استقصاء المواد الخاضعة للضمانات ٧/٢٤

بقلم فنسن فورنييه

في حين أن عمليات التفتيش في صُلْب أنشطة التحقق التي تضطلع بها الوكالة الدولية للطاقة الذرية، غير أن جهود المفتشين تُرفد على نحو متزايد بتكنولوجيات مراقبة تعمل على مدار الساعة. وهو ما يتيح للوكالة تعزيز فاعلية ضماناتها والارتقاء بكفاءتها في الوقت نفسه.

ويحقق مثل هذا الرصد للمواد والمرافق النووية استمرارية معرفية، وهو ما يمثل الضمانة النهائية بأن المواد لم تُحرَّف عن استخداماتها السلمية. وبدلاً من أن يستلزم الأمر وجود مفتشين، تقوم الكاميرات وكاشفات الإشعاعات بتسجيل العمليات التي تستغرق وقتاً طويلاً، مثل إعادة تزويد مفاعلات الماء الخفيف بالوقود، فقد تستغرق تلك العملية أسابيع عدة. وبعدئذ إما أن تُنقل البيانات بطريقة آمنة إلى الوكالة في الزمن الحقيقي، أو بإمكان المفتشين استعراضها في الموقع خلال عملية التفتيش المعنية والتأكد فيما إذا كانت الأنشطة تتم على النحو المعلن.

وتُجمع أكثر من مليون وحدة من بيانات الضمانات المشفَّرة من خلال ما يربو على ١٤٠٠ كاميرا مراقبة، و٤٠٠ من أجهزة استشعار الإشعاعات وغيرها من أجهزة الاستشعار حول العالم. ويضمن أكثر من ٠٠٠ ٢٣ من الأختام المركّبة في المرافق النووية احتواء المواد والمعدات.

عيون يقظة

يتألف **نظام المراقبة من الجيل التالي** لدى الوكالة من كاميرات ضمن حاويات تُظهر علامات التلاعب، ومزوَّدة ببطاريات طويلة الأجل يمكن أن توفر الكهرباء اللازمة لفترات ممتدة دون الحاجة إلى طاقة خارجية. وتُصان صحة وسرية بيانات المراقبة المتأتية من نظام المراقبة من الجيل التالي من خلال ثلاث طبقات مختلفة من حماية البيانات التشفيرية وطبقات متعددة من التكنولوجيا المادية والخاملة والنشطة لإظهار علامات التلاعب. وفي صميم كاميرات نظام المراقبة من الجيل التالي يوفر مكوّن المراقبة الرئيس الآمن الحماية للمكونات الإلكترونية الحاسمة وأجهزة الاستشعار البصرية، وكذلك الأسرار التشفيرية من خلال آلية نشطة لإظهار علامات التلاعب.

وتُركب الكاميرات ضمن مناطق التخزين، وفي أحواض الوقود المستهلَك وبالقرب منها، وعند جميع نقاط العبور التي يمكن أن تمرّ من خلالها المواد النووية. وقد تُزود الكاميرات بعدسة بصرية تُعرف باسم "عين السمكة" بحيث تتمكن تلك الكاميرات من التقاط صور بانورامية. وتلتقط الكاميرات الصور على فترات محددة مسبقاً، وتتراوح الفترة الفاصلة بين صورة وأخرى من ثانية واحدة إلى عشر دقائق أو أكثر، إذ يعتمد ذلك على احتياجات التحقق. وعلى سبيل المثال، في مرافق الإثراء، تسجّل الكاميرات الحركة بوتيرة أكبر، فيما تكون الفترة الزمنية الفاصلة في مناطق التخزين أطول. وفي هذا الصدد، يقول غابور هادفي، رئيس فريق مراقبة الضمانات لدى الوكالة: "في حال أراد أحدهم تثبيت رافعة لنقل مواد، كما هو الحال في مرافق التخزين، بإمكاننا الكشف عن أي أنشطة مشبوهة حتى لو التُقطت الصور بوتيرة أقل".

ويوضح هادفي قائلاً إن التقاط الصور بدلاً من تسجيل الأفلام المستمر أكثر فائدة لأسباب عدة، فمن شأن ذلك إطالة عمر البطارية، كما أن عملية معالجة الصور وتحليلها أكثر سهولة مما عليه الحال مع الأفلام.

