

# دروس تقنية مستفادة من حادثة فوكوشيما داييتشي

سينثيا ديون شوارز (Cynthia Dion-Schwarz).  
سارة أي إفانز (Sarah E. Evans). إدوارد جايسست (Edward Geist).  
سكوت وارين هارولد (Scott Warren Harold). في راى كويم (V. Ray Koym).  
سكوت سافيتز (Scott Savitz). ليويد ثرال (Lloyd Thrall).



# دروس تقنية مستفادة من حادثة فوكوشيما داييتشي

سينثيا ديون شوارز (Cynthia Dion-Schwarz).

سارة أي إفانز (Sarah E. Evans)، إدوارد جايسست (Edward Geist).

سكوت وارين هارولد (Scott Warren Harold)، في راى كويم (V. Ray Koym).

سكوت سافيتز (Scott Savitz)، ليويد ثرال (Lloyd Thrall).

للحصول على مزيدٍ من المعلومات حول هذا المنشور، الرجاء زيارة الموقع الإلكتروني  
[www.rand.org/t/RR857](http://www.rand.org/t/RR857)

تم النشر بواسطة مؤسسة RAND، سانتا مونيكا، كاليفورنيا.  
© حقوق الطبع والنشر لعام 2016 محفوظة لصالح مؤسسة RAND  
RAND® علامة تجارية مسجلة.

#### حقوق الطبع والنشر الإلكتروني محدودة

هذه الوثيقة والعلامة (العلامات) التجارية الواردة فيها محمية بموجب القانون. يتوفر هذا التمثيل للملكية الفكرية الخاصة بمؤسسة RAND للاستخدام لأغراض غير تجارية حصرياً. يحظر النشر غير المصرح به لهذا المنشور عبر الإنترنت. يُصرح بنسخ هذه الوثيقة للاستخدام الشخصي فقط. شريطة أن تظل مكتملة دون إجراء أي تعديل عليها. يلزم الحصول على تصريح من مؤسسة RAND. لإعادة إنتاج أو إعادة استخدام أي من الوثائق البحثية الخاصة بنا، بأي شكل كان. لأغراض تجارية، للمزيد من المعلومات حول تصاريح إعادة الطباعة وتصاريح الربط على المواقع الإلكترونية، الرجاء زيارة صفحة التصاريح في موقعنا الإلكتروني [www.rand.org/pubs/permissions.html](http://www.rand.org/pubs/permissions.html)

مؤسسة RAND هي منظمة بحثية تُعدّ حلاً لتحديات السياسات العامة للمساهمة في جعل المجتمعات حول العالم أكثر أماناً، وسلامة، وصحة وازدهاراً. مؤسسة RAND هي مؤسسة غير ربحية، حيادية، وملتزمة بالصالح العام.

لا تعكس منشورات مؤسسة RAND بالضرورة آراء عملاء ورعاة الأبحاث الذين يتعاملون معها.

ادعم مؤسسة RAND  
وتبرع بمساهمة خيرية معفاة من الضريبة عبر  
[www.rand.org/giving/contribute](http://www.rand.org/giving/contribute)

[www.rand.org](http://www.rand.org)

تعرض شمال اليابان إلى زلزال وتسونامي مدمرين في آذار (مارس) عام 2011. وتمثّل أحد الأثار الثانوية العديدة لتلك الكارثتين في فقدان التحكم في محطة فوكوشيما دايتشي النووية. وأدى ذلك بدوره إلى انتشار مواد مشعة في البيئة بصورة فورية وعلى مدار الأشهر التالية على حد سواء. ينصب تركيز هذا البحث على الطريقة التي استُخدمت بها التقنيات المختلفة بغية تحديد مدى التلوث الإشعاعي. لمنع انتشار النشاط الإشعاعي الذي انتشر بالفعل في البيئة الأوسع نطاقاً وإزالة التلوث من المناطق أو الأجسام ولتخزين المواد المشعة لفترات طويلة. حيث حدث كل ذلك مع الحد من التعرض البشري للإشعاع في الوقت ذاته. يهدف هذا البحث إلى تقديم المساعدة في تحسين الاستعدادات التقنية لأي حوادث نووية أو إشعاعية في المستقبل. وذلك عن طريق استخلاص الدروس المتعلقة بالطريقة التي استُخدمت بها التقنيات بنجاح. إضافة إلى تحديد أوجه النقص في القدرات التي كان يمكن التخفيف منها من خلال تحسين استخدام التقنيات أو تطوير التقنيات المبتكرة.

أجري هذا البحث تحت رعاية مكتب وزير الدفاع وأُجري في مركز سياسات الحيازة والتكنولوجيا التابع لمعهد أبحاث RAND للدفاع الوطني. وهو مركز بحوث وتطوير يعمل بتمويل فدرالي وبرعاية مكتب وزير الدفاع وهيئة الأركان المشتركة وقيادة المقاتلين الموحدّة وقوّات البحرية وقوّات مشاة البحريّة ووكالات الدفاع ومجموعة استخبارات الدفاع. بموجب عقد W91WAW-12-C-0030.

للاطلاع على مزيد من المعلومات حول مركز سياسات الحيازة والتكنولوجيا، يُرجى زيارة [www.rand.org/nsrd/ndri/centers/atp](http://www.rand.org/nsrd/ndri/centers/atp) أو التواصل مع المدير (تتوفر بيانات الاتصال على صفحة الويب).



## المحتويات

iii	تمهيد
vii	الملخص
xxi	شكر وعرفان
xxiii	الاختصارات
	الفصل الأول
1	مقدمة
1	سلسلة الأحداث المؤدية إلى التلوث
3	الدافع
6	تنظيم هذه الدراسة
	الفصل الثاني
7	تحديد حجم التلوث
9	تجربة فوكوشيما مع تحديد حجم التلوث
12	حلول ممكنة
14	النتائج المستخلصة من الفصل
	الفصل الثالث
17	الوقاية من الضرر الناجم عن الإشعاع وزيادة انتشار المواد
17	مشكلة سترات الإشعاع والحماية الجماعية
19	مشكلة قياس جرعات الإشعاع التي يتعرض لها الأفراد
22	مشكلة الجوانب الطبية والوراثية للأثار الصحية الناجمة عن الإشعاع
23	المشكلة المتعلقة بالزراعة والغذاء ومياه الشرب

- 25.....مشكلة استيعاب المواد الملوثة لمنع المزيد من الانتشار.....
- 26.....النتائج المستخلصة من الفصل.....

#### الفصل الرابع

- 29.....**إزالة المواد المشعة وجمعها**.....
- 30.....الوسائل الفيزيائية لإزالة التلوث.....
- 31.....الوسائل الكيميائية لإزالة التلوث.....
- 32.....إزالة التلوث من الماء.....
- 33.....الوسائل البيولوجية لإزالة التلوث.....
- 34.....تجربة فوكوشيما.....
- 35.....الحلول الممكنة لمشكلة إزالة التلوث.....
- 36.....النتائج المستخلصة من الفصل.....

#### الفصل الخامس

- 37.....**التخلص من المواد الملوثة**.....
- 40.....النتائج المستخلصة من الفصل.....

#### الفصل السادس

- 41.....**المسائل المتعلقة بالروبوتات**.....
- 43.....النتائج المستخلصة من الفصل.....

#### الفصل السابع

- 45.....**دروس مستفاداً سابقة من تجربة تشيرنوبيل**.....
- 45.....تجربة تشيرنوبيل مع تحديد حجم التلوث.....
- 46.....تجربة تشيرنوبيل مع إزالة التلوث.....
- 49.....تجربة تشيرنوبيل مع استيعاب التلوث الإشعاعي داخل الموقع.....
- 50.....النتائج المستخلصة من الفصل.....

#### الفصل الثامن

- 51.....**النتائج والتوصيات**.....

- 55.....**المراجع**.....

- 59.....**لقراءة المزيد**.....

حلَّت مؤسسة RAND كيفية استخدام التقنيات لمعالجة التلوث البيئي الإشعاعي الناجم عن فقدان التحكم في محطة فوكوشيما للطاقة النووية عقب وقوع الزلزال والتسونامي في اليابان في 11 آذار (مارس) 2011. حتى كانون الأول (ديسمبر) 2013. يتمثل الهدف من هذه الدراسة في تحليل الدروس المستفادة من تجربة فوكوشيما حتى يتسنى لوزارة الدفاع الأمريكية إمكانية الاستعداد على نحو أفضل للاستجابة للطوارئ الإشعاعية أو النووية في الولايات المتحدة أو في الخارج.<sup>1</sup> وبالنظر إلى مسؤوليات وزارة الدفاع الأمريكية واحتياجاتها المحتملة بعد وقوع حادثة ما، اهتم أصحاب الشأن في وزارة الدفاع الأمريكية اهتمامًا بالغًا بفهم الطريقة التي أسهمت بها التقنيات في جميع النقاط التالية في فوكوشيما:

- تحديد حجم التلوث عبر المكان والزمان
- الوفاية من التعرض البشري للإشعاع والحد منه

<sup>1</sup> على سبيل المثال، في حالة وقوع هجوم في الولايات المتحدة باستخدام سلاح نووي أو جهاز نشر إشعاعي، فمن المرجح التماس العون من وزارة الدفاع الأمريكية لتقديم الدعم الدفاعي إلى السلطات المدنية (DSCA). في حالة وقوع الهجوم بالقرب من قاعدة عسكرية، سيتعين على وزارة الدفاع الأمريكية الاستجابة كذلك لحماية أفرادها وأصولها، إضافة إلى ذلك، من الممكن التماس العون من وزارة الدفاع الأمريكية لتقديم الدعم الدفاعي إلى السلطات المدنية عقب حدوث انبعاث بدرجة كبيرة من إحدى محطات الطاقة النووية في الولايات المتحدة، أو وقوع حادثة تتضمن أسلحة نووية أو حدوث تسرب من حاملة طائرات أو غواصة تعمل بالطاقة النووية. أما في الخارج، فمن الممكن التماس العون من وزارة الدفاع الأمريكية للمساعدة في الاستجابة للهجمات الإشعاعية أو النووية ضد الدول المتحالفة أو قواعد الولايات المتحدة بداخلها. كما قد يتعين عليها أيضًا الاستجابة لحالات انبعاث النشاط الإشعاعي على جبهات القتال أو في المناطق المحتملة. أخيرًا، قد تساعد وزارة الدفاع الأمريكية في الاستجابة لحادثة انبعاث عرضية في الخارج، كما فعلت عقب الزلزال والتسونامي المدمرين ووقوع حادث نووي في اليابان (أطلق على استجابة وزارة الدفاع الأمريكية عملية تومودانشي ومعناها "صديق" باللغة اليابانية). انظر Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Nuclear/Radiological Incident Annex," June 2008; and FEMA, "Federal Radiological Preparedness Coordinating Committee," FEMA website, updated June 26, 2013. انظر أيضًا U.S. Northern Command, "Joint Task Force Civil Support," website, undated



- عمليات إزالة التلوث
- التخلص من المواد المشعة.

رَّكَّزَت وزارة الدفاع الأمريكية بصورة خاصة على معرفة أوجه النقص في قدرات الاستجابة التي كان من الممكن معالجتها باستخدام تقنيات لم تكن متاحة بعد أو لم يتم دمجها بعد بطريقة تجعلها مفيدة في سياق حادث انتشار مواد مشعة. قد يجعل الاستثمار المحتمل في هذه التقنيات وزارة الدفاع الأمريكية أكثر قدرة على الاستجابة للحوادث النووية أو الإشعاعية في المستقبل.

## الموضوعات الرئيسية والنتائج المستخلصة

لقد استنتجنا ثلاثة موضوعات متكررة خلال بحثنا:

1. **متطلبات القدرة على الاستجابة ستكون متنوعة.** ستشهد المتطلبات المحددة للقدرة على الاستجابة تنوعًا كبيرًا من حادثة لأخرى. لا سيما إذا كانت الحادثة من نوع مختلف (على سبيل المثال. انفجار نووي. وليس فقدان التحكم في محطة نووية). يمكن تخصيص المتطلبات أيضًا بشكل كبير عبر الزمان والمكان خلال حادثة واحدة.
2. **حجم الاستجابة المطلوبة محرك رئيسي وراء التحديات المتضمنة.** بالنظر إلى المناطق الشاسعة وكميات المواد المتأثرة بسبب حادثة كبيرة الحجم. فإن تحليلات التكاليف والفوائد أمر حتمي.
3. **تصورات العامة ستشكل عاملاً رئيسياً في تشكيل الاستجابة.** بل إنه لا يمكن تطبيق أسلم النهج من الناحية العلمية في مواجهة معارضة العامة نظرًا للتصورات الخاطئة لدى العامة أو فقدان الثقة.

توصلنا إلى عدة جوانب واعدة لمواصلة التطور التقني. جراء دراستنا للاستجابة التقنية لكارثة فوكوشيما، إضافة إلى ملاحظة تحذيرية تتعلق باستخدام بعض التقنيات:

- ستشكل أجهزة الاستشعار واسعة النطاق الموزعة والمعنية بالقياس السريع في الوقت الفعلي - إلى جانب استخدام تقنية المعلومات لمشاركة البيانات - عاملاً حاسماً لتحقيق استجابة فعّالة.

- وتوجد حاجة إلى الأنظمة ذاتية التشغيل - لا سيما الأنظمة الأرضية التي لديها القدرة على التغلب على العوائق والعمل بشكل مستقل في المناطق الخطرة - في البيئات الملوثة الوعرة القاسية.
- ستوفر الوقاية الشخصية - مثل السترات الواقية وقياس الجرعات التي يتعرض لها الأفراد والأدوية - استجابات أكثر أمانًا واكتمالاً بعد أي كارثة نووية.
- ستُحدِث التقنيات الفعّالة من حيث التكلفة، لإزالة التلوث من كميات كبيرة من المياه وتخزينها ومن الأرض والمساحات الاصطناعية، طفرة في عالم التقنيات بكل تأكيد في مثل هذه الحالة.
- ستؤدّي تصورات العامة إلى تشكيل الاستجابة لمثل هذه الكوارث بقوة - وربما تحول دون بعض الحلول التقنية الممكنة ميسورة التكلفة.

## سلسلة الأحداث المؤدية إلى التلوث

شرع المهندسون والفنيون على الفور في اتخاذ إجراءات إيقاف التشغيل الطارئ؛ فيما يتعلق بالمفاعلات قيد التشغيل داخل محطة الطاقة النووية فوكوشيما دايتشي التي تقع على مسافة 160 كيلومترًا من مركز الزلزال، وذلك في الوقت الذي ضرب فيه الزلزال الهائل منطقة توهوكو في 11 آذار (مارس) لعام 2011 والذي بلغت قوته 9.0 درجات على مقياس درجة العزم.<sup>2</sup> وقد أنشئت المفاعلات بحيث تتحمل الهزّات الأرضية الكبيرة التي يكثر حدوثها في اليابان، وهي مزودة بمولدات طاقة احتياطية في حالة الطوارئ للإمداد بالكهرباء لتشغيل معدات الدورة المائية الأساسية التي تُستخدم في تبريد الوقود، وعلى الرغم من ذلك فقد لحق بهذه المفاعلات بعض التدمير. أُدخلت قضبان مصنوعة من عنصر البورون تلقائيًا داخل الوقود من أجل إخماد التفاعل التسلسلي، وشرع المشغلون في تشغيل الدورة المائية الطارئة التي تستمد طاقتها من مولدات الديزل الاحتياطية. كانت أمواج تسونامي حينها، التي وصل ارتفاعها إلى 15 مترًا، قد تجاوزت الحاجز البحري البالغ طوله 6 أمتار في فوكوشيما وذلك بعد ساعة من وقوع الزلزال، حيث انقطعت كل الطاقة بما في ذلك أنظمة الدعم الاحتياطية.

<sup>2</sup> ربما يكون القراء أكثر معرفة بمقياس ريختر بما أنه مقياس لقوة الزلزال. استخدم الجيولوجيون المتخصصون مقياس درجة العزم منذ حوالي عام 1980 باعتباره مقياسًا أكثر دقة لانبعثات طاقة الزلزال. يتشابه المقياسان إلى حد كبير، لذا فإن أي زلزال تبلغ قوته 9.0 على مقياس درجة العزم هو في الحقيقة حدث كبير للغاية يقع مرة واحدة في كل جيل.

استمر توليد الحرارة السالبة عن طريق الوقود النووي. وذلك في ظل انقطاع الطاقة عقب التسونامي. وبدأت مياه التبريد داخل المفاعلات في السخونة بشدة وتسببت في أكسدة الوقود مما أدى إلى إنتاج غاز الهيدروجين. تعرضت ثلاثة مفاعلات، في اليوم الرابع، لحالات انصهار وانفجارات الهيدروجين داخل المباني التي يوجد بها العديد من المفاعلات، ما أدى إلى تلوث المناطق الريفية المحيطة. انتشرت النواتج الانشطارية النووية بسبب انفجارات المحطة ولوثت المزارع والأشجار والقرى ومياه البحر والمياه الجوفية المحيطة - وتتكون النواتج الانشطارية النووية في المقام الأول من عنصر التيلوريوم المشع (فترة عمر النصف تبلغ 14 ثانية)، واليود (فترة عمر النصف تبلغ 8 أيام)، والسييزيوم (فترة عمر النصف تبلغ سنتين أو 30 سنة، بحسب النظير). يتحلل التيلوريوم واليود سريعاً إلى منتجات ثانوية غير ضارة، غير أن عنصر السيزيوم لا يتحلل.

تلتزم الحكومة اليابانية بتطهير المنطقة الشاسعة وستعطل المحطة بالكامل في فوكوشيما داييتشي على مدى العقود العديدة المقبلة. تناقش هذه الدراسة أوجه نجاح التقنيات المستخدمة في عملية التطهير وأوجه الإخفاقات.

## تحديد حجم التلوث وتعرض الأفراد للإشعاع

إن معرفة مدى التلوث الناتج وطبيعته كدالة للزمان والمكان أمر ضروري من أجل تقليل التعرض البشري للإشعاع إلى الحد الأدنى. وتحديد المدى الذي يمكن استخدام المناطق أو الموارد خلاله والاضطلاع بجهود إزالة التلوث الفعّالة. على الرغم من أن النمذجة يمكن أن تساهم إسهامًا كبيرًا في مثل هذا الفهم، فإنها بحاجة إلى الدعم والتحديث عن طريق جمع البيانات، نظرًا لعدم اليقين بشأن كمية المواد المشعة المنبعثة وأنماط انتقالها خلال البيئة. ويمكن للوصف الفعّال الحد من المخاطر على الجهات المستجيبة وعامة الناس على حد سواء، وعند القيام بذلك، قد يعزز ثقة العامة في جهود الاستجابة. وقد يقلل أيضًا من كمية المواد والوقت والأعمال اليدوية اللازمة لتوفير استجابة فعّالة، حيث إنه يقلص من مضاعفة الجهود ويرفع من الكفاءة.

وقد أُجريت مجموعة من عمليات المسح الجوي، بعد حادثة فوكوشيما بفترة قصيرة، بغية تمكين عملية اتخاذ القرار على نطاق واسع على وجه السرعة فيما يتعلق بالاستجابة. ومع ذلك، فقد اتسمت عمليات المسح الجوي هذه بمحدودية تفاصيلها في تحديد التغييرات المحلية في الانبعاثات الإشعاعية، لذا كانت عمليات المسح الأرضي اللاحقة تشكل أمرًا ضروريًا لتقديم وصف أكثر تفصيلاً. قد تختلف مستويات الإشعاع

بشكل ملحوظ في مسافات تصل إلى بضعة أمتار، نظرًا للتضاريس والتركيز البيولوجي والعوامل البيئية الأخرى. كما تتغير مستويات الإشعاع ديناميكيًا مع مرور الوقت، حيث تنتقل الجسيمات المشعة وتنتشر. وعلاوة على ذلك، فقد تتداخل أحوال الجو (وخاصة الرياح والترسب والجسيمات) مع الوصف المفصل والموثوق للجو. أخيرًا، قد تسيء عملية مسح جوي فهم المناطق الأكثر ارتفاعًا. القريبة من الطائرة، باعتبارها أكثر تلوّنًا من المناطق المنخفضة التي بها درجات التلوث ذاتها أو درجات أكبر. بالإضافة إلى ذلك، فإن عمليات المسح الجوي تكون كثيفة الموارد وعالية التكلفة؛ حيث أبدى الخبراء الذين أجرينا مقابلات معهم رغبة في وجود عدد أكبر من الوسائل الأكثر بساطة وأقل تكلفة.

ومن المؤسف أن الدمار الذي لحق بالبنية التحتية للمنطقة، التي من بينها إمدادات الوقود وشبكات الطرق والكهرباء وإمدادات المياه الصالحة للشرب وشبكات الاتصالات، قد أعاق بشدة عمليات المسح الأرضي بالمركبات والروبوتات، ورغم هذه المشكلات، فقد أجرى الأفراد داخل المركبات والروبوتات قدرًا كبيرًا من أعمال المسح الأرضي. وللأسف، لم تُدمج المجموعات البيانية التي جمعناها عمليات الاستطلاع هذه في تصور عملياتي مشترك، وبشكل عام، تسبب نقص المعرفة بالتلوث الإشعاعي في حدوث أوجه قصور في الاستجابة ومخاطر أخرى على الأفراد.

من المرجح التماس العون من وزارة الدفاع الأمريكية، في حالة وقوع هجوم أو حادث يؤدي إلى انبعاث إشعاعات في المستقبل، للمساعدة في وصف مستويات الإشعاع (كما حدث في إثر حادثة فوكوشيما). تتدهور البنية التحتية الأساسية للمنطقة المتأثرة، في كثير من الأحوال، بسبب كارثة أو هجوم متزامن كما حدث في فوكوشيما. ومن ثم، فمن المرجح أن تكون عمليات المسح الجوي مصدرًا أوليًا مفيدًا للمعلومات. علاوة على ذلك، وبناءً على تجربة فوكوشيما، ظهرت الحاجة إلى أجهزة استشعار موزعة سريعة الانتشار يمكنها الإبلاغ باستمرار عن النشاط الإشعاعي المحلي وأحوال الرياح. قد تُوجد أجهزة الاستشعار هذه على المركبات ذاتية التشغيل وغير ذاتية التشغيل أو قد تُوزع من مثل هذه المركبات على الأرض والأسطح الأخرى. وبطبيعة الحال، يتعين أن تكون أجهزة الاستشعار صغيرة الحجم وقوية ومنخفضة التكلفة ومصممة ضد الإشعاع وذات قدرة على التحمل لفترة طويلة. كما يتعين أن توفر عمليات إرسال ذات نطاق ترددي منخفض لمنصات بث البيانات، مثل الطائرات بدون طيار أو طائرات الأيروسونات، حتى تتمكن من تقديم بيانات عملية في الوقت الفعلي للمحللين وواضعي النماذج. كما ستشكل أجهزة قياس الإشعاع الشخصية جزءًا مفيدًا من هذه الشبكة، حيث إنها تقدم معلومات في الوقت الفعلي لمن يرتديها على نحو مثالي بالإضافة إلى أنها توفر الوعي بالأوضاع لصناع

القرار. وتحقيقاً لهذه الغاية، تعمل مفوضية الرقابة النووية في اليابان على تطوير جهاز قياس إشعاع متقدم يمكنه تقييم التعرض للإشعاع كل ساعة، مما يتيح للأفراد حماية أنفسهم على نحو أفضل في الوقت الفعلي وينقل البيانات إلى صناع القرار لتحديد المناطق التي تعرضت لخطر أكبر من الإشعاع. قد يساعد استخدام وزارة الدفاع الأمريكية لأجهزة قياس الإشعاع المماثلة والمتصلة بالشبكة على تحسين مستوى وعي القادة بالأوضاع وتقليل التعرض البشري للإشعاع. ومن الناحية المثالية، سيكون أيضًا بمقدور أجهزة قياس الإشعاع هذه تقديم قراءات الإشعاع في فترات زمنية أقصر. وبذلك يمكن للأفراد الذين يرتدون الاستجابة وفقًا لذلك.

## الروبوتات

استُخدمت الروبوتات الأرضية على نطاق واسع لمسح البيئة في فوكوشيما، إضافة إلى محاولة استعادة التحكم بالمحطة وإجراء عملية إزالة التلوث في المناطق المحددة. ومع ذلك، فقد أعاقت جميع المشكلات التالية الروبوتات بشكل متكرر، لاسيما داخل المحطة النووية أو بالقرب منها:

- ظهور محدودية الحركة عند الروبوتات عند مواجهة عوائق مثل كومات الحطام وجذور الأشجار والسلالم والأبواب بالإضافة إلى الأسلاك المعقدة للروبوتات.
- وجود تقارير روائية تفيد بأن عدم التصلد ضد الإشعاع أدى إلى فساد الإلكترونيات والكاميرات على بعد أمتار قليلة من المواد عالية الإشعاع.
- فترات المهمات كانت قصيرة بسبب أعمار البطاريات المحدودة للروبوتات غير المقيدة، وكذلك بسبب الضرر بالإشعاع.
- حجب الإرسال بسبب المباني وضعف شبكات الاتصال أدى إلى صعوبات في التواصل مع الروبوتات. عدم وجود درجة عالية من الاستقلالية قيّد قدرة الروبوتات على العمل أو الحركة بالإضافة إلى نقل المعلومات. وفي العديد من الحالات، لا يمكن جمع تدفقات البيانات من الروبوتات الأرضية حتى يتم استعادتها فعليًا؛ ومن ثم كان هناك حاجة لمزيد من الوقت لتحليل البيانات.

• في المناطق الأكثر صعوبة داخل المحطة، أظهرت الروبوتات قصورًا في العمل في بيئات قاسية للغاية. وبالإضافة إلى الإشعاع العالي، كان على الروبوتات العمل في الظلام والحرارة الشديدة والأجواء التي لا يمكن التنبؤ بها والحركة الموجهة. علاوة على ذلك، كان عليها أن تكون قادرة على العمل في كل من بيئات الهواء المفتوح وتحت الماء، وعليها عادةً القيام بحركات سريعة محاكية لحركات اليد البشرية.

ستكون التحسينات في استقلالية الروبوتات، والقدرة على التغلب على العوائق أو تخطيها، وتحلي الروبوتات بالكفاءة والمداومة أمرًا مفيدًا في حالات الحاجة إلى الحركة الأرضية. ومن خلال منح الروبوتات مزيدًا من الاستقلالية وقدرات أكبر لتحليل البيانات، يمكن تقليل إما نطاق التردد المرتبط بالاتصالات أو التردد الذي يحتاجه الروبوت للاتصال. علاوةً على ذلك، ستكون هذه التحسينات مفيدة في مجموعة متنوعة من البيئات المدنية والعسكرية. بالنسبة إلى هذا النوع بعينه من الاستجابة للكوارث، قد يكون من الضروري تصميم روبوتات مصلدة ضد الإشعاع؛ ويمكن القيام بهذا من خلال حماية أجهزتها الإلكترونية والفائض في تصميم الدائرة.

## سترات الإشعاع والحماية الجماعية

من الواضح أن الأفراد الذين يضطرون إلى العمل في بيئات ملوثة يحتاجون إلى حماية ملائمة لحجم الإشعاع وأنواعه في محيطهم، وملائمة كذلك لمدة تعرضهم للإشعاع. ولاحظت المصادر، في فوكوشيما، أن وزن السترات الحالية وتصميمها يسببان إعياءً سريعًا بسبب الحرارة، ودوارًا، وصداعًا حادًا، الأمر الذي يجعل الأفراد أقل قدرة على ارتدائها ويقلل من الفترة الزمنية التي يمكنهم ارتداء السترات خلالها، وكل ذلك سيمثل مشكلات أخرى أمام كادر وزارة الدفاع الأمريكية أثناء استجابتهم لحادث إشعاعي أو نووي. تتضمن الطرق المحتملة لمعالجة هذه المشكلة ما يلي:

• استخدام هياكل خارجية - سترات أشبه بالدرع الخارجي من الملابس - مصممة بطريقة يمكنها تعزيز القوة البشرية بدلاً من استنزافها. كما يمكن أن توفر هذه الهياكل حماية ضد التعرض الخارجي للإشعاع، حيث أن أغلب سترات الإشعاع مصممة حاليًا لمنع امتصاص الجسيمات.

- تصميم مواد أخف وزنًا يمكن أن تؤدي نفس وظيفة السترات الحالية، إن أمكن.
- استخدام مأوي الحماية الجماعية كبديل للسترات الفردية. يمكن إنشاء هذه الملاجئ على "جزر" غير ملوثة وتم فحصها جيدًا، ومن الممكن ربط هذه الجزر "بممرات" تم فحصها جيدًا بطريقة مماثلة لتمثل قواعد للعمليات. وبدلاً من ذلك، يمكن إنشاء المحيطات الحيوية المستقلة التي توفر الحماية الجماعية في المناطق التي لم يتم تطهيرها. في المقابل، يمكن أن يؤدي عزل "مناطق الخطر"، التي تعرّض منطقة أكبر للإشعاع، من خلال وضع حواجز قابلة للانتشار حولها، إلى الحد من الحاجة إلى سترات فردية.

## الجوانب الطبية والوراثية للآثار الصحية الناجمة عن الإشعاع

يختلف متخصصو الفيزياء الصحية بشأن درجة زيادة أو انخفاض حساسية بعض الأفراد تجاه آثار الإشعاع مقارنة بغيرهم، ويجب إجراء مزيد من البحث للإجابة عن هذا السؤال على وجه التحديد. وفي حال وجود مثل هذه الاختلافات، فقد يتم تمكين أساليب التنظير لمنع الأفراد ذوي الحساسية العالية تجاه الإشعاعات، على نحو غير معتاد، من العيش أو العمل في مناطق معرضة لخطر الإشعاع. وعلاوة على ذلك، قد تمثل نتائج هذه الأبحاث أساسًا للمعالجات الجينية أو العقاقير الجديدة الواقية من الإشعاع لتقليل تعرض الأفراد للآثار الصحية الناجمة عن الإشعاع، مما يقلل من الخطر بالنسبة للأفراد العسكريين الذين قد يواجهون بيئات إشعاع عنيفة. ومن الواضح أن التكاليف والموافقة ستمثل مشكلات بالغة. وبالمثل، يقدم الطب التجديدي أحد مجالات البحث الواعدة المحتملة الأخرى لتخفيف الآثار الصحية الناجمة عن التعرض للإشعاع. وقد أشار الأشخاص الذين أُجريت معهم مقابلات إلى أن أبحاث الخلايا الجذعية قد تثبت إنها أحد الجوانب المثمرة في البحث من أجل هذه الغاية، مما يشير، كمثال، أن توافر الطب التجديدي يمكن أن يزيد من رغبة الأفراد في العمل في المناطق الملوثة. وتباشر وزارة الدفاع الأمريكية التطورات في هذه المجالات لتحسين الفعالية وتقليل الخطر في البيئة الإشعاعية. وبطبيعة الحال، فإن تصورات الأفراد العسكريين وعامة الجمهور ستكون اعتبارات مهمة في هذا السياق.

