الطاقة النووية

Nuclear Energy

By
Dr.Muayad Albehadili
Professor of Marine Chemistry
College of Marine Sciences
Basrah University
IRAQ

البلوتونيوم وإعادة معالجة قضبان الوقود النووي

إن نظير البلوتونيوم 239 الذي يتم إنتاجه خلال عملية إنشطار اليورانيوم هو عبارة عن باعث جسيم الفا له عمر نصف طويل يبلغ 24000 عام. بعد 1000 عام ، ستكون المصادر الرئيسية للنشاط الإشعاعي من قضبان الوقود المستنفد هي البلوتونيوم وعناصر أخرى ثقيلة للغاية ، لأن النوى المتوسطة الحجم المنتجة في الانشطار ، التي لها عمر نصف أقصر بكثير من 1000 سنة ، ستتحلل إلى حد كبير في ذلك الوقت. وبالتالي يمكن تقليل النشاط الإشعاعي طويل الأجل لقضبان الوقود المستهلك بشكل كبير عن طريق إزالة العناصر الثقيلة جدًا منه كيميائيًا.

مسألة: بالنظر إلى أن عمر النصف ^{239}Pu هو 24000 سنة ، فكم من السنوات سيستغرق مستوى النشاط الإشعاعي من البلوتونيوم في عينة لتتراجع إلى 1/128 (أي حوالي 1٪) من قيمته الأصلية؟

ان الـ ^{239}Pu التي تتكون في قضبان الوقود هي نفسها قابلة للانشطار. وبمجرد أن يصبح تركيزها في قضبان التشغيل عالياً بما يكفي ، يخضع بعضها أيضاً للانشطار ويساهم في خروج الطاقة من المفاعل. ومع ذلك ، فإن العديد من الانشطارات الأخرى من المنتجات هي عبارة عن ماصات نيترونية فعالة ، يصل تركيزها في نهاية المطاف إلى النقطة التي لا يمكن أن يحدث فيها تفاعل السلسلة النووية بكفاءة ، ويتم إزالة قضيب الوقود. في نظام الدورة المفتوحة ، يتم بعد ذلك تخزين قضبان الوقود "المستهلك" كفضلات نووية.

ومع ذلك ، في أنظمة الدورة المغلقة ، يخضع محتوى قضبان الوقود لإعادة المعالجة لفصل بعض عناصر الأكتينيد واستخدام بعض منها للوقود النووي أو لأغراض أخرى. مشكلة الفصل ليست بسيطة ، حيث أن الخصائص الكيميائية لجميع الأكتينيدات متشابهة تمامًا ، لذا يجب استغلال الفروق الدقيقة بين خصائصها.

للبدء في إعادة المعالجة ، يتم تبريد قضبان الوقود لمدة 5 إلى 25 عامًا في أحواض التخزين إلى قطع ثم تتفاعل محتوياتها مع حمض النيتريك المركز HNO_3، لاذابتها. وينتج عن هذا محلول مائي يحتوي على كاتيونات مؤكسدة من العديد من المعادن ، على حد سواء من الأكتينيدات - مع اليورانيوم بصيغة UO_2^{+2} والبلوتونيوم بصيغة Pu^{+4} ومنتجات انشطارية متوسطة النواة.

يمكن فصل اليورانيوم والبلوتونيوم عن هذا المحلول المائي عن طريق استغلال حقيقة أن الكاتيونات المؤكسدة ـ وليس تلك الموجودة في بعض الأكتينيدات الأخرى وأخرى من المعادن الأخف ـ سوف تشكل معقدات مع فوسفات عضوي ، أي ثلاثي فوسفات بيوتيل $O=P(-O-CH_2CH_2CH_2CH_3)_3$، وهي أكثر قابلية للذوبان في المذيبات الهيدروكربونية مثل الكيروسين منها في المحلول المائي. وهكذا ، فإن خلط محلول مائي معيد مع الفوسفات والكيروسين ينتج نظام مرحلتين يكون فيه اليورانيوم والبلوتونيوم يتم انتقاؤها انتقائيًا في الطبقة العضوية:

$$Pu^{4+}(aq) + UO_2^{2+}(aq) + \text{others} \longrightarrow Pu^{4+}(org) + UO_2^{2+}(org)$$

يجب تخزين الطبقة المائية ، المحتوية على معادن أخف ، كنفايات نووية عالية المستوى لأنها تحتوي على العديد من النظائر المشعة للغاية.

ثم يتم عزل كمية صغيرة نسبيا من البلوتونيوم من كتلة أكبر من اليورانيوم عن طريق الحد الانتقائي باستخدام عامل اختزال معتدل:

$$Pu^{4+}(org) \xrightarrow{\text{Reducing agent}} Pu^{3+}(org)$$

بما أن الأيونات الثلاثة من البلوتونيوم أكثر قابلية للذوبان في المحلول المائي منها في الطور العضوي ، يمكن استخلاصه بإضافة محلول حامض ، يمكن من خلاله ترسيبه ، مثل ثلاثي فلوريد البلوتونيوم ، PuF_3:

$$Pu^{3+}(org) \longrightarrow Pu^{3+}(aq) \longrightarrow PuF_3(s)$$

يتم استخراج اليورانيوم من المرحلة العضوية بصيغة ثنائي أوكسيد. ويمكن تحويلها إلى UF6 وإعادة التخصيب في ^{235}U ويمكن أيضًا دمجها مع UO_2 مع كمية صغيرة من البلوتونيوم التي تم إعادة تأكسدها إلى PuO_2 لإنتاج وقود الأكسيد المختلط .ويمكن الجمع بين هذا وبين كمية أكبر من وقود UO_2 الخام واستخدامه في مفاعلات الماء الخفيف.

