# الطاقة النووية

# Nuclear Energy

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

على الرغم من أن معظم الطاقة التي نستخدمها تنشأ كحرارة ناتجة عن الاحتراق من الوقود المحتوية على الكربون والحرارة بكميات تجارية يمكن أيضا ان تنتج بشكل غير مباشر عند بعض العمليات التي تحدث على نوى الذرة؛ يسمى مصدر الطاقة هذا بالطاقة النووية ، ويستخدم بشكل أساسي في إنتاج الكهرباء. القوى النووية هي أقوى بكثير من قوى الروابط الكيميائية ، والطاقة المنطلقة في الذرة من التفاعلات النووية هي هائلة مقارنة لتلك التي تم الحصول عليها في تفاعلات الاحتراق. أحد عوامل الجذب للطاقة النووية هو أنها لا تولد ثنائي أكسيد الكربون أو أي غازات دفيئة أخرى أثناء عملها. بعض صانعي السياسة برروا التوسع باستخدام الطاقة النووية كوسيلة لمكافحة الاحترار العالمي في المستقبل.

هناك نوعان من العمليات التي يتم الحصول على الطاقة من النوى الذرية: الانشطار والانصهار.

- في الانشطار ، اصطدام أنواع معينة من النوى الثقيلة مع النيوترون يسبب في تقسيم النواة إلى حجمين متشابهين من شظايا تسمى نواتج الانشطار. ولان الأجزاء المفصولة أكثر مستقرة طاقيا من النواة الثقيلة الأصلية ، تتحرر الطاقة من هذه العملية.
- الجمع بين نواتين خفيفتين جدا لتشكيل نواة واحدة مجتمعة يسمى الانصهار. كما أنه يؤدي إلى إطلاق كميات هائلة من الطاقة ، النواة المدمجة أكثر استقرارًا من النواة الأصلية.

## مفاعلات الطاقة الانشطارية

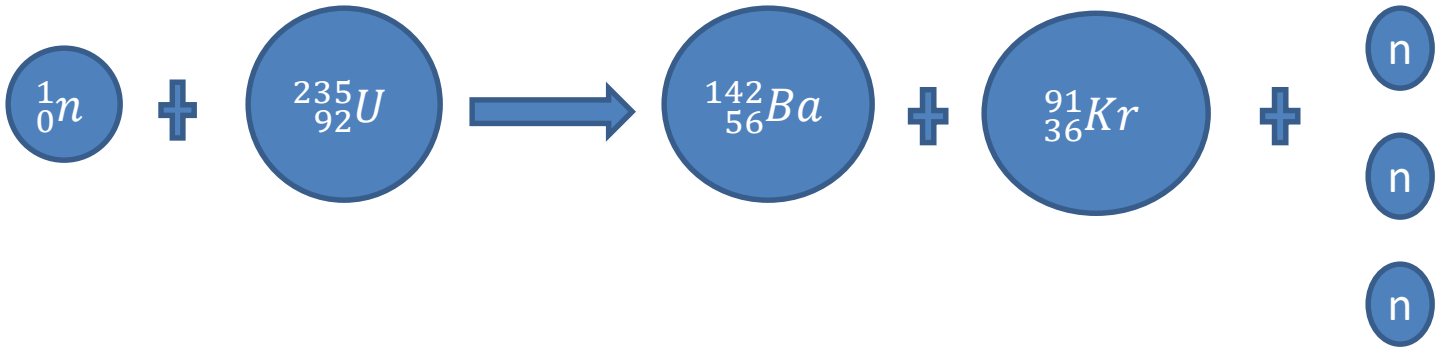
هناك حوالي 440 محطة نووية تعمل بالطاقة النووية في 30 دولة حول العالم حاليا. وهي تولد 14 ٪ من الطلب العالمي على الكهرباء. يبين الجدول التالي جزء من الكهرباء التي تنتجها الطاقة النووية في البلدان التي لديها معظم المفاعلات