## تقليل التعرض للإشعاع من خلال الغذاء

أصبح ابتلاع المواد المشعة الخطر الصحي البشري الرئيسي بعد الحادثة بوقت قصير. وقد طور اليابانيون مجموعة من التقنيات لمواجهة هذه الأخطار. حيث تم اختبار جميع أكياس الأرز المزروع في المنطقة المحيطة لتحديد الإشعاع باستخدام نظام خط تجميعي. ولم يتم العثور إلا على القليل من الأكياس التي تنبعث منها أنشطة إشعاعية أكثر من المقدار المقبول عادة للاستهلاك الآدمي. كما يجري اختبار أسماك المنطقة باستخدام نظام اختبار غير تدميري، والذي وضعته جامعة توهوكو. وستعيد المراقبة التامة المواد الغذائية الثقة بشكل أكبر، كما ستمكّن الاقتصاد المحلي من التعافي بقوة أكبر، لكن تحديات التكلفة والنطاق تعقّد من تحقيق هذا الهدف. وعلاوة على ذلك، قد يعاني الاقتصاد الزراعي المحلي من بعض الاضطرابات حتى بعد الاختبارات الدقيقة للأغذية، حيث يزيد كل من السوق المحلي وسوق التصدير من الاستهلاك في المجالات التي لا تتعرض للتلوث أبدًا. وعلى الرغم من مساعدة التقنيات في الاستيعاب والتنظيف والتحقق، فإن التعافي الكامل للاقتصاد الزراعي المحلي قد يصبح عملية صعبة ومكلفة، حيث يعتمد على التصورات العامة بالإضافة إلى الإنجازات الفنية.

وبعد وقوع أي حادثة نووية أو إشعاعية، من المرجح أن تواجه وزارة الدفاع الأمريكية مخاوف تتعلق بسلامة الطعام بالنسبة لأفرادها وكذلك المواطنين التي تقدم الدعم لهم، وتتمثل إحدى الطرق السهلة لمعالجة هذه المشكلة في جلب الأغذية، مثل الوجبات الجاهزة، المعروف كذلك باسم الوجبات الجاهزة للأكل (MRE)، من خارج المنطقة. وعلى المدى الطويل، وكجزء من جهود إعادة تأهيل المنطقة اقتصاديًا، من المرجح أن يقوم أفراد وزارة الدفاع الأمريكية وهؤلاء الذين يقدمون الدعم لهم بتناول بعض الأطعمة المحلية. وفي هذا السياق، يمكن أن تساعد بعض النهج البسيطة القليلة في تقليل التعرض للإشعاع. وتشمل هذه النهج استخدام الأسمدة الغنية بالبوتاسيوم بشكل خاص (مما يساعد في منع امتصاص النباتات لعنصر السيزيوم)، وكذلك تغذية الماشية بالمواد الامتصاصية التي تساعد في منع امتصاص أجسام الماشية للنويدات المشعة. وتجنب تناول أطعمة معينة ذات مراكم السيزيوم مثل عيش الغراب. كما يمكن تطبيق أنظمة الخط التجميعي، التي وضعت لفوكوشيما، لاختبار الأغذية قبل تناولها.



## إزالة التلوث

يتمثل أحد أكثر الجوانب صعوبة في الاستجابة لحادثة مثل حادثة فوكوشيما في إزالة التلوث من البيئة حتى الوصول إلى قدر كافٍ يمكن استئناف الأنشطة البشرية فيه. لا يزال تلوث السيزيوم على نطاقٍ واسعٍ في التربة والمنشآت والمناطق الحضرية المحيطة بالمحطة موجودًا في فوكوشيما؛ كما تلوث المياه في المحطة نفسها كذلك. ويفاقم هذا التنوع من المواد الملوثة من صعوبة عمل نهج إزالة التلوث. ولكن بشكلٍ أعم، توجد ثلاثة نُهجٍ لعملية إزالة التلوث:

- إزالة التلوث الفيزيائي - التخلص من النويدات المشعة على الأسطح أو المحمولة جواً من خلال استخدام القوة الميكانيكية المباشرة و/أو استخدام الهواء أو الماء المتدفق. في فوكوشيما، يتم إجراء ذلك باستخدام أدوات بسيطة نسبياً، مثل المجارف والفُرش والخِرَق وخراطيم المياه ومنظفات الشوارع ومرشحات السحب وجرافات الخرسانة. تم إجراء الغالبية الكبرى من عملية إزالة التلوث في المنطقة المحيطة بفوكوشيما باستخدام هذه الطرق الفيزيائية ذات العمالة الكثيفة. مما يُبرز المشكلات الصحية للعمال ذات الصلة بالمشكلات الصحية العامة.
- إزالة التلوث الكيميائي - من خلال الاستفادة من التفاعلات على المستوى الذري في تركيز النويدات المشعة لعناصر معينة في كتلة أصغر من المواد. وقد تم تطهير المواد الصلبة كيميائياً باستخدام السوائل أو مواد الرغوة أو الجل لاستخلاص النويدات المشعة بالقرب من فوكوشيما وفي مناطق أخرى. ويمكن إزالة النويدات المشعة المُذابة من المياه باستخدام غرابيل جزئية أو بإضافة المواد المسببة لترسب النويدات المشعة من المحلول.
- إزالة التلوث البيولوجي - من خلال استخدام تفضيلات الأنظمة الحية لامتصاص ذرات عناصر معينة من أجل تركيز النويدات المشعة من مصدر كبير (مثل التربة أو المياه) في كتلة أصغر من المواد العضوية (مثل زهور عباد الشمس، أو الطحالب، أو القنب الهندي، أو الفطريات). وقد تم إجراء ذلك بالقرب من فوكوشيما على نطاق ضيق باستخدام زهور عباد الشمس.

أصبح الحد من حجم المخلفات في هذا الصدد أمرًا إلزاميًا حيث يجب تأمين المواد الإشعاعية لفترات تتراوح من عقود إلى ألف عام. وبشكل عام، يقع الاختيار على عمليات إزالة التلوث الفيزيائية بشكل أقل في تركيز النفايات وتشكيل كميات أكبر من المواد الملوثة، في حين يقع الاختيار بشكل أكبر على عمليات إزالة التلوث البيولوجي، مع تشكيل كميات أصغر من المواد عالية الإشعاع.

كانت المنطقة المحيطة بمحطة فوكوشيما داييتشي بيئة تُشكل صعوبات على نحو خاص في إزالة التلوث منها: تحتفظ البيئات في الغابات والجبال بالمواد المشعة بمقدار أكبر بكثير من أغلب البيئات الحضرية بسبب سمات النقاط السيزيوم في الطين الطبيعي في التربة. ومع ذلك، حتى في البيئات الأقل صعوبة، لا توجد حاليًا طريقة فعالة اقتصاديًا لتطهير مناطق أكبر أو كميات أكثر من منشآت البنية التحتية البشرية. لا يمكن تطهير سوى المناطق المهمة والصغيرة، وحتى في هذه المناطق، يوجد دائمًا تقريبًا بعض التلوث المتبقي. وعلاوة على ذلك، حتى في حالة وجود أثر شبه منعدم للتلوث المتبقي على الصحة، فإن المخاوف العامة ستقيد على الأرجح الاستخدام المستقبلي للمنطقة أو ستطلب برامج مكلفة للحد من مستويات الإشعاع الهامشية بالفعل.

بالإضافة إلى ذلك، ونظرًا إلى ضرورة تبريد المحطة النووية باستمرار، تكونت (وتتكون) كميات كبيرة من المياه الملوثة، وبخاصة داخل المحطة. يمكن أن تترسب نظائر مشعة محددة (مثل نظير السيزيوم -137 أو نظير السترونشيوم -90)، التي تتحلل في المياه، عن طريق إضافة مواد إلى المياه، مما يُتيح إزالة المركبات المترسبة عبر الترشيح. ومع ذلك، لا يعالج ذلك مشكلة جزيئات المياه التي تتحول فيها إحدى ذرتي الهيدروجين، أو كلاهما، إلى التريتيوم، وهو تركيبة إشعاعية من الهيدروجين. وبما أن جزيئات مياه التريتيوم الإشعاعي لديها الخصائص الكيميائية الأساسية ذاتها مثل جزيئات المياه الأخرى، فإن فصلها يتسم باستهلاك كثيف للطاقة بدرجة كبيرة وفرض تكلفة باهظة على نطاق كبير.

ومن المرجح أن يتم تقييد دور وزارة الدفاع الأمريكية في جهود إزالة التلوث على المدى البعيد، ما لم يتم تنفيذ هذه الجهود على أساس قاعدة يتم وضعها. ومع ذلك، إذا كانت وزارة الدفاع الأمريكية تتوقع الحاجة إلى إجراءات إزالة التلوث، فهناك نُهج متعددة لوضعها بالاعتبار. ويتمثل أحد هذه النُهج في تنمية النباتات أو الطحالب

أو حتى البكتيريا التي لها تفضيل للسيزيوم أكبر من الكائنات الحية الموجودة. وذلك للمساعدة في التخلص من السيزيوم الإشعاعي من التربة أو المياه. وعلى نحو مثالي. من الممكن كذلك تصميم هذه الكائنات الحية كي تتضمن عناصر أخرى قد يتم توزيع نويدات المشعة بطريقة ما. مثل السترنتيوم واليورانيوم. ويمكن بعد ذلك جمع هذه الكائنات الحية وحفظها. مما يؤدي إلى إنتاج كميات أقل بكثير من النفايات المركزة أكثر مما يمكن أن تنطوي عليه عملية إزالة التربة السطحية. وبالنسبة للأسطح الصناعية. ثمة نهج تكميلي يتمثل في تطوير روبوتات لإزالة التلوث من على الأسطح؛ وقد لاحظت بعض الجهات المطلعة لدينا أنه يُجرى حاليًا تطوير عدد من الروبوتات أو اختبارها لهذا الغرض. يمكن أن تزيل هذه الروبوتات المياه ذات الضغط المرتفع أو الثلج الجاف أو الكرات الصغيرة (قطرها أصغر من مليمتر) في الأسطح الملوثة لإزالة التلوث السطحي. ثم تطهير المواد المفصولة للتخلص منها. وفي نهاية المطاف. ستؤدي القدرة على تزجيج بعض المواد الإشعاعية (أي وضعها داخل زجاج) في الموقع. بتكلفة معقولة دون تدمير الأنظمة البيئية. إلى تدارك الحاجة لإزالة المواد ونقلها.

## التخلص من المواد

يمثل التخلص من المواد الملوثة أحد أكبر الصعوبات عند الاستجابة للكوارث الإشعاعية. حيث يجب تحديد هذه المواد وجمعها ثم التعامل معها بطريقة تحد من المخاطر البيئية والصحية. مع خضوع جميع هذه الأنشطة المخصصة للمواد والحوادث المحددة للمراجعة. في حالة فوكوشيما. كان من الصعب للغاية التخلص من الأوراق والتربة الملوثة وكذلك المواد الصلبة الأخرى. وذلك يرجع إلى الكم الهائل من المواد الملوثة وكذلك بسبب عدم وجود أي وسائل مقبولة من الجهات الحكومية للتعامل مع الأزمة. وبشكل مثالي. من الممكن معالجة هذه المواد لتركيز النويدات المشعة التي تحتوي عليها. ولكن من الواضح صعوبة هذا الأمر عند تطبيقه على أنواع التربة ذات الخصائص غير المتجانسة. وعلى هذا النحو. من غير الواضح مكان التخزين النهائي: حتى المواد المُخزنة بطرق سليمة والتي تشكل مخاطر صحية بسيطة قد تواجه رفضًا

من المجتمعات المحلية.<sup>3</sup> وبدون المساحة الكافية في مرافق التخلص من المخلفات النووية التي تسع هذه المواد. يتم تخزين المواد في مواقع بالقرب من مكان تجميعها حتى يتم البت في أمرها. وفي الكثير من الحالات، قد يؤدي تخزين المواد إلى نتائج عكسية - قد يكون من الأفضل ترك هذه المواد في موقعها وترك محتوياتها الإشعاعية تتسرب وتحلل - لكن الحاجة الملحة السياسية تطلبت جمع المواد، وذلك في الوقت الذي يتعرض فيه الأفراد لأثار المواد الضارة.

يمثل كذلك التخلص من المياه الملوثة في فوكوشيما صعوبة نظراً إلى أسباب سياسية وفنية، بالإضافة إلى الكميات الهائلة من المياه الملوثة. وكما ذكر آنفاً، لا توجد طريقة فعالة لإزالة التريتيوم من المياه، لذلك يجب التخلص من هذه المياه بالكامل. ويفرض تخفيف المياه المحملة بالتريتيوم بمياه المحيط الهادئ مخاطر صحية وبيئية لا تُذكر. ولكن من غير المرجح تماماً أن يحظى هذا الطرح بالقبول السياسي بسبب التصور العام الدولي والمحلي. كما تقيد القوانين المحلية والدولية هذا النهج.

وبقدر ما يجب على الحكومة الأمريكية (وليس وزارة الدفاع الأمريكية على الأرجح) التخلص من المواد المشعة بعد وقوع حادثة مستقبلية محتملة، فإنها ستجد على الأرجح مخزناً مستقرًا جيولوجيًا على الأرض. وتشمل النُهُج البديلة المقترحة وضع هذه النفايات في أعماق المحيط أو حتى في الفضاء الخارجي. على الرغم من أن الحل الأخير سيكون على الأرجح باهظ التكلفة وخطيرًا. كما تم اقتراح نهج بديل آخر، وهو تحويل العناصر، ولكنه باهظ التكلفة ويتطلب طاقة بشكل كثيف حال تطبيقه على أي نطاق مجدي. وبغض النظر عن كيفية التخلص من المواد، لا يمكن المبالغة في تقدير أهمية استنباط الحلول التي تلقى قبولاً لدى عامة الجمهور.

<sup>3</sup> كانت فكرة تخزين النفايات النووية في مرفق تخزين جبل يوكا، في إحدى المناطق غير الآهلة بالسكان بالولايات المتحدة، مثيرة للجدل بشدة إلى أن تم التراجع عنها. ومع ذلك قد تظهر هذه الفكرة مرة أخرى في المستقبل. ومن المرجح أن تزداد الصعوبات السياسية بشكل كبير بشأن تحديد موقع تخزين مماثل في اليابان بسبب تعرضها للزلازل وكونها مكتظة بالسكان. لا سيما بعد حادثة فوكوشيما.

## النتائج

قد يتحتم على وزارة الدفاع الأمريكية معالجة الحالات النووية أو الإشعاعية في وقت ما بالمستقبل، كما كان الحال في فوكوشيما. ولمواجهة هذه الصعوبات بنجاح على نطاق أكبر، يجب أن تكون إجراءات الاستجابة فعالة من حيث التكلفة. وفي حين ظهور إمكانات واعدة ناشئة لمراقبة الإشعاعات وإزالة التلوث والتخلص من النفايات، فمن الضروري إجراء قدر كبير من الأبحاث والتحسينات من أجل تجهيز هذه التقنيات للانتشار العسكري. كما أن أساليب التخلص من النفايات وإزالة التلوث الحالية مكلفة وغير فعالة نسبيًا، مما يحد بشدة من قدرة الدول على تحسين تبعات الحوادث الإشعاعية. وعلاوة على ذلك، فإنه يلزم القبول السياسي والشعبي لأي إجراءات متصورة لاستخدام وزارة الدفاع الأمريكية، كما يجب أن تضع قرارات التطوير هذا الاعتبار في الحسبان.

استندت استجابة اليابان "للكارثة الثلاثية" في 11 آذار (مارس) إلى الجهود البشرية الاستثنائية المبذولة: من المهندسين الذين يضعون حلولاً في ظل ضغوط عنيفة، والأطباء الذي يعملون في ظل كارثة إشعاعية غير مستقرة لتقديم العلاج، والمستجيبين الأوائل الذين يخاطرون بحياتهم لتقديم العون والرعاية للآخرين. كل ذلك على سبيل المثال لا الحصر. ولا يمكن إجراء بحث مباشر بخصوص هذا الموضوع دون إبداء الإعجاب بإثار هؤلاء الأفراد وتكريسهم وكفاءتهم، الذين يستحقون لقب "البطل". كما أننا ممتنون لموافقتهم على مشاركة تجاربهم واستخلاص الدروس الواردة في هذه الدراسة.

لم يكن من الممكن إجراء هذا البحث بدون الكثير من الأكاديميين والعلماء والمهندسين والمستجيبين الأوائل وضباط الجيش وصناع السياسات الذين تطوعوا بوقتهم وخبرتهم لمناقشة هذا الموضوع الحساس. وعلى جانبي المحيط الهادئ، يسلط إخلاص هؤلاء الموظفين وكفاءتهم الضوء على جوانب بحثية محتملة وكذلك تطوير مجالات الأمن النووي والاستعداد للإشعاعات. وقد أسهموا على هذا النحو في سلامة المواطنين وأمنهم على نطاق واسع. وكذلك المساعدة في التأكيد على نقل الدروس المستفادة في الكارثة إلى المؤسسات والمجتمعات والخبراء الذين يمكنهم تحويل هذه الدروس إلى حلول أفضل. وفي حين أننا نأمل ألا تظهر الحاجة لتطبيق هذه الدروس، فإن فريق مؤسسة RAND يشعر بالتميز نظير المساعدة في تحويل خبرتهم المباشرة بشأن الكارثة إلى دروس ملموسة لصالح العامة.

تعيق شروط المجهولية (عدم الكشف عن الهوية) الضرورية للمناقشة الصريحة لهذه القضايا الحساسة نشر أسماء معظم المنظمات والخبراء الذين يتم استشارتهم في وضع هذه الدراسة. ومع ذلك، نود أن نعرب عن امتناننا لأعضاء منظمة Diet، والحكومة اليابانية، وجامعة طوكيو، ومؤسسة ميتسوبيشي للأبحاث، والسفارة الأمريكية باليابان الذين كرسوا وقتهم وأفكارهم بسخاء. كما نود أن نشكر العقيد إدوارد فاجان (Edward

(Vaughan)، التابع للقوات الجوية الأمريكية، نظير آرائه بشأن عملية نوموداتشي والتعاون الثنائي. وختامًا، نود أن نعرب عن خالص امتناننا لمديري شركة طوكيو للطاقة الكهربائية ومهندسيها الذين أمدونا برؤية مباشرة عن جهود التعافي الفورية والسارية. وفي النهاية، نمتن لريتشارد دانزيغ (Richard Danzig)، الذي قدم لنا تعليقات شاملة عن هذا النهج، وكذلك الدكتور روبرت سيندلر (Robert Sindelar) بمختبر Savannah River National Laboratory وكذلك الدكتور دون سنايدر (Don Snyder) من مؤسسة RAND، الذي قدم مراجعات دقيقة على الدراسة النهائية.

وفي أثناء إجراء الأبحاث لهذه الدراسة، أجرت مؤسسة RAND مناقشات مع الكثير من الخبراء الذين عبروا عن وجهات نظرهم الشخصية والصرحة لنا. إننا نشكرهم، كما لا نسيء فهم وجهات نظرهم على أنها تمثل آراء مؤسساتهم الخاصة. بالإضافة إلى ذلك، أجرت مؤسسة RAND مقابلات مع هؤلاء الأفراد بعد إجراء مراجعة كاملة لحماية الأفراد بحسب بروتوكولاتنا، مع الالتزام بجميع سياسات وزارة الدفاع الأمريكية والأنظمة الفيدرالية السارية التي تنظم حماية الأفراد المشاركين في البحوث.

وزارة الدفاع الأمريكية	DoD
الدعم الدفاعي إلى السلطات المدنية	DSCA
الوكالة الفيدرالية لإدارة الطوارئ	FEMA
نظام تحديد المواقع العالمي/الجغرافي	GPS
جسيمات الهواء عالية الكفاءة	HEPA
قوات الدفاع الذاتي اليابانية	JSDF
مفوضية الرقابة النووية في اليابان	NRA
شركة طوكيو للطاقة الكهربائية	TEPCO





## سلسلة الأحداث المؤدية إلى التلوث

شرع المهندسون والفنيون على الفور في اتخاذ إجراءات إيقاف التشغيل الطارئ فيما يتعلق بالمفاعلات قيد التشغيل داخل محطة الطاقة النووية فوكوشيما دايتشي التي تقع على مسافة 160 كيلومترًا من مركز الزلزال. وذلك في الوقت الذي ضرب فيه الزلزال الهائل منطقة توهوكو في 11 آذار (مارس) لعام 2011 والذي بلغت قوته 9.0 درجات على مقياس درجة العزم. تم إنشاء هذه المفاعلات من أجل أن تتحمل الهزات الأرضية الكبيرة التي يكثر حدوثها في اليابان مدعومة بمولدات طاقة احتياطية في حالة الطوارئ والتي تقوم بتزويد الكهرباء لتشغيل معدات تدوير المياه الضرورية التي تُستخدم في تبريد الوقود. ولكن على الرغم من ذلك فقد تكبدت هذه المفاعلات بعض الأضرار. قامت أنظمة التحكم الآلية بإدخال قضبان مصنوعة من عنصر البورون داخل الوقود من أجل إخماد التفاعل التسلسلي. كما بدأت تلك الأنظمة في تشغيل تدوير المياه الطارئ الذي يعمل بواسطة مولدات الديزل الاحتياطية. كانت أمواج تسونامي حينها. التي وصل ارتفاعها إلى 15 مترًا. قد تجاوزت الحاجز البحري البالغ طوله 6 أمتار في فوكوشيما وذلك بعد ساعة من وقوع الزلزال. حيث انقطعت كل الطاقة بما في ذلك أنظمة الدعم الاحتياطية.

تستخدم مفاعلات الماء المغلي الستة في فوكوشيما دايتشي كريات وقود اليورانيوم (فترة عمر النصف تبلغ 700 مليون عام) المغطاة بالزركونيوم. مع قضبان تحكم البورون الطويلة من أجل امتصاص النيوترونات وإخماد التفاعل التسلسلي الخاضع للتحكم. يستغرق الأمر لحظات لإدخال القضبان في الوقود تلقائيًا. لكن النواتج الانشطارية المُشعّة تستمر في توليد الحرارة. يستلزم إيقاف التشغيل التام إدخال القضبان (وقد تم ذلك في غضون دقائق من وقوع الزلزال) كما يستلزم نقل الوقود والنواتج إلى أحواض التبريد (لم تبدأ نظرًا لأنها تستغرق أيامًا). وهو ما قد يستغرق عدة أسابيع لإيقاف المفاعلات بشكل كامل. ومع وضع إيقاف التشغيل المتوسط. يتم ضخ الماء عبر

النظام من أجل استخراج الحرارة، والأهم من ذلك، لمنع الانصهار. كانت المفاعلات رقم 1 و2 و3 تعمل بكامل طاقتها التشغيلية قبل وقوع الزلزال حيث كانت تمتد شرق اليابان بالطاقة. في الوقت الذي تم فيه إيقاف التشغيل جزئياً أو كلياً للمفاعلات رقم 4 و5 و6 من أجل الصيانة الدورية، استمر توليد الحرارة السائلة عن طريق الوقود النووي وذلك في ظل انقطاع الطاقة عقب التسونامي، كما ارتفعت حرارة مياه التبريد داخل ثلاثة مفاعلات من المفاعلات الستة بشكل مفرط. وعند وصول درجات الحرارة إلى ارتفاع كافٍ، تتفاعل المياه مع الزركونيوم مما ينجم عنه غاز الهيدروجين المتطاير.

طبقت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية (TEPCO)، الشركة المالكة للمحطة، عدداً من الحلول البديلة خلال سعيها الدؤوب لتبريد الوقود وتبيد غاز الهيدروجين الخطر وتنقيسه على مدار الأيام القليلة التالية. تسبب الزلزال في تدمير الطرق كما قضت أمواج التسونامي العاتية على الكثير من المعدات المحلية، ولذلك كانت الموارد محدودة للغاية. وبحلول اليوم الرابع، تعرضت ثلاثة مفاعلات إلى الانصهار والانفجارات الهيدروجينية مما تسبب في انتشار نواتج انشطارية نووية مُشعَّة<sup>1</sup> على مساحة بحجم ولاية كونيتيكت. بدأت مستويات الإشعاع داخل المحطة نفسها بالتزايد، وبدأت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية بإخلاء الجميع إلا مجموعة قليلة من متطوعين مُختارين بانوا معروفين باسم مجموعة فوكوشيما 50.

وفي هذه الأثناء، قامت قوات الدفاع الذاتي اليابانية والجهات المستجيبة المحلية والمجتمع الدولي بالتدخل. كما قام متطوعون من جناح الطائرات المروحية التابع لقوات الدفاع الذاتي اليابانية بإلقاء المياه على المفاعلات من الأعلى، كما استغرق رجال الإطفاء ساعة في الموقع من أجل تجهيز الخراطيم، وقامت قوَّات البحرية برش مياه البحر داخل المحطة. كانت الحكومة اليابانية تشعر بالقلق خشية أن تتوالى الأحداث في الخروج عن السيطرة وبنجم عنها انبعاث إشعاعي على نطاق أكبر ربما يهدد طوكيو الواقعة على بعد 260 كيلومتراً. غير أنه بحلول نهاية آذار (مارس)، نجحت الجهات المستجيبة في الحيلولة دون تصاعد كارثي للنكبة وتراجعت مستويات الإشعاع بشكل كافٍ يسمح بعودة العمال إلى المحطة. كما تراجعت مخاوف وقوع المزيد من الانفجارات الإشعاعية النووية. واصل العاملون في المحطة عملهم الشاق يومياً لاحتواء كميات هائلة من المياه المُشعَّة، لكن تمت استعادة الطاقة المحلية واتسعت دائرة الاهتمام للعمل بكمد من أجل تعطيل المحطات والتخفيف من حدة الكارثة البيئية.

<sup>1</sup> نواتج الانشطار النووي، مقارنة بالوقود النووي، هي منتجات ثانوية ناتجة من الانشطار النووي المُؤلَّد للحرارة والخاضع للتحكم لوقود اليورانيوم. هذه النفايات تجمع عناصر مختلفة، وغالباً ما تكون نفسها مشعَّة.

قامت الحكومة اليابانية بإجلاء أكثر من 100,000 شخص من المنطقة المحيطة بالمحطة. انتشرت النفايات النووية بفعل الانفجارات التي طالت المحطة ولوثت ما يحيطها من مزارع وأشجار وقرى ومياه بحر ومياه جوفية، وتتكون النفايات النووية في المقام الأول من عنصر التيلوريوم المُشع (فترة عمر النصف تبلغ 14 ثانية)، واليود (فترة عمر النصف تبلغ 8 أيام)، والسيزيوم (فترة عمر النصف تبلغ سنتين أو 30 سنة، بحسب النظر). سرعان ما انحل كل من التيلوريوم واليود إلى منتجات ثانوية غير ضارة، ولكن ظل السيزيوم، وهو معدن لزوج ذو رائحة منقّرة، يحاكي كيميائيًا البوتاسيوم في النظم البيولوجية، يشعر الشعب الياباني، لأسباب تاريخية، بقلق شديد إزاء التعرض للإشعاع على المدى الطويل، لذلك يُجري السكان المحليون الآن مسحًا روتينيًا على المواد الغذائية القادمة من المنطقة بحثًا عن بصمات السيزيوم، نما سوق عدادات غايغر في اليابان بمقدار 20 ضعفًا بعد الكارثة.<sup>2</sup>

لم تكن هناك خسائر مؤكدة نتيجة للتسمم الإشعاعي الحاد في الأشهر التي أعقبت الكارثة،<sup>3</sup> وتُقدّر منظمة الصحة العالمية أن الزيادات في معدلات الإصابة بالسرطان بسبب التلوّث ستكون غير قابلة للكشف.<sup>4</sup> ورغم أن وقود اليورانيوم قد انصهر في المحطة، فإنه لم ينتشر في البيئة؛ فقد انتشرت فقط النفايات النووية التي كانت إلى حد ما أسهل في معالجتها وأقل خطرًا. تلتزم الحكومة اليابانية بتطهير المنطقة الشاسعة وستعطل المحطة بالكامل في فوكوشيما دايتشي على مدى العقود العديدة المقبلة. تناقش هذه الدراسة أوجه نجاح التقنيات المستخدمة في عملية التطهير وأوجه الإخفاقات.

## الدافع

في أعقاب وقوع الزلزال والتسونامي في اليابان في 11 آذار (مارس) 2011 وحتى كانون الأول (ديسمبر) 2013، حلّلت مؤسسة RAND كيفية استخدام التقنيات لمعالجة التلوّث

<sup>2</sup> Pavel Alpeyev, "Japan Geiger Counter Demand After Fukushima Earthquake Means Buyer Beware," Bloomberg News, July 14, 2011.

<sup>3</sup> تُقدّر منظمة الصحة العالمية أن جرعات الإشعاع في الجسم بالكامل التي تعرض لها الأشخاص المتواجدون بالقرب من الموقع وفي محيطه لم تتجاوز قط 50 ملي زيفرت، وهو ما يقل كثيرًا عن الجرعة الحادة المميتة البالغة 10,000 ملي زيفرت. World Health Organization, *Health Risk Assessment from the Nuclear Accident After the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami*, 2013.

<sup>4</sup> World Health Organization, 2013, p. 8.

البيئي المشع الناجم عن فقدان السيطرة على محطة فوكوشيما للطاقة النووية، والهدف من ذلك بالتحديد هو مساعدة وزارة الدفاع الأمريكية على الاستعداد للاستجابة إلى أي أحداث مماثلة في المستقبل. وعلى وجه الخصوص، كان أصحاب الشأن في وزارة الدفاع مهتمين بشدة بفهم كيفية مساهمة التقنيات في كل ما يلي:

- تحديد حجم التلوث عبر المكان والزمان
- تطهير الأسطح والبنية التحتية والبيئة والأفراد
- تخزين المواد المشعة، ونقلها، والتخلص منها تمامًا.

رَكَز أصحاب الشأن في وزارة الدفاع الأمريكية بصورة خاصة على فهم النقص في قدرات الاستجابة التي كان من الممكن معالجتها باستخدام تقنيات لم تكن متاحة بعد أو لم يتم دمجها بعد بطريقة تجعلها مفيدة في سياق حادث انتشار مواد مشعة. يمكن أن تشمل هذه الأحداث إطلاقات صغيرة النطاق للإشعاع من محطات الطاقة النووية، وفقدان واسع النطاق للاحتواء في محطات الطاقة النووية، أو عند حدوث هجمات إشعاعية، أو هجمات نووية.<sup>5</sup> يمكن أن تطور وزارة الدفاع مثل هذه التقنيات في محاولة للتعامل على نحو أفضل مع الحوادث الإشعاعية أو النووية المستقبلية في الولايات المتحدة أو خارجها.