يتم ترطيب النفايات السائلة المشعة للغاية التي تبقى بعد إعادة المعالجة ، والتي تحتوي على كل من منتجات الانصهار وبعض الأكتينيدات ، عن طريق التسخين لإزالة الجفاف وتحلل أملاح النيترات. يتم بعد ذلك دمج المسحوق الناتج ، الذي يتكون أساسا من أكاسيد المعادن ، في زجاج البورسليكات ويتم تخزينه في اسطوانات من الصلب ملحومة غير القابل للصدأ.

في نهاية المطاف سيتم دفن هذه الحاويات في التخزين الجيولوجي على المدى الطويل. وعموما ، فإن إعادة المعالجة مكلفة ، ويرجع ذلك جزئيا إلى الحاجة إلى التخلص من النفايات المشعة التي تحررها ، على الرغم من حقيقة أنها عملية كيميائية ، وكذلك الطاقة أقل بكثير من فصل النظائر لإنتاج اليورانيوم المخصب حديثا.

تتم حاليًا إعادة معالجة قضبان الوقود المستهلكة من مفاعلات الطاقة المدنية في فرنسا والهند وروسيا والصين واليابان ولكن ليس في الولايات المتحدة أو كندا. وقد أدت إعادة المعالجة هذه إلى تراكم مئات الأطنان من البلوتونيوم. كما تتوفر كميات مماثلة من العنصر من خلال تفكيك الأسلحة النووية من قبل الولايات المتحدة وروسيا.

وبغض النظر عن المسائل المتعلقة بالصحة والسلامة ، فإن المشكلة الرئيسية المرتبطة بمعاملة البلوتونيوم من جوانب مدنية وعسكرية على حد سواء ، تنطوي على التدابير الأمنية اللازمة لمنع المواد من الانزلاق إلى أيدي الإرهابيين والحكومات المارقة التي ترغب في تصميم قنابلها الخاصة.

فقط بضعة كيلوجرامات من البلوتونيوم المستخدم في صنع الأسلحة ، والتي تتكون من 93٪ أو أكثر من ^{239}Pu ، مطلوب لصنع قنبلة ذرية. وهناك حاجة إلى كمية أكبر إلى حد ما من البلوتونيوم المفاعل ، الذي يحتوي على المزيد من النظائر الأخرى من البلوتونيوم وعناصر مماثلة لصنع لقنبلة. يتجاوز مخزون العالم الحالي من البلوتونيوم 1000 طن متري ويستمر في النمو.

التلوث الإشعاعي بواسطة إنتاج البلوتونيوم

لقد تم إنتاج البلوتونيوم بشكل متعمد منذ أكثر من 60 عاما لتوفير المواد القابلة للانشطار اللازمة للأسلحة النووية. في الولايات المتحدة ، تم إجراء معظم إنتاج البلوتونيوم وتجهيزه في هانفورد ، واشنطن. لأن كميات هائلة من النفايات المشعة تم إنتاجها وتخزينها والتخلص منها في هذا المرفق ، أصبحت البيئة المحيطة الآن ملوثة بشدة لدرجة أنه أطلق عليها "المكان الأكثر قذارة"

"حوالي 190،000 متر مكعب من النفايات الصلبة المشعة للغاية و 760 مليون لتر من النفايات السائلة المشعة المعتدلة والمواد الكيميائية السامة وأودعت في الأرض في هذا الموقع. بمقدار ما يمكن احتواء طن متري من البلوتونيوم داخل كتل النفايات الصلبة المدفونة هناك. سيكلف تنظيف النفايات ما بين 50 و 200 مليار دولار ولن يكتمل في وقت اقل من عام 2020. تقنية واحدة مقترحة - على الرغم من أنها مكلفة -

شل حركة النفايات المشعة ينطوي على مرور تيار كهربائي قوي خلال التربة الملوثة لمدة أيام ؛ الكهرباء سوف تدمج التربة والرمل في صخرة زجاجية لا تستطيع الملوثات الهروب منها. كان البلوتونيوم يستخدم كمواد متفجرة فعلية في بعض القنابل الذرية و "محفزًا" لقنابل الهيدروجين (الاندماج) ، مما يجبر المتفاعلين معًا على بدء الانفجار النووي الحراري. وبالتالي ، يجب إزالة حوالي 100 طن متري من البلوتونيوم من الأسلحة النووية حيث يتم تفكيك عشرات الآلاف منها من قبل الولايات المتحدة وروسيا خلال العقود القليلة القادمة.

المفاعلات المولدة

المفاعلات المولدة هي مفاعلات الطاقة النووية المصممة خصيصًا لتعظيم إنتاج البلوتونيوم المنتج ؛ هذه المفاعلات تنتج في الواقع مواد قابلة للانشطار أكثر مما تستهلك. على وجه الخصوص ، تنتج المفاعلات السريعة الخاصة ^{239}Pu من ^{238}U بواسطة التفاعل الذي تمت مناقشته سابقًا. يتم تبريد المفاعلات بواسطة الصوديوم السائل ، لأن الماء غير مناسب لهذا الغرض وسيمتص النيوترونات. وهي تستخدم النيوترونات السريعة ، بدلاً من النيوترونات الخاضعة للإدارة ، التي تنتج الانشطار ، حيث أن النيوترونات السريعة أكثر احتمالاً من قبل ^{238}U وتنتج بناتها ، والتي بدورها تتحلل بسرعة إلى البلوتونيوم. يجب فصل البلوتونيوم عن اليورانيوم المتبقي عن طريق إعادة المعالجة قبل استخدامه كوقود. لسوء الحظ ، في حالة وقوع حادث في نظام التبريد ، يمكن أن يذوب قلب المفاعل السريع لأن نقطة انصهار البلوتونيوم هي 640 درجة مئوية فقط.

