of soil respiration. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 24, 1271-1280.

١٧ Nickerson, N. and Risk, D., 2009, Physical controls on the isotopic composition of soil respired and CO_2. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 114, G01016, doi:10.1029/2008JG000844.

الشكل هاء-٤- تحسين نوعية التربة وتعزيز احتباس الكربون في الأرض: نمو فول الصويا في إطار الزراعة الحفظية في البرازيل (تكرّم بتقديم الصورة برونو ألفيس، إيمبرابا، البرازيل).

هاء-٤-٢- استخدام النظائر الأكسجينية للفوسفات لاقتفاء أثر مصادر الفسفور ودوراته في التربة

١٢٨- الفوسفور عنصر أساسي في التغذية النباتية والبشرية والحيوانية. ونظراً لأن التربة في العديد من مناطق العالم لا تحتوي سوى على نسب منخفضة من الفوسفور، ولأن نقص الفوسفور يحدّ من نمو النباتات ويقلّص إنتاج المحاصيل وجودة الأغذية، فمن الأهمية بمكان فهم ديناميكيات الفوسفور فهماً أفضل. ويحتوي الفوسفور على نظير مستقر واحد (الفوسفور-٣١) وعلى عدة نظائر مشعّة (من الفوسفور-٢٦ إلى الفوسفور-٣٠ ومن الفوسفور-٣٢ إلى الفوسفور-٣٨)، ولكن النظيرين الوحيدين الملائمين لإجراء دراسات زراعية (الفوسفور-٣٢ والفوسفور-٣٣) لهما أعمار نصفية قصيرة جداً تبلغ ١٤.٣ و٢٥.٣ يوماً على التوالي، مما يجعل من الصعب إجراء أي بحث طويل الأمد. ونظراً لأن الفوسفور لا يحتوي سوى على نظير مستقر واحد، فقد بدأ الباحثون استكشاف إمكانات النظائر الأكسجينية في مكوّنات الفوسفور العضوي وغير العضوي على حد سواء لدراسة وفهم ديناميكيات الفوسفور في كل من نظم إنتاج المحاصيل والإنتاج الحيواني لتحسين خصوبة التربة والإنتاجية الغذائية. وهذه المعلومات جد هامة لإدارة الفوسفور في المستقبل من أجل تكثيف الإنتاج الزراعي على نحو مستدام والتقليل إلى أدنى حد من الآثار السلبية لكميات الفوسفور المفرطة على البيئة.

١٢٩- وبغية تحليل الأكسجين-١٨ في التربة من أجزاء مختلفة من فوسفور التربة، يجب استخراج الفوسفات من التربة وتنقيته وتحويله إلى الأورتوفوسفات الفضي. ووضعت مجموعة من العلماء[١٨] مؤخراً بروتوكولات لتقدير كمية الأكسجين-١٨ الموجودة في أنواع التربة التي تتميّز بحالات فوسفورية مختلفة في التربة وتتوافر فيها النباتات في بلدان مختلفة. وتبيّن من أنواع التربة التي تخضع لممارسات مختلفة في إدارة المزارع (مثل تطبيقات الأسمدة) أن هناك علامات متنوعة للأكسجين-١٨ في فوسفور التربة، مما يدل على إمكانية استخدام الأكسجين-١٨ كمادة اقتفائية نظيرية لدراسة دورات الفوسفور، واقتفاء أثر مصادر الفوسفور، ثم تقديم فهم أفضل بعدئذ لديناميكيات فوسفور التربة في النظم الزراعية والإيكولوجية.

---

[١٨] Tamburini, F., Bernasconi, S.M., Angert, A., Weiner, T. and Frossard, E., 2010, A method for the analysis of the $\delta^{18}O$ of inorganic phosphate extracted from soils with HCl. European Journal of Soil Science, 61, 6, 1025-1032.

واو- الصحة البشرية

واو-١- التغذية

١٣٠- تعتبر تقنيات النظائر المستقرة، القائمة على تخفيف الديوتريوم، أدوات هامة لتقييم تكوين الجسم وتقدير الكميات التي يستهلكها الرضع من حليب الأم. وفي السنوات الأخيرة، وبدعم من الوكالة، انتقلت هذه التقنيات من مجرّد أدوات بحثية محضة تُتاح في بضعة مراكز امتياز فقط، في البلدان الصناعية بالأساس، لتصبح أدوات لتقييم التدخلات العامة في مجال التغذية البشرية في البلدان النامية. ومما سهّل هذا التغيير التركيز على إدراج تقنيات تنظيرية طيفية سهلة الاستخدام لتحليل إثراء الديوتيريوم في عيّنات تحتوي على الماء. وتقنية المطياف بالأشعة تحت الحمراء الذي يستخدم تحويل فورييه هي تقنية يَسهُل تعلّمها وثمنها معقول نسبياً، كما أن أجهزتها تحتاج إلى القليل من الصيانة. لذلك فهي تقنية ملائمة جداً لاستخدامها في البلدان النامية ذات الموارد المحدودة. وبدعم من الوكالة، تم بناء قدرات هائلة في السنوات القليلة الماضية في أفريقيا وأمريكا اللاتينية، وتُطبّق في الوقت الحالي تقنيات النظائر المستقرة باستخدام المطياف بالأشعة تحت الحمراء الذي يستخدم تحويل فورييه لتحليل الديوتيريوم في اللعاب، وذلك من أجل تقييم التدخلات التغذوية لتزويد المهنيين وصانعي القرارات في مجال الصحة بأسس أدلة سليمة للتدخلات كجزء من الجهود الرامية إلى ضمان النمو الصحي لدى الرضع والأطفال.