| TABLE | Nuclear Power Around the World (2011) | |
|---|---|---|
| Country | Number of Operating Power Reactors | Proportion of Electricity Generated by Nuclear Power |
| United States | 104 | 20% |
| France | 58 | 74% |
| Japan | 51 | (29%) |
| Russia | 32 | 17% |
| South Korea | 21 | 32% |
| India | 20 | 3% |
| Great Britain | 19 | 16% |
| Canada | 18 | 15% |
| Germany | 17 | 28% |
| Ukraine | 15 | 48% |
| China | 13 | 2% |
| Sweden | 10 | 38% |
| All others | 63 | |

البلدان الأخرى التي تنتج أكثر من 25 ٪ من قوتها الكهربائية من هذا المصدر تشمل فنلندا وسويسرا ، بالإضافة إلى العديد من البلدان (أرمينيا وبلغاريا والمجر وسلوفاكيا وسلوفينيا) المرتبطة سابقًا مع الكتلة الشيوعية الشرقية.

المثال الأكثر فائدة من الناحية الاقتصادية للانشطار ، والمستخدم بشكل رئيسي من قبل محطات توليد الطاقة ، هو الناجمة عن تصادم نواة $^{235}U$ مع النيوترون. مزيج هاتين الجسيمتين غير مستقر وعندما يتحلل تنتج نواة الباريوم 142 والكريبتون 91 وثلاثة نيوترونات.

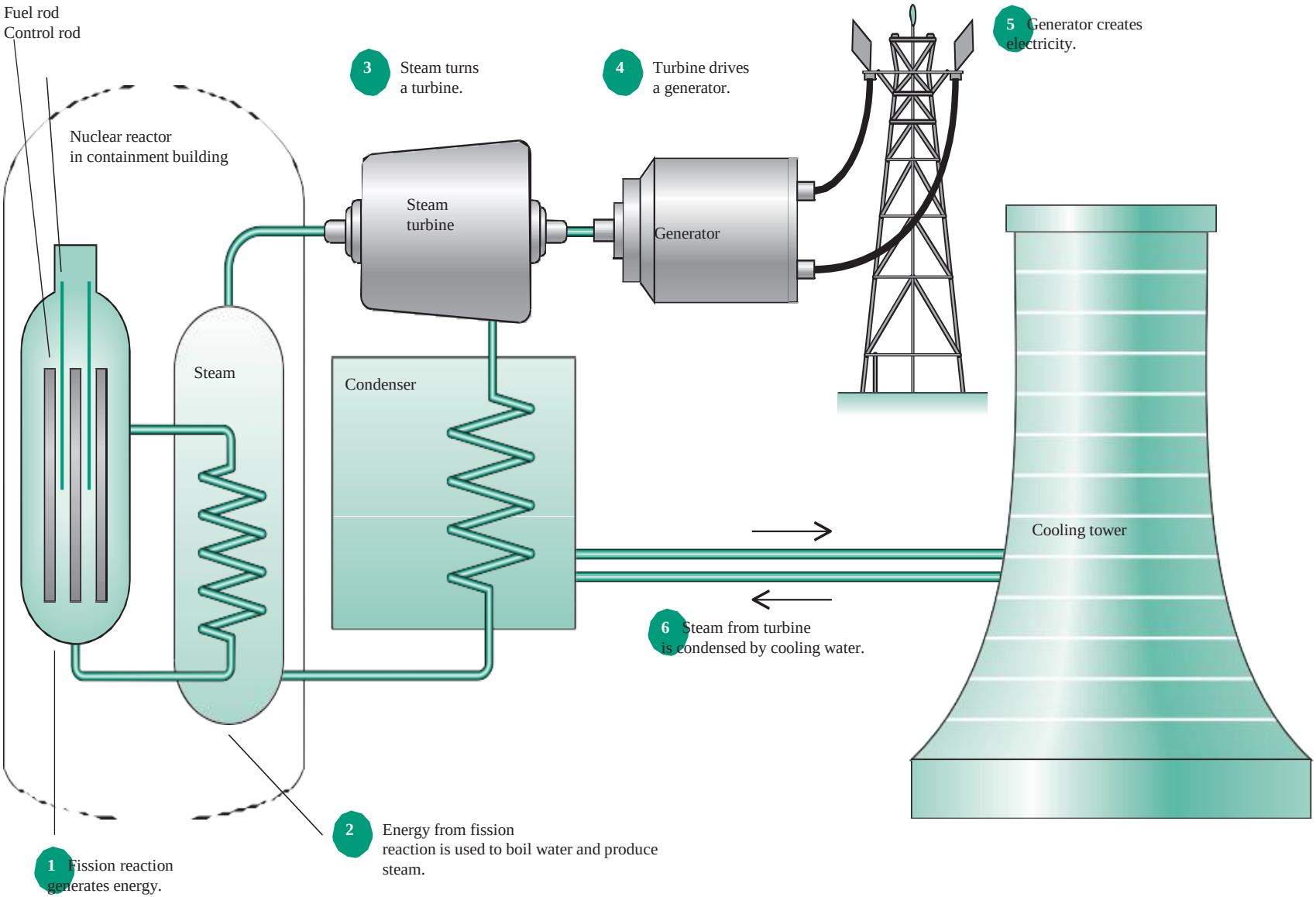
$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \longrightarrow {}^{142}_{56}Ba + {}^{91}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$$