مشكلة أخرى محتملة هي الانفجار العنيف الذي سيحدث إذا كان الصوديوم السائل يتلامس مع الماء أو الهواء.

بدلا من ذلك ، يحول مفاعل التوليد الحراري ^{232}Th عن طريق امتصاص النيوترون والانحلال بيتا إلى ^{233}U ، والتي يمكن أن تستخدم أيضا كوقود في المفاعلات النووية لأنها ستخضع للانشطار. جربت الهند هذا التصميم حيث أن لديها احتياطيات طبيعية كبيرة من الثوريوم.

بسبب مشاكل التشغيل مع مفاعلات المولدات السريعة المتطورة تقنيا ، تم التخلي عن البرامج في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة وألمانيا وفرنسا. تقوم روسيا والصين بتشغيل مفاعلات مولدة ، وتقوم اليابان ببناء وحدة عرض. عموما ، لا يزال مستقبل المفاعلات المولدة موضع شك.

التخلص من البلوتونيوم

إن الإشعاع الصادر من البلوتونيوم ضعيف ويصبح مصدر قلق فقط إذا تم ابتلاع المادة أو استنشاقها ، لأن إشعاعها (جسيمات الفا) لا يمكن أن تمر عبر طبقات ميتة من الجلد أو الملابس أو حتى من خلال بضعة سنتيمترات من الهواء. لا يمكن للجسم أن يمتص البلوتونيوم المعدني بسهولة. ومع ذلك ، عند تعرضه للهواء ، يشكل البلوتونيوم أكسيد PUO_2، وهو غبار بودري يتشتت بسهولة ويمكن استنشاقه.

فحتى الكميات الميكروسكوبية من أكسيد البلوتونيوم الموجودة في الرئتين يمكن أن تحفز سرطان الرئة.

تم اقتراح طريقتين للتخلص من البلوتونيوم الزائد:

1- مزجها مع النفايات السائلة الأخرى المشعة للغاية ثم مزج الخليط في حاويات زجاجية متينة التي سيتم دفنها تحت الأرض في عبوات معدنية. يعمل التزجيج على ربط النفايات السائلة كيميائيًا في زجاج البورسليكات المستقر والدائم حيث تشكل أكاسيد المنتجات الانشطارية حوالي 20٪ من الكتلة.

2- تحويله إلى أكسيد البلوتونيوم ومزجها مع أكسيد اليورانيوم لإنتاج وقود أكسيد مختلط ، والتي يمكن استخدامها في محطات الطاقة القائمة. في الواقع ، يعمل بعض MOX حاليا في مفاعلات في فرنسا وألمانيا وسويسرا وبلجيكا واليابان. ومع ذلك ، فإن إنتاج وقود الموكس أكثر تكلفة في الوقت الحاضر من توليد يورانيوم منخفض التخصيب ، وبالتالي فإن الحافز لاستخدامه ليس اقتصاديًا.

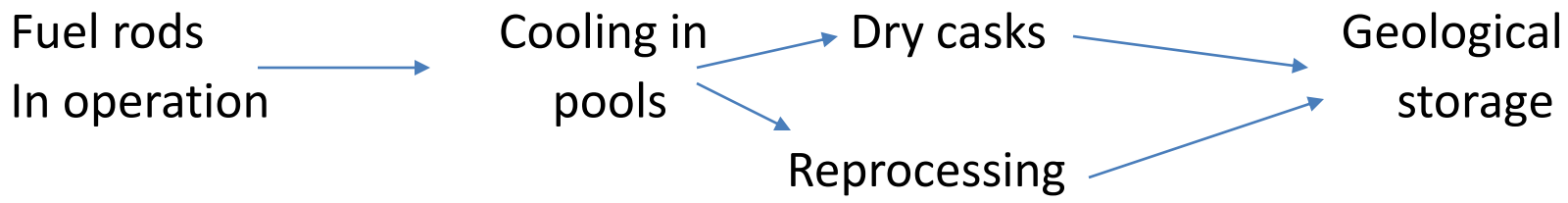
التخزين الجيولوجي لنفايات المفاعل النووي

على الرغم من استخدام الطاقة النووية لتوليد الكهرباء لعقود عديدة ، لا يوجد حتى الآن إجماع بين العلماء وصناع القرار فيما يتعلق بأفضل إجراء للتخزين الطويل الأجل تحت الأرض لقضبان الوقود المستهلك أو النفايات الأخرى عالية المستوى من هذه المصانع. في الواقع ، لم يتم إيداع غرام واحد من نفايات قضبان الوقود في موقع تخزين طويل الأمد.

كما نوقش أعلاه ، يتم تبريد قضبان الوقود المستهلك في البداية في برك المياه العميقة. بعد بضع سنوات ، أو ربما لعقد من الزمان ، تبرد قضبان الوقود المستهلك ما يكفي حرارياً وإشعاعيًا لتوضع في مخزن جاف داخل أسطوانات تم فيها استبدال الهواء والماء بغاز خامل.