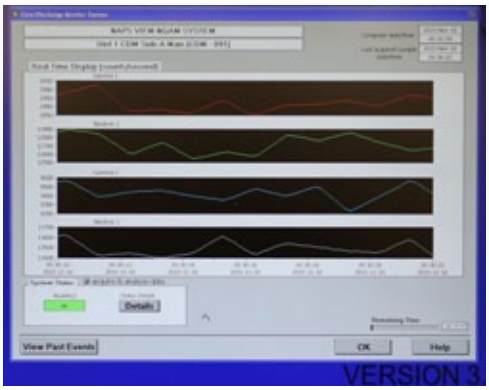
وتُعالج بيانات المراقبة مسبقاً لاستعراضها بالاستعانة ببرمجيات متخصصة تكشف عن الحركة، ويقوم المفتشون بفحص تلك البيانات وتقييم فيما إذا كانت متسقة مع العمليات الاعتيادية والمبلَغ عنها في المرفق.

التأكد من الإشعاعات عن بُعد

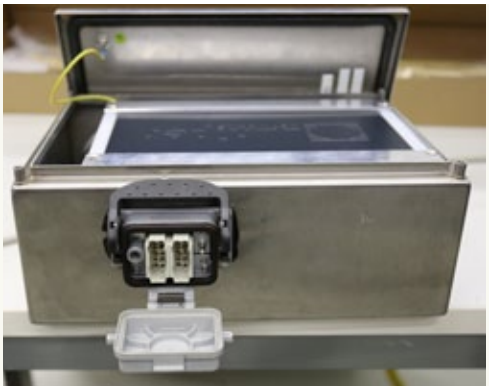
كاميرات المراقبة مصممة لمراقبة الحركة، لكن ليس بمقدورها أن تكشف عن المستويات الإشعاعية. وتحقيقاً لتلك الغاية، تستخدم الوكالة نُظم رصد آلية للقياس غير المتلف للقياس غير المتلف تشمل كاشفات إشعاعات لقياس الإشعاعات النيوترونية وأشعة غاما إلى جانب أجهزة استشعار مختلفة لقياس الحرارة والتدفق وغيرها من البارامترات. وهنا يقول تيري بوشيه، رئيس فريق نُظم الرصد الآلي لدى الوكالة: "هذه تُركَّب في مواقع محددة لتحديد خصائص المواد النووية والتحقق منها، ورصد حركة الوقود المستهلَك، وجمع البيانات المشفَّرة وإرسالها على مدار الساعة".

ويمكن تركيب هذه النظم لجمع البيانات في مناطق يتعذر على المفتشين الوصول إليها بسبب الحجم الكبير للإشعاعات. ويتابع بوشيه قائلاً إن هناك نحو ١٦٠ من النظم التي تشمل ما مجموعه ٧٠٠ كاشف وجهاز استشعار المركَّبة في أكثر من ٤٠ بلداً. وعلى سبيل المثال يتم تركيب نحو ٢٠ جهاز استشعار لمفاعل القوى الذي يعمل بالماء الثقيل المضغوط "مفاعل كاندو".

وتُستخدم أنواع مختلفة من النظم الآلية للأنواع المختلفة من المرافق، مثل مرافق الإثراء والمفاعلات ومرافق خزن الوقود المستهلك ومرافق إعادة المعالجة. وفي العادة يتم تحليل البيانات المجمَّعة من رصد الإشعاعات جنباً إلى جنب مع المراقبة الفيديوية لتتبع حركة المواد النووية في المرفق، إذ يستعين المفتش بالصور ليتمكن عن بُعد من مراقبة ما يمكن أن يتسبب في تفاوت المستويات الإشعاعية.



ويقوم **جهاز الرصد المتكامل للوقود** بتتبُّع وتعداد الوقود المفرَّغ من قلب المفاعلات التي تعمل بالماء الثقيل المضغوط، ومنها مفاعلات كاندو. وفي مثل هذه الأنواع من المفاعلات لابد من استبدال حُزم الوقود عدة مرات في اليوم الواحد. وتقوم نظم الرصد بتتبُّع هذه الحُزم أثناء تحميلها ونقلها في قلب المفاعل وتفريغها في حوض الوقود المستهلك باستخدام عدد من كاشفات الإشعاعات النيوترونية وأشعة غاما.