واو-٢- أوجه التقدّم في تطبيقات العلاج الإشعاعي للأورام[١٩]

١٣١- يُستخدم العلاج الإشعاعي المكيَّف الثلاثي الأبعاد لوصف تصميم التخطيط العلاجي بالأشعة وتنفيذه استناداً إلى بيانات صور ثلاثية الأبعاد مع تكييف كل مجال من المجالات العلاجية على حدة لعلاج الأنسجة المستهدفة فقط. وباستخدام العلاج الإشعاعي المكيّف الثلاثي الأبعاد، بتعديل الكثافة أو دون تعديلها، بات اليوم من الممكن مواءمة الجرعات الإشعاعية المقررة مع شكل الورم وبالتالي الحفاظ بشكل أفضل على الأنسجة السليمة المحيطة.

١٣٢- ويواجه المختصون بعلاج الأورام بالأشعة مشاكل محددة في مناطق من الجسم حيث تتحرّك أعضاء الجسم والأورام خلال العلاج. وبما أن إيصال جرعة الإشعاعات أصبح دقيقاً أكثر فأكثر، فإن حركات أعضاء الجسم والأورام قد أضحى عاملا يؤثّر في إيصال الجرعة بإتقان. وهذه مسألة مثيرة بالخصوص في الأورام التي تصيب منطقة الصدر التي تتحرّك خلال التنفّس. وهو ما يحدث أيضاً في الأورام التي تصيب الحنجرة والبطن (الكبد) والبروستات والمثانة، وكذلك منطقة الحوض على العموم، وهي مناطق تتحرك جميعها خلال التطبيقات العلاجية وبين التطبيقات العلاجية.

١٣٣- وبفضل تطوير علاج إشعاعي متحكّم في الجهاز التنفسي، يمكن اليوم مراعاة حركة الورم بدقة شديدة. وفي العلاج الإشعاعي المتحكّم في الجهاز التنفسي والموجّه بالحاسوب، توضع في بطن المريض علبة بلاستيكية صغيرة مزوّدة بواسمات تمحيصية. وتتحرّك الواسمات التمحيصية خلال التنفّس، وتقوم كاميرا رقمية موصولة بوحدة معالجة مركزية برصد هذه الحركات في الوقت الحقيقي. ويحلّل برنامج حاسوبي هذه الحركات ويطلق الحزمة الإشعاعية العلاجية في اللحظة ذاتها التي تتم فيها الدورة التنفسية. وباستخدام هذه التقنية يُمكن

---

١٩ يمكن الاطلاع في الموقع GovAtom على معلومات إضافية في الوثائق ذات الصلة بوثيقة استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١.

كذلك اختيار المرحلة التنفسية. وبحسب موقع الورم، يتلقى هذا الأخير الأشعة خلال الاستنشاق أو خلال الزفير. وبذلك يكون الورم مُطوّقاً دائماً بالحزمة الإشعاعية وفي الوقت ذاته تكون الأعضاء الحساسة في مأمن من الأشعة.

واو-٣- تطورات جديدة في تكنولوجيا الطب النووي المتعلقة بدراسات القلب

١٣٤- في السنوات الثلاث الأخيرة، أحرز الطب النووي تقدّماً كبيراً، لا سيما في مجال أمراض القلب. فقد انخفضت المدة اللازمة لإجراء المسح وتقلّصت الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها المرضى إلى جانب تحسين جودة الصور على العموم، مما سمح بإجراء تشخيص أوثق وأكثر فعالية لأمراض القلب والأوعية الدموية وتحسين سير الإجراءات.