ثم يتم تغليف الاسطوانات المغلقة في العلب المصنوعة من الصلب والخرسانة والتي تسمى براميل. توجد في الهواء الطلق ، وغالباً على منصات خرسانية. بعد مرور قرن من الزمان ، فإن مستوى نشاطهم الإشعاعي سيتراجع إلى عدة مئات فقط - وليس مليون مرة - من مستوى خام اليورانيوم (منحنى أسود ، الشكل البياني السابق).

خطط التخلص النهائي من النفايات النووية عالية المستوى ، سواء كانت قضبان الوقود نفسها أو بقاياها بعد إزالة اليورانيوم و / أو البلوتونيوم أثناء إعادة المعالجة ، تفترض جميعها أن موادها سيتم تغليفها ثم دفنها في موقع مركزي ثابت بعيد تحت الأرض 300-1000 م تحت السطح. من الناحية المثالية ، ستستمر الكبسولات لمئات الآلاف من السنين قبل حدوث أي تسرب كبير ، وبحلول ذلك الوقت سوف ينخفض مستوى النشاط الإشعاعي للمخلفات إلى قيم مستقرة تقريبًا.كما في المخطط التالي:



أهم الميزات الجيولوجية المثالية لمواقع الدفن هي:

- استقرار عالٍ من الاضطراب المحتمل بسبب النشاط البركاني أو الزلازل ؛ و
- نفاذية منخفضة للماء ، لضمان الحد الأدنى من التفاعلات مع المياه الجوفية والمحيط الحيوي.

تسعى العديد من الدول التي لديها العديد من مفاعلات الطاقة النووية إلى خطط دفن فردية للقضبان. لدى السويد وفنلندا خطط التخزين الأكثر تطوراً حالياً. فهم يخططون لدفن قضبان الوقود عدة مئات من الأمتار تحت الأرض في عبوات حديدية كبيرة مطلية بـ 5 سم من النحاس المقاوم للتآكل ثم تغطى في طين البنتونيت. تجري الآن تجربة في هذا النظام لمدة 20 عامًا في السويد ، حيث تستخدم السخانات الكهربائية داخل العلب لتقليد الحرارة التي يتم إنتاجها فعليًا من قضبان الوقود. تقوم أجهزة الاستشعار بمراقبة درجة الحرارة وحركة الماء ، إن وجدت ، داخل جدران الغرفة. بدأت فنلندا بالفعل حفريات على موقعها.

وبحكم الضرورة أو بالتصميم ، تخطط معظم البلدان لمواقع التخلص الجيولوجي العميقة التي تقع تحت مستوى تشبع المياه ، حيث تتقلص الظروف كيميائياً بدلاً من الأكسدة. موقع Yucca في الولايات المتحدة يتعين عليه التخلص من مستوى المياه الجوفية. وتتمثل ميزة التخزين فوق مستوى المياه في أن أي تسرب للمواد المشعة من الكبسولات لن يتم حشده في بيئة مائية.

تخلت الولايات المتحدة في عام 2010 عن خطتها المثيرة للجدل - التي تطورت في الثمانينات - لتخزين قضبان الوقود المستهلك من محطات الطاقة في منشأة في جبل يوكا في نيفادا. كانت الخطة لنقل القضبان ، بعد أن تم تبريدها لمدة عشر سنوات في الماء في مرافق المفاعلات المحلية ، إلى أسطوانات فولاذية ووضعها في نفق تحت الأرض ليبردها المراوح لمدة 50 سنة أخرى قبل إغلاق المرفق.

خطة مبدئية جديدة ، تقترحها لجنة بلو ريبون ، هي إنشاء عدد من مواقع التخزين المؤقتة في جميع أنحاء الولايات المتحدة حيث يتم تخزين قضبان الوقود المستنفد في براميل من الصلب والخرسانة الخارجية لعدد من العقود - ربما قرنًا أو أكثر من ذلك ، ولكن على الأقل 50 سنة - بعد أن تم تبريدها لمدة عشر سنوات في البرك في مواقع المفاعل. في نهاية المطاف ، سيتم إنشاء مستودع جيولوجي للتصرف النهائي للقضبان ،ولا يتطلب أي تبريد لأنهم قد يبردوا بما فيه الكفاية بعد ذلك الوقت المنقضي.

حوادث ومستقبل الطاقة النووية

في الدول المتقدمة ، تحول الرأي العام حول الطاقة النووية القائمة على الانشطارية من الإيجابية إلى السلبية في العقدين الأخيرين من القرن العشرين ، ويرجع ذلك جزئياً إلى الحوادث في محطة توليد الطاقة في جزيرة ثري مايل في هاريسبيرغ ، بنسلفانيا ، في عام 1979 ، وبقوة محطة في تشيرنوبيل ، أوكرانيا ، في عام 1986 ، وكلاهما موضح أدناه. ونتيجة لذلك ، لم يتم بناء أي مفاعلات جديدة في الولايات المتحدة أو كندا أو معظم البلدان المتقدمة الأخرى منذ ذلك الوقت. في المقابل ، تم بناء العديد من المفاعلات فيما بعد في البلدان النامية حيث تكون الحاجة إلى الكهرباء كبيرة مع توسع اقتصاداتها.