لا تعطي كل نويات اليورانيوم التي تمتص نيوترونات نفس النواتج الانشطارية. لكن العملية تنتج تنتج دائما نواتين من الاحجام الباريوم والكريبتون مع بعض النيوترونات. النويتان الجديدتان اللتان تم إنتاجهما في تفاعلات الانشطار تتحركان بسرعة كبيرة ، وكذلك النيوترونات. الطاقة الحرارية من هذه الطاقة الحركية الزائدة تستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية. في الواقع ، فإن توليد الكهرباء من قبل الطاقة النووية وحرق الوقود الأحفوري تنطوي على استخدام مصدر الطاقة لإنتاج البخار ، والذي يستخدم بعد ذلك لتحويل التوربينات الكبيرة التي تنتج الكهرباء.

يتم إنتاج ثلاثة نيوترونات في المتوسط لكل تفاعل نواة $^{235}U$. يمكن أن ينتج واحد من هذه النيوترونات انشطار نواة يورانيوم اخرى وهكذا ينتج عنه تفاعل متسلسل. في القنابل الذرية ، النيترونات الإضافية تستخدم للحث على الانشطار السريع جدا لجميع اليورانيوم الذي يتم تقييد بقاءه في حجم صغير ، لذلك يتم إطلاق الطاقة بشكل متفجر. في المقابل ، فإن يتم إطلاق الطاقة تدريجيا في مفاعل للطاقة النووية من خلال ضمان ذلك ، في المتوسط ، يبدأ نيوترون واحد فقط من كل حدث الانشطار $^{235}U$ بانشطار نواة أخرى. النيوترونات الزائدة المنتجة في الانشطار تمتصها قضبان التحكم في مفاعل الطاقة النووية. هذه القضبان مصنوعة من عناصر امتصاص النيوترون مثل الكادميوم. للتحكم في معدل الانشطار يمكن أن يختلف موقع القضبان في المفاعل.