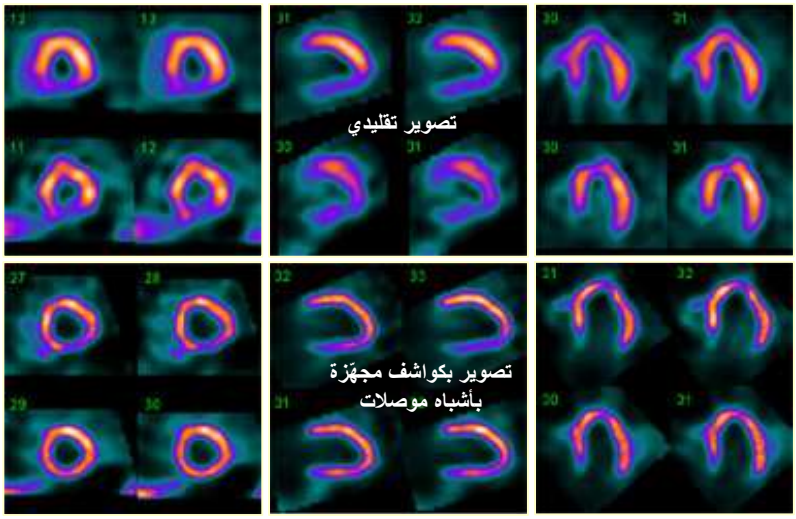
١٣٥- ولم يتغيّر طيلة السنوات الخمسين الماضية المفهوم التكنولوجي لنظم أنغر التقليدية لكاميرا أشعة غاما المستخدمة في التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد. ويستخدم هذا التصميم التقليدي بلورة يود الصوديوم المقوى بالتاليوم، وهي بلورة تومض استجابة لفوتونات أشعة غاما، فتُطلق وميضاً ضوئياً ضعيفاً تصاحبه مجموعة من صمامات المضاعفات الضوئية التي تكشف الوميض الفلوري. وهناك تكنولوجيات جديدة تجمع بين مواد الكشف الجديدة مثل تيلوريد زنك الكادميوم، واستخدام التسديد المركّز الأحادي الفتحة، وإعادة البناء الثلاثي الأبعاد، ونماذج التقاط البيانات. وفي كاميرا أنغر التقليدية، تطلق أشعة غاما بلورات يوديد الصوديوم، مما ينجم عنه ظهور وميض ضوئي، فيُحوّل بعدئذ صمام المضاعفات الضوئية الفوتونات الضوئية إلى شحنة كهربائية لتتم عملية من مرحلتين. وباستخدام كاشف مجهّز بأشباه موصلات، تُطلق أشعة غاما نوعاً مختلفاً من البلورات، مثل تيلوريد زنك الكادميوم، وهو من أشباه الموصلات التي تحوّل الفوتونات مباشرة إلى إشارة إلكترونية رقمية، وهي عملية من مرحلة واحدة.

١٣٦- ويتميّز النظام الجديد العالي السرعة بزيادة حساسية العدّ، مما يسمح بتقليص وقت الدراسة وتقليص جرعة الإشعاعات التي يتلقاها المريض، دون المساس بجودة الدراسات والقدرات التشخيصية. وباستخدام النظم الجديدة، تكون جرعة الإشعاعات الفعالة في نطاق ١٠/١، مقارنة بالجرعة التي يتلقاها المريض باستخدام تكنولوجيا الطب النووي التقليدية.

١٣٧- وتتقلّص المدة التي يستغرقها المسح لتبلغ أربع دقائق إجهاد/دقيقتين لأخذ قسط من الراحة، علماً بأن الكاميرا العالية السرعة تقدّم صوراً باستبانة محسّنة وحجماً من عيوب التروية مماثلاً للحجم الذي يقدّمه التصوير التقليدي لتروية عضلة القلب باستخدام تقنية التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد (الشكل واو-١).[٢٠]

---

٢٠ Tali Sharir, MD, Piotr J. Slomka and Daniel S. Berman, MD, Solid-State SPECT technology: fast and furious. J Nucl Cardiol 2010; 17:890–6.



الشكل واو-١ - صور لعملية تروية عضلات القلب باستخدام تكنولوجيا التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني المفرد (الإطار العلوي) وباستخدام كاميرا جديدة مخصصة لدراسة القلب ومجهّزة بكواشف بأشباه موصلات بتيلوريد زنك الكادميوم (الإطار السفلي). وقد أجريت هذه الدراسات بالتسلسل على المريض ذاته. ويمكن بسهولة إدراك الاختلاف في استبانة الصورة (تكرّم بتقديم الصورة البروفيسور ب. هوتون والبروفيسور س. بينهايم، من مستشفيات كلية لندن الجامعية، لندن، المملكة المتحدة).

١٣٨- وتسمح النظم الجديدة بإمكانية الجمع بين الصور الجزيئية للطب النووي والتفاصيل التشريحية التي تقدّمها أجهزة التصوير المقطعي الحاسوبي. ويُتيح هذان النوعان المختلفان من المعدّات اللذان يندمجان ضمن "النظم الهجينة"، إجراء تقييم يجمع بين الوظيفة والهيكل في إجراء تشخيصي واحد للحصول من كل طريقة على حدة على أكبر قدر من المعلومات. وهذا تقدّم هائل في مجال رعاية المرضى ويجري تطبيقه في طب القلب النووي وسيُستخدم لا محالة على نطاق أوسع في المستقبل في مجالات إكلينيكية أخرى، مثل علاج الأورام.