بدأ الاتجاه العام في البلدان المتقدمة نحو بناء محطات طاقة نووية إضافية - أو على الأقل استبدال المفاعلات التي تقترب من نهايات حياتها الإنتاجية في العقود القادمة - في الاتجاه الإيجابي في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. ومع ذلك ، فإن الكارثة الرئيسية في عام 2011 في محطة فوكوشيما داي إيتشي للطاقة النووية في اليابان الموصوفة بالتفصيل أدناه - عكس هذا الاتجاه تمامًا. في الواقع ، قررت دول مثل ألمانيا التخلص التدريجي من الطاقة النووية في المستقبل. في وقت كتابة هذه الكلمات ، ليس من الواضح على الإطلاق ما سيكون مستقبل الطاقة النووية.

كارثة مفاعل تشرنوبيل:

إن الخوف الواقعي هو أكثر من الخوف من محطة الطاقة النووية الخارجة عن السيطرة والتفجير مثل القنبلة الذرية في أن المنتجات الانشطارية المشعة للغاية الموجودة في قضبان الوقود العاملة يمكن أن تنتشر في المناطق الريفية المحيطة إذا وقع انفجار غير نووي في محطة لتوليد الكهرباء. وهذا ما حدث بالفعل في أحد محطات الطاقة النووية في تشرنوبيل ، أوكرانيا ، في عام 1986. فخلال اختبار روتيني فقد المهندسون في المصنع السيطرة على المفاعل من خلال تجاوز آليات السلامة في المصنع وسحب معظم قضبان التحكم من المفاعل النواة. ونتيجة لذلك ، فإن المفاعل كان محموما واندلعت نارًا في وسيط الجرافيت. وقد أدى ذلك إلى حدوث انفجار هائل أدى إلى تفجير الصفيحة الثقيلة التي تغطي المبنى ، وتم إطلاق مئات الملايين كيوري من النشاط الإشعاعي في الهواء وانتشرت على مساحة واسعة.

تركز النشاط الإشعاعي المتشتت بشكل رئيسي في نظائر الغازات النبيلة ^{131}Xeو ^{85}Kr ، في ^{131}I ، وفي نظائر السيزيوم ^{134}Cs و ^{137}Cs، وكلها منتجات انشطارية. توفي حوالي عشرين شخصا ، معظمهم من مشغلي المصانع ورجال الإطفاء ، في غضون بضعة أشهر بسبب جرعات عالية من الإشعاع م

تم تشييد تابوت خرساني من أجل تشييد مبنى المفاعل في غضون أشهر من وقوع الحادث ، لكنه بدأ ينهار. الخطة الحالية هي بناء والانزلاق في مكان قوس الصلب الهائل لتغطية المبنى والسماح للرافعات الآلية لتفكيك التابوت وأجزاء من المفاعل. ستستغرق عملية التنظيف حوالي 50 عامًا.

كانت النتيجة الصحية المزمنة الرئيسية لعامة الانفجار في تشرنوبيل هي الزيادة الكبيرة في سرطان الغدة الدرقية بين الأطفال في المنطقة. بدأ سرطان الغدة الدرقية على الأرجح بإشعاع بيتا من اليود المشع ^{131}I، الذي له نصف عمر 8 أيام فقط. يتركز اليود في جسم الإنسان في الغدة الدرقية. الحمد لله ، سرطان الغدة الدرقية لديه معدلات شفاء عالية. في أكثر المناطق تلوثاً في أوكرانيا ، تم تشخيص حوالي أربعة أضعاف الأطفال العاديين المصابين بسرطان الغدة الدرقية ، حيث وجد أن الأطفال الصغار جداً هم الأكثر عرضة للإشعاع. وبشكل عام ، تم تشخيص أكثر من 6000 طفل في المنطقة بسرطان الغدة الدرقية ، على الرغم من أن أقل من 20 طفلاً قد ماتوا من هذا المرض حتى الآن.

وجد أن احتمال إصابة طفل أوكراني بسرطان الغدة الدرقية يتزايد بشكل مباشر مع جرعة اليود المشع المبتلع بعد وقوع الحادث. نتج معظم اليود في أنظمة الأطفال عن شرب الحليب من الأبقار التي ترعى النباتات الملوثة ومن أكل الخضراوات المورقة ، حيث أن اليود المشع قد انتقل من الهواء على سطح النبات. التربة في المناطق المتضررة تعاني من قصور مزمن في اليود ، وبالتالي فإن المادة يمكن تناولها بسهولة من خلال الغدة الدرقية لدى الأطفال الذين يعانون من نقص مزمن في العنصر. في الواقع ، تم توزيع أقراص يوديد البوتاسيوم المصممة لإغراق الجسم باليود وبالتالي تخفيف الشكل الإشعاعي ، على السكان في جميع أنحاء تشيرنوبيل - ولكن ذلك تم بعد أسبوع من الانفجار.

ويتوقع خبراء الإشعاع أن ما يقرب من 4000 إلى 9000 حالة وفاة مبكرة بين الأشخاص الذين كانوا يعيشون في المناطق الملوثة بشدة - أوكرانيا ، وبيلاروسيا ، وروسيا - سوف يكونون مرتبطين في نهاية المطاف بالإشعاع من حدث تشيرنوبيل ، بما في ذلك ليس فقط ^{131}I ولكن أيضا نظائر السيزيوم ^{134}Cs و ^{137}Cs (هذا الأخير لديه عمر نصف من 30 سنة). السرطانات الأخرى غير الغدة الدرقية لها أوقات تطوير أطول بكثير. قد يتأثر عدد أكبر بكثير من الأوروبيين - ربما ما يصل إلى 60،000 شخص - يعيشون خارج المناطق الأكثر تضرراً والذين يتناولون الجرعات الصغيرة في النهاية. ومع ذلك ، ووفقاً لمنظمة الصحة العالمية ، فإن أكبر مشكلة صحية عامة للأشخاص الذين كانوا يعيشون في المناطق شديدة التلوث في وقت كارثة تشيرنوبيل ، هي انخفاض طويل الأمد في صحتهم العقلية ، ناشئة عن صدمات صحية مدركة والمخاطر من إعادة التوطين خارج المناطق غير الصالحة للسكن .