لقد وجدنا أربعة مواضيع عامة تتكرر من خلال بحثنا، ونود أن نلقي الضوء عليها في البداية؛ سوف نعود إليها مرارًا وتكرارًا خلال مسار هذا البحث.

### 1. الاحتياجات المتعلقة بالقدرة على الاستجابة ستكون متنوعة للغاية.

يتعين أن تتناول جميع قدرات الاستجابة الاحتياجات والظروف المكانية من الدرجة الأولى. فالمناطق المختلفة ستتطلب أنواعًا مختلفة من الاستجابة، كما ستتطلب مصادر مختلفة مثل التربة والخرسانة والمياه والهواء. علاوة على ذلك، غالبًا ما تتطلب المنطقة ذاتها أنواعًا مختلفة من قدرات الاستجابة بمرور الوقت، ويمتد هذا التنوع ليشمل أنواع الحوادث كذلك؛ سوف تكون هناك حاجة إلى قدرات استجابة مختلفة للسلاح الإشعاعي، والسلاح النووي، والإطلاق العَرَضي صغير النطاق، والإطلاق العَرَضي المستمر الأكبر نطاقًا.

<sup>5</sup> قد يشمل الهجوم الإشعاعي نواتر المواد المشعة دون تفاعل نووي؛ على سبيل المثال، يمكن تعبئة المواد المشعة حول المتفجرات التقليدية لتفريقها على مساحة شاسعة.

2. **العديد من المشكلات المرتبطة بالاستجابة لحادث واسع النطاق من هذا النوع هي دالة على النطاق الملحوظ المُتضمن في الاستجابة، وهو ما يستدعي إجراء تقييم شامل لمزايا تدابير معينة ومدى فاعلية هذه التدابير من حيث التكلفة.** يمكن معالجة عدد قليل من غالونات المياه أو أمتار مربعة من التربة بتكاليف مقبولة؛ فالكميات والمساحات الهائلة المتضمنة في حادث واسع النطاق أقل عرضة للحلول ذات الفاعلية من حيث التكلفة. (نحدد التكاليف بشكل عام، لتشمل صحة الإنسان والتأثير على المجتمع). تعد عملية إزالة التلوث صعبة للغاية على النطاق الواسع، مثلما هو الحال مع التخزين الآمن والسليم للمواد المشعة.
3. **الانتشار واسع النطاق وفي الوقت المناسب لمعلومات قابلة للتنفيذ وواضحة وتتسم بالشفافية والموثوقية هو أمر بالغ الأهمية للحد من الآثار والتكاليف المجتمعية، فضلاً عن تشكيل الاستجابة.** يمكن للأشخاص اتخاذ إجراءات أفضل لحماية صحتهم، ومن المرجح أن تنقلص الآثار الاقتصادية. إذا كان الجمهور على دراية جيدة بالمصادر الموثوقة. بالإضافة إلى ذلك، تؤثر التصورات العامة تأثيراً قوياً على قرارات الاستجابة؛ ويجب أن تكون النهج السليمة علمياً مقبولة لدى الجمهور على نطاق أوسع إذا قدر لها النجاح.
4. **هناك حاجة إلى "مجموعة أدوات" متنوعة للغاية من أجل الاستجابة الفعّالة.** نظراً لتنوع قدرات الاستجابة اللازمة في النطاقات الكبيرة، فضلاً عن العديد من القيود التي تفرضها التكاليف والتصورات العامة، فهناك حاجة إلى مجموعة كبيرة ومتنوعة من النهج للتعامل مع الأحداث الإشعاعية أو النووية؛ حيث إنه لن يتم تطبيق أي نهج على نطاق واسع. لحسن الحظ، هناك بالفعل ثروة من الأبحاث حول القضايا الإشعاعية والنووية في كل من القطاعين المدني والعسكري. يتمثل أحد أدوار الباحثين في وزارة الدفاع في التفكير في كيفية الاستفادة من مثل هذه الأبحاث، بينما يحاول أيضاً التفكير في كيفية تكامل القدرات المدنية والعسكرية مع بعضها بعضاً.

## تنظيم هذه الدراسة

لقد نظمنا هذه الدراسة في أربعة جوانب أساسية للاستجابة للتلوث الإشعاعي، مع اعتبار كل مما يلي موضوعًا لفصل مستقل:

- تحديد حجم التلوث
- منع المزيد من الضرر الناجم عن المادة المشعة أو منع انتشارها
- إزالة الملوثات المشعة وجمعها
- التخلص بأمان وبإحكام من المواد الملوثة.

نبدأ بمناقشة شاملة لما يستتبعه هذا النوع من الاستجابة في كل من هذه الفصول، ثم نركز على التجربة في فوكوشيما، ثم نسلط الضوء على الاتجاه المرتقب لحللول التحديات المستقبلية استنادًا إلى المشكلات والنجاحات الناتجة عن تلك التجربة. نستكشف بعد ذلك استخدام الروبوتات في فوكوشيما، والدروس المستفادة من تلك التجربة، على الرغم من أن الروبوتات مرتبطة دائمًا بمهمة معينة، بما في ذلك تلك المذكورة أعلاه، فقد رأينا أن هناك وفرة من المواد المتعلقة بالروبوتات التي لم تكن محددة المهمة، والتي كان من الأفضل التعامل معها بشكل منفصل. وبعد ذلك، نستعرض بإيجاز تجربة الاستجابة لحادثة تشيرنوبيل في عام 1986. هذا يساعد على تسليط الضوء على جوانب التقدم منذ هذا الحدث، فضلًا عن أوجه التشابه بين هذين النوعين من الاستجابة، وعلاوة على ذلك، أتاحت فترة الربع القرن التي تلت حادثة تشيرنوبيل مزيدًا من الوقت لجمع الدروس بشأن مسائل الاستجابة طويلة الأجل بقدر أكبر مما هو متاح لقضية فوكوشيما.

وأخيرًا، نقدم بعض الاستنتاجات والتوصيات استنادًا إلى تحليلنا.

## تحديد حجم التلوث

عند التصدي لحدث إشعاعي بفعالية، فإنه من الأهمية بمكان التيقن بشكل قاطع من كمية المواد المشعة التي تسربت وكذلك الأشياء التي تعرضت لهذه المواد من أشخاص وبنية تحتية ومعدات والبيئة عمومًا. وتعتبر معرفة هذه الأمور أمرًا أساسيًا في الحد من تعرض المزيد من البشر للإشعاع. وتحديد مدى إمكانية استخدام المناطق أو الموارد. وبذل جهود فعّالة لإزالة التلوث.

هناك العديد من الجوانب المعقدة لعملية التقييم هذه. وبوجه عام سيكون نطاق قياسات الإشعاع محليًا بشكل كبير؛ قد يختلف مقدار التعرض للإشعاع اختلافاً ملحوظاً بالمناطق الصغيرة نسبيًا. على سبيل المثال، عندما تتسبب تغيرات طفيفة في الطوبوغرافيا المحلية في تشكيل برك من الماء، فسيتمركز الإشعاع الذي يتم جمعه بواسطة الماء في وسط كل بركة أثناء التبخر، وهو ما ينجم عنه نشاط إشعاعي يأخذ أنماطاً على شكل "نقاط جلد النمر". بالنسبة لأي نقطة معينة على سطح الأرض، فإن التعرض للنشاط الإشعاعي يترتب على الارتفاع، ويتوقف ذلك على درجة انحصار المادة الإشعاعية بالسطح، ودرجة تداخلها مع التربة الجوفية أو المياه، ودرجة توزيعها في الهواء، و/أو تواجدها على الأسطح المجاورة التي تختلف في الارتفاع (مثل الأشجار أو المباني). كما ستتغير قياسات الإشعاع ديناميكياً مع مرور الوقت، حيث تنتقل الجسيمات المشعة وتنتشر. وسوف تتسبب الرياح والترسيب وغيرها من الظواهر البيئية في انتقال النويدات المشعة، وكذلك الأنشطة البشرية والحيوانية. تميل بعض النظم البيولوجية بصفة خاصة لتركيز أنواع معينة من النويدات المشعة،<sup>1</sup> وقد ترتبط التركيزات بمراتب الكائنات

<sup>1</sup> إنها في الواقع تعمل على تركيز عناصر كيميائية محددة، مثل السيزيوم أو السترونشيوم، بما في ذلك النظائر الإشعاعية لهذه العناصر التي هي محل اهتمام، انظر، على سبيل المثال، P. Soudek, S. Valenová, Z. Vavriková, and T. Vanek, "(137)Cs and (90)Sr Uptake by Sunflower



الحية في السلسلة الغذائية. بالإضافة إلى ذلك، من المرجح أن يكون عدد العمليات التي تؤثر على انتشار الإشعاع من خلال البيئة دوريًا. على سبيل المثال، يمكن أن تتركز النويدات المشعة في أوراق الأشجار خلال فصلي الربيع والخريف، ثم يتم إعادة نشرها في البيئة فقط عندما تسقط الأوراق على الأرض خلال الخريف والشتاء.

بشكل عام، هناك العديد من مجموعات البيانات الرئيسية التي يجب جمعها في أي نقطة زمنية معينة لتتبع انتشار النشاط الإشعاعي بدقة؛ علاوة على ذلك، بالنظر إلى التغييرات المهمة التي ستحدث مع تطور الظروف، ستحتاج مجموعات البيانات هذه قياسات إضافية لضمان استمرار دقتها بالإضافة إلى نمذجة تغييرها بمرور الوقت بينما تنتقل وتتلاشى. من الطبيعي أن يكون لدى صناع القرار القدرة على معرفة معدلات جرعة الإشعاع التي يتعرض لها الأفراد في أي لحظة، وكذلك الجرعة التراكمية التي تعرضوا لها، وذلك لتوجيه المستجيبين بعيدًا عن مناطق الخطر وضمان عدم تعرض أي شخص للإشعاع المفرط. كما يتعين عليهم معرفة كم الإشعاع المنبعث في منطقة محلية ما، وما إذا كان هذا الإشعاع يصدر عن الجزيئات المحمولة عبر الهواء أو مصادر المياه أو الأسطح الصناعية أو التربة أو النباتات أو الحيوانات. ومن المهم تحديد نوع التلوث، على سبيل المثال، يمكن إزالة الغبار المشع السطحي بسهولة أكبر من إزالة الجسيمات الغائرة بشدة أو النويدات المشعة الذائبة في المياه الجوفية. قد يعتمد التعامل مع المواد المشعة كذلك على فترات عمر النصف للنويدات المشعة التي تحتويها؛ وقد يُسمح بتلاشي النويدات المشعة قصيرة العمر في موقعها الطبيعي، بينما قد تتطلب النويدات الأطول عمرًا إزالتها وتغليفها.

عند القيام بهذا النوع من التقييم، فإن هناك العديد من التحديات الرئيسية. يكمن التحدي الأول في الحاجة إلى استخدام أعداد كبيرة جدًا من أجهزة الاستشعار المتينة والمتسمة بالفاعلية من حيث التكلفة وذلك بالنظر إلى مستويات الإشعاع المختلفة عبر الزمن والمكان. ويتمثل التحدي الثاني في توفير أجهزة الاستشعار إلى الأماكن المطلوبة، وبالأعداد المطلوبة، ونقلها في أنحاء المناطق المتضررة، وتمكينها من إرسال المعلومات التي تجمعها إلى المحللين. ويجب القيام بكل هذه الأمور في بيئة قاسية شهدت مؤخرًا نوعًا من الكوارث.

ونناقش فيما يلي الخبرات التي تم تحصيلها في هذه الجوانب فيما يتعلق بفوكوشيما.

## تجربة فوكوشيما مع تحديد حجم التلوث

أجرت السلطات اليابانية<sup>2</sup> والجيش الأمريكي<sup>3</sup> عددًا من عمليات المسح الجوي لوصف حجم الإشعاع المنبعث في البيئة على نطاق أوسع. خاصة في الأيام والأسابيع الأولى التي تلت الحادث.<sup>4</sup> وقد وفرت عمليات المسح وعيًا ميدانيًا قيمًا فيما يتعلق بالحجم الإجمالي للتلوث مع انتشار المواد المشعة في بادئ الأمر. كانت عمليات المسح الجوي أسرع بكثير من عمليات المسح الأرضي؛ كما أنها كانت بحاجة إلى موارد وأفراد أقل لتغطية منطقة معينة، بينما لم تتطلب تعرض الأفراد للإشعاع تعرضًا ملحوظًا ولا عددًا كبيرًا من المركبات البرية المصدلة ضد الإشعاع. وكان هذا عاملًا حاسمًا بشكل خاص خلال الفترة التي تلت الحادث مباشرة. عندما حالت البيئة القاسية دون القدرة على نشر موارد كبيرة بشكل فعال لهذه المهمة.

قدمت عمليات المسح الجوي بوجه عام دقة أداء كافية في مناطق واسعة لتكون قادرة على اتخاذ قرارات واسعة النطاق فيما يتعلق بإجراءات الاستجابة، بما في ذلك كيفية إجراء رصد أرضي لاحق. وبالنظر إلى حجم الاستجابة، فقد كانت عمليات المسح هذه جزءًا ضروريًا منها. ومع ذلك، فإن عمليات المسح الجوي محدودة التفاصيل من حيث تحديد التغيرات المحلية في الانبعاثات الإشعاعية، وهو أحد الأسباب التي دعت إلى ضرورة إجراء المزيد من عمليات المسح الأرضي. وعلاوة على ذلك، قلّصت الطبوغرافيا الجبلية في اليابان من دقة البيانات التي تم جمعها من الجو؛ حيث كانت المناطق العالية تقترب

Junichiro Ishida, "Response to TEPCO's Fukushima-Daiichi NPS Accident and<sup>2</sup> Decontamination in Off-Limits Zones," briefing, Japan Atomic Energy Agency, January 18, 2012.

Andrew Feickert and Emma Chanlett-Avery, *Japan 2011 Earthquake: U.S. Department<sup>3</sup> of Defense (DOD) Response*, Washington, D.C.: Congressional Research Service, R41690, June 2, 2011.

<sup>4</sup> تُواصل الوكالات اليابانية المتعددة، والمجتمع الدولي، والمنظمات غير الحكومية إجراء عمليات المسح. لم يتم الإبلاغ عن نتائج المسح هذه ولم تتم إدارتها بواسطة أي كيان لتوفير نوع من التنسيق. ومع ذلك، تحتفظ الوكالة الدولية للطاقة الذرية بقاعدة بيانات واسعة من القياسات. تسمى قاعدة بيانات رصد فوكوشيما، التي يمكن الاطلاع عليها في الموقع <https://iec.iaea.org/fmdl/>.

في ارتفاعها من طائرة تحلق على ارتفاع منخفض. لذلك جاء تصور الطيران بأن معدلات الانبعاث الإشعاعي في هذه المناطق الأكثر قُرْبًا أعلى من المعدلات في المناطق الأخرى المنخفضة.

تفاقت العديد من الصعوبات المرتبطة بالكشف عن الإشعاع على مستوى الأرض بسبب تأثيرات الزلزال والتسونامي، التي أتلفت البنية التحتية في جميع أنحاء المنطقة. تم تدمير أجهزة مراقبة الإشعاع في المنطقة أو إزالتها؛ وكانت أجهزة المراقبة الوحيدة التي لا تزال في الخدمة بعيدة عن المشهد. ولكن سرعان ما نفذت منها إمدادات الطاقة الاحتياطية. أدى فقدان البنية التحتية للطاقة الكهربائية والاتصالات إلى الحد من القدرة على إجراء عمليات أرضية، سواء بالاعتماد على الأفراد أو الروبوتات. كان هناك أيضًا نقص في الأفراد المؤهلين بالمنطقة لإجراء عمليات المسح بأنفسهم أو لدعم الروبوتات التي تجري عمليات المسح. وقد أسهمت البنية التحتية المتدهورة للنقل، ونقص الإمدادات الأساسية مثل مياه الشرب، والمخاطر التي يتعرض لها الأفراد، في نقص الموظفين المخصصين لهذا الغرض. علاوة على ذلك، تعرض الأفراد والموارد لضغوط بسبب الحاجة إلى إعادة مسح المناطق بشكل متكرر بمرور الوقت، وهو ما يعكس حقيقة تغيّر مستويات الإشعاع بسبب ظروف الرياح والترسيب والتركيز البيولوجي والأنشطة البشرية.

أسهم عدد من الظروف القاسية مثل ارتفاع درجات الحرارة ونقص الضوء في تعقيد عملية الاستشعار بشكل أكبر. ناهيك عن أنه لا بد من الوصول إلى نُهْج مستنبطة لوصف الحطام الإشعاعي الموجود تحت الماء أو لتحديد مدى تلوث المياه نفسها. وتشير أحد مصادرها إلى أن المركبات ذاتية القيادة تحت الماء قد تكون مفيدة في هذا السياق.

وفي بيئات متعددة، كان من الصعب تتبع التسريبات أو الوصول إلى "المناطق الخطرة"؛ وهي المناطق التي تصدر كميات كبيرة غير عادية من الإشعاع. وقد كان من المفيد معرفة المزيد عن توزيع كل من اليورانيوم والبلوتونيوم في الموقع. قد تتمثل إحدى النُهْج المحتملة في استخدام الميونات دون الذرية التي تنشأ بصورة طبيعية في الخلفية أثناء عبورها للغلاف الجوي ومرورها بالقرب من المعادن حيث يؤثر عليها كل من البلوتونيوم واليورانيوم (من خلال الانعكاس أو الإيقاف). كان من الممكن وضع خريطة عامة لمواقع محتملة لهذه المعادن المشعة، تمامًا مثل قيام الطبيب بفحص العظام

البشرية باستخدام التظليل بالأشعة السينية، وذلك من خلال تصوير الميونات وكشف هذه الظلال.<sup>5</sup>

فشلت الروبوتات الأرضية التي تحمل مستشعرات الإشعاع في كثير من الأحيان، وذلك لعدة أسباب. فلم يكن معظمها مصلاً ضد الإشعاع، وبالتالي، فقد تدهورت بسرعة في البيئات عالية الإشعاع. (على نحو أكثر تحديداً، تلقت الأجهزة الإلكترونية بالروبوتات معلومات خاطئة بشكل فعال من النشاط الإشعاعي الذي كانت مغمورة فيه؛ وكان بالإمكان تجنب هذا بالتدريع أو بتصميم أفضل للدوائر). كانت حركات الروبوتات غالباً ما تعوقها أكوام الركام، والدرجات، ومقابض الأبواب، فضلاً عن تشابك أسلاكها الكهربائية. واجهت الروبوتات صعوبات كبيرة في الاتصال في البيئة القاسية مع وجود العديد من المباني التي حجبت عمليات الإرسال، وافتقرت إلى الاستقلالية للعمل دون اتصالات ذات نطاق ترددي عالٍ. وأخيراً، افتقرت الروبوتات أحياناً إلى القدرة أو القوة اللازمة في التعامل مع الأجسام من أجل أداء بعض المهام.

ثمة تحديات إضافية شملت تحليل البيانات ونشرها. وفي العديد من الحالات، لا يمكن جمع تدفقات البيانات من الروبوتات الأرضية حتى يتم استعادتها فعلياً؛ ومن ثم كان هناك حاجة لمزيد من الوقت لتحليل البيانات. وحيثما كانت مجموعات البيانات متاحة، لم يكن يتم إرسالها دائماً بكفاءة. على سبيل المثال، لم يتم جمع البيانات الإشعاعية الأولية من أجهزة الاستشعار في المناطق التي لم تلتهمها أمواج تسونامي (طالما أنها كانت بها طاقة في أعقاب الحدث) ولم يتم دمجها في التحليل بالوقت الفعلي، ولم تتم مشاركتها إلا بعد مرور عام. لم تكن هناك صورة عملياتية مشتركة للتلوث الإشعاعي تدمج جميع المعلومات المتاحة. وأشار الخبراء الذين أجرينا حواراً معهم فيما بعد إلى ضرورة الحصول على صورة رقمية يتم تحديثها بشكل مستمر وتلقائي، بدلاً من محاولة دمج الملاحظات المكتوبة بخط اليد وغيرها من أشكال الاتصال المختلفة. كانت الأخطاء في النسخ شائعة، كما هو متوقع. ولم يتم تقديم الكثير من البيانات التي تم جمعها إلى السلطات الحكومية.

<sup>5</sup> وتنتشر الميونات طبيعية المنشأ من العناصر الثقيلة مثل اليورانيوم والبلوتونيوم، ويمكن تصويرها، وتتمثل صعوبة هذه الطريقة في أن أجهزة الكشف عن الميون باهظة الثمن نسبياً وأن معدل الميون متغير زمنياً، لذلك يجب إجراء قياسات دقيقة للخلفية لأغراض المقارنة.

وبشكل عام، تسبب نقص المعرفة بالتلوث الإشعاعي في حدوث أوجه قصور في الاستجابة ومخاطر أخرى على الأفراد. وفي العديد من الحالات، لم تكن السلطات على علم بمدى تعرض الأفراد الذين تم إرسالهم إلى المنطقة للإشعاع، أو بأنهم سيتعرضون قريباً كنتيجة للحركة إما من قبل الأفراد أنفسهم أو انتقال المواد المشعة.

## حلول ممكنة

تجلت الحاجة إلى أجهزة استشعار منتشرة على نطاق واسع وقادرة على الإبلاغ باستمرار عن النشاط الإشعاعي المحلي وظروف الرياح. ومن خلال توفير معدلات من الجرعة الفورية لمختلف الأنواع من الإشعاع والجرعات التراكمية على حسب الوقت وسرعات الرياح واتجاهاتها، فإن كلاً من الكشف واسع الانتشار وشبكة الرصد يساعدان في فهم الظروف المشعة الحالية والمستقبلية على المدى القريب. كما يجب أن تكون أجهزة الاستشعار هذه قادرة على استشعار مواقعها والإبلاغ عنها في ثلاثة أبعاد، وذلك باستخدام النظام العالمي لتحديد المواقع أو الأنظمة القائمة على القمر الصناعي غير المعرضة للضرر الناجم عن حوادث مرتبطة بالأرض.

ويمكن نشر أجهزة الاستشعار هذه على متن طائرات بدون طيار ومركبات ذاتية القيادة بالجو والبر وفوق الماء وتحت الماء لإجراء عمليات مسح للمنطقة. ويمكن استخدام المركبات ذاتية القيادة أو غير المؤهلة بالأفراد، سواء في الهواء أو على الأرض أو في الماء، لتوزيع أجهزة الاستشعار هذه على نطاق واسع عبر مجموعة من المواقع الثابتة. وبعدها ستقوم هذه الأجهزة بجمع البيانات ونقلها باستمرار. (ويمكن أيضاً لمثل هذه المركبات توصيل الإمدادات والمعدات الأخرى التي تكون الحاجة ماسة إليها). ويمكن للأفراد والمركبات المؤهلة بالأفراد أن يحملوا معهم أجهزة الاستشعار هذه لتسجيل الظروف المحلية، وتمكينهم والآخرين من إنجاز المهام الضرورية مع الإلمام الكامل بمستويات تعرضهم للإشعاع. بطبيعة الحال، يجب تصميم أجهزة الاستشعار لتكون صغيرة، ومتينة، ومنخفضة التكلفة حتى يمكن استخدامها في جميع الحالات والسياقات. كما يتعين عليها أن تكون قادرة على تحمل الظروف البيئية لفترات طويلة دون مزيد من الدعم، الأمر الذي يتطلب مزيجاً من البطاريات والقدرة على "جمع" الطاقة من البيئة (على سبيل المثال، الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، أو حتى الطاقة الممتصة من الإشعاع). كما يجب كذلك أن تكون مُصَلِّدة ضد الإشعاع.

يتمثل أحد الجوانب الرئيسية لهذا الحل المقترح في أن أجهزة الاستشعار يتعين أن تكون متصلة بالشبكة بحيث يمكنها توفير البيانات في الوقت الفعلي للمحللين والمصممين. الذين يمكنهم دمجها وتحليلها لتزويد صناع القرار بمعلومات يمكن التصرف بناء عليها. في معظم البيئات في البلدان المتقدمة، لن يمثل ذلك صعوبة في ظل الظروف العادية؛ فالعديد من قنوات الاتصال اللاسلكي ستنجح إرسال البيانات من أجهزة الاستشعار المنتشرة إلى المواقع المركزية. ومع ذلك، فإنه من الممكن أن تتضرر البنية التحتية القائمة بعد وقوع حدث كارثي تسبب في انتشار المواد المشعة. ويمكن لأي نظام مرن وفعال لقياس انتشار الإشعاع استخدام مزيج من المركبات والمناطيد غير المأهولة بالأفراد لنقل المعلومات من أجهزة الاستشعار إلى المواقع المركزية من أجل التحليل والنمذجة. وبطبيعة الحال، فإنه يجب نشرها بسرعة بعد وقوع الحدث، ويجب توزيعها على نطاق واسع بما فيه الكفاية بحيث لا يتعين على أجهزة الاستشعار استهلاك قدر كبير من الطاقة للاتصال بها. من المحتمل أن يكون مقدار النطاق الترددي المطلوب لكل قراءة من أجهزة الاستشعار صغيراً؛ أي عدد قليل من الأرقام للإشارة إلى قراءات جهاز الاستشعار للجرعة الحالية والمترجمة. بالإضافة إلى موقعه وبيانات الرياح المحلية. ومع ذلك، فإنه يتعين على النظام استيعاب أعداد كبيرة من أجهزة الاستشعار، كل منها يصدر مثل هذه البيانات بشكل تكراري. كما يتعين أن يدمج مجموعات البيانات هذه وتحليلها ونقلها إلى مواقع متعددة حيث يمكن لصناع القرار استخدامها. وحيث يمكنهم إعداد تلك المعلومات لإصدارها للجمهور العام. كما يمكن إرسال هذه المعلومات إلى المواقع الميدانية، أو إلى العاملين في الميدان، للمساعدة في تحسين كفاءتهم والحد من تعرضهم للإشعاع. إذا كانت حدود النطاق الترددي تمنع إرسال مجموعة بيانات كاملة، فقد تكون درجات الانحدار أو الخطوط الكفافية المحلية كافية للمساعدة في اتخاذ القرارات.

قد تكون الشبكة الموصوفة أعلاه مرنة للغاية؛ فقد يؤدي فقدان المعلومات من أي جهاز استشعار محدد إلى قصور في المعلومات فقط في المناطق المحلية من الدرجة الأولى. وعلاوة على ذلك، فإن وجود مسارات كثيرة للاتصالات من شأنه أن يساعد في ضمان المرونة وهو ما يتأتى من خلال وجود محطات تقوية أكثر مما هو مطلوب إذا كانت جميع الأنظمة تعمل بشكل مثالي وربما من خلال قنوات اتصال متعددة.

وأوصت العديد من مصادرها بإنشاء "ممرات" عبر المنطقة الملوثة التي تم فيها إجراء عمليات مسح تفصيلية بشدة. ومن الناحية المثالية، كان من الممكن اختيار الممرات على أساس مسح أولي واسع النطاق يشير إلى المناطق التي كانت مستويات

الإشعاع فيها منخفضة نسبياً. ويمكن أن يساعد الرصد المستمر لهذه الممرات، وللبدائل الخاصة بأجزاء منها، في تمكين التنقل لكل من الأفراد والآلات، مع تقليل التعرض أو الحاجة إلى التصدي له. يتوافق مفهوم الممر جيداً مع فكرة إنشاء "جزر" إزالة التلوث لاحقاً. بل وإنشاء مسارات لها في نهاية المطاف، وهو ما سيتم مناقشته في الفصل التالي.

ذكرت بعض مصادرها مزايا امتلاك القدرة على إجراء عمليات مسح جوي ذات درجات أعلى من التفصيل عما كان ممكناً في ذلك الوقت. كما لوحظ من قبل، أن عمليات المسح الجوي تتسم بميزات مهمة فيما يتعلق بالسرعة ومتطلبات الموارد والأفراد في بيئة قاسية. يمكن النظر في العديد من نُهج تحسين عمليات المسح الجوي. إحداها هو استخدام الطائرات بدون طيار، والتي يمكن لبعض منها التحليق على وجه الخصوص ببطء وعلى مسافة قريبة نسبياً من الأرض. تكمن الطريقة الأخرى في تصميم خرائط إلكترونية طوبوغرافية ومفصلة للغاية، والتي كان يمكن استخدامها للحد من مستويات الإشعاع المرتفعة ظاهرياً والتي كانت في الواقع بسبب تغيرات في الارتفاع. اقترحت بعض مصادرها أن عمليات المسح الجوي محدودة بطبيعتها من حيث التفاصيل والدقة بسبب ظروف الرياح والظواهر الجوية الأخرى، وأن الاستخدام الأفضل للطائرات المأهولة أو غير المأهولة يكمن في إسقاط أجهزة الاستشعار على الأرض، لتكون بالتالي بمثابة محطات تقوية اتصالات لأجهزة الاستشعار هذه.

وهناك عدد من الحلول التي يمكن أن تساعد على تحسين أداء الروبوتات الأرضية. يمكن للتصليد ضد الإشعاع بواسطة التدرج والوفرة في تصميم الدوائر أن يتيح قدرة أكبر على تحمل المواد شديدة الإشعاع. هناك حاجة إلى إضفاء تحسينات على كل من التنقل والاستقلالية؛ ومثل هذه التطورات ستكون مفيدة في مجموعة متنوعة من السياقات الصناعية والعسكرية والاستهلاكية، وكذلك في الكوارث من أي نوع. سنناقش هذه القضايا بمزيد من التفصيل في الفصل المتعلق بالروبوتات.

## النتائج المستخلصة من الفصل

إن أجهزة الاستشعار سريعة الانتشار والقادرة على مسح مساحات كبيرة هي أجهزة بالغة الأهمية للوصف الأولي والمراقبة المستمرة لحدث انتشار إشعاعي. بالإضافة إلى ذلك، ستكون هناك حاجة إلى المزيد من أجهزة الاستشعار المحلية الدقيقة للغاية والمناسبة

لدعم إنشاء وصيانة الممرات الآمنة ومناطق تجمع الأشخاص بالإضافة إلى الأنظمة المصلدة غير المأهولة التي تحمل أجهزة الاستشعار. إن الفجوات في المعرفة حول حجم التلوث في وقت مبكر من كارثة فوكوشيما حالت دون استجابة فعالة بالكامل من قبل المسؤولين. وبالتالي، فإن هناك حاجة لتقنيات المعلومات التي تساهم في مشاركة قياسات الإشعاعات لأجهزة الاستشعار وعرضها بدقة وبسرعة في الوقت الفعلي لدعم الاستجابة للكوارث.