زاي- البيئة

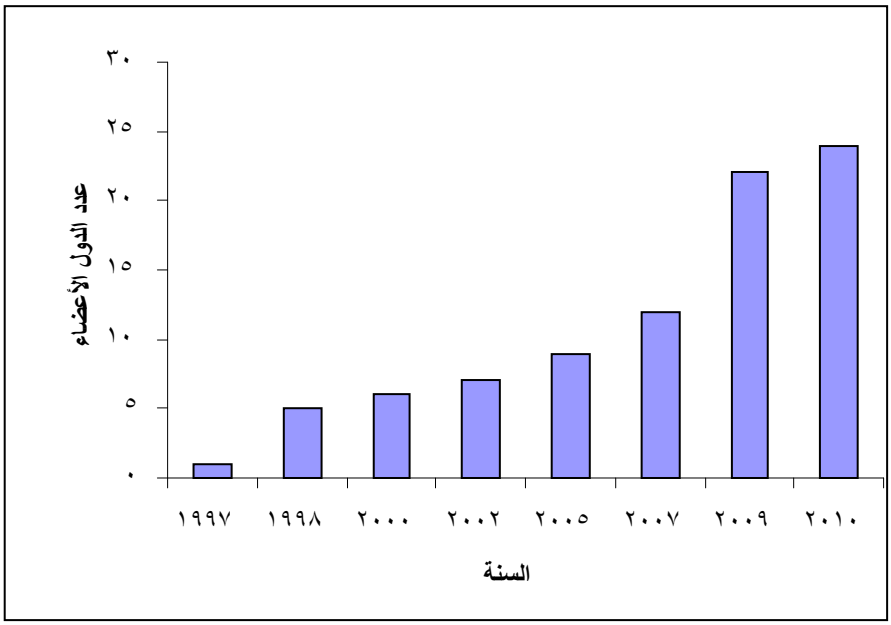
زاي-١- التكنولوجيا النووية للإنذار المبكر بتكاثر الطحالب البحرية الضارة

١٣٩- تُعزى ظاهرة تكاثر الطحالب البحرية الضارة إلى نمو وتكدّس الطحالب الصغيرة جداً، لا سيما كنتيجة للأنشطة البشرية. وتتسرّب العوالق النباتية السامة من مياه البحر كأغذية بواسطة المحاريات التي تكدّس بعد ذلك مستويات من توكسينات الطحالب يمكن أن تكون مُميتة للبشر أو لأي كائنات أخرى تستهلكها. وبالإضافة إلى حالات الوفيات والتسمّم والآثار السميّة التي أفادت بها البلدان، قدّم برنامج العمل العالمي لحماية البيئة البحرية من الأنشطة البرية التابع لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة، معلومات في عام ٢٠٠٢ تُفيد بخسائر اقتصادية كبيرة بسبب تكاثر الطحالب الضارة، وبلغت هذه الخسائر مئات الملايين من الدولارات .

١٤٠- وفي الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الأوروبي يجب أن تكون كل الحاويات والشحنات التي تنقل المحاريات مصحوبة بعلامة وبشهادة عن صحتها تبيّن مكان المنشأ، والجهة التي حصدت المحاريات وتاريخ حصدها. وينبغي أن تكون هذه المعلومات ملازمة للمحاريات خلال نقلها، وطيلة معالجتها وتوزيعها في كل المراحل إلى أن تصل إلى البيع بالتجزئة، حتى يتسنى تعقب أثر المنتج في حالة ما إذا ظهرت أي مشكلة صحية. وفي عام ٢٠١٠، بدأ الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة الأمريكية في دراسة استوجاب شهادة للمحاريات الخالية من توكسينات الطحالب الضارة التي لا تزال قيد النظر. وفي حالة ما تم اعتماد هذا التشريع، سيتم حظر جميع عمليات استيراد المحاريات الباهظة الثمن دون هذه الشهادة في المستقبل. وفي عام ٢٠٠٩، لاحظ الفريق المعني بالملوّثات (CONTAM) التابع للهيئة الأوروبية، والذي يدرس الملوّثات في السلسلة الغذائية أن "الطريقة الحالية للاختبار الأحيائي القائم على استخدام الفئران لا تعتبر أداة مناسبة لأغراض المراقبة." وخلال الاجتماع السنوي لرابطة الهيئات التحليلية الدولية (وهي الرابطة العلمية المكرّسة للامتياز التحليلي) في عام ٢٠١٠، اعتُبِرت طريقة اختبار ربط أجهزة الاستقبال، وهي تكنولوجيا نووية تعتمد على استخدام التوكسينات المرقومة إشعاعياً، كواحدة من الطريقتين البديلتين المتطورتين اللتين تم اختبارهما بنجاح في دراسات التصديق المسبق، وستكون هذه الطريقة مهمة بالنسبة للهيئات الرقابية الوطنية في مجال تصدير المحاريات.

١٤١- وتعتبر هذه الطريقة كذلك أداة بحوث فعالة لإجراء تقييم أفضل لديناميكيات توكسينات الطحالب، تبعاً للتغييرات الفيزيائية الكيميائية في الأعمدة المائية التي يمكن أن تساعد في تحديد العوامل التي تنظّم مستوى السميّة وتسهّل وضع نماذج تنبُّؤية لتكاثر السميّة. وفي مركز متعاون مع الوكالة في الفلبين، تجري بحوث علمية باستخدام تقنية اختبار ربط أجهزة الاستقبال لتقييم قدرة توكسينات تكاثر الطحالب الضارة على التكدّس في أنواع المأكولات البحرية، كبلح البحر والمحار.

١٤٢- وتتزايد الطلبات من الدول الأعضاء على تنفيذ هذه التكنولوجيا، كما يبيّن الشكل زاي-١. وبناء على ذلك، من المتوقع أن يتزايد استخدامها في العقد القادم.



الشكل زاي-١ - العدد الإجمالي للدول الأعضاء التي طلبت نقل طريقة اختبارات ربط أجهزة الاستقبال من خلال مشاريع التعاون التقني.