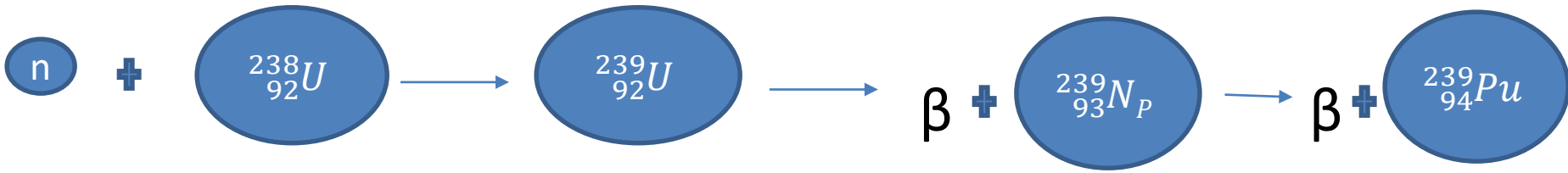
النيوترونات التي تترك نوى $^{235}U$ عند الانشطار تتحرك بسرعة كبيرة ليتم امتصاصها بكفاءة من النوى الأخرى وتسبب المزيد من الانشطار ، لذلك يجب إبطاءها إذا كان من المفترض أن تكون مفيدة. يتم هذا الابطاء من قبل منظم ، يبنى اعتمادا على نوع المفاعل, يمكن أن يكون الماء العادي ، الماء الثقيل (أي المياه المخصبة في الديوتيريوم) أو الجرافيت. المبرد وهو المواد التي تستخدم لحمل الطاقة الحرارية التي تنتجها الانشطار في معظم أنواع المفاعلات يكون الماء ، وقد يستخدم غاز ثنائي أكسيد الكربون الغازي في بعض المفاعلات. في نهاية المطاف، يتم إنشاء بخار عالي الضغط ، ذو درجة حرارة عالية - كما هو الحال في محطة توليد الطاقة من الوقود الأحفوري - ويستخدم في تشغيل التوربينات وإنشاء الكهرباء. كفاءة التشغيل لمفاعلات الطاقة النووية أقل بكثير من تلك التي تحتوي على الوقود الأحفوري لان قلب المفاعل النووي ، الذي يتم سحب الحرارة منه، لا يزيد إلا قليلاً عن 300 درجة مئوية ، في حين أن مصانع الوقود الأحفوري قد تكون عالية تصل إلى 550 درجة مئوية. الخطوات المختلفة في إنتاج الكهرباء من قبل مصنع الطاقة النووية القائمة على الانبعاثات مبينة في الشكل التالي:


Fuel rod
Control rod
Nuclear reactor
in containment building
3 Steam turns
a turbine.
4 Turbine drives
a generator.
5 Generator creates
electricity.
Steam
turbine
Generator
Steam
Condenser
Cooling tower
6 Steam from turbine
is condensed by cooling water.
2 Energy from fission
reaction is used to boil water and produce
steam.
1 Fission reaction
generates energy.

# منتجات انشطار الاكتنيدات

نظير اليورانيوم الطبيعي الوحيد الذي يمكن أن يخضع للانشطار هو $^{235}U$ ، والذي يشكل 0.7٪ فقط من العنصر الأصلي. والمتبقي هو اليورانيوم $^{238}U$ (وفرة طبيعية 99.3 ٪). ومع ذلك ، النيوترون المنتج من خلال الانشطار من نواة $^{235}U$ يمكن امتصاصه عند الاصطدام بنواة $^{238}U$. نواة $^{238}U$ الناتجة هي إشعاعية وتنبعث منها جسيمات β:

$$^{1}_{0}n + {}^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow{-\beta} {}^{230}_{93}N_P \xrightarrow{-\beta} {}^{239}_{94}Pu$$




وبالتالي ، يتم إنتاج $^{239}Pu$ كمنتج ثانوي لتشغيل طاقة المفاعلات النووية. ومثل $^{235}U$ ، هذا النظير من البلوتونيوم يمكن أن يخضع للانشطار النووي ويقال أن يكون "انشطاري". ومع ان تركيزه في قضبان الوقود يزداد مع مرور الوقت ، لذا يولد بعض النيوترونات وبالتالي بعض الطاقة المنتجة من سلسلة التفاعل. بالإضافة إلى ذلك ، $^{239}Pu$ هو مادة مشعة للغاية.