## الوقاية من الضرر الناجم عن الإشعاع وزيادة انتشار المواد

نعرض في هذا الفصل خمسة جوانب مختلفة من تخفيف الجرعات الإشعاعية على الأفراد وأثارها عليهم وزيادة انتشار المواد الملوثة:

- استخدام سترات الإشعاع والحماية الجماعية
- قياس جرعات الإشعاع لدى الأفراد
- وسائل الاستجابة الطبية والبيولوجية والجينية
- الحد من التلوث عن طريق الزراعة والغذاء ومياه الشرب
- التحكم في المواد الملوثة للحيلولة دون زيادة انتشارها.

### مشكلة سترات الإشعاع والحماية الجماعية

لا شك أن الأفراد الذين يضطرون للعمل في بيئات ملوثة تلزمهم حماية تناسب كمية الإشعاع وأنواعه في محيطهم. وتناسب كذلك الفترة الزمنية التي سيقضونها في البيئة. وعادة ما سيرتدي الأفراد سترات إشعاع تغطي الجسم بالكامل ومصممة لتوفر حاجزاً عازلاً للإشعاع. بالإضافة إلى وحدات تنفس ذاتية، مما يوفر عزلاً بيئياً كاملاً - وذلك بالقدر ذاته الذي توفره أي سترة فضاء. وتوفر هذه السترات حماية جيدة من الإشعاع. غير أنها أيضاً ثقيلة وغير مكيفة للهواء في العادة. أشارت مصادر، في فوكوشيما، إلى أن السترات الحالية تسببت في حالات إعياء بسبب الحرارة وصداع حاد، الأمر الذي يجعل الأفراد أقل قدرة على ارتدائها ويقلل من الفترة الزمنية التي يمكنهم فيها ارتداء هذه السترات. وظهرت مشكلة أخرى تمثلت في أن درجات الحرارة الشديدة بالمحطة أذابت الأحذية المرافقة لسترات الإشعاع في بعض الأحيان.

## حلول ممكنة

توجد نُهَجٌ عديدة لتصميم سترات أفضل تتيح لمستخدميها العمل بمزيد من الفاعلية والأمان. ويتمثل أحد النُهج في استخدام هياكل خارجية - سترات تشبه الدرع الخارجي أكثر من كونها ملابس - يمكن تصميمها لتعزيز القوة البشرية بدلاً من إضعافها. ويتمثل نهج آخر في إيجاد مواد أكثر مرونة (أو غيرها من المواد التي تكون أقل إرهاقاً) يمكن أن تؤدي نفس وظيفة السترات الحالية. وقد يكون هذا الأمر مستحيلاً في الواقع. نظراً إلى أن خصائص تخفيف الإشعاع في الرصاص وغيره من مواد الحماية مرتبطة بكثافتها. ومع ذلك يمكن مواصلة البحث.

وقد تكون الحماية الجماعية بديلاً عن حماية الأفراد أو مكماً لها، ويمكن للحواجز الممكن نشرها سريعاً، والتي من شأنها حماية الأفراد من الإشعاع الخارجي. الحد من كمية الأجهزة التي سيلزم ارتداؤها داخل الملجأ. فعلى سبيل المثال، يمكن إنشاء مثل هذا الملجأ على أنه "جزيرة" في منطقة أقل تلوثاً تطوقها مناطق أكثر تلوثاً. ثم استخدامها كقاعدة لإطلاق الروبوتات والتحكم فيها ودعمها. وعلى النقيض، إذا كانت هناك "مناطق معينة ذات نشاط إشعاعي شديد" ومحدودة المساحة تلوث منطقة محيطية أوسع بالإشعاع. فيمكن تسييح هذه المناطق بحواجز يمكن نشرها للحد من تعرض الأفراد خارج تلك المناطق للإشعاع.

وثمة بديل آخر يتمثل في إبعاد الأفراد تماماً عن البيئة وإحلال روبوتات يمكن التحكم فيها عن بعد محل هؤلاء الأفراد. ومع ذلك، يتطلب إبعاد الأفراد تماماً من هذه البيئات تطورات هائلة في استقلال عمل الروبوتات، وروابط دعم محلية يمكن أن تستخدمها الروبوتات (كإعادة الشحن مثلاً)، ومقاومة الإشعاع للعمل في المناطق الأكثر خطورة، وحلقات اتصال واسعة النطاق وذات نطاق تردد عالي. وقد ينجم عن ذلك فقدان قدر من الوعي الميداني في حال تم إبعاد الأفراد جسدياً عن تلك البيئة.

أشارت بعض مصادرنا إلى وجود مخبأ يمكن نشره سريعاً خاص بسترات الإشعاع ووجود مقاييس جرعات الإشعاع التي يتعرض لها الأفراد لاستخدامها في حالة الطوارئ.

## مشكلة قياس جرعات الإشعاع التي يتعرض لها الأفراد

يحتاج الأفراد داخل المواقع المشتبه بوجود إشعاع فيها، وحولها، إلى الرصد في الوقت الفعلي للتعرض للإشعاع الخارجي والداخلي للحد من خطر الإصابة بالأمراض الشخصية ومعرفة وقت طلب العلاج. أدت القيود التكنولوجية فيما مضى إلى جعل قياس جرعات الإشعاع التي يتعرض لها الفرد—أي رصد تعرض الأفراد للإشعاع—أمرًا مُعقدًا وباهظ التكلفة وعرضة للخطأ. كما اتسمت عملية معايرة أدوات مقاييس جرعات الإشعاع بالصعوبة سابقًا، وكان يقتصر استخدامها بصورة فقالة على العاملين ذوي التدريب الكافي. وعلاوة على ذلك، فلما جمعت هذه الأدوات أي نوع من أنواع البيانات الجغرافية أو الزمانية لتحديد سياقات قراءات الإشعاع. ونتيجة لذلك، كان قياس جرعات الإشعاع في الأفراد من جميع الأنواع محاطًا بالشكوك. كان قياس جرعات الإشعاع لعمليات التعرض الخارجية للإشعاع لعدد كبير من السكان مستحيلًا من الناحية العملية، الأمر الذي اقتضى استبدال إعادة تنظيم مقادير الجرعة ذات الدقة المشكوك في صحتها. فعلى سبيل المثال، بذل الاتحاد السوفيتي، بعد كارثة تشيرنوبيل، جهدًا لرصد التعرضات الخارجية للإشعاع لعمال الطوارئ؛ ولكنه كان يفتقر إلى الموارد اللازمة للقيام بالإجراء ذاته مع مواطنيه الذين يقطنون في مناطق ملوثة، وذلك على الرغم من المستلزمات الهائلة لأدوات قياس جرعات الإشعاع المجمعّة على أنها جزء من برنامج للدفاع المدني. بالإضافة إلى ذلك، فإنه على الرغم من أنه يمكن قياس الجرعة الخارجية التي يتعرض لها الأفراد مبدئيًا، ومن ثم توفير الأساس لتقدير المخاطر الصحية، فإنه لا يمكن الآن قياس الجرعات الداخلية مباشرة - أي قياس جرعة الإشعاع الناجمة عن المواد المشعة التي تم ابتلاعها. تم تقدير الجرعة الداخلية للأفراد في فوكوشيما دايتشي عن طريق أجهزة قياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل، وتصميم نماذج أنسجة بشرية، وتقدير التعرض الفردي<sup>1</sup> وتم قياس التعرض الخارجي للإشعاع باستخدام أجهزة قياس جرعات الإشعاع في الأفراد قابلة للارتداء. وعادة ما كانت هذه الأجهزة توفر أجهزة إنذار في المناطق ذات الإشعاع المرتفع، ولكن لم تُنح دائمًا جرعات تراكمية في الوقت الفعلي لمترديها. ولم تُنح الدمج في الوقت الفعلي للقياسات مع تكنولوجيا المعلومات لإنشاء "خرائط" سياقية لبيئة الإشعاع حتى يستخدمها الأفراد.

<sup>1</sup> Makoto Miyazaki, Akira Ohtsuru, and Tetsuo Ishikawa, "An Overview of Internal Dose Estimation Using Whole-Body Counters in Fukushima Prefecture," *Fukushima Journal of Medical Science*, Vol. 60, No. 1, 2014, pp. 95-100

## حلول ممكنة

لحسن الحظ، ثبت التطورات في كل من أدوات قياس الجرعات وتكنولوجيا المعلومات أنه سيتم التغلب على القيود الماضية لقياس الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها الفرد، الأمر الذي يتيح نطاقاً واسعاً من احتمالات تفيد بأن اليابانيين بدأوا في استغلالها في أعقاب كارثة فوكوشيما داييتشي. لا يقتصر دمج أدوات قياس الجرعات الإشعاعية مع التقنية الرقمية في أن تصبح هذه الأجهزة أرخص وأسهل للاستخدام، بل يجعل أيضاً عملية الرقابة الدقيقة لحالات التعرض للإشعاع من السكان أمراً ممكناً. ومن الممكن أيضاً إدراج تقنيات النظام العالمي لتحديد المواقع ونقل البيانات اللاسلكية غير المكلفة في مقاييس الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها الفرد، الأمر الذي يساهم في جمع وفرة من البيانات التي لا تقتصر على جرعات الإشعاع الخارجية للأفراد فقط، بل تمتد أيضاً إلى مكان تلقي هذه الجرعات وتوقيت تلقيها. وقد أوضح العديد من الأشخاص الذين تم إجراء مقابلات معهم عن رغبتهم في تطبيق هذه النهج، وأعلنت مفوضية الرقابة النووية في اليابان عن نيتها الطلب من المواطنين العائدين إلى المناطق التي تم إخلاؤها ارتداء مقاييس جرعات الإشعاع. وقد بدأت بالفعل عملية توزيع تجريبية لمقاييس جرعات الإشعاع، ولكن العديد من الأجهزة التي حصل عليها المواطنون تنتمي إلى طرازات قديمة يقتصر أداؤها على تسجيل الجرعات المجمعة على مدى عدة أشهر، وتعمل مفوضية الرقابة النووية في اليابان على تحسين نموذج أكثر تطوراً قادر على إخطار المستخدمين بشأن التعرض للإشعاع على مدار الساعة، مما يسمح لهم معرفة المناطق الأكثر عرضة للإشعاع. بينما يعمل الباحثون اليابانيون على تصميم مقاييس جرعات إشعاع مدمجة في أجهزة استقبال النظام العالمي لتحديد المواقع والهواتف الذكية، إلا أن الأشخاص الذين أجريت مقابلات معهم نبهوا إلى أن هذه الأجهزة قد لا تحظى بالقبول العام اللازم للاستخدام واسع النطاق وذلك بسبب مخاوف تتعلق بالخصوصية.

وأدت التحديات التعليمية والنفسية إلى تعقّد مسألة اعتماد مقاييس جرعة الإشعاع للسكان المعرضين له. يفتقر المواطنون غالباً إلى إدراك معنى قراءات الإشعاع ويتم الخلط بين الأرقام والوحدات الخاصة بالتعرض للإشعاع، وقد أعرب أحد الأشخاص ممن أجريت معهم مقابلات عن قلقه من عدم ثقة الجمهور في دقة الأدوات. تتوقع مفوضية الرقابة النووية في اليابان تشكيل فريق من الميسرين سيقومون، من بين أدوار أخرى، بمساعدة أفراد الجمهور على فهم نتائج الجرعة وتفسيرها، وذلك كجزء من برنامجها لتوزيع أجهزة مقاييس جرعات الإشعاع. ولكي تكون هذه المقاييس أكثر سهولة في الاستخدام، اقترح أحد المتحاورين معه استخدام لوحة عرض بسيطة مرمزة بألوان (أحمر= "مرتفع"، أخضر

"منخفض"). واقترح العديد من الأشخاص الذين أجريت معهم مقابلات أنه يجب أن تشتمل مقاييس جرعات الإشعاع على مقومات ترتبط عمومًا بأدوات الدراسة الاستقصائية الأخرى المتعلقة بالإشعاع، مثل قراءات وإنذارات مستوى الإشعاع في الوقت الفعلي، ويرجع ذلك جزئيًا إلى الظن بأن هذه المعلومات ستسهم في الحد من المخاوف الشائعة. ومع ذلك، فإن هذه المعلومات الأخرى قد تزيد من إثارة المخاوف العامة من مخاطر الإشعاع في حال عدم وجود حملة توعوية فعّالة تساعد المواطنين على فهم هذه القراءات.

يمكن أن تشكل مقاييس جرعات الإشعاع في الأفراد التي تجمع بيانات جغرافية مكانية في الوقت الفعلي عن مجالات الإشعاع فائدة كبيرة لعناصر الجيش الأمريكي وللموظفي الاستجابة للطوارئ؛ لا تتطلب هذه الأجهزة طفرات تكنولوجية لتصبح سهلة الاستخدام، لكنها ستستفيد من التطورات التي تحد من تكاليفها الأولية التي لا تزال مرتفعة. يمكن بعد ذلك تحليل معلومات على درجة عالية من التفصيل ومحدّثة عن مخاطر الإشعاع وتعرض الأفراد له وذلك لتحديد المناطق ذات النشاط الإشعاعي الشديد واتخاذ قرارات مستنيرة بشأن إزالة التلوث والعزل، مما يتيح وجود إدارة أكثر فاعلية من حيث التكلفة للتصدي لهذه المشكلات. قد يتبين أن تصميم برامج فعالة لتحليل هذه البيانات يساوي القدر نفسه من تطوير مقاييس جرعات الإشعاع ذاتها أو أكثر صعوبة منها.

بالإضافة إلى مقاييس جرعات الإشعاع الخارجية، يسعى الباحثون اليابانيون أيضًا إلى إيجاد وسائل مطورة لرصد تعرضات الإشعاع الداخلية لمواطني اليابان. يستخدم اليابانيون أجهزة قياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل، بيد أن الأجهزة الحالية أثبتت أنها غير كافية للاحتياجات المحددة للمواطنين اليابانيين، وذلك لتحديد جرعات الإشعاع الواردة من حمولة الجسم الداخلية للنظائر المشعة مثل السيزيوم-137 والسترونشيوم-90. يرغب العديد من المواطنين على وجه التحديد في فحص الحمولة الإشعاعية في الأطفال والرضع، غير أن معظم أجهزة قياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل صمّمت للبالغين. لا يقتصر الأمر على أن الكتل الأقل نسبيًا في الأطفال تشكل صعوبات بالنسبة لأجهزة قياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل، بل تتطلب الآلات أيضًا من المرضى عادةً السكون لفترات طويلة للحصول على نتائج دقيقة، الأمر الذي قد يصعب تحقيقه مع صغار السن. أشار أحد المتحاورين إلى أن آلة فاست سكان (FASTSCAN) ذات السرعة الأكبر، حيث تفحص الشخص البالغ بمتوسط دقيقة واحدة، غير مصممة لفحص الأطفال. علاوة على ذلك، فإن أداء معظم أجهزة قياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل الحالية يقتصر على فحص باعناث غاما عالية القدرة نسبيًا، مثل السيزيوم-137، ولا يتضمن باعناث بيتا، مثل السترونشيوم-90. في الوقت الذي يمثل فيه اكتشاف السترونشيوم المشع في

الأشخاص الذين هم على قيد الحياة صعوبة، فإنه ممكن من الناحية التقنية بفضل أشعة غاما منخفضة القدرة التي ينتجها إشعاع الكبح لجسيمات بيتا. وفي سبعينيات القرن العشرين، استفاد باحثون من السوفيت من هذا المبدأ لإنشاء جهاز قياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل أطلق عليه 9.1-SICH. حيث استغلوه في قياس حمولة الجسم للسترونسيوم المشع بين السكان المجاورين لمجمع ماياك النووي (Mayak weapons complex). وعلى الرغم من أنه بسيط فنيًا وكبير من حيث الحجم، فإن نجاح هذا الجهاز يشير إلى أنه باستخدام تقنيات كشف متطورة، فإنه يمكن تطوير جهاز أسرع وأقل كلفة وأكثر دقة لقياس درجة الإشعاع بالجسم بالكامل ليكون بإمكانه اكتشاف كل من السيزيوم-137 والسترونسيوم-90. وستكون أجهزة الكشف ميسورة التكلفة والحساسة والموثوقة لأشعة غاما منخفضة الطاقة التي توفر درجة عالية من الحساسية بالمواقع لا غنى عنها لهذا النوع، وربما تكون موضع اهتمام لجهود أبحاث وزارة الدفاع الأمريكية.

## مشكلة الجوانب الطبية والوراثية للآثار الصحية الناجمة عن الإشعاع

أفنعت أدلة فولية مستخلصة من السكان الذين يعيشون في مناطق كان بها تجربة إشعاعية عالية، والناجين من القنبلة الذرية، والعمال في قطاع الصناعة النووية، بعض الأشخاص في وسط الفيزياء الصحية للوقاية من الإشعاع بوجود تغيرات كبيرة بين حساسية الأفراد للإشعاع، وإذا تم فهم أساس هذه الظاهرة، فقد يتم استغلالها لإدارة آثار حالات الطوارئ الإشعاعية. على سبيل المثال، يوجد سكان يعيشون في منطقة ما بإيران شهدوا تجارب إشعاعية تفوق المتوسط العالمي بعشرات أو مئات المرات بسبب رواسب الثوريوم الغنية، ولكن تفشي الأمراض ذات الصلة بالإشعاع في هذه المناطق لا يفوق المتوسط بنسبة كبيرة، وعلاوة على ذلك، فمن المعروف أن جينات BRCA1 وBRCA2، وهي نسخ متحولة تؤدي إلى زيادة معدلات الإصابة بسرطان الثدي، مرتبطان في الواقع بآلية تصليح الحمض النووي (DNA) الذي يستجيب للضرر الإشعاعي الذي يؤثر على الخلايا. ونتيجة ذلك، فإن الأشخاص الذين يحملون تحولات متضررة من هذه الجينات أكثر عرضة للإصابة بسرطانات الثدي الإشعاعية. وعلى الرغم من الفرضية القائلة أن الحساسية الإشعاعية تختلف اختلافًا كبيرًا بين السكان بعيدة عن كونها مقبولة عالميًا، فقد أكد أحد الأفراد الذين أجريت معهم مقابلة هذه الفرضية، وأشار إليها في الدراسات المخبرية التي تجرى على زراعة الخلايا الداعمة لها. ويلقى هذا الرأي أيضًا دعمًا كبيرًا بين الباحثين في الاتحاد السوفياتي السابق الذين يدرسون التأثير الصحي لكارثة تشيرنوبيل.

## حلول ممكنة

إذا كان هناك تغيرات جينية كبيرة في حساسية الأفراد للأثار الصحية المترتبة على الإشعاع، فإنه قد يتم وضع مجموعة من التدخلات التقنية الممكنة للحد من التكاليف الصحية لحالات التعرض للإشعاع. على سبيل المثال، إذا كان من الممكن تحديد التغيرات الجينية المرتبطة بالحساسية الإشعاعية الأعلى، فإنه يمكن وضع برنامج فحص جيني لوقاية الأفراد ذوي الحساسية الإشعاعية تحديداً من العيش في الأماكن الملوثة أو العمل فيها. وبشكل أكثر تطلعاً، فإنه يمكن تطوير أدوية جينية أو أدوية جديدة واقية من الإشعاع للحد من قابلية إصابة الأفراد بالآثار الصحية المترتبة على الإشعاع. قد يكون من الضروري تحقيق تقدم كبير في دراسة الآليات الجزيئية الحيوية التي تشكل أساس استجابة الخلايا للتعرض للإشعاع لتحديد جدوى هذه النهج، غير أن الانخفاضات الطفيفة في الحساسية الإشعاعية يمكن أن تثبت فائدة بالغة. لا يقتصر الحد من حساسية الأفراد للإشعاع على تقليص تكاليف الكوارث الإشعاعية بشكل جذري، مهما كان الأمر صعباً، ولكن تزيد أيضاً من قدرة الجيش الأمريكي بشكل كبير للعمل داخل بيئات إشعاعية للخصم، مما يجعله هدفاً لا يمكن تفويته لوزارة الدفاع الأمريكية.

يوفر الطب التجديدي مجالاً آخر واعدًا من الأبحاث يُحتمل أن يساهم في تخفيف الأثار الصحية المترتبة على التعرض للإشعاع. وقد أشار الأشخاص الذين أُجريت معهم مقابلات أن أبحاث الخلايا الجذعية قد تثبت إنها وسيلة بحثية مثمرة لتحقيق هذه الغاية، مقترحين، على سبيل المثال، أن توافر الطب التجديدي سيضاعف من استعداد الأفراد للعمل في المناطق الملوثة. ومن المحتمل أن يتطلب استغلال هذه التقنية جمع الخلايا الجذعية للأفراد وتخزينها قبل التعرض للإشعاع ومن ثم يمكن استخدامها حسب الحاجة للعلاج بالخلايا الجذعية لاحقاً.

## المشكلة المتعلقة بالزراعة والغذاء ومياه الشرب

كان التعرض للإشعاع الخارجي وعن طريق الاستنشاق في فوكوشيما أكثر حدة بعد فترة وجيزة من الحادث، وبعد ذلك بوقت قصير، أصبح امتصاص الفاعلية الإشعاعية الخطر الأساسي الذي يهدد صحة الإنسان (ناهيك عن أكثر المناطق المعرضة للإشعاع، مثل المصنع نفسه). وقد أدى وقوع الزلزال والتسونامي اللذين أحدثا خللاً في الإمدادات



الغذائية المحلية في الواقع إلى منع الناس من استهلاك المواد المشعة: فلم يعد الطعام المحلي متوفرًا. الأمر الذي جعل الناس يستهلكون طعامًا من مكانٍ آخر. وبعد الحادثة بوقت قليل، أصبح الحليب والخضروات أوجه قلق خاصة. حيث استهلك الأبقار مواد مشعة، وتم إفراز كثير منها في الحليب (ولم يمتص اللحم إلا قليلاً من المواد الإشعاعية). كان فطر عيش الغراب عرضة بشكل خاص لامتنصاص النظائر المشعة مثل السيزيوم-137. في حين امتصت جذور الخضراوات قدرًا قليلًا جدًا. ولعله من العجيب عدم وجود ارتباط بين مستويات السيزيوم في التربة المحلية والسيزيوم المشع في الأرز. وتم اختبار كل كيس أرز مزروع في المنطقة لفحص التعرض للإشعاع وذلك باستخدام نظام خط تجميع. غير أنه لم يُعثر إلا على قدر قليل من الأكياس التي تعدت حدود الفاعلية الإشعاعية المعتدلة للاستهلاك الأدمي. على الرغم من أن معظم الأرز كان مزروعًا في تربة ملوثة.

كما تعرض السمك للتلوث بسبب الحدث الأولي واستمرار جريان المواد المشعة في الجداول والبحار. ومع ذلك، امتصت أنواع محددة من رأسيات القدم والقشريات (وتحديدًا الأخطبوط والحبار وسرطان البحر) مواد إشعاعية أقل من كائنات بحرية أخرى. كما يتم حاليًا تقييم الأسماك باستخدام نظام اختبار غير تدميري، والذي وضعته جامعة توهوكو. وتتمثل الصعوبات في الحجم والتكلفة كما هو الحال في العديد من مجالات الاستجابة. إن مراقبة المواد الغذائية بشكل كامل سيعيد الثقة ويمكن الاقتصاد المحلي من التجدد، غير أن تكلفة القيام بذلك لأنواع كثيرة من الطعام ربما تكون ثقيلة. حثت الحكومة اليابانية شعبها على تناول مربي بكتين التفاح للحبولة دون التعرض لامتنصاص الأشعة. ومع ذلك، لم يكن لهذه الخطوة أثر يُذكر بسبب استهلاك الناس بشكل عام مواد إشعاعية قليلة جدًا. وبعد وقت قصير من وقوع الحادث، لم يكن هناك إلا القليل جدًا من المواد الغذائية التي يتم إنتاجها في فوكوشيما تشكل أي مخاطر يمكن قياسها. ومع ذلك، فإن الأثار النفسية ما زالت موجودة.

### حلول ممكنة

يتمثل أحد نُهج مواجهة امتصاص العديد من النباتات للسيزيوم المشع في استخدام الأسمدة الغنية بالبوتاسيوم بالتحديد. وهذا الدور تقوم به النباتات التي تمتص السيزيوم لأنها مماثلة كيميائيًا للبوتاسيوم الذي تحاول التغذية عليه؛ حيث يمكن أن يؤدي فرز البوتاسيوم في بيئاتها إلى أن تكون سائدة بما يكفي لأنها لن تمتص سوى كمية قليلة جدًا من السيزيوم. وفي السياق ذاته، يمكن تغذية الماشية مواد امتصاصية من شأنها

المساعدة على منع إدخال نويدات مشعة داخل أجسادها. مما يسهّل على الحيوانات إخراجها بسهولة.

أفادت بعض مصادرنا أنه يمكن توجيه النصائح الغذائية للأفراد حسب صحتهم وعمرهم وخصائصهم الشخصية الأخرى. فعلى سبيل المثال، قد يُنصح الأطفال بعدم تناول فطر عيش الغراب.

## مشكلة استيعاب المواد الملوثة لمنع المزيد من الانتشار

يمكن أن يساعد الاستيعاب الفعال للمواد الملوثة، أي منعها من الانتشار الزائد في البيئة، على الحد بنسبة كبيرة من التعرض للإشعاع وتكاليف إزالة التلوث. وفي أعقاب وقوع أي حادث، يمكن أن يتخذ ذلك عدة أشكال:

- منع مزيد من انتشار المواد الإشعاعية من مصدر الحدث
- منع الغبار الملوث من الانتقال عبر الهواء
- منع المياه الملوثة من دخول البيئة (أو انتشارها أكثر على مستوى البيئة).

بعد الشكل الأول من هذه الأشكال خارج نطاق دراستنا، ولا ينطبق هذا الأمر في الحقيقة إلا على إحدى محطات الطاقة النووية عندما تكون هي السبب وراء الحادث، وليس سلاحًا نوويًا أو جهاز انتشار الإشعاع. نتطرق في هذا القسم إلى الجانبين الآخرين من استيعاب المواد، وهما منع الغبار الملوث من التبعثر ومنع المياه الملوثة من التسرب إلى البيئة. (سنناقش طرق التخلص من المواد الملوثة التي تم جمعها في الفصل الخامس).

## حلول ممكنة

**منع الغبار الملوث من التبعثر.** قد يتبعثر الغبار بفعل القوى الطبيعية، مثل الرياح وأي نشاط بشري، مثل الحفر والقيادة. كانت إحدى الوسائل لمنع انتشار الغبار في فوكوشيما في غاية السهولة وهي: رشه بالماء لإخماده. وفي بعض الحالات، تم استخدام البخاخات والمواد الهلامية التي تدوم لفترة أطول لتحقيق هذا الغرض.

**منع المياه الملوثة من التسرب إلى البيئة.** وفقاً لما ذكره أحد مصادرنا، كان أحد أوجه الاختلافات بين كارثتي فوكوشيما وتشيرنوبيل هو غزارة المياه في فوكوشيما؛ حيث كانت بيئة رطبة أكثر بكثير من شمال غرب أوكرانيا. علاوة على ذلك، تم استخدام المياه بكميات هائلة في فوكوشيما، بما في ذلك مياه البحر، في محاولة لتبريد المحطة. وفي هذا السياق، تركز جزء كبير من الموارد الإجمالية بهدف التصدي للحادث على التعامل مع مشكلتين تتعلقان باستيعاب المياه. تمثلت المشكلة الأولى في منع المياه التي تلوثت بالفعل من التسرب إلى البيئة على نطاق أوسع. في حين تمثلت الثانية في إيقاف تدفق المياه الجوفية التي يمكن أن تتسرب إلى مناطق ملوثة بشدة، وتصبح مشعة، ثم تعاود التسرب إلى البيئة.

تم جمع مياه البحر الملوثة المستخدمة في تبريد المحطة داخل خزانات، لكن خصائص التآكل والإشعاع في مياه البحر تدمر أجزاء من الخزانات. كما تعد مشكلة التسرب أزمة لا مرد لها إضافةً إلى ذلك، تظل هذه الخزانات عرضة للزلازل وغيرها من الأحداث الشديدة.

خططت شركة طوكيو للطاقة الكهربائية (TEPCO) في وقت ما لبناء "جدار جليدي" مدفون في الأرض حول محطة فوكوشيما لمنع تدفق المياه الجوفية؛ حيث ستؤدي مجموعة من الأنابيب تحتوي تحديداً على مبرد إلى تجميد السطح الأرضي حول محيط المحطة مما سيؤسس جداراً تحت الأرض. تكمن أحد المخاوف المتعلقة بالجدار الجليدي في أنه إذا حال دون تدفق المياه إلى الداخل (وتدفعها إلى الخارج)، فقد يؤدي فقدان ضغط المياه الجوفية إلى تسريع معدل تسرب المياه شديدة التلوث إلى البيئة من المحطة عبر الفجوات الموجودة في الجدار الجليدي.

## النتائج المستخلصة من الفصل

توجد ضرورة للمراقبة والحماية الفردية، مثل بدلات الوقاية من الأخطار المحسنة، وقياس جرعات الإشعاع التي يتعرض لها الفرد، والنهج الطبية الشخصية لمواجهة مخاطر الإشعاع التي يتعرض لها البشر وذلك لضمان سلامة العمال والمقيمين. أدى عدم وجود هذه التقنيات إلى تكوين تصورات عامة سلبية والخوف من الحادثة. إن النهج المستخدمة لمنع امتصاص الأراضي الزراعية للسترونشيوم والسترونشيوم موجودة حالياً، مما يوفر سلامة

الغذاء المنتج محليًا. ومع ذلك، يظل منع تلوث الحياة البحرية أمرًا صعبًا. تدفع التصورات العامة بشأن سلامة الغذاء المنتج محليًا التطور التكنولوجي في هذا التخصص. وأخيرًا، أتت وسائل إزالة الغبار في المنطقة المحلية ثمارها. لكن لا تزال إدارة المياه على نطاق واسع أمرًا شائكًا.



## إزالة المواد المشعة وجمعها

يكن أحد أهم الجوانب الأكثر صعوبة في الاستجابة لحادثة مثل حادثة فوكوشيما في إزالة التلوث من البيئة للوصول إلى قدر كافٍ يمكن معه استئناف الأنشطة البشرية. ففي فوكوشيما، يستمر التلوث بالسييزيوم على نطاقٍ واسعٍ في التربة والنباتات والمناطق الحضرية المحيطة بالمحطة، كما أن المياه ملوثة في المحطة ذاتها. وتؤدي هذه المجموعة المتنوعة من المواد الملوثة إلى تعقيد النهج المتبع في إزالة التلوث. ولكن بشكلٍ أعم، توجد ثلاثة نُهجٍ لعملية إزالة التلوث:

- إزالة التلوث فيزيائيًا. ويشمل ذلك التخلص من النويدات المشعة الظاهرية أو المحمولة جواً من خلال استخدام القوة الميكانيكية المباشرة و/أو استخدام الهواء أو الماء المتدفق.
- إزالة التلوث كيميائيًا، الذي يستخدم التفاعلات على المستوى الذري لتركيز النويدات المشعة لعناصر معينة إلى كتلة أصغر من المواد
- إزالة التلوث بيولوجيًا، الذي يستخدم تفضيلات الأنظمة الحية في امتصاص ذرات عناصر معينة من أجل تركيز النويدات المشعة من وسط كبير (مثل التربة أو الماء) إلى كتلة أصغر من المواد العضوية (مثل دوار الشمس أو فطر عيش الغراب).