زاي-٢- استخدام النويدات المشعة الطويلة العمر لفهم العمليات البيئية

١٤٣- استُخدمت النويدات المشعة الطويلة العمر، بفضل مستويات تقلبها العالية في الطبيعة وفي مختلف الخصائص الفيزيائية والكيميائية، لدراسة العمليات البيولوجية الكيميائية (مثل الهجرة والبحوث الأوقيانوغرافية وبحوث الترسّب). وتُستخدم الخصائص الإشعاعية لهذه النويدات وتقلبات النسب من الأصل إلى النسل، تبعاً للوقت، في قياسات التاريخ (على سبيل المثال، تحديد التاريخ بواسطة الكربون-١٤ واليورانيوم) ومن أجل التحقّق من العمليات الطبيعية التي تعتمد على الوقت، مثل دراسات الهجرة أو الترسّب.

١٤٤- ويمكن أن تُستخدم هذه النويدات المشعة الطويلة العمر كمقتفيات طبيعية وبشرية المنشأ وكعدّادات مشعّة في البيئة، مما يسمح للباحثين بتحديد تاريخ العمليات البيئية الواسعة النطاق ودراستها، وكذلك الحصول على معلومات لا يمكن الحصول عليها لولا هذه الطريقة. وبالإضافة إلى ذلك، وبسبب الشكوك التي تخيّم على السيناريوهات المناخية في المستقبل والردود البيئية المحتملة، تتجّه البحوث أكثر فأكثر نحو المقتفيات المعتمدة على النويدات المشعة ومنهجيات تحديد التاريخ لتحسين فهم العمليات البيئية والتغيرات الحاصلة في البيئة البحرية وفي المياه العذبة والبيئة البرية.

١٤٥- وتوفّر النويدات المشعة أدوات لاستقصاء موارد المحيطات، والعمليات الأوقيانوغرافية، والتلوّث البحري على أساس كمي، كما تساعد في الوقت ذاته على التصدي لمشاكل إدارة المناطق الساحلية. ونظراً لأن النويدات المشعة تحتوي على "عدّاد" بسبب اضمحلالها مع مرور الوقت، فمن الممكن استخدامها لدراسة العمليات البيولوجية والجغرافية والكيميائية الزمنية في البيئة البحرية.

١٤٦- وخلال العقدين الماضيين، وبسبب التطور السريع في أجهزة قياس الطيف الكتلي غير العضوي، بات استخدام أجهزة قياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث، لا سيما أجهزة قياس طيف كتل الحقل القطاعي البلازمي المقرون بالحث والمجهّزة بأجهزة تحليل الحقل القطاعي المزدوج التركيز، أداة استكمالية وبديلة للأساليب التحليلية الإشعاعية التقليدية (مثل قياس طيف أشعة ألفا وقياس الوميض السائل) من أجل تحليل النويدات المشعة الطويلة العمر. وتسيطر تقنيات قياس الطيف الكتلي على مجال التحليل النظيري لأنها تستغرق وقتاً أقل، ويمكن أن تكون لها حدود أدنى للكشف، وهي أدق وملائمة أكثر. ويعتبر قياس الطيف الكتلي البلازمي المقرون بالحث في بعض الأحيان التقنية الوحيدة القادرة على تحديد "البصمات" النظيرية، لا سيما فيما يتعلق بالنظائر الثانوية لأي عنصر.

١٤٧- ويمكن تحديد مصادر التلوّث البيئي بالوفرة النظيرية و/أو تحليل النسبة النظيرية، وهو ما يمكن استخدامه كنوع من "بصمات" التلوّث. ويُتوقّع أن تطلق المواد الكيميائية الناتجة عن مصادر متميزة جراء عمليات مختلفة بالأساس تكوينات نظيرية محدّدة يمكن استخدامها لتحديد المصادر.

١٤٨- وبمجرد تحديد مختلف المصادر (كالمصادر البشرية المنشأ أو المصادر الطبيعية المنشأ)، يمكن استخدام الوفرة النظيرية والنسبة النظيرية لتحديد كمية توزيع المصادر. وتشكّل العلامات النظيرية الأساس لاستقصاء التغيرات التاريخية والبيئية لمواقع العينات المختارة.

حاء- الموارد المائية[٢١]

١٤٩- تجري الاستعانة بالدراسات التي تستخدم النظائر المستقرة والنظائر المشعة لدعم الإدارة الشاملة للمياه الجوفية نظرا لأن الوقت الذي تستغرقه تلك التقنيات وجدوى تكاليفها يحظيان باعتراف على نطاق أوسع. وثمة أمثلة عديدة حديثة العهد حيث تم استخدام تقنيات نظيرية لدعم إدارة المياه الجوفية. فمثلا، تم تأويل بيانات النظائر في مستجمع غواراني المائي في جنوب أمركيا، وحوض تادلة بالمغرب، والمستجمع المائي الصخري النوبي في أفريقيا الشمالية، ليس فقط لتأكيد الدراسات الهيدرولوجية التقليدية ولكن لتقديم أفكار عن تدفق المياه الجوفية وديناميكيات مستجمعات المياه. وتم استخدام النظائر، على وجه الخصوص، في تلك المجالات للتعرف على مصادر وآليات تجدد المياه الجوفية، وتحديد عمر المياه الجوفية ومعدل تحركها، وتحديد كمية امتزاج المياه الجوفية بين المستجمعات المائية. ومن المتوقع أن يشهد تطبيق التقنيات النظيرية في عمليات الاستقصاء الهيدرولوجي عامة وفي الإدارة الشاملة لموارد المياه الجوفية خاصة تزايداً كبيراً في السنوات المقبلة.