الكارثة في مفاعلات فوكوشيما في اليابان:

بدأت كارثة اليابان النووية في شهر اذار من عام 2011 عندما وقع زلزال بلغت قوته 9 درجات على عمق 25 كم تحت سطح المحيط على بعد 100 كم قبالة الساحل الشمالي الشرقي للبلاد. أسفر الزلزال عن إغلاق تلقائي لجميع محطات الطاقة النووية العاملة على طول الساحل. ومع ذلك ، فقد تسبب في حدوث تسونامي يبلغ ارتفاعه حوالي 13 مترًا (43 قدمًا) عندما وصل إلى موقع محطة فوكوشيما داي-إيتشي للطاقة النووية ، والذي كان محميًا من خلال جدار بحري مصمم للتأقلم مع أمواج التسونامي 5.7 متر فقط (19 قدمًا).

من بين مفاعلات الماء المغلي الستة في الموقع ، كانت ثلاثة (أرقام 1 و 2 و 3) تعمل عندما وقع الزلزال وإغلقت أوتوماتيكياً ، على ما يبدو عن طريق إدخال قضبان التحكم ، في حين أن الثلاثة الأخرى (4 ، 5 ، 6) قد تم بالفعل إغلاقها للصيانة والتزود بالوقود. فقدت روابط الطاقة الكهربائية من المصنع إلى العالم الخارجي نتيجة لكارثة تسونامي ، التي دمرت خطوط الكهرباء. كما أغرقت المباني في الموقع ، بما في ذلك المولدات الطارئة التي تعمل بالديزل في المستويات الدنيا من مباني المفاعل ، وكذلك المضخات الواقعة خارجها.

بعد أقل من ساعة من وقوع الزلزال ، طغت موجات تسونامي على الدفاعات في محطات الطاقة. فقدت المفاعلات من 1 إلى 5 جميع الطاقة الكهربائية ، بما في ذلك مولدات الديزل في الموقع ، في حين استمر مولد المفاعل 6 في العمل ، وتم توصيل قوته لاحقًا بالمفاعل 5 ، مما يضمن أنه يمكن إيقاف كليهما نهائيًا في النهاية.

ومع ذلك ، على الرغم من المحاولات البطولية من قبل مشغلي المحطة التي تعمل في أوقات قريبة من الظلام مع طاقة البطارية المحدودة فقط ، فإن الماء المبرد على قضبان الوقود قد فقد في المفاعلات 1 و 2 و 3. وعلى وجه الخصوص ، نقص الطاقة والمشاكل الأخرى منع استمرار حقن مياه التبريد على قضبان الوقود. بسبب التسريبات ، بدأت مستويات المياه في الانخفاض ، في نهاية المطاف تعريض معظم أو كل قضبان الوقود. ونتيجة لفقدان المبرد ، أدت الحرارة المتبقية الناجمة عن الاضمحلال الإشعاعي لمنتجات الانشطار إلى رفع درجة حرارة قضبان الوقود في القلب إلى آلاف الدرجات ، مما أدى إلى انصهارها والسماح بهروب المنتجات الانشطارية المشعة من القضبان. بالإضافة إلى ذلك ، فإن كريات الوقود يمكن أن تسقط من أنابيب الزركونيوم في قاع الوعاء. كما أدت درجات الحرارة المرتفعة إلى تحويل مياه التبريد المتبقية إلى بخار ساخن عال الضغط يرفع الضغط داخل الوعاء. نتيجة للتلامس بين معدن الزركونيوم العاري Zr ، من قضبان الوقود ودرجة حرارة عالية (1000 درجة مئوية) ، حدث تفاعل كيميائي ينتج غاز الهيدروجين ، H_2، وثنائي أوكسيد الزركونيوم:

$$Zr(s) + H_2O(g) \longrightarrow ZrO_2(s) + 2H_2(g)$$

في وقت لاحق ، بعد زيادة الضغط في وعاء الاحتواء الداخلي الأساسي حيث تم تخفيفه عن طريق السماح لبعض الهواء المحمّل بالهيدروجين بالدخول إلى منطقة الاحتواء الثانوية الخارجية ، وعلى ما يبدو فان شرارة أشعلت الخليط بشكل عشوائي ، مما أدى إلى انفجار من التفاعل باعث الحرارة من الهيدروجين والأوكسجين:

$$2H_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2H_2O(g) + heat$$

حدثت انفجارات من هذا النوع في نهاية المطاف في المفاعلات 1 و 2 و 3 ، مما أدى إلى تدمير جزئي لمبانيهم.

بالإضافة إلى قضبان الوقود في المفاعل نفسه ، تم تخزين قضبان الوقود المستهلك من مختلف الأعمار في برك من المياه في المستويات العليا للمفاعلات في مجمع فوكوشيما. تحتوي الرفوف المستخدمة لإيواء القضبان على البورون المخصص لامتصاص جسيمات الفا المنبعثة منها وتمنع أي احتمال للانشطار. ان ضررا من الانفجار في مفاعل 3 أسفر عن فشل نظام مياه التبريد لتجميع قضبان الوقود المستهلك في مفاعل الإغلاق 4. وحدث انفجار بالقرب من المستوى العلوي من المفاعل 4 من الهيدروجين قد تولد من قضبانها المخزنة أو هاجر من مفاعل 3.