بشكلٍ عام، تتكون نسبة صغيرة فقط من حجم النفايات المجمعة من مواد مشعة. سيلزم التخلص من كمية أصغر من النفايات المشعة من أجل الوصول إلى درجة يمكن عندها فصل المواد المشعة عن المواد غير المشعة بصورة انتقائية. وبوجه عام: في حين تكون العمليات الفيزيائية هي الأقل انتقائية، فإن العمليات البيولوجية هي الأكثر انتقائية. ومن الضروري تقليل حجم النفايات بسبب الحاجة إلى تأمين المواد المشعة

المجمعة لفترات طويلة جدًا من الوقت. تكون فترة عمر النصف للنظائر المشعة الشائعة طويلة (على سبيل المثال، تكون فترة عمر النصف لكل من سيزيوم-137 وأسترنسيوم-90 30 عامًا تقريبًا)؛ أي أن النفايات التي تحتوي على هذه النظائر يتعين أن تُغلف بإحكام لمدة قرن قبل أن ينخفض الإشعاع المُنبعث بحسب ترتيب الأحجام.

## الوسائل الفيزيائية لإزالة التلوث

لا يعد الكثير من العناصر المستخدمة في إزالة التلوث النووي فيزيائيًا في حالة وقوع كارثة أدوات متخصصة، ولكنها بدلاً من ذلك أدوات مُختارة من بين عناصر يسهل توافرها. فعلى سبيل المثال، كان الناس يستخدمون المجارف والمُفْرَش والخِرَق والأدوات المنزلية المماثلة في عمليات إزالة التلوث الأساسية في حالة فوكوشيما؛ مثل إزالة الطبقة العلوية من التربة أو العشب، وإزالة الوحل من مجاري التصريف، وتنظيف الأسطح.<sup>1</sup>

لقد كانت المعدات المتخصصة الأخرى الإضافية مفيدة كذلك في إزالة التلوث فيزيائيًا. على سبيل المثال، تم استخدام المكانس ذات مرشحات جسيمات الهواء عالية الكفاءة (HEPA)، المستخدمة في عدد من الأغراض، وتكييفها للحد من التلوث النووي. وقد استُخدمت رذاذات الماء ذات الضغط العالي بصورة واسعة في المنازل والأرصفت والطرق.<sup>2</sup> كما استُخدمت مركبات كمنس الشوارع التقليدية أيضًا في إزالة التلوث، ومن الجدير بالذكر أن استخدام الخراطيم ذات الضغط العالي للغاية كان مفيدًا في إزالة تلوث الطرق المُعبدة بالحجارة.<sup>3</sup> وبمجرد تصريف المياه، تُستخدم مركبة أخرى من مركبات تنظيف الشوارع لضخ الماء الملوّث، وبالنسبة لإزالة الهياكل كبيرة الحجم، قد تكون المتفجرات وسيلة سريعة، لكنها مثيرة للجدل بسبب احتمالية انتشار المواد المُلوّثة.

1 Shunsuke Kimura, "Cleanup Work Progresses in Fukushima, but Residents Still Concerned," *Asahi Shinbun*, March 7, 2013. للحصول على مرجع مناسب عن نجاح جميع أنواع العمليات المتاحة بالفعل لبيئات إزالة التلوث، مثل الأسطح من صنع الإنسان، والبيئات المنزلية، والغابات، والمناطق الريفية، والمناطق الزراعية، انظر، Jørn Roed, K. G. Andersson, and H. Prip, *Practical Means for Decontamination 9 Years After a Nuclear Accident*, Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1995.

2 Jeffrey Hays, "Clean Up, Decontamination and Radioactive Debris and Soil Around Fukushima," *Facts and Details*, April 2012.

3 Hays, 2012.

وقد تم تعديل جرافات الخرسانة لاستخدامها في حالات الكوارث حيث تحتاج الكثير من الأسطح الخرسانية الكبيرة إلى إزالة التلوث منها، وتتميز بكونها منخفضة التكلفة نسبيًا. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدام "الصاقلات" أو الآلات التي تصقل الأسطح في إزالة التلوث.<sup>4</sup>

## الوسائل الكيميائية لإزالة التلوث

تشير تجارب القطاعات النووية بالعديد من الدول. وكذلك تجارب برنامج الدعم الفائق من وكالة حماية البيئة الأمريكية، إلى استخدام العديد من وسائل إزالة التلوث الكيميائية والعمليات الكهروكيميائية في أغراض المعالجة. تتضمن العمليات الكيميائية رش السوائل على الأماكن الملوثة، من خلال وضع الرغوة والمواد الهلامية على المواد الملوثة، أو غسل العناصر الملوثة في أوعية كيميائية. تعتمد الوسائل الكيميائية المفضلة لإزالة التلوث على خصائص التلوث، أي حجم المواد التي يتعين تطهيرها وكميتها وتركيبها: وتعتمد على خبرة المسؤول. لأن الخبرة الكبيرة ضرورية عند استخدام طريقة إزالة التلوث كيميائيًا، خاصة عند استخدام التقنية التي تمتزج فيها المواد الكيميائية العضوية بالأيونات المعدنية، التي يتميز بعض منها بالإشعاع<sup>5</sup> وتعد تحديات التخزين المرتبطة بالتعامل مع النفايات السائلة الملوثة التي تنتج عن تلك العمليات أحد العيوب الرئيسية. ولا يوصى باستخدام الكثير من الوسائل الكيميائية إلا مع الأنظمة المغلقة، وبالتالي تكون أقل استخدامًا مع وقوع حالات الكوارث في المناطق المفتوحة.

<sup>4</sup> Sang Don Lee, Robert L. Sindelar, and Mark B. Triplett, *Report of the United States Embassy Science Fellows Support to the Government of Japan—Ministry of the Environment: Observations and Commentary on Remediation of the Lands Off-Site from the Fukushima Daiichi Reactors*, U.S. Environmental Protection Agency, SRNL-RP-2013-00303, July 2013, pp. 56–60

<sup>5</sup> E. Felcorn, *Technology Reference Guide for Radioactively Contaminated Media*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 402-R-07-004, October 2007



## إزالة التلوث من الماء

تعد إزالة التلوث من الماء حالة مفيدة يمكن فيها استخدام طريقتي العلاج الكيميائية والفيزيائية. توجد ثلاثة أنواع مميزة للإشعاع المرتبط بالماء. والنوع الأسهل في العلاج هو النوع المنبعث من الجسيمات المعلقة في الماء دون إذابتها كيميائيًا في هذا الماء. يمكن ترشيح هذه الجسيمات ميكانيكيًا، أو تركها ببساطة لتستقر في قعر الخزانات ثم إزالتها ميكانيكيًا.

بينما تشكل النويدات المشعة الذائبة في الماء مشكلة أكثر صعوبة نوعًا ما، على سبيل المثال، سوف يذوب السيزيوم-137 المشع بسهولة في الماء، ما يعني أن الذرات الفردية من المادة ستمتزج بجزيئات الماء (ليفقد كل منها إلكترونًا لتصبح أيونات موجبة أثناء هذه العملية). يمكن إزالة الأيونات المُدَابَّة المشعة من الماء عن طريق إضافة مادة ستؤدي إلى ترسب السيزيوم من المحلول، ثم ترشيح المترسب الصلب ميكانيكيًا أو تركه ليستقر في قعر الخزان لإزالته.<sup>6</sup> طوّرت مختبرات سانديا الوطنية مصفاة جزيئات غير عضوية تلتقط عناصر معينة وتفصلها عن ماء المخلفات المشع من خلال استخدام تيتانات السليكون البلورية.<sup>7</sup> وعلى نحوٍ منفصل، طوّرت شركة Kurion نظامًا لوسائط خاصة بالأيونات يعمل على امتصاص الملوثات المشعة لفصلها عن الماء.<sup>8</sup> ثم يمكن بعد ذلك تعبئة المخلفات في زجاج خلال عملية تُسمى التزجيج.<sup>9</sup> ويتمثل أحد التحديات الرئيسية المرتبطة بإزالة التلوث من الماء في النطاق الواسع الذي يلزم القيام بعملية إزالة التلوث به عادة، ويشمل ذلك الكميات الكبيرة للمرشحات الكيميائية والطاقة.

<sup>6</sup> انظر على سبيل المثال، Harold Rogers, John Bowers, and Dianne Gates-Anderson, "An Isotope Dilution–Precipitation Process for Removing Cesium from Wastewater," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 243, December 2012.

<sup>7</sup> Sandia National Laboratories, "Sandia Labs Technology Used in Fukushima Cleanup," news release, May 29, 2012.

<sup>8</sup> Melissa Mahony, "Radioactive Water Cleanup Steams Ahead at Fukushima," *SmartPlanet*, August 29, 2011.

<sup>9</sup> لا تزال عملية التخلص من هذه المخلفات معلقة حتى وقت إعداد هذه الدراسة. في مجال إدارة النفايات النووية، يُقصد بالتزجيج مزج العناصر المشعة مع شظايا الزجاج المنصهر (السيليكون)، وتبريد الخليط لتكوين مادة مقاومة للماء تشبه الزجاج. لا تتحول النفايات النووية إلى زجاج، بالمعنى الدقيق للكلمة، ولكنها ترتبط بالزجاج بإحكام ما يحول دون انتقالها إلى البيئة.

يظهر النوع الأصعب من معالجة الماء المشع عندما تحتوي جزيئات الماء على التريتيوم، وهو نظير مشع للهيدروجين له فترة عمر تبلغ 12 عامًا. تكاد تكون الخصائص الكيميائية لذرات التريتيوم متطابقة مع ذرات الهيدروجين الأخرى، مما يجعل من الصعب للغاية فصل جزيئات الماء المحتوية على التريتيوم عن المياه السائبة. تضمن الوسائل الرئيسية لإجراء عمليات فصل مماثلة استخدام الأغشية الجزيئية والطبقات الأمتزازية.<sup>10</sup>

### الوسائل البيولوجية لإزالة التلوث

تستلزم الوسائل البيولوجية لإزالة التلوث استخدام قدرة الكائنات الحية على التركيز على معادن محددة، مثل النويدات المشعة، على سبيل المثال، تمتص بعض النباتات بحكم تركيبها نويدات مشعة معينة، ويمكن أن تنمو هذه النباتات في منطقة ملوثة كي تمتص المادة المستهدفة، ثم يمكن جمعها للتخلص منها. تُستخدم أزهار دوار الشمس حاليًا في فوكوشيما لاستخلاص السيزيوم، ثم سيتم تحليلها عن طريق البكتيريا الحمضية الهوائية لتقليل الكتلة التي يجب التخلص منها.<sup>11</sup> يمكن أن تقلل عملية كهذه بشدة حجم النفايات المشعة التي يلزم تخزينها، وقد اقترح استخدام فطر عيش الغراب لما يتميز به من خصائص امتصاص. وكذلك نبات القنب للسرعة التي ينمو بها، وقد تبين أيضًا أنه يمكن استخدام بعض أنواع الطحالب للمساعدة في إزالة التلوث من المياه.<sup>12</sup>

<sup>10</sup> انظر على سبيل المثال، D. W. Jeppson, G. Collins, L. Furlong, and S. L. Stockinger, "Separation of Tritium from Wastewater," paper presented at *Waste Management 2000* conference, Tucson, Ariz., February 2000; and Myung W. Lee, "Method and Apparatus for Separation of Heavy and Tritiated Water," U.S. Patent No. US 6332914 B1, December 25, 2001.

<sup>11</sup> Hays, 2012. يتمثل أحد التحديات الرئيسية في أن أزهار دوار الشمس تستخلص حوالي 0.5 بالمئة من السيزيوم الموجود في التربة المحيطة بها في كل دورة حياة. وبالتالي سيتطلب الأمر إعادة زرع أزهار دوار الشمس لعدد من المرات من أجل استخلاص جزء كبير من السيزيوم.

<sup>12</sup> Maxime Goualin, "The Japanese Nuclear Power Accident: Is Seaweed and Cannabis Being Used to Treat Nuclear Power Waste?" *Cereplast RSS*, August 11, 2011.

## تجربة فوكوشيما

في فوكوشيما، فاقمت طبيعة البيئة من صعوبة الجهد المبذول في إزالة التلوث. كما تشير العديد من مصادرها، تحتفظ بيئات الغابات والجبال بالمواد المشعة بدرجة أكبر بكثير من أغلب البيئات الحضرية بسبب سمات الاحتفاظ بالسيزيوم التي يتميز بها الطين الطبيعي في التربة. يمتزج السيزيوم بالطين بشدة في تربة فوكوشيما، ما يجعل من الصعب استخلاصه باستخدام وسائل إزالة التلوث وما يتيح في الوقت ذاته تسربه ببطء عبر النظام البيئي ودورة الماء. تمزج بيئة الغابات الديناميكية المادة المشعة وتنقلها من التربة إلى ظلة الأشجار، ثم تعود بها مرة أخرى إلى أرضية الغابات أو الجداول نظرًا إلى أن الأوراق تسقط في آخر العام، وتتسبب الأمطار أيضًا في تحول المواد المشعة من المناطق المرتفعة إلى المناطق المنخفضة، وتساعد وفرة المياه الجوفية اليابانية في إعادة توزيع الإشعاع. ويكمن القلق في أن المناطق الآمنة الاستخدام نسبيًا (أو التي يتم اصطياد الأسماك منها) قد تصبح أكثر خطورة في وقت لاحق.

لقد تركزت جهود إزالة التلوث في فوكوشيما بشكل أساسي على الاستخدام المكثف للتقنيات البسيطة، بدلًا من الاستخدام الانتقائي للتقنيات الأكثر تقدمًا. وتتألف معظم الجهود المبذولة في إزالة التلوث من تجميع التربة السطحية في أكياس، وتنظيف الأسطح بالخرق والخراطيم، وكشط الأسطح الخارجية للخرسانة، وغير ذلك من الوسائل التكنولوجية البسيطة. تتطلب هذه الأنواع من العمليات عمالة كثيفة، ما يجعلها مكلفة اقتصاديًا وخطيرة بسبب تعرض الموظفين للإشعاع؛ وكما أشار أحد مصادرها، فإن قضايا الصحة المهنية بسبب التعرض للإشعاع قد تكون أكثر أهمية من قضايا الصحة العامة الناتجة عنها على المدى الطويل. ومن ثم يتعين مراقبة أو إعادة فحص المواقع التي تم تطهيرها من التلوث للتأكد من الدرجة التي عاد بها التلوث، وهذا يعني استمرار وجود حاجة إلى مزيد من العمال. كما تولد هذه العمليات أيضًا كميات كبيرة من الماء الملوث والمواد الصلبة التي تتطلب التخلص منها.

في فوكوشيما، اكتُشف أن المواد المشعة كانت تتجمع في الغالب في بقاع ذات نشاط إشعاعي شديد يصعب الوصول إليها نسبيًا، مثل الشقوق والزوايا ولا تنتشر المواد المشعة منها. وكانت النتيجة وجود حاجة متزايدة لكشط هذه البقاع ذات النشاط الإشعاعي الشديد للتخلص من تلوث الأسطح.

لم يتم تطهير الكميات الكبيرة من المياه الملوثة في فوكوشيما بشكل كامل؛ خاصة في المحطة، سواء المياه المستخدمة في تبريد المفاعلات أو حتى المياه

الجوفية الملامسة للمفاعل. في الوقت الحالي وبعد المعالجة الجزئية لإزالة السيزيوم والسترنتيوم المشع (لكن بدون التريتيوم المشع). يُخزن الماء في خزانات، دون وجود خطط واضحة لإزالة التلوث بالكامل. لا توجد وسيلة معروفة وفعّالة من حيث التكلفة لإزالة التريتيوم المشع المتبقي الذي يكاد يكون متطابقًا كيميائيًا مع الماء. وعمومًا، لا توجد ببساطة وسيلة فعّالة من حيث التكلفة لتطهير مساحات كبيرة، أو كميات كبيرة من المياه، أو نطاقات كبيرة من منشآت البنية التحتية البشرية. يمكن تطهير المناطق الصغيرة ذات الأولوية التي تحظى بأهمية خاصة في الاستخدام البشري. كما يمكن تطهير المناطق التي تستحق إزالة التلوث لأسباب أخرى (على سبيل المثال، منطقة صغيرة بها نسبة إشعاع مرتفعة عند مدخل إحدى المدن). ومع ذلك، سيوجد دائمًا بعض التلوث المتبقي الذي يتجاوز القدر الموجود قبل الحادثة. قد تشكل معالجة مخاوف العامة في هذا الصدد تحديًا بالقدر ذاته من التحدي الذي تمثله جهود إزالة التلوث.

### الحلول الممكنة لمشكلة إزالة التلوث

عند النظر في الحلول الممكنة لمشكلات إزالة التلوث، نجد أن أحد أهم الأمور التي ينبغي أن تؤخذ بعين الاعتبار تكمن في أن قطاع الطاقة النووية قد كرّس بالفعل موارد كبيرة لتطوير مثل هذه الحلول.

وقد أشار عدد من المصادر إلى أن القدرة على تزيح المواد المشعة في الموقع ستقلل إلى حد كبير من الموارد اللازمة لإزالة التلوث وتجعله أمرًا أكثر قابلية للتطبيق في مناطق واسعة.

قد يكمن أحد البدائل في تطبيق عملية مُحسنة لإزالة التلوث. وكما أشرنا سابقًا، يتراكم السيزيوم في الكائنات الحية بسبب تشابهه الكيميائي مع البوتاسيوم الذي تحتاجه الكائنات الحية وتستهلكه. ويمكن أن يساعد تطوير النباتات أو الطحالب أو حتى البكتيريا التي تفضل السيزيوم أكثر من الكائنات الحية الموجودة في التخلص من الإشعاع الموجود في التربة. وعلى نحو مثالي، من الممكن كذلك تصميم هذه الكائنات الحية كي تتضمن عناصر أخرى قد يتم توزيع نوبداتها المشعة بطريقة ما، مثل السترنتيوم واليورانيوم. ويمكن بعد ذلك جمع هذه الكائنات الحية وحفظها، مما يؤدي إلى إنتاج كميات أقل بكثير من النفايات المركزة أكثر مما يمكن أن ننتوي عليه عملية إزالة التربة السطحية.

أشار بعض من مصادرننا أنه يمكن استخدام روبوت بوصلة تشبه الثعبان. يستطيع أن يكشط بصورة عميقة داخل المساحات الضيقة ومن ثم يكنس المادة المفصولة أو يزيلها. كحل لمشكلة البقاع ذات النشاط الإشعاعي الشديد. ويكمن أحد التحديات الخاصة في توفير روبوت يعمل باستقلالية تمكنه من تمييز أماكن مثل هذه البقاع ذات النشاط الإشعاعي الشديد بدقة وكيفية ثني ذراعه كي ينظف تلك البقع.

## النتائج المستخلصة من الفصل

تتوفر وسائل إزالة التلوث للأبنية والأراضي في المناطق المفتوحة ولكن وُجد أن محطة فوكوشيما النووية لتوليد الطاقة تحتاج إلى الكثير من العمالة عند العمل على نطاق واسع. وتظل عملية إزالة التلوث في المناطق المائية المفتوحة على نطاق واسع مشكلة بلا حل. على الرغم من أن الوسائل الكيميائية تبدو واعدة. وتبدو الوسائل البيولوجية لإزالة التلوث من المناطق الزراعية واعدة. خاصة إذا كانت تقلل بفاعلية من حيث التكلفة متطلبات العمالة لإزالة التلوث من المناطق الكبيرة.

## التخلص من المواد الملوثة

لا يمكن تغيير طبيعة كميات كبيرة من المواد المشعة من خلال عمليات قابلة للتطوير ومجدية اقتصادياً<sup>1</sup> وتكمن الوسيلة الوحيدة لخفض كمية الإشعاع التي تطلقها هذه المواد في الانتظار لفترات طويلة جداً إلى أن يتحلل جزء كبير من نويدات المشعة وتتوقف عن إطلاق إشعاع. وحالما يتم إجراء عملية إزالة التلوث بالقدر الذي تسمح به الموارد، تجدر الحاجة إلى تخزين المواد المشعة المتبقية لفترات طويلة، تتراوح من سنوات وعقود إلى قرون (وفي بعض الحالات إلى آلاف السنين). ويعتمد وقت التخزين الذي تحتاج إليه هذه المواد الإشعاعية حتى لا تعد تشكل تهديداً على أنواع النويدات المشعة الموجودة وتركيزاتها<sup>2</sup> ويعتمد كذلك على ما يعتبر مستوى مقبولاً من النشاط الإشعاعي للتعرض البشري أو الإطلاق في البيئة، وقد يعتمد أيضاً على التطورات التكنولوجية المستقبلية.

<sup>1</sup> ومن الممكن تعريض كميات قليلة من المواد المشعة القابلة للانحطاط مثل اليورانيوم (وليس السيزيوم) لمصادر إشعاعية إضافية يمكن أن تحولها إلى نويدات مشعة أقل ضرراً أو عناصر مستقرة، وتُعرف هذه العملية باسم "الاحتراق النووي". ومع ذلك، فإن هذا غير ممكن عملياً بالنسبة لأحجام العينات التي تزيد عن جزء من الجرام، ما يتطلب كميات هائلة من الإشعاع المركز بشدة في ظروف خاضعة لمراقبة دقيقة، علاوة على ذلك، قد لا يكون من الممكن معالجة عينات من العالم الحقيقي قد تمتزج فيها حتماً أنواع متنوعة من النويدات المشعة مع بعضها بعضاً في ظل وجود كميات أكبر بكثير من المواد غير المشعة، وستؤدي محاولات معالجة مثل هذه العينة بالإشعاع إلى إيجاد نويدات مشعة أكثر مما ستزيله.

<sup>2</sup> ويُصير كل نوع من النويدات المشعة إشعاعاً بمعدل خاص به. يمكن وصف ذلك عادة في ضوء فترة عمر النصف للنويدات المشعة: الوقت الذي تُصير خلاله نصف النويدات المشعة إشعاعاً. في نهاية فترة عمر النصف الأولى، يبقى نصف المادة الأصلية. وفي نهاية فترتي عمر نصف، يبقى ربع المادة الأصلية؛ وفي نهاية ثلاث فترات عمر نصف، يبقى ثمن المادة وهكذا. يمكن أن تختلف فترات عمر النصف للمواد المشعة حسب الكثير من القيم الأسية، على سبيل المثال، تبلغ فترة عمر النصف لنظير اليود 131 ثمانية أيام، وتبلغ فترة عمر النصف لنظير السيزيوم 30 137 سنة، وتبلغ فترة عمر النصف لنظير اليورانيوم 235 704 مليون سنة.

فعلى سبيل المثال، قد تكون قدرات المعالجة المتاحة في القرن الثالث والعشرين أفضل بكثير من القدرات المتاحة حاليًا. وبسبب هذا، قد تكون هناك مزايا لجعل أساليب التخلص يمكن الرجوع عنها، ومن ثم يمكن الوصول إلى هذه المواد من أجل المعالجة أو حتى الاستخدام المستقبلي. وفي المقابل، تجدر الحاجة إلى تأمين أساليب التخلص ضد التجميع المحتمل من قِبَل الأشخاص الفضوليين أو الحاقدين. بالإضافة إلى متانتها بالقدر الكافي لمنع الإطلاقات الطارئة، ويتعين أن تكون آليات الاحتواء قادرة على الصمود أمام القوة المذهلة للأحداث الطبيعية المحددة، مثل وقوع زلزال أو تسونامي أو عاصفة تشكّل خطرًا كبيرًا. بالإضافة إلى عمليات التعرية القاسية والبطيئة عن طريق المياه والرياح والنشاط البيولوجي. ومن الناحية المثالية، يجب أن يكون موقع الاحتواء قريبًا نسبيًا من مصدر المادة الملوثة، الأمر الذي من شأنه أن يحد من المتطلبات اللوجستية المرتبطة بنقل هذه المادة، ويجب أن تقلل جميع أجزاء عملية نقل المواد من كل من التعرض البشري والإطلاق في البيئة إلى الحد الأدنى، لذا من المرجح تفضيل الأساليب البسيطة التي تنطوي على خطوات قليلة قدر الإمكان، وبطبيعة الحال، فإن تقليل هذه الكمية التي تحتاج إلى التخزين، أو تزجيجها في الموقع، يمكن أن يسهل كلاً من نقل المواد وتخزينها.

لم يتم اختيار أي موقع أو آلية احتواء للتخلص النهائي من المواد الملوثة من فوكوشيما حتى الآن، وسيتم تخزين آلاف الأطنان من التربة والحطام والمواد البيولوجية الملوثة لعقود وفق مقدار التلوث. (لقد كان التخلص من النفايات النووية قضية صعبة في الولايات المتحدة، كما يتضح من وقف خطط تخزين مثل هذه النفايات في جبل يوكا، حيث تزداد حدة المشكلات المعنية في بلد أصغر بكثير وذي كثافة سكانية عالية للغاية وزلزال متكررة). يمثّل العثور على موقع للتخلص الآمن من النفايات المشعة على المدى الطويل تحديًا؛ وفي هذه الأثناء تم جمع كميات كبيرة من التربة والمياه والمواد الأخرى الملوثة، وحفظها في المنطقة المحيطة بفوكوشيما.

ويشكّل تخزين المياه الملوثة، خاصة مياه البحر المستخدمة في فوكوشيما، تحديًا على وجه الخصوص. وقد أُلحقت خصائص مياه البحر الأثقال بطبيعتها، التي تفاقمت بسبب تأثيرات الإشعاع المدمرة، الضرر ببطانات المطاط وأجزاء أخرى من خزانات الاحتواء المستخدمة في فوكوشيما، المحتوية على عدة آلاف من أطنان المياه الملوثة، وفي حين كان يمكن استخدام خزانات مكونة من مواد أكثر متانة للتغلب على هذه المشكلات، فإن تكلفة هذه الخزانات وفق النطاق المطلوب قد تحظر هذا الخيار سريعًا. علاوة على

ذلك، يظل أي تصميم للخزان عرضة للأحداث الطبيعية القاسية، مثل الزلازل أو ظواهر تسونامي أو العواصف العاتية.

يمكن أن تكون المسائل النفسية والسياسية بالقدر ذاته من أهمية الأمور الفنية في تشكيل كيفية معالجة المواد الملوثة في نهاية الأمر. يفتقر الأشخاص الذين يعيشون بالقرب من موقع التخلص المقترح شعور بالقلق بطبيعة الحال إزاء ما إذا كان تصدع وعاء الاحتواء، أو الترشيح البطيء للمواد عن طريق النفاذ إلى الماء، يمكن أن يعرضهم وعائلاتهم للخطر. وسوف يدركون أيضًا أهمية التصورات التي يمكن أن تقلل سبل عيشهم، أو تقلل من حيوية مجتمعاتهم، أو تحط من قيمة ممتلكاتهم، أو حتى تؤدي إلى تمييز غير عقلاني ضدهم، وسينتاب الأشخاص ذوي التفكير البيئي مخاوف كبيرة حول ما إذا كانت المادة المشعة أو حاوية الاحتواء (التي قد تحتوي على رصاص) قد تؤثر على البيئة المحيطة. في نهاية المطاف، سيكون مكان وكيفية تأمين المواد المشعة مسائل سياسية، بالإضافة إلى جميع التعقيدات التي تستلزمها.

في حالة عدم وجود موقع مناسب للتخلص الدائم، تتمثل إحدى الطرق البديلة القابلة للتطبيق في بعض الحالات في تشتيت المواد إلى درجة لا تشكل معها خطرًا قابلاً للقياس على الأشخاص أو البيئة، وينطبق ذلك بشكل كبير في حالة المياه الملوثة، التي ستتشتت بسرعة عند إطلاقها في المحيط، في حين أن المواد الصلبة ستنتقل ببطء أكبر. على الرغم من إمكانية إزالة الكثير من الأنواع المشعة من الماء الملوث كما تمت الإشارة إليه سابقًا، من المستحيل فصل جزيئات الماء المحتوية على التريتيوم عن بقية المياه على أي نطاق مجدٍ. حيث إن الخواص الكيميائية لجزيئات الماء العادية والمحتوية على التريتيوم متطابقة أساسًا، على الرغم من أن هذه النقطة الأخيرة قد تكون مفيدة أيضًا في حالة التخفيف: على عكس النويدات المشعة الأخرى، لن تتراكم جزيئات الماء المحتوية على التريتيوم تفضيلًا في الكائنات الحية أو في قاع البحر. وبدلاً من ذلك، ستتشتت عبر المحيط إلى درجة أن مستويات الإشعاع لا يمكن تمييزها عن المستويات السابقة.

كما هو الحال مع تطوير موقع تخزين دائم، توجد مسائل سياسية كبيرة الشأن على نحو واضح متداخلة مع مسألة تخفيف المياه الملوثة في المحيط، وهذه المسائل منفصلة بعض الشيء عن الاعتبارات الفنية. ومن المحتمل أن تشعر المجتمعات المحلية والصيادون ومن يتناولون المأكولات البحرية من العامة بالقلق بشأن التلوث المحتمل، حتى لو كان التخفيف سليمًا من الناحية الفنية. قد يكون نقل المياه إلى مناطق بعيدة من المحيط للتخلص منها ضروريًا لأسباب سياسية، حتى إذا لم يكن هناك



مبرر لذلك استنادًا إلى المخاطر الفعلية المتضمنة. ويمكن أن تؤدي الآثار الاقتصادية الناجمة عن الخوف من تناول المأكولات البحرية إلى تدمير المجتمعات، بغض النظر عما إذا كانت مستويات الإشعاع في المأكولات البحرية مرتفعة على الإطلاق. علاوة على ذلك، قد تثار اتهامات مضادة قاسية من بلدان أخرى عقب الإطلاق المتعمد للمياه الملوثة في البحر نظرًا إلى أن المحيط هو أحد الأصول العالمية. مثل هذا الإطلاق من شأنه أن يوفر رعاية كبيرة للخصوم المحتملين.