---

٢١ يمكن الاطلاع، في الموقع GovAtom، على معلومات إضافية في الوثائق ذات الصلة بوثيقة *استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١١*.

طاء- إنتاج النظائر المشعة، والتكنولوجيا الإشعاعية

طاء-١- النظائر المشعة والمستحضرات الصيدلانية الإشعاعية

طاء-١-١- عوامل الاستهداف الجزيئي لأغراض التصوير والعلاج

١٥٠- تتطلب أساليب التصوير القائمة على النظائر المشعة من قبيل التصوير المقطعي الحاسوبي بالانبعاث الفوتوني والتصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني التوافر المستمر لمستحضرات صيدلانية إشعاعية جديدة (مكوّنات كيميائية أو بيولوجية مرقومة بالنظائر المشعة) للتصدي لمشاكل التشخيص الطبي. وتُستخدم المستحضرات الصيدلانية الإشعاعية ذات الخصائص العالية التحديد باعتبارها واسمات بيولوجية للعمليات التي تطرأ على الجزيئات عند الإصابة بمرض ما، وهو نهج معروف باسم "التصوير الجزيئي"، كمؤشر مبكر للإصابة بالمرض أو كمعلمة موضوعية لقياس فعالية العلاج، لا سيما لدى مرضى السرطان. وقد تم تصميم عدد من المكوّنات المرقومة لاستهداف عمليات بيولوجية لم يتم استكشافها من قبل. ويتطلب ذلك إجراءات فائقة الفعالية لإعدادها، مما أدى إلى صوغ نُهج بديلة. وفي ميدان التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، يجري بهمّة استقصاء نظم مولّدات جديدة وسيكلوترونات مدمجة لإنتاج الغاليوم-٦٨ والفلور-١٨ والكربون-١١، ووحدات توليف نمطية مؤتمتة جديدة تعتمد على مُسيّلات مجهرية.

١٥١- ويشكل إيجاد طرائق إضافية فعالّة للعلاج من السرطان أكثر التحديات إلحاحاً في الطب الإشعاعي. ولقد تم توسيع نطاق نهج التصوير التشخيصي الجزيئي بنجاح واستخدامه في تقديم جرعات علاجية من النشاط الإشعاعي لموضع الورم للقضاء على الخلايا السرطانية (العلاج بالنويدات المشعة). وتحقّق ذلك بواسطة إدماج نويدات مشعة علاجية ملائمة في ناقل جزيئي يتراكم بسرعة، بعد إدخاله في الأجسام الحية، في موضع الورم نتيجة لمرونته الخاصة للاستهداف الجزيئي الذي تختاره الخلايا السرطانية. وهكذا، يبقى النشاط الإشعاعي في موضع الورم بصورة ملائمة وبقوة، أما الجسيمات المنبعثة خلال اضمحلال النويدات المشعة فتتفاعل عن كثب مع الخلايا السرطانية دون الحاجة إلى تخطي أي حواجز بيولوجية. وأورام الأعصاب والغدة الصمّاء هي إحدى الحالات الأكثر ملاءمة لهذا العلاج بالنويدات المشعة باستخدام الببتيدات المرقومة باليتريوم-٩٠ وباللُّتِشيُوم-١٧٧ المسماة على التوالي دواتاتوك ودوتاتاي. والمزايا الأخرى للعلاج بالنويدات المشعة هي توافر عدد كبير من النويدات المشعة التي لديها خصائص تتناسب مع التطبيقات العلاجية (مثل اليتريوم-٩٠ واللُّتِشيُوم-١٧٧ والنحاس-٦٧ والنحاس-٦٤ والرنيوم-١٨٨ والبيزموث-٢١٣)، التي يمكن ربطها كيميائياً بطائفة من الجزيئات الحيوية الناقلة للاستهداف الانتقائي لأنواع مختلفة من الخلايا السرطانية.

طاء-١-٢- أمن إمدادات الموليبدينوم–٩٩ والتكنِتيوم–٩٩م[٢٢]

١٥٢- أدّت حالات النقص الشديد التي شهدتها، منذ نهاية عام ٢٠٠٧ وحتى الفصل الثالث من عام ٢٠١٠، إمدادات الموليبدينوم–٩٩ المنتج انشطارياً، وبالتالي مولّدات التكنتيوم–٩٩م، إلى زيادة ملموسة في الاهتمام بتقصّي وتطوير تكنولوجيات بديلة لإنتاجهما.[٢٣] واستخدام التكنولوجيات التي لا تقوم على استعمال اليورانيوم

---

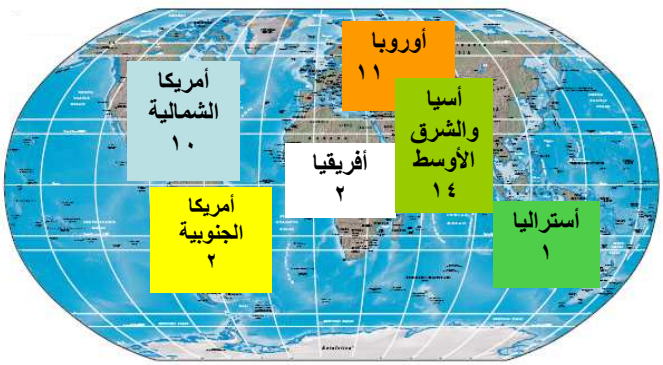
٢٢ انظر أيضاً القسم دال–٢ بعنوان "مفاعلات البحوث"

٢٣ يمكن الاطلاع على معلومات إضافية في المرفق السابع بوثيقة استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٠.