تؤدي واحدة أو أكثر من تفاعلات التقاط النيوترونات المتتالية متبوعة بواحد أو أكثر من تفاعلات انحلال بيتا إلى تكوين أكتينيدات أخرى في قضبان الوقود ، كما يحدث للبلوتونيوم. المنتج المهم neptunium-237 الذي تشكلت من جزء صغير من $^{235}U$ الذي لا ينشط بعد أن يمتص النيوترون. في نهاية المطاف ، يمتص $^{236}U$ الناتج نيوترونًا آخر ، وبعد ذلك يتحلل من قبل انبعاثات بيتا ، وإنتاج النبتونيوم:

$$^{235}_{92}U \xrightarrow{+n} {}^{236}_{92}U \xrightarrow{+n} {}^{237}_{92}U \xrightarrow{-\beta} {}^{237}_{93}N_P$$

يبلغ عمر نصف نظير النبتونيوم -237 حوالي 2 مليون سنة ، لذا فهو بطيء جدا في التحلل. ينشأ معظم انحلال جسيمات ألفا من قضبان الوقود المستنفد وينشأ مع البلوتونيوم-239.

يتزايد تركيز $^{237}_{93}N_P$ في قضبان الوقود المستهلك مع مرور الوقت لأنه يتكون أيضًا من تحلل جزئي للأكتينيد الاخر المهم الذي تم تكوينه في قضيب الوقود أثناء تشغيله $^{241}_{95}Am$. نظير الأميريسيوم يتكون عندما تمتص بعض من البلوتونيوم-239 على نيوترونين لإنتاج $^{241}_{94}Pu$ ، والذي يتحلل بانبعاث جسيمات بيتا مع عمر نصف يبلغ 15 سنة لإعطاء $^{241}_{95}Am$ :

$$^{239}_{94}Pu \xrightarrow{+n} {}^{240}_{94}Pu \xrightarrow{+n} {}^{241}_{94}Pu \xrightarrow{-\beta} {}^{241}_{95}Am \xrightarrow{-\alpha} {}^{237}_{93}N_P$$

يبلغ العمر النصفي لأمريسيوم 241 حوالي 432 عامًا ، ولذلك سيتحلل بصورة أساسية لإنتاج المزيد من النبتونيوم في غضون بضعة آلاف من السنين.

تم العثور على استخدام عملي جدا لأميريسيوم-241. لأنه حتى عينة صغيرة من النظائر تصدر تيارًا ثابتًا من جسيمات ألفا على مدار سنوات عديدة ، يتم استخدامها كمصدر للإشعاع المؤين في كاشفات الدخان التقليدية. طالما أن التيار الكهربائي الصغير المتكون من جسيمات مشحونة يمر بين قطبين في غرفة التأين للمكشاف ، لا يتم تشغيل الإنذار. ومع ذلك ، فإن أي دخان موجود سوف يمتص جسيمات ألفا ، وبالتالي يقلل من التيار ويطلق الإنذار.

# النشاط الإشعاعي من منتجات الانشطار

في الوقت الذي يتم إزالتها من المفاعل ، فإن قضبان الوقود المستهلك تكون أكثر إشعاعًا بمقدار مليون مرة من خام اليورانيوم الأصلي! ينشأ النشاط الإشعاعي من الأكتينيدات المنتجة من نويات اليورانيوم السليمة ، كما نوقش أعلاه ، ومن نواتج الانشطار الناتجة عندما يتعرض الأكتينيدات للانشطار.