ولقد تم أيضًا اقتراح حلول أكثر غرابة للتخلص من النفايات المشعة، رغم أنه من غير المحتمل نجاحها لأسباب فنية وسياسية على حد سواء. وسيكون التخلص من المواد أسفل قاع البحر صعبًا ومكلفًا من الناحية الفنية، مع احتمال حدوث بعض التسرب والتراكم الحيوي؛ وسيُقابل أيضًا بمعارضة سياسية حادة. قد تكون إحدى الطرائق المذهلة لإزالة المواد الملوثة من البيئة هي إطلاقها في الفضاء. ومع ذلك، فإن هذا قد يكون باهظ التكلفة ومحفوفًا بالمخاطر، حيث يمكن أن يؤدي أي نوع من الفشل إلى تشتيت الإشعاع على مناطق واسعة.

## النتائج المستخلصة من الفصل

يحول المقدار الكبير من المواد الملوثة، التي يصل عددها إلى عدة آلاف من الأطنان من الأوساخ والحطام والماء، دون عزل المواد بسهولة عن عامة السكان. ولسوء الحظ، لا توجد طريقة معروفة لتسريع الانحلال الإشعاعي بهذا المقدار الكبير، لذلك يجب عزل المادة وتخزينها. يمكن أن تبحر وزارة الدفاع في إجراء الحرق النووي لتسريع الانحلال كتقنية مستقبلية محتملة، ولكن يجب إيلاء اهتمام خاص لإمكانيات القياس. بالإضافة إلى ذلك، سيشكل القلق العام بشأن التخزين المحلي للمواد الملوثة بالإشعاع النووي بقوة اختيار الحلول التقنية، لذا ينبغي للمطورين أن يأخذوا بعين الاعتبار قبول عامة الناس لهذه التقنيات قبل الشروع في برنامج عمل مكثف.

## المسائل المتعلقة بالروبوتات

أدت الروبوتات دورين حاسمين في فوكوشيما: فقد أمدت بيانات استطلاع مفيدة عن البيئة (بما في ذلك مستويات الإشعاع داخل المباني وخارجها) وكانت تستخدم للمساعدة في التعامل مع أجهزة التحكم في المفاعل. وأسهمت في إزالة التلوث من الأسطح الداخلية في حالات محددة. ومع ذلك، ظهر العديد من المشكلات الرئيسية في نطاق استخدامها. أشيرَ إلى بعض منها سابقاً:

- **الاتصالات والاستقلالية.** كانت الروبوتات تعمل في بيئة تواصل قاسية نتيجة للكارثة؛ وكانت جدران المباني والعوائق الأخرى تسبب الكثير من العوائق للاتصالات اللاسلكية. كما كان تنسيق ترددات الاتصالات صعباً في بعض الأحيان. افتقرت الروبوتات إلى الاستقلالية في المناورة والاستجابة بدون استمرار التوجيه. الأمر الذي يتطلب قدرتها على إرسال مقطع فيديو نطاق ترددي عالٍ إلى المتحكمين بها.
- **قيود الحركة والخفة والقوة.** تسبب الحطام الناتج عن الكارثة والعوائق الطبيعية والأدوات التي يستخدمها الإنسان مثل مقابض الأبواب والسلالم في إعاقة عمل الروبوتات. وواجهتها أيضاً صعوبة اختراق المساحات الضيقة داخل المباني. وفي بعض الحالات، افتقرت إلى الخفة أو القوة لأداء مهام معينة.
- **متطلبات الطاقة والدعم.** كانت الروبوتات غير المتصلة بالطاقة تعني بمهام ذات فترات زمنية محدودة، في حين كان للروبوتات التي كانت تُشحن باستمرار خلال مهماتها نطاقات محدودة للغاية، فضلاً عن وجود مشكلات في تشابك الأسلاك. وكانت الروبوتات بحاجة إلى الدعم والتحكم من نطاقات قريبة نسبياً. لذلك لزم

وجود أفراد في مخابئ بالقرب من أماكن استخدام الروبوتات. وهذا لم يعرّض الأفراد لقدرة من الخطر فحسب، بل استلزم أيضاً دعماً لوجستياً للأفراد.

- **انعدام التصلب ضد الإشعاع.** أشارت تقارير غير رسمية إلى أن المكوّنات الإلكترونية الحساسة للروبوتات قد تدهورت بفعل الإشعاع عندما كانت قريبة (في نطاق أمتار) من المواد عالية الإشعاع. وورد أيضاً في هذه التقارير أن الكاميرات وأجهزة الاستشعار الأخرى المثبتة على الروبوتات عرضة للتلف.

سيؤدي جعل الروبوتات أكثر ذكاءً وأكثر استقلالية وأقل عرضة للإشعاع واحتياجها إلى متطلبات دعم أقل إلى تمكينها من أداء مهامها بشكل أكثر فاعلية وأداء أدوار إضافية في بعض الأحيان. على سبيل المثال، يمكن استخدامها لإزالة التلوث في ظروف أكثر تنوعاً. ويشمل ذلك الهواء الطلق وفي الأماكن الضيقة. كما أنها ستكون أكثر فائدة في حالات الكوارث الأخرى، فضلاً عن استخدامها في مجموعة واسعة من السيناريوهات الأخرى. يمكن أن تؤدي زيادة الاستقلالية والقدرات التحليلية المُركّبة إلى تقليل عرض النطاق الترددي اللازم للاتصالات بينما تسمح أيضاً للروبوتات بالعمل لفترات أطول خلال انقطاع الاتصالات.

سيكون الدفاع لبعض من هذه التطورات في المقام الأول قائماً على المتطلبات والجهود خارج سياق الاستجابة للكوارث. يسعى عدد من المؤسسات الأكاديمية والصناعية والعسكرية إلى تطوير روبوتات أكثر استقلالية يمكنها العمل لفترات أطول والقيام بمزيد من المهام المتنوعة ببراعة ودقة متناهيتين؛ وتتعدد استخدامات هذه الروبوتات لتشمل خطوط التجميع وتقديم الرعاية أو حتى المشاركة في القتال. من ناحية أخرى، تبرز عدة مناطق يكونها فريدة من نوعها إلى حد ما للاستجابة للكوارث، لا سيما في بيئة مشعة. وقد يكون من الضروري أيضاً تطوير روبوتات محصّنة ضد الإشعاع. على الرغم من أن ذلك يمكن أن يزيد أيضاً من التحصين الإشعاعي لمكونات الأقمار الصناعية أو المجالات المتخصصة الأخرى. يمكن لتغليف الإلكترونيات بالريصاص و/أو تثبيت دوائر متكررة، أن تُمكّن الروبوتات من العمل بشكل أكثر فاعلية في البيئات المشعة. ويكمن الاستخدام الخاص الثاني في إزالة التلوث باستخدام خراطيم الضغط العالي. وأجهزة التنظيف باستخدام الثلج الجاف، وأجهزة تنظيف بمحامل كريات، و/أو المكاسن الكهربائية؛ وتختبر شركة طوكيو للطاقة الكهربائية عدة روبوتات تحتوي على هذه القدرات. أخيراً، يكمن الاستخدام الثالث المخصص للكوارث في تصميم روبوتات تناسب البيئات القاسية، التي قد يتم إعاقه الاتصالات فيها وقد لا تكون مصادر الطاقة

متاحة لفترات طويلة. وهذا أمر مهم في الاستجابة للكوارث، ولكنه مهم أيضًا لبعض الاستخدامات العسكرية. يتمثل أحد الخيارات التي يتعين أخذها بعين الاعتبار في هذا الصدد في "تجميع الطاقة". وفي هذا الخيار يجمع الروبوت الطاقة من البيئة ثم يحولها بعد ذلك إلى كهرباء. تشمل مصادر الطاقة التي يتم جمعها الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح وربما الإشعاع ذاته.

## النتائج المستخلصة من الفصل

تمثل الروبوتات التي يمكنها التغلب على العقبات، والعمل بشكل مستقل، وتحمل البيئات الخطرة تقنيات من شأنها أن تكون مفيدة للغاية في أعقاب أي كارثة نووية مثل ما حدث في فوكوشيما.



## دروس مستفادة سابقة من تجربة تشيرنوبيل

قبل خمسة وعشرين عامًا من انبعاث الإشعاع في فوكوشيما، وقعت كارثة نووية أكبر بكثير في تشيرنوبيل، أوكرانيا (التي كانت حينها جزءًا من الاتحاد السوفيتي). لقد فحصنا باختصار الجوانب التقنية لتصدي الاتحاد السوفيتي لكارثة تشيرنوبيل من أجل فهم ما تم استفادته منذ ذلك الوقت وإدراك مزيد من الرؤى بشأن القدرات المرغوبة.

### تجربة تشيرنوبيل مع تحديد حجم التلوث

واجهت الحكومة السوفيتية صعوبات عملية بالغة في تحديد حجم التلوث الناجم عن المفاعل المدمر، وذلك بعد انفجار الوحدة الرابعة من محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية. لم تنتج التحديات من الطبيعة المعقدة والديناميكية للانبعاثات فقط (التي ظلت هائلة لأسابيع بعد الحادثة ولم تتوقف إلا بعد الانتهاء من بناء "هيكل الإيواء" حول الوحدة المدمرة)، ولكن من أوجه القصور التقنية والمؤسسية أيضًا. اعتمد الاتحاد السوفيتي اعتمادًا كبيرًا على قدرات القوات الكيميائية للجيش السوفيتي وقوات الدفاع المدني السوفيتية في تنفيذ المراقبة الإشعاعية، والتي أدخلت معدات وإجراءات للخدمة وُضعت بالأساس تحسبًا لحرب نووية. اتضح أن أدوات قياس الجرعات المتوفرة مثل مقياس المعدل DP-5 غير مناسبة لظروف ما بعد حادثة تشيرنوبيل بسبب أخطاء التصميم التي تسببت في مشكلات تتعلق بموثوقيتها وسهولة استخدامها. كما قيّد نقص الكادر المؤهل جهود مراقبة الإشعاع. لم يكن يوجد سوى عدد ضئيل من مسؤولي قياس الجرعات بقوات الجيش السوفيتي النظامي وقوات الدفاع المدني للاضطلاع بأعمال المراقبة في الوقت الفعلي على مستوى جميع المناطق الملوثة، وسريعًا ما أدركت قوات الدفاع المدني أن مسؤولي قياس الجرعات المتطوعين من المدنيين الذين تلقوا التدريب

على أيديهم كانوا يفترضون إلى المهارات اللازمة للمشاركة الفاعلة في أعمال المراقبة. ونتيجة لذلك، لم تنجح السلطات السوفيتية في تحديد حجم التلوث إلا بعد فترات تأخر كبيرة وبدقة محدودة.<sup>1</sup>

## تجربة تشيرنوبيل مع إزالة التلوث

وضعت الحكومة السوفيتية بعد حادثة تشيرنوبيل خططاً طموحة من أجل إزالة التلوث من المناطق الملوثة وإعادة إسكانها. لتكتشف أنها لا يمكنها تحقيق هذه الأهداف. كان قادة السوفيت يأملون بدءاً من أيار (مايو) 1986. في ظل بذل جهود مكثفة لإزالة التلوث. أن يتمكن جميع السكان الذين تم إجلاؤهم من العودة إلى منازلهم خلال المستقبل المنظور. ما سيساعد في تخفيف الصعوبات الكبيرة التي سببتها حادثة تشيرنوبيل للنظام. إلا أن كفاءة وسائل إزالة التلوث المتاحة التي جاءت أقل من المتوقع سرعان ما أفنعت المتخصصين بتعذر بلوغ هذا الهدف.

فشلت جميع وسائل إزالة التلوث الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية في الارتقاء إلى مستوى التطلعات بعد كارثة تشيرنوبيل. ظهرت بعض هذه الإخفاقات بسبب الاختلافات النوعية بين التلوث الإشعاعي الناتج عن الانفجارات النووية (التي وضع الجيش السوفيتي والدفاع المدني إجراءات إزالة التلوث لمواجهتها) والانفجارات النووية الناتجة عن حادث انصهار مفاعل تشيرنوبيل. تم احتواء قدر كبير من النشاط الإشعاعي الذي أعقب الانفجار النووي داخل "جسيمات الغبار الإشعاعي" الزجاجية.<sup>2</sup> التي يمكن إزالتها من الأسطح بسهولة نسبية. في المقابل. أثبت التلوث الإشعاعي الناجم عن حادث تشيرنوبيل أنه مستعص على الحل ومعقد بشكل أكبر. علقّت النظائر المشعة مثل السيزيوم-137 كيميائياً بالأسطح. ولكن عوامل إزالة التلوث الكيميائي المتاحة لم تُفلح في إزالتها كما كان متوقعاً. هذا. وقد حقق أحد البرامج العاجلة التي وُضعت لتطوير عوامل إزالة التلوث المحسنة بعض النجاح في نهاية الأمر. غير أن هذه العوامل لم ترق

<sup>1</sup> Edward Geist, "Political Fallout: The Failure of Emergency Management in the Chernobyl Disaster," *Slavic Review*, Vol. 74, No. 1, Spring 2015

<sup>2</sup> Samuel Glasstone and Phillip J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed., Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1977

إلى مستوى الأمل المبدئية المعقودة على برنامج إزالة التلوث.<sup>3</sup> وبعد التجارب العملية، رفض الباحثون السوفيت المعالجة البيولوجية أيضًا. وفقًا لأحد العلماء السوفيت، كشف هذا البحث عن "القابلية الكاملة للتطبيق" للمعالجة البيولوجية كوسيلة لمعالجة التلوث الإشعاعي.<sup>4</sup> في ظل عدم وجود إجراءات إزالة التلوث الكيميائي العملية، لجأت السلطات السوفيتية إلى التقنيات الفيزيائية لإزالة التلوث، ولكن عدم ملاءمة هذه الوسائل وتطلبها لعمالة كثيفة جعلها عملية في مناطق محدودة فقط. خاصةً محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية والمناطق المحيطة بها بصورة مباشرة.

لإنشاء "هيكل الإيواء" حول المفاعل المدمر، بذلت السلطات السوفيتية جهودًا مكثفة لإزالة التلوث حول محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية، بهدف تقليل مخاطر الإشعاع إلى مستويات تعرض مقبولة للعاملين في فترات قصيرة في حالة الطوارئ؛ استلزم وجود شظايا الوقود المقذوفة في المنطقة المحيطة حول محطة الطاقة استخدام الآلات الثقيلة لإزالة الطبقات العليا من التربة والتخلص منها في "أماكن دفن" مُعلَّمة، ولكن للأسف، فإن الفشل السريع للجرافات الآلية، التي صممها مصنع تشيلياينسك للجرارات بسبب الإشعاع والظروف الحرارية، خَلَّف جهود التصدي السوفيتية بدون خيار عملي معتمد على الآلات لهذه المهمة. ونجح الجيش السوفيتي في إعادة توظيف المركبة المدرعة الخاصة ببناء الطرق IMR-2 من أجل استخدامها في العمليات حول تشيرنوبيل. وبفضل تركيب جرافة تحمل فردين على هيكل دبابة بصورة أساسية، وفرت مركبة IMR-2 لراكبيها حماية ملائمة ضد أخطار الإشعاع المحيطة.<sup>5</sup> كما دخلت الجرارات التقليدية المجهزة بتدريع بدوي الصنع ضد الإشعاع الخدمة بصورة معتبرة لتُستخدم في نقل المواد الملوثة في تشيرنوبيل.

Staff of Civil Defense of the Ukrainian SSR, *Dezaktivatsionny raboty v khode likvidatsii* <sup>3</sup> *avarii na Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Decontamination Efforts in the Course of the Liquidation of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant], Kiev: Shtab GO Ukrainskoi SSR, 1988.

R. M. Aleksakhin, and A. N. Sirotkin, "Chernobyl'skaia katastrofa i agrarnaia nauka [The <sup>4</sup> Chernobyl Catastrophe and Agricultural Science]," in A. A. D'iachenko, ed., *Chernobyl'. Dolg i Muzhestvo* [Chernobyl: Duty and Courage], Moscow: 4-yi filial Voenizdata, 2004.

S. Paskevich and D. Vishnevskii, *Chernobyl': Realnyi Mir* [Chernobyl: The Real World], <sup>5</sup> Moscow: Eksmo, 2011.



واشترت الحكومة السوفيتية روبوتات أجنبية وأطلقت برنامجاً عاجلاً لوضع تصميماتها الخاصة بعدما اكتشفت عدم امتلاكها روبوتات ملائمة للاستعانة بها في جهود إزالة التلوث في تشيرنوبيل. دخل روبوت STR-1 الخدمة في آب (أغسطس) 1986، وهو الروبوت الأنجح من بين هذه الروبوتات والناج عن جهود التعاون بين عشرات المؤسسات السوفيتية. على غرار عربات لونغود الفضاوية السوفيتية، كانت مركبة STR-1 عبارة عن جرافة صغيرة بست عجلات يُتحكم فيها عن بعد. تُرفع مركبة STR-1 إلى الجزء العلوي من المحطة المدمرة عن طريق رافعة وطائرة مروحية، وتُزيح المركبة المخلفات الملوثة عن الحافة لتسقطها داخل حاويات خاصة موجودة بالأسفل. ويُذكر أن مركبات STR-1 عملت بنجاح في الحقول الإشعاعية التي تتسم باحتوائها على عشرات من السيترات في الساعة الواحدة، ولسوء الحظ وصلت روبوتات STR-1 وغيرها في وقت متأخر جداً وبأعداد محدودة جداً حتى أنها لم تسهم إلا بقدر ضئيل في جهود إزالة التلوث في تشيرنوبيل. أُسندت أغلب أعمال إزالة التلوث إلى "مسؤولي إزالة التلوث" من المتطوعين والمجندين الذين أُطلق عليهم لقب تهكمي يُسمى "الروبوتات الحية"<sup>6</sup>.

على الرغم من الخبرة والموارد الكبيرة للتعامل مع حالات الطوارئ الإشعاعية، إلا أنه فشلت الأساليب التكنولوجية في إزالة التلوث إلى حد كبير في تشيرنوبيل. قبل الحادث، عجز المتخصصون عن التنبؤ بالاختلافات النوعية بين حادث في محطة للطاقة النووية والاختبارات النووية الجوية المستخدمة في تطوير أساليب إزالة التلوث السائدة. فشلت أساليب إزالة التلوث الكيميائي والبيولوجي في الخروج بالنتائج المرجوة، بينما كانت التقنيات الفيزيائية لإزالة التلوث خطيرة حيث أنها أسفرت في بعض الأحيان عن تدمير المناطق التي كان الغرض الحفاظ عليها بالأساس. في نهاية الأمر، أُجبرت هذه الاعتبارات الاتحاد السوفيتي على قبول أن "منطقة العزل" المحيطة بالمفاعل المدمر يجب أن تظل غير مأهولة بالسكان لعقود قادمة.

M. I. Malenkov and A. L. Kemurdzhian, "Opyt razrabotki i ekspluatatsii <sup>6</sup> robototekhnicheskogo kompleksa STR-1 pri raschistke krovel' ChAES v 1986 gody [Experience of the Development and Use of the STR-1 Robot-Technological System During the Decontamination of the Roof of the ChNPP in 1986]," in *Ekstremal'naiia robototekhnika: Sb. Trudov X Muzhdunarodnoi nauchno- tekhnicheskoi konferentsii [Extreme Robot Technology: Collection of Works from the Tenth Scientific-Technical Conference]*, Saint Petersburg: TsNII .RTK, 1999, pp. 48–55

## تجربة تشيرنوبيل مع استيعاب التلوث الإشعاعي داخل الموقع

حظي الباحثون السوفيت بنجاح أكبر بكثير في محاولاتهم للسيطرة على انتقال التلوث الإشعاعي في البيئة. على النقيض من تجربتهم المخيبة للأمال عند إزالة التلوث بعد حادث تشيرنوبيل. نجحت الحكومة السوفيتية باستخدام مجموعة متنوعة من التقنيات في الحد من انتشار التلوث في الأنظمة البيئية الأرضية والمائية. وكذلك في وضع تقنيات زراعية أسهمت بشكل واضح في الحد من كمية النشاط الإشعاعي الذي تمتصه المحاصيل والماشية. وساعدت هذه الإجراءات في الحد من تعرض المواطنين السوفيت للإشعاع الداخلي والخارجي. مما قلل من التكاليف البشرية والاقتصادية للكارثة.

دفع موقع محطة تشيرنوبيل للطاقة النووية على نهر بريبيات، الذي يلتقي مع نهر دنيبر أمام النهر المارّ بمحاذاة كييف، الحكومة السوفيتية إلى تنفيذ برنامج ممتد لوقف انتشار التلوث المنقول بالماء قبل أن يؤثر بشكل خطير على إمدادات مياه العاصمة الأوكرانية. ولمنع انتقال الرواسب المشعة من موقع الحادث أسفل النهر، شيدّ الاتحاد السوفيتي نظامًا من السدود على مدار عام 1986. وهو ما نجح في هدفه المتمثل في الإبقاء على الكم الأكبر من التلوث في المرتفعات العليا للنهر. كما وضعت موسكو خطة طوارئ من أجل إمداد مدينة كييف بالماء من الآبار الارتوازية عند الحاجة. ولكن لحسن الحظ لم تتطلب الضرورة اتباع هذا الإجراء. في النهاية، اكتشف الاتحاد السوفيتي أنه بإمكانه إدارة التلوث الإشعاعي المنقول عبر الماء والناجم عن كارثة تشيرنوبيل باستخدام تقنيات بسيطة نسبيًا.

بالإضافة إلى إجبار 115,000 مواطن سوفيتي على الإخلاء، أسفرت كارثة تشيرنوبيل أيضًا عن تلوث منخفض المستوى في مناطق كبيرة ظلت مأهولة بالسكان. الأمر الذي ألزم الاتحاد السوفيتي والدول الخلف البحث عن وسائل لتقليل تأثير الحادثة على الأرض الزراعية والسيطرة على حالات تعرض السكان للإشعاع الداخلي. فبعد انفجار الوحدة الرابعة بفترة وجيزة، شرعت وزارة الزراعة السوفيتية في تطبيق برنامج لتحقيق هذه الأهداف. وخلال الأعوام التالية، طوّر الباحثون السوفيت تقنيات للحد من التعرض البشري للإشعاع من خلال التحكم في انتقال النظائر المشعة مثل السيزيوم-137 والسترونشيوم-90 في الأنظمة البيئية الزراعية. طرح علماء سوفيت أنظمة سماد خاصة نجحت في الحد من امتصاص السيزيوم عن طريق النباتات. وحددوا أيضًا أن استبدال أنواع

العشب، التي تنمو طبيعياً في المروج في أشكال سريعة النمو بجانب استخدام الأسمدة المستهدفة، يمكن أن يقلل من كمية السيزيوم-137 في نباتات المروج بمقدار عشرة أضعاف.

بالنظر إلى أهمية منتجات الألبان في النظام الغذائي السوفيتي، فإن الحد من التلوث الإشعاعي في الحليب شكّل مصدر قلق بالغ للسلطات السوفيتية بعد حادثة تشيرنوبيل. إلى جانب تقنيات إدارة المراعي التي ذكرناها للتو، قرر الاتحاد السوفيتي أن المواد الماصة، مثل طين البنتونايت وفيريك سداسي سيانو فيرات، يمكن أن تؤدي دوراً حيوياً في الزراعة في المناطق الملوثة. لا يمكن استخدام هذه المواد الماصة على أنها إضافات غذائية للتربة لمنع النباتات من امتصاص النويدات المشعة فحسب، بل وقرر الباحثون السوفيت البيطريون أن هذه المواد، المستخدمة على أنها إضافة غذائية، يمكن أن تقلل من كمية النظائر المشعة التي امتصتها الماشية من غذائها. تختلف كفاءة هذه التقنية بصورة كبيرة بحسب المادة الماصة المستخدمة والشكل الذي تُعطى به. اكتشف الباحثون أن معادن مثل الزيوليت كانت فاعليتها أقل بكثير من الإضافات الغذائية التي تحتوي على هيكساسيانوفيرات فيريك الذي يتم إعطاؤه إما على شكل قوالب أو أقراص. كما أثبتت الإضافات الغذائية هيكساسيانوفيرات فيريك أيضاً فاعلية أقل من تقنيات تحسين المراعي، ما يجعل منها الخيار المفضل للزراعة في المناطق الملوثة.<sup>7</sup>

## النتائج المستخلصة من الفصل

على الرغم من التقدم التكنولوجي المجتمعي المذهل الذي تم إحرازه على مدار ما يزيد عن 25 سنة منذ كارثة تشيرنوبيل، فمن المدهش أن العديد من تقنيات التخفيف النووي التي استخدمها السوفيت لأول مرة في عام 1986 لم تتغير إلا بقدر ضئيل.

## النتائج والتوصيات

أسفر هذا البحث عن عدة نتائج رئيسية وهي:

- يعد تمكين قياس موزع وواسع النطاق للإشعاع أمراً بالغ الأهمية بمرور الوقت للحصول على استجابة فعالة. ويمكن معالجة هذا الأمر من خلال توزيع شبكة من أجهزة استشعار إشعاعية صغيرة تنقل المعلومات المحلية إلى محور مركزي عبر محطات ترحيل مرتفعة.
- يجب أن تكون المركبات البرية غير المأهولة بالركاب المناسبة للخواص البيئية والاستجابة البيئية ملائمة لاحتياجات البيئات الملوثة والقاسية. وهي تتطلب على وجه التحديد إجراء تحسين في الحركة للتغلب على مختلف أنواع العوائق، ودرجات عالية من الاستقلالية بسبب محدودية عرض النطاق الترددي للاتصالات، والقدرة على المناورة ببراعة مع الأجسام واختراق المساحات الصغيرة، وأوقات بقاء طويلة في البيئة، وتحتاج إلى تحسين إشعاعي من خلال تحسين تصميم الدوائر أو التدريع بالنسبة لتلك الأنظمة في المناطق الأكثر خطورة.
- وفي حين يتحتم على الأشخاص دخول المناطق الملوثة، سيكون من المفيد وجود وسائل لحمايتهم لفترات طويلة دون بذل جهد بدني كبير. قد يكون أحد النهج استخدام سترات "الهيكل الخارجي" التي من شأنها أن تحميهم بطبقة خارجية من الرصاص مع تزويدهم أيضاً بمرشح للهواء وقوة معززة.
- تجدر الحاجة إلى إجراء مزيد من البحث للتمكن من إزالة التلوث من كميات كبيرة من المياه ومساحات شاسعة من التربة أو الأسطح الاصطناعية. وتعد الأساليب الحالية مفيدة في المقام الأول للتعامل مع كميات محدودة من المواد، بدلاً من الكمية الهائلة من المواد الملوثة التي قد تتطلب إزالة التلوث بعد وقوع الحادثة.

وقد يكون من المفيد التحقق من التكلفة والمفاضلات الأخرى المرتبطة بنُهج مختلفة للمعالجة.

- تحظى التصورات العامة بأهمية قصوى في تشكيل الاستجابة لحادثة ما. وفي بعض الحالات قد تمنع ردود الفعل العامة حيال الحلول الملائمة تقنيًا وميسورة التكلفة اقتصاديًا وتطبيق هذه الحلول تعرقلها.

من الناحية التاريخية، تميل الحكومات والمتخصصون إلى التقليل من صعوبة إزالة التلوث في أعقاب الحوادث الإشعاعية. لسوء الحظ، فشلت محاولات إزالة التلوث على نطاق واسع في الوفاء بالتوقعات في أعقاب كارثتي تشيرنوبيل وفوكوشيما دايتشي. وفي كلتا الحالتين، تم التخلي عن خطط طموحة لتطهير المناطق التي تعرضت للإشعاع وإعادة تعميمها أو تقليصها بعد استثمار معقول، مما تسبب في إحراج بالغ للحكومة. علاوة على ذلك، على الرغم من فاعلية إزالة التلوث، من غير المحتمل القدرة على تحقيق مستويات إشعاعية منخفضة مثل المستويات السابقة لهذه الحادثة. تصبح إزالة الإشعاع أكثر تكلفة وأكثر صعوبة بشكل مطرد مع انخفاض مستويات الإشعاع. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تحد الآثار البيئية (مثل التراكم الحيوي والحركة الدورية للإشعاع بين الغابات والأنهار) من فاعلية أي جهد مبدول لإزالة التلوث. يمكن أن تساعد الرياح والمياه على تشتيت الإشعاعات، والحد من التركيزات في بعض المناطق. ولكن غالبًا ما تؤدي إلى زيادتها في مناطق أخرى يعتبرها الناس مهمة.

ثمة مصدر قلق رئيسي آخر يتعلق بعملية إزالة التلوث يكمن في تأثيرها على الأشخاص الذين يؤدون هذا العمل. وكما رأينا في فوكوشيما وتشرنوبيل، فإن الغالبية العظمى من عمليات إزالة التلوث يقوم بها بشر يتعرضون بالتالي للتلوث، رغم حمايتهم جيدًا. تقلل عملية إزالة التلوث من الخطر المهدد للصحة العامة، ولكن على حساب التغاضي عن تسببها في مخاطر صحية مهنية. وعلى نحو مثالي، قد تُمكن التطورات المستقبلية من إنجاز معظم أو كل هذا العمل عبر الروبوتات. ومع ذلك، فإن الروبوتات لا تزال بحاجة إلى تحكم البشر بها ودعمهم لها، ربما من نطاق قريب بما يكفي لا يزال يتعرض البشر معه لبعض المستوى من التعرض للإشعاع. (قد يحدث بعض من هذا التعرض للإشعاع نتيجة التلامس مع الروبوتات ذاتها مع عدم امتلاك الروبوتات لقدرات التنظيف الذاتي أو التنظيف المتبادل).

يجب مراعاة الاستفادة من طرق أخرى لاحتواء الأثار الصحية والتكاليف بالنظر للحالة العصبية فيما يتعلق بإزالة التلوث. تنبع المخاوف بشأن التلوث في نهاية المطاف من خطر تعرض الأشخاص أو الكائنات الحية الأخرى لهذه المواد، مع وجود آثار صحية سلبية. يمكن الحد من هذا التعرض، على الأقل في حالة البشر، ولكن فقط بتكلفة معقولة. تشمل البدائل الأكثر شهرة عملية إزالة التلوث، التي ناقشنا تحدياتها بالفعل، والإخلاء، الذي ينطوي على تكاليف بشرية وسياسية واقتصادية واسعة النطاق. قد لا يكون الإخلاء أيضًا خيارًا للجيش الأمريكي في بعض السيناريوهات، نظرًا لأنه قد يحتاج إلى تنفيذ عمليات ممتدة في مناطق إشعاعية عالية. وقد يكون من المفيد تطوير تقنيات قد تسمح للأفراد بالعمل في بيئة إشعاعية معادية.