الشديد الإثراء وتناول ما يتصل بذلك من قضايا ذات صلة بالتطوير، بالإضافة إلى استخدام النُهُج القائمة على المعجلات، كلها مسائل من شأنها أن تساعد على تقليص الاعتماد على المفاعلات المتقادمة التي توفر الخدمات لصناعة الموليبدينوم–٩٩ الانشطاري. وعلى سبيل المثال، يجري تنفيذ البحوث في ميدان إنتاج الموليبدينوم–٩٩ بواسطة تفاعلات ضوئية نووية انطلاقاً من أهداف مصنوعة من الموليبدينوم–١٠٠ الشديد الإثراء [موليبدينوم–١٠٠ (أشعة غاما، نيوترونات) موليبدينوم–٩٩] داخل معجّلات إلكترونية بقدرة تتراوح بين ١٥ و٢٠ ميغاإلكترون فلط.[٢٤]

١٥٣- ويقترح باحثون كنديون إنتاجاً مباشراً للتكنِتيوم–٩٩م على أساس السيكلوترون بوصفه خياراً عملياً للقيام، ولو جزئياً، بالتخفيف من حالات النقص في البلدان التي يمكنها الاستفادة من السيكلوترونات ذات الطاقة المنخفضة أو المتوسطة. ويلزم مزيد من الاستقصاء لتحديد العوامل الاقتصادية المرتبطة بالإنتاج المباشر للتكنِتيوم–٩٩م على أساس يومي بالكميات المطلوبة. وتتوقف طريقة إنتاج التكنِتيوم–٩٩م مباشرة بواسطة التفاعل 'موليبدينوم–١٠٠ (بروتون، ٢ نيوترون) تكنِتيوم–٩٩م' على الاستفادة من السيكلوترونات القادرة على تعجيل البروتونات بما يتراوح بين ٢٠ و٣٠ ميغاإلكترون فلط، والتي يقارب عددها الأربعين سيكلوتروناً (الشكل طاء-١). ومن الضروري توافر أهداف من الموليبدينوم–١٠٠ الشديد الإثراء لهذه الطريقة بغية كفالة نقاء نويدات التكنِتيوم–٩٩م المشعة المطلوبة من أجل الاستخدامات الطبية.

١٥٤- وبالتالي، فبالنسبة لكلا النهجين المذكورين أعلاه، ستشكل التكنولوجيا اللازمة لاسترداد وإعادة تدوير أهداف الموليبدينوم–١٠٠ المثرى مطلباً مسبقاً وأساسياً، وسيلزم مع ذلك إعداد ما هو مناسب من البروتوكولات والطرائق.



الشكل طاء-١ - توزيع السيكلوترونات التي تتجاوز طاقتها ٢٠ ميغاإلكترون فلط لإنتاج النظائر الطبية (أعدّها: الدكتور د. شلاير، مختبر بروكهيفن الوطني، الولايات المتحدة الأمريكية، استناداً إلى معلومات من كبار صانعي السيكلوترونات).

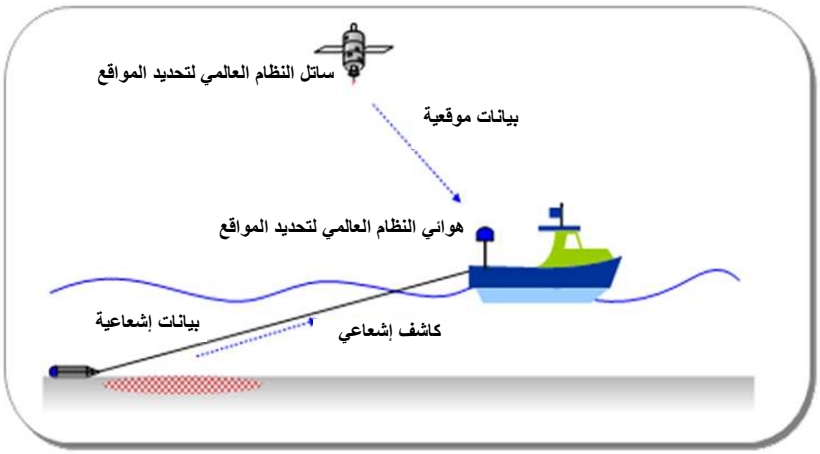
---

٢٤ تقرير وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي عن" توريد النظائر المشعة الطبية – استعراض التكنولوجيات المحتملة لإنتاج الموليبدنوم-٩٩ التكنتيوم-٩٩م."