نتيجة للحوادث وعمليات التنظيف ، تعرض سبعة من موظفي الموقع إلى أكثر من 250 مليسيفرت من الإشعاع الذي حددته الحكومة اليابانية بأثر رجعي. تم إطلاق المواد المشعة في البيئة في الغاز المنطلق من المفاعلات لتخفيف الضغط وفي مياه التبريد التي يتم تصريفها في البحر. كان النشاط الإشعاعي في الغازات يتكون بشكل أساسي من نظائر الزينون قصيرة العمر Xe. وكما حدث في حادث تشرنوبيل ، كانت المنتجات الانشطارية الرئيسية هي I^{131} و Cs^{134} و Cs^{137} ، وقد تم اكتشاف الثلاثة جميعها في مياه البحر بالقرب من موقع المفاعل بمستويات أكبر من المعتاد.

تبين في وقت لاحق أن اللبن وبعض الخضروات في منطقة فوكوشيما ملوثة. ومع ذلك ، فإن إجلاء السكان على نطاق واسع وعلى المدى الطويل من منطقة كبيرة جداً تحيط بالموقع من المفترض أن يحول دون الإصابة بسرطانات الغدة الدرقية في الطفولة والتي كانت سمة مميزة لحدث تشيرنوبيل.وحتى وقت قريب كان تنظيف الكارثة غير مكتمل. ويتساءل المرء ما إذا كانت مشكلة الصحة العامة الدائمة بالنسبة للسكان الذين تم إجلاؤهم ستكون مشابهة لنوع الصدمة التي عانى منها الأشخاص الذين تم إجلاؤهم في الكارثة السابقة.

الحادث في جزيرة الاميال الثلاثة:

كان حادث محطة الطاقة النووية الأخرى أقل خطورة بكثير. حدث ذلك في عام 1979 في مصنع جزيرة الاميال الثلاثة بولاية بنسلفانيا. المشكلة نشأت بسبب الإخفاقات في أنظمة التبريد القائمة على الماء في المفاعل. على الرغم من إدخال قضبان التحكم في اللب وتم إيقاف عملية الانشطار ، إلا أن المفاعل حافظ على التسخين. وكان مصدر الحرارة هو الاضمحلال الإشعاعي من خلال انبعاث اشعة كاما ، وليس من اليورانيوم ، ولكن من المنتجات الانشطارية التي تراكمت بشكل طبيعي مع مرور الوقت في قضبان الوقود. بسبب العطل الميكانيكي وخطأ المشغل ، انكشف الجزء الأساسي جزئيا من المفاعل لذلك سخنت بدرجة أكبر من 2200 درجة مئوية ، ونصفها ذاب. تم إنتاج غازات الهيدروجين والأوكسجين من تحلل الماء شديد الحرارة.

لحسن الحظ ، لم يكن هناك انفجار كبير في جزيرة الاميال الثلاثة ولم يخترق مرفق الاحتواء. وعلى النقيض من حادث تشرنوبيل ، فإن المواد المشعة السائلة والصلبة التي هربت من المفاعل لم تفلت من مبنى الاحتواء ؛ كان الافراج عن ^{131}I أقل حوالي مليون مرة. كميات كبيرة من النظائر المشعة للغاز النبيل خرج ^{131}Xe و ^{85}Kr إلى الهواء ، ولكن كما حدث في تشرنوبيل ، تم تخفيفها بسرعة في الغلاف الجوي.

الاندماج النووي

مفاعلات الانصهار:

يحصل الثبات النشط الأمثل لكل جسيم نووي (بروتونات ونيوترونات) من أجل نواة من الحجم المتوسط ، مثل الحديد. هذا هو السبب في أن انشطار نواة ثقيلة إلى جزأين من الحجم المتوسط يطلق طاقة. وبالمثل ، فإن انصهار نواتين خفيفتين للغاية لإنتاج نواة أثقل يطلق أيضا كميات كبيرة من الطاقة. في الواقع ، تفاعلات الاندماج هي مصدر الطاقة في النجوم ، بما في ذلك شمسنا ، وفي القنابل الهيدروجينية.

لسوء الحظ ، تحتوي كل تفاعلات الاندماج على طاقات تنشيطية كبيرة للغاية بسبب التنافر الكهروستاتي الهائل الموجود بين النوى المشحونة إيجابياً عندما يتم تقريبها معاً ، وهو ما يجب أن يحدث قبل أن يحصل الاندماج. وبالتالي ، من الصعب البدء والحفاظ على تفاعل اندماج يتم التحكم فيه والذي يوفر طاقة أكثر مما يستهلك.

تتضمن التفاعلات الاندماجية التي تنطوي على إمكانات أكبر كمنتجين للطاقة التجارية المفيدة ، نوى نظائر الهيدروجين الأثقل ، وهي الديوتيريوم ^2H ، والتريتيوم ^3H .لاحظ أنه يمكن إنتاج مجموعتين مختلفتين من هذه التفاعلات النموذجية:

$$^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n$$

$$^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_1H + {}^1_1H$$

deuterium deuterium

إن الطاقة التي يتم إطلاقها عندما تحدث إحدى هذه التفاعلات هي حوالي 4×10^8 كيلو جول لكل مول، أي حوالي مليون مرة اكبرمن الطاقة المنتجة في تفاعل كيميائي طارد للحرارة. تتوفر كمية وفيرة من الديوتيريوم ، لأنه نظير غير مشع ، يحدث بشكل طبيعي (يشكل 0.015٪ من الهيدروجين) ، وبالتالي فهو مكون طبيعي لكل الماء.