ولحسن الحظ، قد يمكّن التقدم التقني والعلمي من وضع استراتيجيات تكميلية ومتعددة الطبقات لا تهدف إلى الحد من التعرض السكاني فحسب، بل أيضًا إلى الحد من الأثار الصحية لعمليات التعرض. ويمكن أن تشمل التطورات على المدى القريب تقنيات مثل الرصد التفصيلي للإشعاع في الوقت الحقيقي، الذي كان من الممكن استخدامه في إدارة حالات التعرض الفردية للإشعاع بكفاءة أكبر، وتحسين الإلكترونيات المصدّدة ضد الإشعاع للسماح بأتمتة أكبر للمهام في المناطق الملوثة، ويمكن أن يسهل تطوير الهياكل الخارجية التي توفر درع إشعاعي وجود الإنسان في المناطق الملوثة بشكل خطير. قد يصبح العلاج الحيوي، غير العملي في الوقت الحاضر، أكثر فائدة للكائنات الحية المعدلة وراثيًا لتعزيز قدرتها على تركيز النظائر المشعة، ويمكن الاستفادة من تكنولوجيا النانو والهندسة الجزيئية لإنشاء مواد ماصة أكثر فاعلية للاستخدام الزراعي والبيطري والطبي، من أجل عزل المواد المشعة بشكل أفضل في الموقع. ومن الاحتمالات الممكنة لتغيير قواعد اللعبة صياغة تدخلات طبية تؤدي إلى إصلاح الأثار الصحية للتعرض للإشعاع، مثل العقاقير المتطورة للوقاية من الإشعاع، أو العلاجات المصممة لإصلاح التلف الإشعاعي على المستوى الخلوي. قد تُحدث هذه التقنيات تغييرًا جذريًا في قدرة الجيش الأمريكي على الاستجابة لعوامل الإشعاع على الرغم من صعوبتها تقنيًا للغاية، وقد تساعد في تقليل التكاليف الصحية والاجتماعية لهذه الأحداث إلى مستوى يمكن التحكم فيه بدرجة كبيرة جدًا.



Aleksakhin, R. M., and A. N. Sirotkin, "Chernobyl'skaia katastrofa i agrarnaia nauka [The Chernobyl Catastrophe and Agricultural Science]," in A. A. D'iachenko, ed., *Chernobyl'. Dolg i Muzhestvo [Chernobyl: Duty and Courage]*, Moscow: 4-yi filial Voenizdata, 2004.

Alpeyev, Pavel, "Japan Geiger Counter Demand After Fukushima Earthquake Means Buyer Beware," *Bloomberg News*, July 14, 2011. As of November 13, 2014: <http://www.bloomberg.com/news/2011-07-15/geiger-counters-sell-out-in-post-fukushima-japan.html>

FEMA—See Federal Emergency Management Agency.

Federal Emergency Management Agency, "Nuclear/Radiological Incident Annex," June 2008. As of December 1, 2014: [http://www.fema.gov/pdf/emergency/nrf/nrf\\_nuclearradiologicalincidentannex.pdf](http://www.fema.gov/pdf/emergency/nrf/nrf_nuclearradiologicalincidentannex.pdf)

Federal Emergency Management Agency, "Federal Radiological Preparedness Coordinating Committee Report," FEMA website, updated June 26, 2013. As of December 2013: <https://www.fema.gov/federal-radiological-preparedness-coordinating-committee>

Feickert, Andrew, and Emma Chanlett-Avery, *Japan 2011 Earthquake: U.S. Department of Defense (DOD) Response*, Washington, D.C.: Congressional Research Service, R41690, June 2, 2011.

Feltcorn, E., *Technology Reference Guide for Radioactively Contaminated Media*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 402-R-07-004, October 2007.

Geist, Edward, "Political Fallout: The Failure of Emergency Management in the Chernobyl Disaster," *Slavic Review*, Vol. 74, No. 1, Spring 2015, pp. 104–126.

Glasstone, Samuel, and Phillip J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3rd ed., Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1977.



Goualin, Maxime, “The Japanese Nuclear Power Accident: Is Seaweed and Cannabis Being Used to Treat Nuclear Power Waste?” *Cereplast RSS*, August 11, 2011. As of August 2, 2013:

<http://www.cereplast.com/the-japanese-nuclear-power-accident-is-seaweed-and-cannabis-being-used-to-treat-nuclear-power-waste/>

Hays, Jeffrey, “Clean Up, Decontamination and Radioactive Debris and Soil Around Fukushima,” *Facts and Details*, April 2012. As of November 12, 2014:

<http://factsanddetails.com/japan/cat26/sub162/item1856.html>

Ishida, Junichiro, “Response to TEPCO’s Fukushima-Daiichi NPS Accident and Decontamination in Off-Limits Zones,” briefing, Japan Atomic Energy Agency, January 18, 2012.

Jeppson, D. W., G. Collins, L. Furlong, and S. L. Stockinger, “Separation of Tritium from Wastewater,” paper presented at *Waste Management 2000* conference, Tucson, Ariz., February 2000.

Kimura, Shunsuke, “Cleanup Work Progresses in Fukushima, but Residents Still Concerned,” *Asahi Shinbun*, March 7, 2013. As of November 12, 2014:

<http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/fukushima/AJ201303070075>

Lee, Myung W., “Method and Apparatus for Separation of Heavy and Tritiated Water,” U.S. Patent No. US 6332914 B1, December 25, 2001.

Lee, Sang Don, Robert L. Sindelar, and Mark B. Triplett, *Report of the United States Embassy Science Fellows Support to the Government of Japan—Ministry of the Environment: Observations and Commentary on Remediation of the Lands Off-Site from the Fukushima Daiichi Reactors*, U.S. Environmental Protection Agency, SRNL-RP-2013-00303, July 2013.

Mahony, Melissa, “Radioactive Water Cleanup Steams Ahead at Fukushima,” *SmartPlanet*, August 29, 2011. As of November 12, 2014:

<http://www.smartplanet.com/blog/intelligent-energy/radioactive-water-cleanup-steams-ahead-at-fukushima/8325>

Malenkov, M. I., and A. L. Kemurdzhian, “Opyt razrabotki i ekspluatatsii robototekhnicheskogo kompleksa STR-1 pri raschistke krovel’ ChAES v 1986 gody [Experience of the Development and Use of the STR-1 Robot-Technological System During the Decontamination of the Roof of the ChNPP in 1986],” in *Ekstremal’naia robototekhnika: Sb. Trudov X Muzhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Extreme Robot Technology: Collection of Works from the Tenth Scientific-Technical Conference]*, Saint Petersburg: TsNII RTK, 1999, pp. 48–55.

Miyazaki, Makoto, Akira Ohtsuru, and Tetsuo Ishikawa, “An Overview of Internal Dose Estimation Using Whole-Body Counters in Fukushima Prefecture,” *Fukushima Journal of Medical Science*, Vol. 60, No. 1, 2014, pp. 95–100.

Paskevich, S., and D. Vishnevskii, *Chernobyl’: Realnyi Mir [Chernobyl: The Real World]*, Moscow: Eksmo, 2011.

Roed, Jørn, K. G. Andersson, and H. Prip, *Practical Means for Decontamination 9 Years After a Nuclear Accident*, Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1995.

Rogers, Harold, John Bowers, and Dianne Gates-Anderson, "An Isotope Dilution–Precipitation Process for Removing Cesium from Wastewater," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 243, December 2012, pp. 124–129.

Sandia National Laboratories, "Sandia Labs Technology Used in Fukushima Cleanup," news release, May 29, 2012. As of August 2, 2013:  
[https://share.sandia.gov/news/resources/news\\_releases/fukushima\\_cleanup/](https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/fukushima_cleanup/)

Soudek, P., S. Valenová, Z. Vavriková, and T. Vanek, "(137)Cs and (90)Sr Uptake by Sunflower Cultivated Under Hydroponic Conditions," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 88, No. 3, April 21, 2006, pp. 236–250.

Staff of Civil Defense of the Ukrainian SSR, *Dezaktivatsionny raboty v khode likvidatsii avarii na Chernobylskoi atomnoi elektrostantsii [Decontamination Efforts in the Course of the Liquidation of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant]*, Kiev: Shtab GO Ukrainskoi SSR, 1988.

U.S. Northern Command, "Joint Task Force Civil Support," website, undated. As of December 2014:  
<http://www.jtfc.northcom.mil>

World Health Organization, *Health Risk Assessment from the Nuclear Accident After the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami*, Geneva, Switzerland, 2013.



يمكن للقراء المهتمين بمتابعة أحدث تطورات تقدم عملية إزالة التلوث في فوكوشيما دايتشي أن يجدوا المواقع التالية باللغة الإنجليزية مفيدة:

- المعالجة داخل الموقع:
  - شركة طوكيو للطاقة الكهربائية  
(<http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html>)
  - المعهد الدولي لأبحاث إزالة التلوث النووي  
(<http://irid.or.jp/en/>)
  - وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة  
(<http://www.meti.go.jp/english/>)
- المعالجة خارج الموقع:
  - وزارة البيئة  
(<http://www.env.go.jp/en/>)
  - وكالة الطاقة الذرية اليابانية  
(<http://www.jaea.go.jp/english/index.html>)

تمثل القائمة التالية مراجع جزئية للمواد الأساسية المقدمة للقارئ المهتم. يُرجى التواصل على [Cynthia\\_Dion-Schwarz@rand.org](mailto:Cynthia_Dion-Schwarz@rand.org) للاطلاع على قائمة المراجع الكاملة التي تضم المصادر المكتشفة خلال إعداد هذه الدراسة.

“36th World Nuclear Association Annual Symposium 2011,” London, United Kingdom, September 14–16, 2011.

Akabayashi, A., and Y. Hayashi, “Mandatory Evacuation of Residents During the Fukushima Nuclear Disaster: An Ethical Analysis,” *Journal of Public Health (United Kingdom)*, Vol. 34, No. 3, 2012, pp. 348–351.

Akai, J., N. Nomura, S. Matsushita, H. Kudo, H. Fukuhara, S. Matsuoka, and J. Matsumoto, “Mineralogical and Geomicrobial Examination of Soil Contamination by Radioactive Cesium due to 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident,” *Physics and Chemistry of the Earth*, 2013.

Akashi, M., “Fukushima Daiichi Nuclear Accident and Radiation Exposure,” *Japan Medical Association Journal*, Vol. 55, No. 5, 2012, pp. 393–399.

American Nuclear Society, *Fukushima Daiichi: ANS Committee Report*, 2012.

Anderson, Christopher, “Soviet Official Admits That Robots Couldn’t Handle Chernobyl Cleanup,” *The Scientist*, January 20, 1990. As of November 12, 2014: <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/10861/title/Soviet-Official-Admits-That-Robots-Couldn-t-Handle-Chernobyl-Cleanup/>

Anshari, R., and Z. Su’ud, “Preliminary Analysis of Loss-of-Coolant Accident in Fukushima Nuclear Accident,” *AIP Conference Proceedings*, 2012, pp. 315–327.

Anzai, K., N. Ban, T. Ozawa, and S. Tokonami, “Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: Facts, environmental contamination, possible biological effects, and countermeasures,” *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, Vol. 50, No. 1, 2012, pp. 2-8.

Aoyama, Michio, Daisuke Tsumune, and Yasunori Hamajima, “Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  in the North Pacific Ocean: Impacts of the TEPCO Fukushima-Daiichi NPP Accident,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 296, No. 1, 2013, pp. 535–539.

Arase, David M., “The Impact of 3/11 on Japan,” *East Asia*, Vol. 29, No. 4, 2012, pp. 313–336.

Bandstra, M. S., K. Vetter, D. H. Chivers, T. Aucott, C. Bates, A. Coffey, J. Curtis, D. Hogan, A. Iyengar, Q. Looker, J. Miller, V. Negut, B. Plimley, N. Satterlee, L. Supic, and B. Yee, “Measurements of Fukushima Fallout by the Berkeley Radiological Air and Water Monitoring Project,” Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2011, pp. 18–24.

Baranov’ska, Nataliia, *Chornobyl’s’ka trahediia: Narisi z istorii [The Chernobyl Tragedy: Sketches from History]*, Kiev: Instytut istorii Ukrainy, 2011.

Beresford, N. A., and D. Coppstone, “Effects of Ionizing Radiation on Wildlife: What Knowledge Have We Gained Between the Chernobyl and Fukushima Accidents?” *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 7, No. 3, 2011, pp. 371–373.

Beresford, N. A., and B. J. Howard, "An Overview of the Transfer of Radionuclides to Farm Animals and Potential Countermeasures of Relevance to Fukushima Releases," *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 7, No. 3, 2011, pp. 382–384.

Bevelacqua, J. J., "Applicability of Health Physics Lessons Learned from the Three Mile Island Unit 2 Accident to the Fukushima Daiichi Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 105, 2012, pp. 6–10.

Beyea, J., E. Lyman, and F. N. Von Hippel, "Accounting for Long-Term Doses in Worldwide Health Effects of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident," *Energy and Environmental Science*, Vol. 6, No. 3, 2013, pp. 1042–1045.

Bird, Winifred A., "Research Initiatives: Fukushima Health Study Launched," *Environmental Health Perspectives*, Vol. 119, No. 10, October 2011, pp. A428–A429.

Bird, Winifred A., and Elizabeth Grossman, "Chemical Aftermath: Contamination and Cleanup Following the Tohoku Earthquake and Tsunami," *Environmental Health Perspectives*, Vol. 119, No. 7, 2011, pp. a290–a301.

Blankenbecler, Richard, "Radiation Worker Protection by Exposure Scheduling," *Dose-Response*, Vol. 9, No. 4, 2011, pp. 465–470.

Boing, Lawrence E., "Decommissioning of Nuclear Facilities: Decontamination Technologies," briefing slides, International Atomic Energy Agency, October 2006. As of November 12, 2014:

<http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/r2d2/workshop2/lectures/decontamination-technologies.pdf>

Braun, J., and T. Barker, "Fukushima Daiichi Emergency Water Treatment," *Nuclear Plant Journal*, Vol. 30, No. 1, 2012, pp. 36–37.

Caffrey, J. A., K. A. Higley, A. T. Farsoni, S. Smith, and S. Menn, "Development and Deployment of an Underway Radioactive Cesium Monitor off the Japanese Coast near Fukushima Dai-ichi," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 111, 2012, pp. 120–125.

Campbell, K., "The Roles Welding Plays in Our Lives," *Welding Journal*, Vol. 90, No. 7, 2011, pp. 28–32.

Champion, D., I. Korsakissok, D. Didier, A. Mathieu, D. Quélo, J. Groell, E. Quentric, M. Tombette, J. P. Benoit, O. Saunier, V. Parache, M. Simon-Cornu, M. A. Gonze, P. Renaud, B. Cessac, E. Navarro, and A. C. Servant-Perrier, "The IRSN's Earliest Assessments of the Fukushima Accident's Consequences for the Terrestrial Environment in Japan," *Radioprotection*, Vol. 48, No. 1, 2013, pp. 11–37.

Chino, M., H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata, and H. Yamazawa, "Preliminary Estimation of Release Amounts of 131I and 137 Cesium Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 48, No. 7, 2011, pp. 1129–1134.

Cleveland, G. S., "The Advisory Team for Environment, Food, and Health: Capabilities, Mission, and Initiatives," Third International Topical Meeting on Emergency Preparedness and Response and Robotics and Remote Systems, 2011, pp. 382–395.

"Cutting-Edge Technology Aids Fukushima Cleanup," *Oil & Energy Daily*, July 11, 2013. As of August 2, 2013:  
<http://www.oilandenergydaily.com/2013/07/11/radball/>

Cuttler, J. M., "Commentary on the Appropriate Radiation Level for Evacuations," *Dose-Response*, Vol. 10, No. 4, 2012, pp. 473–479.

Dada, E., T. Mensah, D. Rollins, L. A. Estévez, O. Shelton, and J. Harrison, "Lessons Learned from and Economic Impacts of the Fukushima, Japan Disaster," AIChE Annual Meeting, 2011.

Danielache, S. O., C. Yoshikawa, A. Priyadarshi, T. Takemura, Y. Ueno, M. H. Thiemens, and N. Yoshidai, "An Estimation of the Radioactive S-35 Emitted into the Atmospheric from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant by Using a Numerical Simulation Global Transport," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 335–339.

Dauer, L. T., P. Zanzonico, R. M. Tuttle, D. M. Quinn, and H. W. Strauss, "The Japanese Tsunami and Resulting Nuclear Emergency at the Fukushima Daiichi Power Facility: Technical, Radiologic, and Response Perspectives," *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 52, No. 9, 2011, pp. 1423–1432.

D'Auria, F., G. Galassi, P. Pla, and M. Adorni, "The Fukushima Event: The Outline and the Technological Background," *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2012, 2012.

D'iachenko, A. A., *Opyt likvidatsii Chernobyl'skoi katastrofy [Experience of the Liquidation of the Chernobyl Catastrophe]*, Moscow: Institut strategicheskoi stabil'nosti, 2004.

Dominey-Howes, Dale, and James Goff, "Tsunami Risk Management in Pacific Island Countries and Territories (PICTs): Some Issues, Challenges and Ways Forward," *Pure and Applied Geophysics*, 2012, pp. 1–17.

Estournel, C., E. Bosc, M. Bocquet, C. Ulses, P. Marsaleix, V. Winiarek, I. Osvath, C. Nguyen, T. Duhaut, F. Lyard, H. Michaud, and F. Auclair, "Assessment of the Amount of Cesium-137 Released into the Pacific Ocean After the Fukushima Accident and Analysis of Its Dispersion in Japanese Coastal Waters," *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Vol. 117, 2012.

Fehrenbacher, Katie, "Kurion Dominates Fukushima Radioactive Water Cleanup," *GigaOM.com*, March 13, 2012. As of August 2, 2013:

<http://gigaom.com/2012/03/13/>

[kurion-dominates-fukushima-radioactive-water-cleanup/](#)

Fitzgerald, J., S. B. Wollner, A. A. Adalja, R. Morhard, A. Cicero, and T. V. Inglesby, "After Fukushima: Managing the Consequences of a Radiological Release," *Biosecurity and Bioterrorism*, Vol. 10, No. 2, 2012, pp. 228–236.

Fujimura, S., K. Yoshioka, T. Saito, M. Sato, Y. Sakuma, and Y. Muramatsu, "Effects of Applying Potassium, Zeolite and Vermiculite on the Radiocesium Uptake by Rice Plants Grown in Paddy Field Soils Collected from Fukushima Prefecture," *Plant Production Science*, Vol. 16, No. 2, 2013, pp. 166–170.

Fukuda, T., Y. Kino, Y. Abe, H. Yamashiro, Y. Kuwahara, H. Nihei, Y. Sano, A. Irisawa, T. Shimura, M. Fukumoto, H. Shinoda, Y. Obata, S. Saigusa, T. Sekine, and E. Isogai, "Distribution of Artificial Radionuclides in Abandoned Cattle in the Evacuation Zone of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *PLoS ONE*, Vol. 8, No. 1, 2013.

Funabashi, Y., and K. Kitazawa, "Fukushima in Review: A Complex Disaster, a Disastrous Response," *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 68, No. 2, 2012, pp. 9–21.

Furukawa, Fumiya, Soichi Watanabe, and Toyoji Kaneko, "Excretion of Cesium and Rubidium via the Branchial Potassium-Transporting Pathway in Mozambique Tilapia," *Fisheries Science*, Vol. 78, No. 3, 2012, pp. 597–602.

Gómez Cadenas, JuanJosé, "Fukushima, or the Black Swan of Nuclear Energy," *The Nuclear Environmentalist*, Milan: Springer, 2012, pp. 161–165.

Grambow, B., and C. Poinssot, "Interactions Between Nuclear Fuel and Water at the Fukushima Daiichi Reactors," *Elements*, Vol. 8, No. 3, 2012, pp. 213–219.

Grigg, N. S., "Large-Scale Disasters: Leadership and Management Lessons," *Leadership and Management in Engineering*, Vol. 12, No. 3, 2012, pp. 97–100.

Hachisuka, A., Y. Kimura, R. Nakamura, and R. Teshima, "Study of Radiation Dose Rate in Air at Setagaya in Tokyo," *Bulletin of National Institute of Health Sciences*, No. 129, 2011, pp. 129–133.

Han, Fei, Guang-Hui Zhang, and Ping Gu, "Adsorption Kinetics and Equilibrium Modeling of Cesium on Copper Ferrocyanide," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 295, No. 1, 2013, pp. 369–377.

Hao, LeCong, Miyako Nitta, Ryoko Fujiyoshi, Takashi Sumiyoshi, and Chau Tao, "Radiocesium Fallout in Surface Soil of Tomakomai Experimental Forest in Hokkaido due to the Fukushima Nuclear Accident," *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 224, No. 2, 2013, pp. 1–8.



Hashim, M., Y. Ming, and A. S. Ahmed, "Review of Severe Accident Phenomena in LWR and Related Severe Accident Analysis Codes," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 12, 2013, pp. 3320–3335.

Hashimoto, S., S. Ugawa, K. Nanko, and K. Shichi, "The Total Amounts of Radioactively Contaminated Materials in Forests in Fukushima, Japan," *Scientific Reports*, Vol. 2, 2012.

Hayashi, M., and L. Hughes, "The Policy Responses to the Fukushima Nuclear Accident and Their Effect on Japanese Energy Security," *Energy Policy*, 2012.

Hazama, Ryuta, and Akihito Matsushima, "Measurement of Fallout with Rain in Hiroshima and Several Sites in Japan from the Fukushima Reactor Accident," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, pp. 1–7.

"HEPA Filter Vacuum Cleaners," Direct Scientific website, undated. As of August 2, 2013:

<http://www.drct.com/HEPA-Vacuums.html>

Higaki, S., and M. Hirota, "Decontamination Efficiencies of Pot-Type Water Purifiers for  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in Rainwater Contaminated During Fukushima Daiichi Nuclear Disaster," *PLoS ONE*, Vol. 7, No. 5, 2012.

Higaki, T., S. Higaki, M. Hirota, K. Akita, and S. Hasezawa, "Radionuclide Analysis on Bamboos Following the Fukushima Nuclear Accident," *PLoS ONE*, Vol. 7, No. 4, 2012.

Higashi, Tatsuya, Takashi Kudo, and Seigo Kinuya, "Radioactive Iodine ( $^{131}\text{I}$ ) Therapy for Differentiated Thyroid Cancer in Japan: Current Issues with Historical Review and Future Perspective," *Annals of Nuclear Medicine*, Vol. 26, No. 2, 2012, pp. 99–112.

Hirao, S., H. Yamazawa, and T. Nagae, "Estimation of Release Rate of Iodine-131 and Cesium-137 from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 50, No. 2, 2013, pp. 139–147.

Hitchin, P., "Public Exposure in Japan," *Nuclear Engineering International*, Vol. 56, No. 682, 2011, pp. 18–20.

Honda, M. C., T. Aono, M. Aoyama, Y. Hamajima, H. Kawakami, M. Kitamura, Y. Masumoto, Y. Miyazawa, M. Takigawa, and T. Saino, "Dispersion of Artificial Caesium-134 and-137 in the Western North Pacific One Month After the Fukushima Accident," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 6, 2012, pp. E1–E9.

Husqvarna, "Swedish Robotic Technology Used to Clean Fukushima Nuclear Plant," news release, October 26, 2011. As of November 12, 2014:

<http://www.husqvarna.com/au/construction/company/newsroom/news-listing/swedish-robotic-technology-used-to-clean-fukushima-nuclear-plant/>

Imanaka, T., S. Endo, M. Sugai, S. Ozawa, K. Shizuma, and M. Yamamoto, "Early Radiation Survey of Iitate Village, Which Was Heavily Contaminated by the Fukushima Daiichi Accident, Conducted on 28 and 29 March 2011," *Health Physics*, Vol. 102, No. 6, 2012, pp. 680–686.

Inoue, K., M. Hosoda, M. Sugino, H. Simizu, A. Akimoto, K. Hori, T. Ishikawa, S. K. Sahoo, S. Tokonami, H. Narita, and M. Fukushi, "Environmental Radiation at Izu-Oshima After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 152, No. 1-3, 2012, pp. 234–237.

Interstate Technology and Regulatory Council, *Decontamination and Decommissioning of Radiologically Contaminated Facilities*, Washington, D.C., 2009.

Ishii, H., "Research on Farming Methods for Reducing the Absorption of Radiological Materials," *Report of Research Center of Ion Beam Technology, Hosei University, Suppl No 30*, 2012, pp. 17–20.

Ishii, N., K. Tagami, H. Takata, K. Fujita, I. Kawaguchi, Y. Watanabe, and S. Uchida, "Deposition in Chiba Prefecture, Japan, of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Fallout," *Health Physics*, Vol. 104, No. 2, Feb, 2013, pp. 189–194.

Isobe, T., Y. Mori, K. Takada, E. Sato, H. Sakurai, and T. Sakae, "Robust Technique Using an Imaging Plate to Detect Environmental Radioactivity," *Health Physics*, Vol. 104, No. 4, 2013, pp. 362–365.

Iwanade, Akio, Noboru Kasai, Hiroyuki Hoshina, Yuji Ueki, Seiichi Saiki, and Noriaki Seko, "Hybrid Grafted Ion Exchanger for Decontamination of Radioactive Cesium in Fukushima Prefecture and Other Contaminated Areas," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 293, No. 2, 2012, pp. 703–709.

Jang, Mee, Alan C. Perkins, and ByungIl Kim, "Dosimetry in Accidental Radiation Exposure," in Richard P. Baum, ed., *Therapeutic Nuclear Medicine*, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2014, pp. 817–833.

Kakamu, T., H. Kanda, M. Tsuji, D. Kobayashi, M. Miyake, T. Hayakawa, S. I. Katsuda, Y. Mori, T. Okouchi, A. Hazama, and T. Fukushima, "Differences in Rates of Decrease of Environmental Radiation Dose Rates by Ground Surface Property in Fukushima City After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Health Physics*, Vol. 104, No. 1, 2013, pp. 102–107.

Kamada, N., O. Saito, S. Endo, A. Kimura, and K. Shizuma, "Radiation Doses Among Residents Living 37 km Northwest of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 110, 2012, pp. 84–89.

Kamel Boulos, Maged N., Bernd Resch, David N. Crowley, John G. Breslin, Gunho Sohn, Russ Burtner, William A. Pike, Eduardo Jezierski, and Kuo-Yu Slayer Chuang, "Crowdsourcing, Citizen Sensing and Sensor Web Technologies for Public and Environmental Health Surveillance and Crisis Management: Trends, OGC Standards and Application Examples," *International Journal of Health Geographics*, Vol. 10, No. 1, 2011, pp. 1–29.

Kameya, H., S. Hagiwara, D. Nei, Y. Kakihara, K. Kimura, U. Matsukura, S. Kawamoto, and S. Todoriki, "The Shielding of Radiation for the Detection of Radioactive Cesium in Cereal Sample by Using a NaI (Tl) Scintillation Survey Meter," *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology-Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, Vol. 58, No. 9, 2011, pp. 464–469.

Kaneko, K., "Towards Emergency Response Humanoid Robots," paper presented at *Mecatronics REM 2012*, Paris, November 21–23, 2012, pp. 504–511.

Karpan, Nikolai, *Ot Chernobylia do Fukusimy: Dokumental'naja povest [From Chernobyl to Fukushima: A Documentary Account]*, 2nd ed., Kiev: S. Podgornov, 2013.

Katata, Genki, Masakazu Ota, Hiroaki Terada, Masamichi Chino, Haruyasu Nagai, "Atmospheric Discharge and Dispersion of Radionuclides During the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, Part I: Source Term Estimation and Local-Scale Atmospheric Dispersion in Early Phase of the Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 109, 2012, pp. 103–113.

Katata, Genki, Hiroaki Terada, Haruyasu Nagai, Masamichi Chino, "Numerical Reconstruction of High Dose Rate Zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 111, 2012, pp. 2–12.

Kato, H., Y. Onda, and T. Gomi, "Interception of the Fukushima Reactor Accident-Derived Cesium-137, Cesium-134 and I-131 by Coniferous Forest Canopies," *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, October 2012.

Kawano, Y., D. Shepard, Y. Shobugawa, J. Goto, T. Suzuki, Y. Amaya, M. Oie, T. Izumikawa, H. Yoshida, Y. Katsuragi, T. Takahashi, S. Hirayama, R. Saito, and M. Naito, "A Map for the Future: Measuring Radiation Levels in Fukushima, Japan," Global Humanitarian Technology Conference, Seattle, Wash., 2012, pp. 53–58.

Kawatsuma, S., M. Fukushima, and T. Okada, "Emergency Response by Robots to Fukushima-Daiichi Accident: Summary and Lessons Learned," *Industrial Robot*, Vol. 39, No. 5, 2012, pp. 428–435.

Kitagaki, T., T. Hoshino, Y. Sambommatsu, K. Yano, M. Takeuchi, T. Igarashi, and T. Suzuki, "Fission Product Separation from Seawater by Electrocoagulation Method," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2012, pp. 1–5.

Kobayashi, Daisuke, Masao Miyake, Takeyasu Kakamu, Masayoshi Tsuji, Yayoi Mori, Tetsuhito Fukushima, and Akihiro Hazama, "Reducing Radiation Exposure Using Commonly Available Objects," *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2012.

Koike, H., T. Hata, and R. Kubota, "Analysis on Human and Organizational Factors Regarding Initial Responses of Shift Teams and Field Workers to the Fukushima Daiichi NPP Accident," presentation at *ANS Winter Meeting & Nuclear Technology Expo 2012*, San Diego, Calif., 2012.

Koren, Marina, "3 Robots That Braved Fukushima," *Popular Mechanics*, undated. As of August 2, 2013:

<http://www.popularmechanics.com/technology/engineering/robots/3-robots-that-braved-fukushima-7223185>

Korsakissok, I., A. Mathieu, and D. Didier, "Atmospheric Dispersion and Ground Deposition Induced by the Fukushima Nuclear Power Plant Accident: A Local-Scale Simulation and Sensitivity Study," *Atmospheric Environment*, Vol. 70, 2013, pp. 267–279.

Kotoku, J., K. Ishioka, H. Kanemitsu, D. Kato, N. Sasano, H. Oba, T. Kaminaga, K. Takeshita, H. Koutake, K. Toyoda, K. Kutomi, T. Haruyama, A. Watanabe, N. Sekiya, M. Sakuramachi, A. Yamamoto, Y. Ishikawa, T. Okamoto, and S. Furui, "Basic Concepts of Radiation Protection for Nuclear Disaster Relief," *Teikyo Medical Journal*, Vol. 34, No. 3, 2011, pp. 227–234.

Krisanangkura, P., T. Itthipoonthanakorn, and S. Udomsomporn, "Environmental Dose Assessment Using Ecolego: Case Study of Soil from Japan," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, pp. 1–8.

Kryshev, I. I., A. I. Kryshev, and T. G. Sazykina, "Dynamics of Radiation Exposure to Marine Biota in the Area of the Fukushima NPP in March-May 2011," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 114, 2012, pp. 157–161.