وبعد نحو خمسة أعوام من التبريد في حوض الوقود المستهلك، يكون الوقود جاهزاً لنقله إلى موقع تخزين، وفي العادة يكون ذلك في حدود كيلومترات معدودة من موقع المفاعل. وبالنسبة للنقل، يُنقل الوقود المستهلَك إلى براميل خاصة يُركب عليها **نظام نقال للكشف عن النيوترونات** لقياس مستوى الإشعاع للتأكد من عدم حدوث أي تغيير في المحتوى أثناء عملية النقل. ويعتمد هذا الجهاز على نظام الكشف عن النيوترونات وباستطاعته جمع وتخزين البيانات لمدة تصل إلى ثمانية أسابيع باستخدام طاقة البطارية ودون الحاجة إلى خدمته.

وعند الوصول إلى موقع التخزين، يُزال النظام النقال للكشف عن النيوترونات ويُنقل محتوى البراميل إلى الصوامع. ويُركب **جهاز رصد أشعة غاما عند مداخل الصوامع** قبل عملية النقل، وترصد كاشفات أشعة غاما داخل الجهاز المذكور عملية التحميل. وهذا الجهاز متصل بخزانة تُخزن فيها البيانات. ويعمل هذا النظام بالتزامن مع المراقبة بالكاميرا من أجل التقاط جميع حركات عملية النقل.

رصد قوى مفاعلات البحوث

تُستخدم نظم محددة لرصد قوى مفاعلات البحوث النووية. ويُستخدم **جهاز رصد القدرة الهيدرولوجي الحراري المتقدم** لرصد مخرجات قوى مفاعلات البحوث من خلال قياس الحرارة وتدفق المياه في دوائر تبريد تلك المفاعلات. وفي حال تجاوزت القوى المحسوبة بناء على عملية الرصد حداً معيناً يقوم المفتش حينها بالاستقصاء لتحديد فيما إذا كان المفاعل يعمل على النحو المعلن. وقد تشير قدرة الخرج الحراري التي تفوق ما هو مُعلن إلى احتمال إنتاج البلوتونيوم، وهو ما يشكل خطر انتشار.

إعادة المعالجة

أثناء عملية إعادة المعالجة النووية لوقود اليورانيوم المستهلك، يُسترد البلوتونيوم القابل للانشطار من الوقود النووي المشعَّع. ويُعاد تدوير هذا البلوتونيوم المعاد معالجته للحصول على وقود موكس النووي للمفاعلات الحرارية. واليورانيوم المعاد معالجته، الذي يشكل جُلّ مادة الوقود المستهلك، يمكن أن يُعاد استخدامه أيضاً كوقود. ويمثل وجود البلوتونيوم خطر انتشار على وجه التحديد، ويتم رصد العمليات المختلفة في محطات إعادة المعالجة باستخدام معدات آلية. وعلى سبيل المثال، تم تصميم ما يربو على ٢٠ نظاماً محدداً تشمل المئات من كاشفات الإشعاعات النيوترونية وأشعة غاما لمحطة روكاشو لإعادة المعالجة في اليابان. وتعمل تلك المحطة، التي تُعد إحدى أكبر محطات إعادة المعالجة في العالم، بطاقة سنوية لتحويل ٨٠٠ طن من اليورانيوم أو ٨ أطنان من البلوتونيوم سنوياً إلى وقود. وتُنقل بيانات الرصد المجمّعة كافة في الزمن الحقيقي وعبر شبكة مخصصة وآمنة إلى مركز التفتيش التابع للوكالة الواقع ضمن المحطة نفسها.

تتبُّع اليورانيوم-٢٣٥ في محطات الإثراء

في عام ٢٠١٥ طوَّرت الوكالة جهازاً لرصد الإثراء إلكترونياً خُصِّص لقياس معدل إثراء اليورانيوم في مرافق الإثراء بالطرد المركزي الغازي. وتقوم مثل هذه المرافق بإثراء اليورانيوم من خلال زيادة نسبة نظائر اليورانيوم-٢٣٥ تدريجياً، وهي القادرة على استدامة تفاعل انشطاري متسلسل.