كل ناتج انشطاري له نواة حوالي نصف نواة اليورانيوم الأصلي ، مع عدد ذري في المدى 30 إلى 50 بدلا من 92. وبما أن نسبة النيوترون / البروتون المثلى للنوى تزداد مع العدد الكتلي ، فإن المنتجات الانشطارية غنية بالنيترونات. تنقسم النيوترونات الزائدة إلى بروتون وإلكترون ، مع طرد الأخير من النواة كجسيم بيتا مشع ، وبالتالي زيادة العدد الذري بمقدار 1 وخفض نسبة النيوترون / البروتون. يستمر انحلال نيوترون متتالي حتى لا يكون المنتج غنيًا بالنيترونات. على سبيل المثال ، الكريبتون المنتج في التفاعل الانشطار النمطي الذي تمت مناقشته سابقًا له نسبة نيوترون / بروتون 1.53 ، نموذجية لنواة بحجم اليورانيوم. وله نصف عمر لمدة 10 ثوانٍ فقط قبل أن يصدر جسيم بيتا ويصبح روبيديوم ، والذي بدوره (نصف عمر دقيقة واحدة) يصدر جسيم بيتا ليصبح سترونتيوم (نصف عمر 10 ساعة) والذي بدوره يصدر جسيم بيتا ليصبح الإيتريوم (نصف عمر 59 يومًا)، والذي بدوره يصدر جسيم بيتا ليصبح نظيرًا ثابتًا غير اشعاعي من الزركونيوم مع نسبة نيوترون / بروتون عادية (1.28) للعناصر من هذا الحجم:

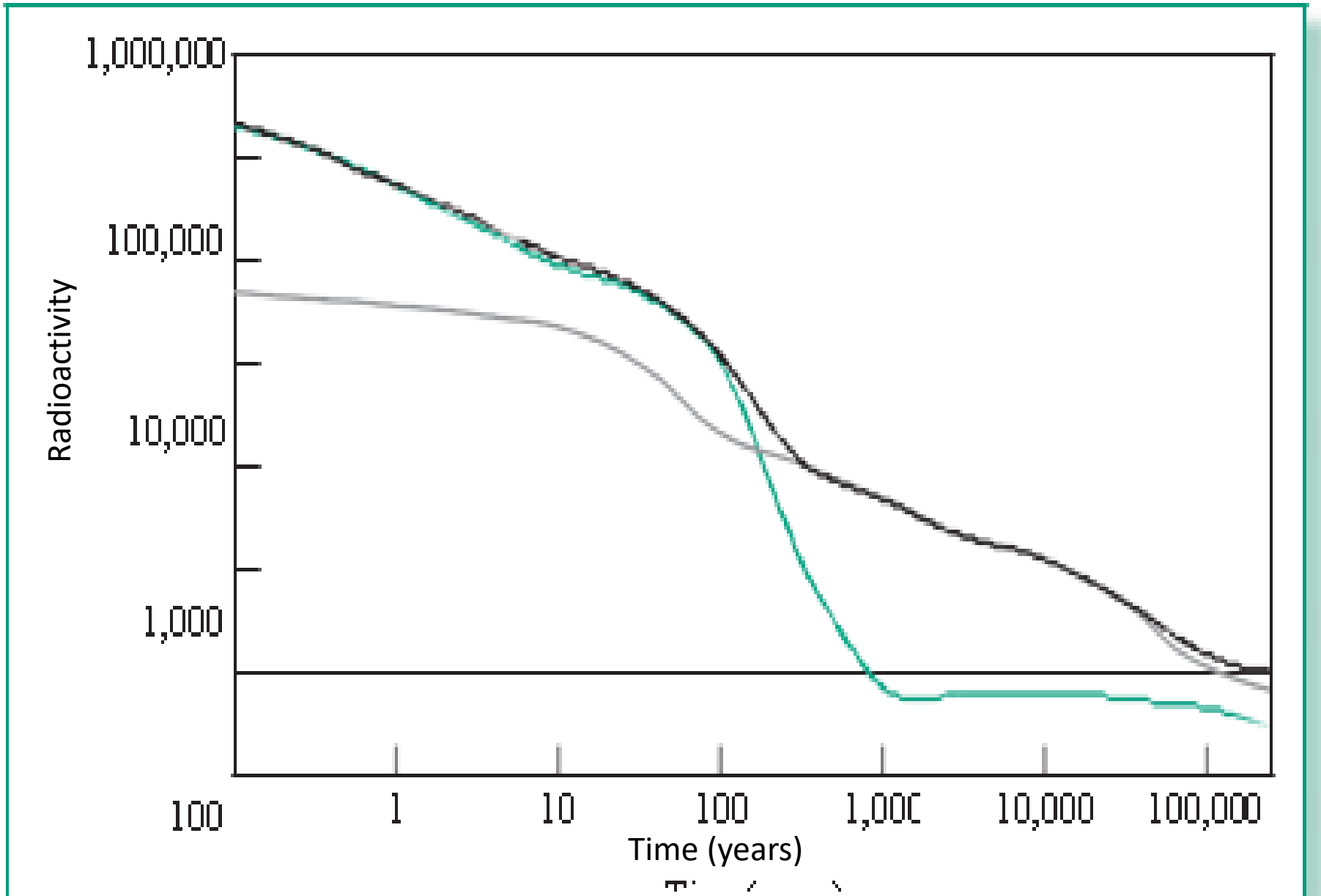
$$^{91}_{36}Kr \xrightarrow{-\beta} {}^{91}_{37}Rb \xrightarrow{-\beta} {}^{91}_{38}Sr \xrightarrow{-\beta} {}^{91}_{39}Y \xrightarrow{-\beta} {}^{91}_{40}Zr$$