Kurihara, O., K. Kanai, T. Nakagawa, C. Takada, N. Tsujimura, T. Momose, and S. Furuta, "Measurements of <sup>131</sup>I in the Thyroids of Employees Involved in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 50, No. 2, 2013, pp. 122–129.

Kurion, "Kurion's Ion Specific Media Is Available to Assist Fukushima Nuclear Plant Cleanup," press release, March 29, 2011. As of August 2, 2013:

<http://www.kurion.com/newsroom/press-releases/kurions-ion-specific-media-is-available-to-assist-fukushima-nuclear-plant-c>

Kuwahara, T., Y. Tomioka, K. Fukuda, N. Sugimura, and Y. Sakamoto, "Radiation Effect Mitigation Methods for Electronic Systems," 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Fukuoka, Japan, 2012, pp. 307–312.

Langlois, L., "IAEA Action Plan on Nuclear Safety," *Energy Strategy Reviews*, Vol. 1, No. 4, 2013, pp. 302–306.

- Lavigne, O., T. Shoji, and K. Sakaguchi, "On the Corrosion BEhavior of Zircaloy-4 in Spent Fuel Pools Under Accidental Conditions," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 426, No. 1-3, 2012, pp. 120–125.
- Leng, Yuxiao, Gang Ye, Jian Xu, Jichao Wei, Jianchen Wang, and Jing Chen, "Synthesis of New Silica Gel Adsorbent Anchored with Macrocyclic Receptors for Specific Recognition of Cesium Cation," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 66, No. 3, 2013, pp. 413–421.
- Levy, S., "How Would US Units Fare?" *Nuclear Engineering International*, Vol. 56, No. 688, 2011, pp. 14–17.
- Lovering, Daniel, "Radioactive Robot: The Machines That Cleaned Up Three Mile Island," *Scientific American*, March 27, 2009. As of August 2, 2013: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=three-mile-island-robots>
- Lyons, C., and D. Colton, "Aerial Measuring System in Japan," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 509–515.
- Mabuchi, K., M. Hatch, M. P. Little, M. S. Linet, and S. L. Simon, "Risk of Thyroid Cancer After Adult Radiation Exposure: Time to Re-Assess?" *Radiation Research*, Vol. 179, No. 2, 2013, pp. 254–256.
- Maguire, David, Bingrong Zhang, Amy Zhang, Lurong Zhang, and Paul Okunieff, "The Role of Mitochondrial Proteomic Analysis in Radiological Accidents and Terrorism," in William J. Welch, Fredrik Palm, Duane F. Bruley, and David K. Harrison, eds., *Oxygen Transport to Tissue XXXIV*, New York: Springer, 2013, pp. 139–145.
- Maki, Norio, "Disaster Response to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake: National Coordination, a Common Operational Picture, and Command and Control in Local Governments," *Earthquake Spectra*, Vol. 29, No. s1, 2013, pp. S369–S385.
- Mallampati, S. R., Y. Mitoma, T. Okuda, S. Sakita, and M. Kakeda, "High Immobilization of Soil Cesium Using Ball Milling with Nano-Metallic Ca/CaO/NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: Implications for the Remediation of Radioactive Soils," *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 10, No. 2, 2012, pp. 201–207.
- Manolopoulou, M., S. Stoulos, A. Ioannidou, E. Vagena, and C. Papastefanou, "Radiation Measurements and Radioecological Aspects of Fallout from the Fukushima Nuclear Accident," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 292, No. 1, 2012, pp. 155–159.
- Maruyama, S., "Heat and Fluid Flow in Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Unit 2 (Accident Scenario Based on Thermodynamic Model)," *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B*, Vol. 78, No. 796, 2012, pp. 2127–2141.
- Masaki, T., E. Hiroko, and S. Toshikazu, "Rapid Measurement of <sup>89,90</sup>Sr Radioactivity in Rinse Water," *Health Physics*, Vol. 104, No. 3, 2013, pp. 302–312.

Matsuda, N., K. Yoshida, K. Nakashima, S. Iwatake, N. Morita, T. Ohba, T. Yusa, A. Kumagai, and A. Ohtsuru, "Initial Activities of a Radiation Emergency Medical Assistance Team to Fukushima from Nagasaki," *Radiation Measurements*, 2013.

Matsumoto, T., T. Maruoka, G. Shimoda, H. Obata, H. Kagi, K. Suzuki, K. Yamamoto, T. Mitsuguchi, K. Hagino, N. Tomioka, C. Sambandam, D. Brummer, P. M. Klaus, and P. Aggarwal, "Tritium in Japanese Precipitation Following the March 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Plant Accident," *Science of the Total Environment*, Vol. 445-446, 2013, pp. 365–370.

Matsumura, H., K. Saito, J. Ishioka, and Y. Uwamino, "Diffusion of Radioactive Materials from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Obtained by Gamma-Ray Measurements on Expressways," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 10, No. 3, 2011, pp. 152–162.

Matsunaga, T., J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, S. Nagao, T. Sato, and H. Nagai, "Comparison of the Vertical Distributions of Fukushima Nuclear Accident Radiocesium in Soil Before and After the First Rainy Season, with Physicochemical and Mineralogical Interpretations," *Science of the Total Environment*, Vol. 447, Mar, 2013, pp. 301–314.

Maxwell, Sherrod L., Brian K. Culligan, and Jay B. Hutchison, "Rapid Fusion Method for Determination of Plutonium Isotopes in Large Rice Samples," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013/04/30, 2013, pp. 1–8.

Maxwell, Sherrod L., Brian K. Culligan, and Robin C. Utsey, "Rapid Determination of Radiostrontium in Seawater Samples," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, pp. 1–9.

McCann, D. G. C., A. Moore, and M. E. A. Walker, "The Public Health Implications of Water in Disasters," *World Medical and Health Policy*, Vol. 3, No. 2, 2011.

Michal, Rick, "Red Whittaker and the Robots That Helped Clean Up TMI-2," *Nuclear News*, December 2009.

Miller, C. W., "The Fukushima Radiological Emergency and Challenges Identified for Future Public Health Responses," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 584–588.

Min, B. I., R. Periañez, I. G. Kim, and K. S. Suh, "Marine Dispersion Assessment of <sup>137</sup>Cs Released from the Fukushima Nuclear Accident," *Marine Pollution Bulletin*, 2013.

Miyake, Y., H. Matsuzaki, T. Fujiwara, T. Saito, T. Yamagata, M. Honda, and Y. Muramatsu, "Isotopic Ratio of Radioactive Iodine (I-129/I-131) Released from Fukushima Daiichi NPP Accident," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 327–333.

Morimura, N., Y. Asari, Y. Yamaguchi, K. Asanuma, C. Tase, T. Sakamoto, and T. Aruga, "Emergency/Disaster Medical Support in the Restoration Project for the Fukushima Nuclear Power Plant Accident," *Emergency Medicine Journal*, 2012.

Morino, Y., T. Ohara, and M. Nishizawa, "Atmospheric Behavior, Deposition, and Budget of Radioactive Materials from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in March 2011," *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 17, 2011.

Motooka, T., T. Sato, and M. Yamamoto, "Effect of Gamma Ray Irradiation on Deoxygenation by Hydrazine in Artificial Seawater," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 11, No. 4, 2012, pp. 249–254.

Motooka, T., T. Sato, and M. Yamamoto, "Effect of Gamma-Ray Irradiation on the Deoxygenation of Salt-Containing Water Using Hydrazine," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 50, No. 4, 2013, pp. 363–368.

Mrowca, B., "Removing Heat from a Reactor in Shutdown," *Mechanical Engineering*, Vol. 133, No. 5, 2011.

Murphy, Robin R., "A Decade of Rescue Robots," paper presented at 2012 IEEE/RSJ International Conference, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012.

Naganawa, H., N. Kumazawa, H. Saitoh, N. Yanase, H. Mitamura, T. Nagano, K. Kashima, T. Fukuda, Z. Yoshida, and S. I. Tanaka, "Removal of Radioactive Cesium from Surface Soils Solidified Using Polyion Complex: Rapid Communication for Decontamination Test at Iitate-mura in Fukushima Prefecture," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 10, No. 4, 2011, pp. 227–234.

Nagata, T., Y. Kimura, and M. Ishii, "Use of a Geographic Information System (GIS) in the Medical Response to the Fukushima Nuclear Disaster in Japan," *Prehospital and Disaster Medicine*, Vol. 27, No. 2, 2012, pp. 213–215.

Nagatani, K., S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima, and S. Kawatsuma, "Gamma-Ray Irradiation Test of Electric Components of Rescue Mobile Robot Quince - Toward Emergency Response to Nuclear Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011," Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Kyoto, Japan, 2011, pp. 56–60.

Nagatani, K., S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, K. Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima, and S. Kawatsuma, "Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants Using Mobile Rescue Robots," *Journal of Field Robotics*, Vol. 30, No. 1, 2013, pp. 44–63.

Nagatani, K., S. Kiribayashi, Y. Okada, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, and Y. Hada, "Redesign of Rescue Mobile Robot Quince - Toward Emergency Response to the Nuclear Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011," *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics*, Kyoto, Japan, 2011, pp. 13–18.

Nair, R. N., Faby Sunny, Manish Chopra, L. K. Sharma, V. D. Puranik, and A. K. Ghosh, "Estimation of Radioactive Leakages into the Pacific Ocean due to Fukushima Nuclear Accident," *Environmental Earth Sciences*, 2013, pp. 1–13.

Nakanishi, Tomoko M., and Keitaro Tanoi, eds., *Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident*, Tokyo: Springer, 2013, pp. 1–10.

Nakano, M., "Long-Term Impact on the Marine Environment-Simulation of the Marine Dispersion of Released Radionuclides from Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant and Estimation of Internal Dose from Marine Products," *Atomos*, Vol. 53, No. 8, 2011, pp. 29–33.

Nakano, Masanao, and Pavel P. Povinec, "Long Term Simulations of the Cesium Dispersion from the Fukushima Accident in the World Ocean," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 111, 2012, pp. 109–115.

Nishino, Tomoaki, Shin-ichi Tsuburaya, Takeyoshi Tanaka, Akihiko Hokugo, "Fundamental Considerations of Evacuation Behavior of Fukushima Residents in Nuclear Emergency Event Based on Questionnaire Surveys," *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, Japan, 2012, pp. 3120–3129.

Nöggerath, J., R. J. Geller, and V. K. Gusiakov, "Fukushima: The Myth of Safety, the Reality of Geoscience," *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 67, No. 5, 2011, pp. 37–46.

Norio, Okada, Tao Ye, Yoshio Kajitani, Peijun Shi, and Hirokazu Tatano, "The 2011 Eastern Japan Great Earthquake Disaster: Overview and Comments," *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 2, No. 1, 2011, pp. 34–42.

Ohnishi, T., "The Disaster at Japan's Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant After the March 11, 2011 Earthquake and Tsunami, and the Resulting Spread of Radioisotope Contamination," *Radiation Research*, Vol. 177, No. 1, 2012, pp. 1–14.

Ohno, K., S. Kawatsuma, T. Okada, E. Takeuchi, K. Higashi, and S. Tadokoro, "Robotic Control Vehicle for Measuring Radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics*, Kyoto, Japan, 2011, pp. 38–43.



- Ohno, T., Y. Muramatsu, Y. Miura, K. Oda, N. Inagawa, H. Ogawa, A. Yamazaki, C. Toyama, and M. Sato, "Depth Profiles of Radioactive Cesium and Iodine Released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in Different Agricultural Fields and Forests," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 287–295.
- Ohnuki, T., and N. Kozai, "Adsorption Behavior of Radioactive Cesium by Non-Mica Minerals," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 50, No. 4, April 2013, pp. 369–375.
- Omoto, A., "The Accident at TEPCO's Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station: What Went Wrong and What Lessons Are Universal?" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 731, 2013, pp. 3–7.
- Oura, Y., and M. Ebihara, "Radioactivity Concentrations of I-131, Cesium-134 and Cesium-137 in River Water in the Greater Tokyo Metropolitan Area After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 303–309.
- Parajuli, D., H. Tanaka, Y. Hakuta, K. Minami, S. Fukuda, K. Umeoka, R. Kamimura, Y. Hayashi, M. Ouchi, and T. Kawamoto, "Dealing with the Aftermath of Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Decontamination of Radioactive Cesium Enriched Ash," *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, No. 8, Apr, 2013, pp. 3800–3806.
- Pemberton, W., R. Mena, and W. Beal, "The Role of the Consequence Management Home Team in the Fukushima Daiichi Response," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 549–556.
- Perrow, C., "Fukushima and the Inevitability of Accidents," *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 67, No. 6, 2011, pp. 44–52.
- Po, L. C. C., "Events at Unit 1," *Nuclear Engineering International*, Vol. 56, No. 684, 2011, pp. 12–15.
- Pritchard, S. B., "An Envirotechnical Disaster: Nature, Technology, and Politics at Fukushima," *Environmental History*, Vol. 17, No. 2, 2012, pp. 219–243.
- Qu, J. H., J. F. He, X. J. Zhang, and R. B. Wang, "Water and Food Radiation Monitor," *Hedianzixue Yu Tance Jishu/Nuclear Electronics and Detection Technology*, Vol. 32, No. 12, 2012, pp. 1467–1472.
- Rana, D., T. Matsuura, M. A. Kassim, and A. F. Ismail, "Radioactive Decontamination of Water by Membrane Processes - A Review," *Desalination*, 2012.
- Reed, A. L., "U.S. DoE's Response to the Fukushima Daiichi Reactor Accident: Answers and Data Products for Decision Makers," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 557–562.

Romanyukha, A., D. L. King, and L. K. Kennemur, "Impact of the Fukushima Nuclear Accident on Background Radiation Doses Measured by Control Dosimeters in Japan," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 535–541.

Saegusa, H., H. Funaki, H. Kurikami, Y. Sakamoto, and T. Tokizawa, "Design, Construction and Monitoring of Temporary Storage Facilities for Removed Contaminants," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 12, No. 1, 2013, pp. 1–12.

Saegusa, J., H. Kurikami, R. Yasuda, K. Kurihara, S. Arai, R. Kuroki, S. Matsushashi, T. Ozawa, H. Goto, T. Takano, H. Mitamura, T. Nagano, H. Naganawa, Z. Yoshida, H. Funaki, T. Tokizawa, and S. Nakayama, "Decontamination of Outdoor School Swimming Pools in Fukushima After the Nuclear Accident in March 2011," *Health Physics*, Vol. 104, No. 3, March 2013, pp. 243–250.

Sage, Cindy, "The Similar Effects of Low-Dose Ionizing Radiation and Non-Ionizing Radiation from Background Environmental Levels of Exposure," *The Environmentalist*, Vol. 32, No. 2, 2012, pp. 144–156.

Sakaguchi, A., A. Kadokura, P. Steier, K. Tanaka, Y. Takahashi, H. Chiga, A. Matsushima, S. Nakashima, and Y. Onda, "Isotopic Determination of U, Pu and Cesium in Environmental Waters Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 355–360.

Sakama, M., Y. Nagano, T. Saze, S. Higaki, T. Kitade, N. Izawa, O. Shikino, and S. Nakayama, "Application of ICP-DRC-MS to Screening Test of Strontium and Plutonium in Environmental Samples at Fukushima," *Applied Radiation and Isotopes*, 2013.

Sakamoto, F., T. Ohnuki, N. Kozai, S. Igarashi, S. Yamasaki, Z. Yoshida, and S. Tanaka, "Local Area Distribution of Fallout Radionuclides from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Determined by Autoradiography Analysis," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 11, No. 1, 2012, pp. 1–7.

Sanami, T., S. Sasaki, K. Iijima, Y. Kishimoto, and K. Saito, "Time Variations in Dose Rate and Spectrum Measured at Tsukuba City, Ibaraki, due to the Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, Vol. 10, No. 3, 2011, pp. 163–169.

Sarkisov, A. A., "The Phenomenon of Perception of the Nuclear Energy Hazard in Social Consciousness," *Herald of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 82, No. 1, 2012, pp. 8–16.

Sato, I., H. Kudo, and S. Tsuda, "Removal Efficiency of Water Purifier and Adsorbent for Iodine, Cesium, Strontium, Barium and Zirconium in Drinking Water," *Journal of Toxicological Sciences*, Vol. 36, No. 6, 2011, pp. 829–834.

Schwantes, J. M., C. R. Orton, and R. A. Clark, "Analysis of a Nuclear Accident: Fission and Activation Product Releases from the Fukushima Daiichi Nuclear Facility as Remote Indicators of Source Identification, Extent of Release, and State of Damaged Spent Nuclear Fuel," *Environmental Science and Technology*, Vol. 46, No. 16, 2012, pp. 8621–8627.

Scott, B. R., "Assessing Potential Radiological Harm to Fukushima Recovery Workers," *Dose-Response*, Vol. 9, No. 3, 2011, pp. 301–312.

Shanks, A., S. Fournier, and S. Shanks, "Challenges in Determining the Isotopic Mixture for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 527–534.

Shibata, Tomoyuki, Helena Solo-Gabriele, and Toshimitsu Hata, "Disaster Waste Characteristics and Radiation Distribution as a Result of the Great East Japan Earthquake," *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, No. 7, 2012, pp. 3618–3624.

Shimura, H., K. Itoh, A. Sugiyama, S. Ichijo, M. Ichijo, F. Furuya, Y. Nakamura, K. Kitahara, K. Kobayashi, Y. Yukawa, and T. Kobayashi, "Absorption of Radionuclides from the Fukushima Nuclear Accident by a Novel Algal Strain," *PLoS ONE*, Vol. 7, No. 9, 2012.

Smolders, E., and H. Tsukada, "The Transfer of Radiocesium from Soil to Plants: Mechanisms, Data, and Perspectives for Potential Countermeasures in Japan," *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 7, No. 3, 2011, pp. 379–381.

Srinivas, C. V., R. Venkatesan, R. Baskaran, V. Rajagopal, and B. Venkatraman, "Regional Scale Atmospheric Dispersion Simulation of Accidental Releases of Radionuclides from Fukushima Dai-ichi Reactor," *Atmospheric Environment*, Vol. 61, 2012, pp. 66–84.

Sugimoto, Jun, "Current Status of Fukushima Dai'ichi Nuclear Power Plant Accident," in Takeshi Yao, ed., *Zero-Carbon Energy Kyoto 2011*, Tokyo: Springer, 2012, pp. 203–209.

Sugiyama, G., J. Nasstrom, B. Pobanz, K. Foster, M. Simpson, P. Vogt, F. Aluzzi, and S. Homann, "Atmospheric Dispersion Modeling: Challenges of the Fukushima Daiichi Response," *Health Physics*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 493–508.

Sutou, S., "Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster: Generally Applicable Implications from Measurements of Radioactive Contaminations in Some Areas of Ibaraki and Fukushima," *Genes and Environment*, Vol. 35, No. 1, 2013, pp. 1–4.

Swartz, H. M., A. B. Flood, B. B. Williams, R. H. Dong, S. G. Swarts, X. M. He, O. Grinberg, J. Sidabras, E. Demidenko, J. Gui, D. J. Gladstone, L. A. Jarvis, M. M. Kmiec, K. Kobayashi, P. N. Lesniewski, S. D. P. Marsh, T. P. Matthews, R. J. Nicolalde, P. M. Pennington, T. Reynolds, I. Salikhov, D. E. Wilcox, and B. I. Zaki, "Electron Paramagnetic Resonance Dosimetry for a Large-Scale Radiation Incident," *Health Physics*, Vol. 103, No. 3, September 2012, pp. 255–267.

Tagami, K., and S. Uchida, "Can We Remove Iodine-131 from Tap Water in Japan by Boiling? - Experimental Testing in Response to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Chemosphere*, Vol. 84, No. 9, 2011, pp. 1282–1284.

Tagami, Keiko, and Shigeo Uchida, "Comparison of Food Processing Retention Factors of <sup>137</sup>Cs and <sup>40</sup>K in Vegetables," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 295, No. 3, 2013, pp. 1627–1634.

Tagami, K., S. Uchida, and N. Ishii, "Extractability of Radiocesium from Processed Green Tea Leaves with Hot Water: The First Emergent Tea Leaves Harvested After the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 292, No. 1, 2012, pp. 243–247.

Tagami, K., S. Uchida, N. Ishii, and J. Zheng, "Estimation of Te-132 Distribution in Fukushima Prefecture at the Early Stage of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Reactor Failures," *Environmental Science and Technology*, Vol. 47, No. 10, 2013, pp. 5007–5012.

Tagami, K., S. Uchida, Y. Uchihori, N. Ishii, H. Kitamura, and Y. Shirakawa, "Specific Activity and Activity Ratios of Radionuclides in Soil Collected About 20km from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Radionuclide Release to the South and Southwest," *Science of the Total Environment*, Vol. 409, No. 22, 2011, pp. 4885–4888.

Takada, M., and T. Suzuki, "Early in situ Measurement of Radioactive Fallout in Fukushima City due to Fukushima Daiichi Nuclear Accident," *Radiat Prot Dosimetry*, Vol. 155, No. 2, 2013, pp. 181–196.

Takamura, N., and S. Yamashita, "Lessons from Chernobyl," *Fukushima Journal of Medical Science*, Vol. 57, No. 2, 2011, pp. 81–85.

Takemura, T., H. Nakamura, and T. Nakajima, "Tracing Airborne Particles After Japan's Nuclear Plant Explosion," *Eos*, Vol. 92, No. 45, 2011, pp. 397–398.

Tanabe, F., "Analysis of Core Melt Accident in Fukushima Daiichi-Unit 1 Nuclear Reactor," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 48, No. 8, 2011, pp. 1135–1139.

Tanabe, F., "Analyses of Core Melt and Re-Melt in the Fukushima Daiichi Nuclear Reactors," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 49, No. 1, 2012, pp. 18–36.

Tanabe, F., "A Scenario of Large Amount of Radioactive Materials Discharge to the Air from the Unit 2 Reactor in the Fukushima Daiichi NPP Accident," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 49, No. 4, 2012, pp. 360–365.

Tanaka, Kazuya, Hokuto Iwatani, Aya Sakaguchi, Yoshio Takahashi, and Yuichi Onda, "Local Distribution of Radioactivity in Tree Leaves Contaminated by Fallout of the Radionuclides Emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 295, No. 3, 2013, pp. 2007–2014.

Tanaka, Kazuya, Aya Sakaguchi, Yutaka Kanai, Haruo Tsuruta, Atsushi Shinohara, and Yoshio Takahashi, "Heterogeneous Distribution of Radiocesium in Aerosols, Soil and Particulate Matters Emitted by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: Retention of Micro-Scale Heterogeneity During the Migration of Radiocesium from the Air into Ground and River Systems," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 295, No. 3, 2013, pp. 1927–1937.

Tanaka, K., Y. Takahashi, A. Sakaguchi, M. Umeo, S. Hayakawa, H. Tanida, T. Saito, and Y. Kanai, "Vertical Profiles of Iodine-131 and Cesium-137 in Soils in Fukushima Prefecture Related to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident," *Geochemical Journal*, Vol. 46, No. 1, 2012, pp. 73–76.

Tanimoto, T., N. Uchida, Y. Kodama, T. Teshima, and S. Taniguchi, "Safety of Workers at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *The Lancet*, Vol. 377, No. 9776, 2011, pp. 1489–1490.

Ten Hoeve, J. E., and M. Z. Jacobson, "Worldwide Health Effects of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident," *Energy and Environmental Science*, Vol. 5, No. 9, 2012, pp. 8743–8757.

Thielen, H., "The Fukushima Daiichi Nuclear Accident-An Overview," *Health Physics*, Vol. 103, No. 2, 2012, pp. 169–174.

Thorp, J., "Fukushima Sequence of Events & Seismic Attributes," *Nuclear Plant Journal*, Vol. 29, No. 3, 2011, pp. 36–37.

"Toshiba Shows New Robot for Nuclear Cleanup," *CBC News*, November 21, 2012. As of August 2, 2013:

<http://www.cbc.ca/news/technology/>

toshiba-shows-new-robot-for-nuclear-cleanup-1.1131222

"Transactions of the American Nuclear Society and Embedded Topical Meetings 1st ANS SMR 2011 Conference and Young Professionals Congress 2011," Washington, D.C., 2011.

Tsuiki, M., and T. Maeda, "Spatial Distribution of Radioactive Cesium Fallout on Grasslands from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011," *Grassland Science*, Vol. 58, No. 3, September 2012, pp. 153–160.

Tsuiki, M., and T. Maeda, "Spatial Variability of Radioactive Cesium Fallout on Grasslands Estimated in Various Scales," *Grassland Science*, Vol. 58, No. 4, 2012, pp. 227–237.

Uchida, S., and Y. Katsumura, "Water Chemistry Technology - One of the Key Technologies for Safe and Reliable Nuclear Power Plant Operation," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 50, No. 4, 2013, pp. 346–362.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, *Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surfaces*, Washington, D.C., EPA-402-R-06-003, April 2006.

Van Deventer, E., M. Del Rosario Perez, A. Tritscher, K. Fukushima, and Z. Carr, "WHO's Public Health Agenda in Response to the Fukushima Daiichi Nuclear Accident," *Journal of Radiological Protection*, Vol. 32, No. 1, 2012, pp. N119–N122.

Von Hippel, F. N., "The Radiological and Psychological Consequences of the Fukushima Daiichi Accident," *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 67, No. 5, 2011, pp. 27–36.

Vuddhakul, V., T. Nakai, C. Matsumoto, T. Oh, T. Nishino, C. H. Chen, M. Nishibuchi, and J. Okuda, "Analysis of *gyrB* and *toxR* Gene Sequences of *Vibrio Hollisae* and Development of *gyrB*- and *toxR*-Targeted PCR Methods for Isolation of *V. Hollisae* from the Environment and Its Identification," *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, No. 8, 2000, pp. 3506–3514.

Wang, Hui, ZhaoYi Wang, XueMing Zhu, DaKui Wang, and GuiMei Liu, "Numerical Study and Prediction of Nuclear Contaminant Transport from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in the North Pacific Ocean," *Chinese Science Bulletin*, Vol. 57, No. 26, 2012, pp. 3518–3524.

Westlake, Adam, "Robot Suit to Be Used in Fukushima Cleanup, Controlled by Brain Waves," *Japan Daily Press*, October 18, 2012. As of August 2, 2013: <http://japandailypress.com/robot-suit-to-be-used-in-fukushima-cleanup-controlled-by-brain-waves-1816592/>

Woo, T. H., "Atmospheric Modeling of Radioactive Material Dispersion and Health Risk in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants Accident," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 53, 2012, pp. 197–201.

Woods, V. T., T. W. Bowyer, S. Biegalski, L. R. Greenwood, D. A. Haas, J. C. Hayes, E. A. Lepel, H. S. Miley, and S. J. Morris, "Parallel Radioisotope Collection and Analysis in Response to the Fukushima Release," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 296, No. 2, 2013, pp. 883–888.

Yamaguchi, K., and University Radiation Survey Team of Fukushima, "Investigations on Radioactive Substances Released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *Fukushima Journal of Medical Science*, Vol. 57, No. 2, 2011, pp. 75–80.

Yamaguchi, N., S. Eguchi, H. Fujiwara, K. Hayashi, and H. Tsukada, "Radiocesium and Radioiodine in Soil Particles Agitated by Agricultural Practices: Field Observation After the Fukushima Nuclear Accident," *Science of the Total Environment*, Vol. 425, 2012, pp. 128–134.

Yamaguchi, T., K. Sawano, M. Kishimoto, K. Furuhashi, and K. Yamada, "Early-Stage Bioassay for Monitoring Radioactive Contamination in Living Livestock," *Journal of Veterinary Medical Science*, Vol. 74, No. 12, 2012, pp. 1675–1676.

Yamamoto, S., and J. Hatazawa, "Development of an Alpha/Beta/Gamma Detector for Radiation Monitoring," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 82, No. 11, 2011.

Yasunari, T. J., A. Stohl, R. S. Hayano, J. F. Burkhart, S. Eckhardt, and T. Yasunari, "Cesium-137 Deposition and Contamination of Japanese Soils due to the Fukushima Nuclear Accident," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 108, No. 49, December 2011, pp. 19530–19534.

Yemelyanau, Maksim, Aliaksandr Amialchuk, and MirM Ali, "Evidence from the Chernobyl Nuclear Accident: The Effect on Health, Education, and Labor Market Outcomes in Belarus," *Journal of Labor Research*, Vol. 33, No. 1, 2012, pp. 1–20.

Yoshida, K., K. Hashiguchi, Y. Taira, N. Matsuda, S. Yamashita, and N. Takamura, "Importance of Personal Dose Equivalent Evaluation in Fukushima in Overcoming Social Panic," *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 151, No. 1, 2012, pp. 144–146.

Yoshida, N., and J. Kanda, "Tracking the Fukushima Radionuclides," *Science*, Vol. 336, No. 6085, 2012, pp. 1115–1116.

Yoshihara, Toshihiro, Hideyuki Matsumura, Shin-nosuke Hashida, and Toru Nagaoka, "Radiocesium Contaminations of 20 Wood Species and the Corresponding Gamma-Ray Dose Rates Around the Canopies at 5 Months After the Fukushima Nuclear Power Plant Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 115, 2013, pp. 60–68.

Zheng, J., K. Tagami, Y. Watanabe, S. Uchida, T. Aono, N. Ishii, S. Yoshida, Y. Kubota, S. Fuma, and S. Ihara, "Isotopic Evidence of Plutonium Release into the Environment from the Fukushima DNPP Accident," *Scientific Reports*, Vol. 2, March 2012.

في أعقاب الزلزال المدمر لتوهوكو وتسونامي الذي ضرب اليابان في آذار (مارس) 2011، بدأت بعض المفاعلات في محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية بإطلاق المواد المشعة في البيئة. تستمد هذه الدراسة دروسًا من هذه التجربة المتعلقة بالتدابير التقنية المضادة للتلوث الإشعاعي من أجل تحسين الاستجابات في حالة الطوارئ الإشعاعية أو النووية المستقبلية. وتركز بالتحديد على كيفية استخدام التقنيات لقياس التلوث خلال المكان والزمان، والحد من انتشار المواد المشعة في البيئة، وإزالة التلوث من المناطق أو العناصر، وتخزين المواد المشعة لفترات طويلة. جمع المؤلفون البيانات عن طريق إجراء مراجعات شاملة للدراسات السابقة وعشرات المقابلات مع خبراء في كل من اليابان والولايات المتحدة. وتحلل الدراسة كيفية استخدام التقنيات بنجاح وتحدد أوجه القصور في القدرات التي كان من الممكن معالجتها من خلال تقنيات جديدة أو تحسين استخدام التقنيات القائمة. وشملت أيضًا مرجعًا موجزًا لمزيد من القراءة.



NATIONAL DEFENSE RESEARCH INSTITUTE

[www.rand.org](http://www.rand.org)