طاء-٢- تطبيقات التكنولوجيا الإشعاعية

طاء-٢-١- النـُهـُج المتكاملة للاقتفاء الإشعاعي والمحاكاة الحاسوبية من أجل التصرّف في الترسبات

١٥٥- على مدى الأعوام القليلة الفائتة، تزايد استخدام نهج متكامل للنمذجة والاقتفاء بغية التصدّي للمشكلة المعقـّدة المتمثلة في تحرك الترسبات على طول الساحل والقاع البحري. وتوفـّر تقنيات الاقتفاء الإشعاعي معلومات كمية مثل السرعة والسماكة ومعدل نقل الترسبات، ويمكن استخدام هذه المعلومات للتحقق من صحة النماذج الرياضية. وجرى تطوير نظم متقدمة جديدة (الشكل طاء–٢) مثل نظم مُدَمَّجة لالتقاط البيانات مقرونة بنظام لتحديد المواقع GPS من أجل رصد معدلات تركيز المقتفيات الإشعاعية على أساس خطوط العرض والطول؛ ونظم حقن محسّنة لحقن المقتفيات الإشعاعية على نحو مأمون وميسّر؛ فضلا عن مجموعات برامج حاسوبية جديدة لمعالجة البيانات وتفسيرها بدقة. وعلى سبيل المثال، فقد جرى خلال عامي ٢٠٠٩ و٢٠١٠ في الهند، تنفيذ عمليات تقصٍّ على أساس الاقتفاء الإشعاعي باستخدام مسحوق زجاجي مرقوم بالسكانديوم–٤٦ بوصفه مادة اقتفائية، وذلك في مكبٍّ قائم في مرفأ فيزاكهاباتنام وفي مكبَّيْن مقترحين في مرفأ كولكاتا. وأظهرت النتائج أن الموقع القائم وأحد الموقعين المقترحين ملائمان لرمي الترسبات المجروفة، في حين أن الموقع المقترح الآخر غير ملائم إذ لوحظ تحرك كميات ضخمة من الترسبات باتجاه إحدى القنوات الملاحية.



الشكل طاء-٢- رسم لنظام عداد متكامل بأشعة غاما تابع للنظام العالمي لتحديد المواقع لأغراض إجراء دراسات اقتفاء أثر ترسّب المواد في المناطق الساحلية.

طاء-٢-٢- معجلات حزم الأشعة الإلكترونية المنخفضة الطاقة

١٥٦- في سوق المعجلات الإلكترونية الصناعية لعام ٢٠١٠، تم تسجيل أسرع نسبة من النمو (موقع www.Radtech.org) في المعجلات التي تتراوح قدرتها من أقل من ١٠٠ كيلوإلكترون فلط وحتى بضع مئات من الكيلوإلكترون فلط، التي تولـّد طاقة منخفضة بما فيه الكفاية للتمكن من تدريعها باستخدام معدن عالي الكثافة – المعدن الأشيع استخداماً هو الرصاص، على الرغم من البدء مؤخراً باستخدام الفولاذ. ويمكن تركيب غالبية

معجلات الحزم الإلكترونية المنخفضة الطاقة خطياً ضمن عمليات صناعية متواصلة كقطاعي الطباعة والتغليف مثلا.

١٥٧- وعند معالجة الأحبار والدهانات واللصاقات بواسطة الحزم الإلكترونية، تنتفي الحاجة إلى استخدام مكونات عضوية متطايرة، ممّا يتيح للمصنّعين تحقيق سرعات إنتاجية عالية مقرونة باستهلاك أدنى للطاقة وبآثار بيئية مخفّضة. وفي هذه التطبيقات، تتيح تكنولوجيا الحزم الإلكترونية تخفيضَ استهلاك الكهرباء بنسبة قد تصل إلى ٩٠% بالمقارنة مع التجفيف والمعالجة الحراريين التقليديين. وتتوافر معجلات الحزم الإلكترونية المنخفضة الطاقة المدمجة والمعتدلة الكلفة من عدة مصنّعين للاستخدامات المخبرية ولإدماجها ضمن عمليات عالية السرعة للدهان والطباعة ومعالجة الأسطح. ويرد في الشكل طاء–٣ مثال عن آلة من هذا النوع تعمل بقدرة تتراوح بين ٨٠ و١٢٠ كيلوإلكترون فلط.

الشكل طاء-٣- وحدة ذاتية التدريع لتطوير تطبيق معجلات الحزم الإلكترونية المنخفضة الطاقة (المصدر: http://www.aeb.com/)

١٥٨- ومن بين الاستخدامات الأخرى لمعجلات الحزم الإلكترونية المنخفضة الطاقة، هناك الربط المتقاطع للأغشية القابلة للتقليص حرارياً وذات المكوّنات النانومترية المستخدمة، على سبيل المثال، في تغليف الأطعمة. وتتيح هذه الأغشية إطالة فترات بيع منتجات اللحوم والدواجن والألبان، ويتم استخدامها لاستحداث غلافات مقاومة للتلاعب. وقد تزايد خلال العامين الماضيين استخدام علاج مواد التغليف بواسطة الحزم الإلكترونية والتطبيقات ذات الصلة استجابة لمتطلبات السوق الآخذة في التطور وللطلبات الداعية إلى الابتكار.