يتطلب طاقة تنشيط أقل نوعًا ما لتفاعل الديوتيريوم مع التريتيوم:

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}e$$

ومع ذلك ، لأن التريتيوم هو عنصر مشع (باعث جسيمات بيتا) مع نصف عمر قصير (12 سنة) ، فإنه ليس مكونًا مهمًا للهيدروجين الموجود طبيعياً ويتعين تركيبه بواسطة انشطار الليثيوم عنصر الشحيح نسبياً.

يجب أن تكون العواقب البيئية لتوليد الطاقة الكهربائية من مفاعلات الاندماج أقل خطورة من تلك المرتبطة بمفاعلات الانشطار. والنفايات المشعة الوحيدة المنتجة مباشرة في الكمية هي التريتيوم ، على الرغم من أن النيوترونات المنبعثة في العملية يمكن أن تنتج مواد مشعة عندما تمتصها ذرات أخرى. على الرغم من أن الجسيمات التي يطلقها التريتيوم ليست فعالة بدرجة كافية لاختراق الطبقة الخارجية من الجلد البشري ، إلا أن التريتيوم مع ذلك خطر لأن الأنظمة البيولوجية تدمجه بسهولة كما تفعل مع الهيدروجين الطبيعي (^{1}H أو ^{2}H) - عن طريق الاستنشاق والامتصاص عبر الجلد. أو ابتلاع الماء أو الطعام. في الوقت الحالي ، يشكل التريتيوم في مياه الشرب (وبعضها ناتج عن مصادر اصطناعية) مصدر حوالي 3٪ من تعرضنا للنشاط الإشعاعي.

يرتبط حوالي 80٪ من الطاقة المنبعثة في تفاعل الدوتريوم والتريتيوم بالنيوترونات. الطاقة ، التي تم التقاطها باستخدام مبردات نيوترون ساخنة ، سوف تستخدم في توليد بخار مسخن لدفع التوربينات. لسوء الحظ ، فإن القصف النيوتروني المكثف سيسبب تدهورًا شديدًا للهيكل المستخدم لحصر المواد المتفاعلة للاندماج وسيولد كميات كبيرة من النوى المشعة. سوف يتم التغلب على هذه المشاكل إلى حد كبير إذا ما تم استخدام ما يسمى بالوقود المتطور كمواد متفاعلة.

وبالتالي فإن تفاعل الاندماج الديوتيريوم مع الهليوم - 3 ($^{3}_{2}He$) يطلق فقط نسبة قليلة من طاقة تفاعله مثل النيوترونات (منتجات العملية السائدة كونها بروتونات ونوى ^{4}He) ونوعين من النوى ^{3}He (لإنتاج بروتونين و ^{4}He) هي في الأساس خالية من النيوترونات. يمكن أن تعمل هذه العمليات بكفاءة تحويل طاقة أعلى بكثير ولكنها تتطلب درجات حرارة أعلى وظروف احتجاز أعلى. المشكلة الخطيرة الأخرى هي عدم وجود ^{3}He على الأرض: القمر هو أفضل مصدر لهذه المواد!

في عام 2006 ، وافق تحالف عالمي مؤلف من الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة والصين والهند وروسيا واليابان وكوريا الجنوبية على تمويل مشروع المفاعل النووي التجريبي النووي الدولي (ITER) وهو أول مفاعل اندماج نووي في العالم. بدأ بناء المرفق في منطقة بروفانس جنوب فرنسا ، في عام 2008 ، ومن المتوقع أن يعمل بكامل طاقته بحلول عام 2026. ولن ينتج المفاعل طاقة صالحة للاستخدام ، ولكن يجري تشييده لإثبات أنه من الممكن بناء مفاعل اندماجي سيولد قوة أكثر مما تستهلك. يعتمد تصميم المفاعل على التوكاماك *tokamak* ، وهي آلة على شكل دونات ولها سلسلة من المجالات المغناطيسية المتداخلة التي يمكنها حمل البلازما داخل جدران المفاعل.

سوف يستخدم مرفق ITER تفاعل الديوتيريوم التريتيوم. سوف يتباطأ النيوترون عالي السرعة المنبعث من التفاعل ويمتصه "غلاف او غطاء " يحتوي على الليثيوم والذي سيولد المزيد من التريتيوم المطلوب للتفاعل. غير أن مصدر القلق الرئيسي هو أن النيوترونات عالية الطاقة الناتجة عن الانصهار ستدمر المواد المستخدمة في بناء حوض المفاعل.

ومن المقرر إنشاء محطة لتوليد الطاقة الكهربائية ، التي يمكن أن تستخدم الحرارة الزائدة لغلي الماء وتحويل التوربينات لتوليد الكهرباء ، لحوالي عام 2040. وستستخدم التجربة المكتسبة في مشروع ITER في التعامل مع الهليوم والتريتيوم المتولد عن تفاعلات الاندماج. نأمل أن يتم التغلب على حل لمشكلة مواد المفاعلات المشعة التي تولدها النيوترونات المنبعثة من عملية الاندماج في ذلك الوقت