ويقيس الجهاز المذكور خصائص اليورانيوم بشكله الغازي - سادس فلوريد اليورانيوم - المتدفق عبر أنابيب المعالجة من سلسلة الطاردات المركزية التعاقبية في محطة الإثراء. وتقيس عقدة الاتصال الأساسية، المتمثلة في كاشف أشعة غاما يعتمد على بلورات يوديد الصوديوم، كمية اليورانيوم-٢٣٥ في الأنبوب، فيما تمكّن أجهزة استشعار الضغط والحرارة الجهاز من تحديد الكمية الإجمالية لليورانيوم في شكله الغازي. ومن خلال الاثنين، يتمكن الجهاز من حساب وتخزين أو نقل معدل الإثراء في الزمن الحقيقي إلى المقر الرئيسي للوكالة. ويمكن تركيب الجهاز ضمن نسَق لرصد معدلات إثراء المواد الداخلة إلى، أو الخارجة من، سلسلة الطاردات المركزية التعاقبية الغازية المستخدمة في الإثراء.

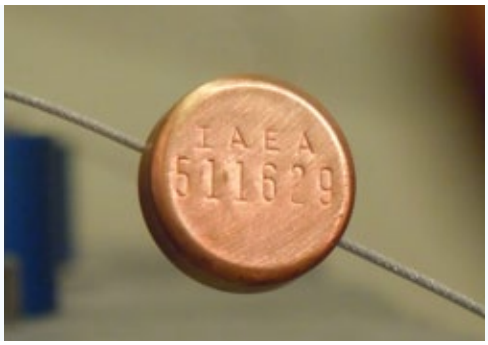
وتوضع جميع المكونات في صناديق مختومة متصلة بأنابيب خاصة وجميع هياكلها مختومة. ويُستخدم طلاء خاص بما يضمن ملاحظة أي محاولة للتلاعب في الجهاز.

وبدأت الوكالة في استخدام جهاز رصد الإثراء إلكترونياً في إيران، في محطة إثراء الوقود في ناتانز، في كانون الثاني/يناير ٢٠١٦، وتعتزم الوكالة نشر الجهاز تدريجياً في محطات الإثراء بالطرد المركزي الغازي في بلدان أخرى. وحيث أن هذه التكنولوجيا الجديدة توفر القياس المستمر، سيتم تقليص أخذ العينات وأخذ العينات البيئية، وهو ما يزيد الكفاءة ويحقق وفورات في التكلفة.

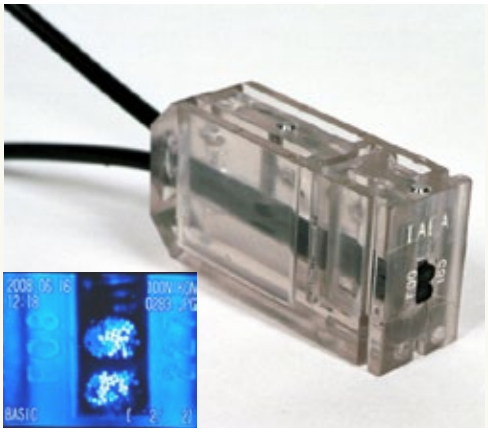
ختم موافقة الوكالة

من بين مختلف معدات الضمانات تُعدُّ أختام الوكالة الدولية للطاقة الذرية أكثرها شهرة بل وأكثرها استخداماً. ورغم بساطتها فإن هذه الأجهزة الكاشفة للتلاعب ذات كفاءة عالية في ردع الوصول غير المصرح به إلى المواد الخاضعة للضمانات ومعدات ضمانات الوكالة. وهي توفر أيضاً وسيلة لتحديد الحاويات الآمنة على نحو فريد. وعملية التحقق من الأختام تتألف من فحص متأنٍ للهيكل وهوية وسلامة الختم للكشف عن أي محاولة للتلاعب.

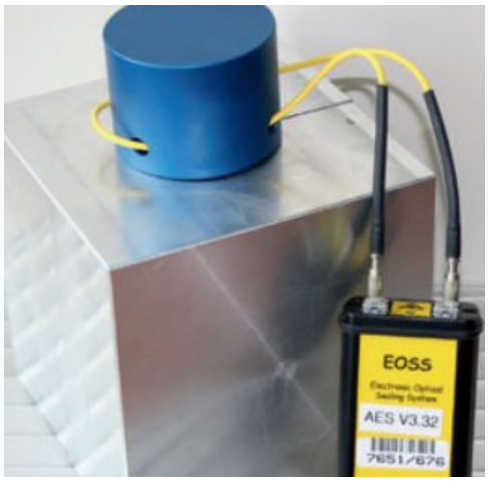
وتستخدم الوكالة أنواعاً عدة من الأختام حسب الاقتضاء. وبعض تلك الأختام مصمم للاستخدام تحت الماء أو في البيئات القاسية.



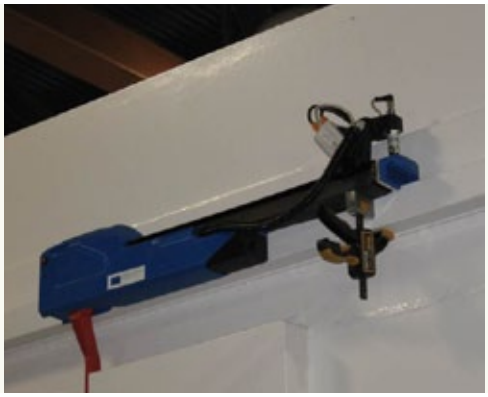
وتستعين الوكالة بالأختام ذات **الأغطية المعدنية** وذات الاستخدام الواحد منذ أكثر من ثلاثين عاماً، ويتم توزيع قرابة ١٦ ٠٠٠ من تلك الأختام والتحقق منها سنوياً. ولأغراض تحديد الأختام فإن كل ختم منها مرقّم وله علاماته المميِّزة الفريدة على سطحه الخارجي، ويتم تدوينها قبل إصدار الأختام للمفتشين. وخلال عمليات التفتيش، تُستبدل الأختام وتُعاد إلى المقر الرئيسي للوكالة للتحقق من فاعليتها وصحتها من خلال التأكد من أن العلامات المميِّزة مطابقة للأصلية.



وثمة أنواع أخرى من الأختام يتحقق منها مفتشو الوكالة في الموقع. وعلى سبيل المثال، يشمل ختم **"كوبرا"** كابلَ ألياف بصرية متعدد النوى أطرافه متضمنة داخل هيكل الختم. وبطريقة عشوائية يتم إحداث قطع في بعض تلك النوى خلال إغلاق الختم لتشكيل أنساق بصرية فريدة. وتُستخدم الكاميرات لتسجيل تلك الأختام الفريدة من خلال وميض ضوء عبر الكابل. وخلال عملية التحقق، تتم مقارنة صور التفتيش بصور التركيب لضمان هوية الختم واستمرار سلامته. ويتم سنوياً نشر نحو ٢٠٠٠ ختم من أختام "كوبرا"، وفي العادة يتم ذلك بالتزامن مع أختام الأغطية المعدنية بما يعزز الموثوقية.



كذلك تستخدم الوكالة الأختام الإلكترونية، مثل **نظم الأختام الإلكترونية-الضوئية**، التي يمكن فحصها عن بُعد من قِبل المفتشين، وهي متصلة بنُظم المراقبة الفيديوية. وتتألف هذه الأختام من حلقة ألياف بصرية ووحدة إلكترونية، والتي تواصل رصد حالة الحلقة بإرسال نبضات ضوئية عبر الألياف تفصل بين كل نبضة وأخرى منها فترات زمنية قصيرة. ويتم تدوين وقت وتاريخ ومدة أي عملية فتح وإغلاق لحلقة الألياف البصرية وذلك ضمن ذاكرة داخلية مشفَّرة. وتتيح الأختام الإلكترونية النشطة التعاون مع السلطات الوطنية والجهات المشغِّلة الوطنية، إذ يُسمح لتلك السلطات والجهات تثبيت تلك الأختام أو نزعها. وتُسجَّل مثل هذه التعديلات وباستطاعة المفتشين مقارنتها مع الأنشطة المعلنة.



ويمثل **نظام المسح بالليزر للتحقق من الاحتواء** أحدث تكنولوجيات الأختام قيد الاستخدام. ويعتمد هذا النظام على تكنولوجيا رسم الخرائط السطحية بالليزر، حيث تولّد المساحة الضوئية في النظام المذكور خريطة فائقة الدقة للوصلة الملحومة لهيكل الحاوية عند إدخال الحاويات في الخدمة. ويمكن تحديد هويتها والكشف عن التلاعب من خلال إجراء مسح جديد للوصلة الملحومة ومقارنة الخريطة الجديدة بالمرجع المقابل.

الصور (ما لم يُذكر خلاف ذلك): الوكالة الدولية للطاقة الذرية