# النشاط الإشعاعي في قضبان الوقود المستهلك

تكون قضبان الوقود عند إزالتها من المفاعل "مشعة" وكذلك "ساخنة" بسبب الحرارة التي ينتجها جسيمات بيتا المنبعثة من المنتجات الانشطارية ، وكذلك من جسيمات الفا من الأكتينيدات ، على الرغم من أن الانشطار قد توقف. تولد حزم قضبان الوقود المستهلك في البداية حوالي 6٪ من الحرارة التي تم إنتاجها في المفاعل ، على الرغم من أن هذا ينخفض إلى نسبة قليلة فقط بعد بضع ساعات وإلى حوالي 0.1٪ بعد عام. يمكن أن تصل درجات الحرارة إلى 1500 درجة مئوية ، وتدمر الأنابيب ، إذا لم يتم تبريد القضبان على الفور بعد إزالتها.

لتبريد قضبان الوقود المستهلك ، يتم غمرها في برك كبيرة من المياه المتحركة لعدة سنوات. لا يمتص الماء الحرارة فحسب ، بل يلتقط أيضًا معظم الإشعاعات التي تفلت أيضًا. تقع "حمامات السباحة" الكبيرة التي تضم قضبان الوقود المستنفد في موقع محطة توليد الكهرباء. على الصعيد العالمي ، هناك أكثر من 300،000 طن من قضبان الوقود المستهلك - حوالي ثلثها في الولايات المتحدة - في انتظار التغير النهائي ، والكثير منها مخزّن في برك.

ان الانخفاض في كمية النشاط الإشعاعي مع مرور الوقت من حزمة الوقود المستهلك النموذجية موضح بالخط الأسود في الشكل التالي ؛ لاحظ أن كلا المقياسين على الرسم البياني لوغاريتمي. في المئات من السنوات الأولى ، نشأ كل النشاط الإشعاعي تقريباً من المنتجات الانشطارية ذات الكتلة المتوسطة (منحنى أخضر داكن). نشاطهم يكتمل بشكل أساسي بعد الألفية. ومع ذلك ، فإن النشاط الإشعاعي من الأكتينيدات وبناتهم أبطأ كثيرا في الانخفاض ، ويصبح المصدر المهيمن بعد بضع مئات من السنين (منحنى رمادي فاتح). بسبب استمرار انبعاثات الأكتينيدات ، فإنه فقط بعد مرور بضع مئات آلاف من السنين ، انخفض مستوى النشاط الإشعاعي للقضبان دون ذلك من خام اليورانيوم (الخط الاسود المستقيم في الشكل البياني).

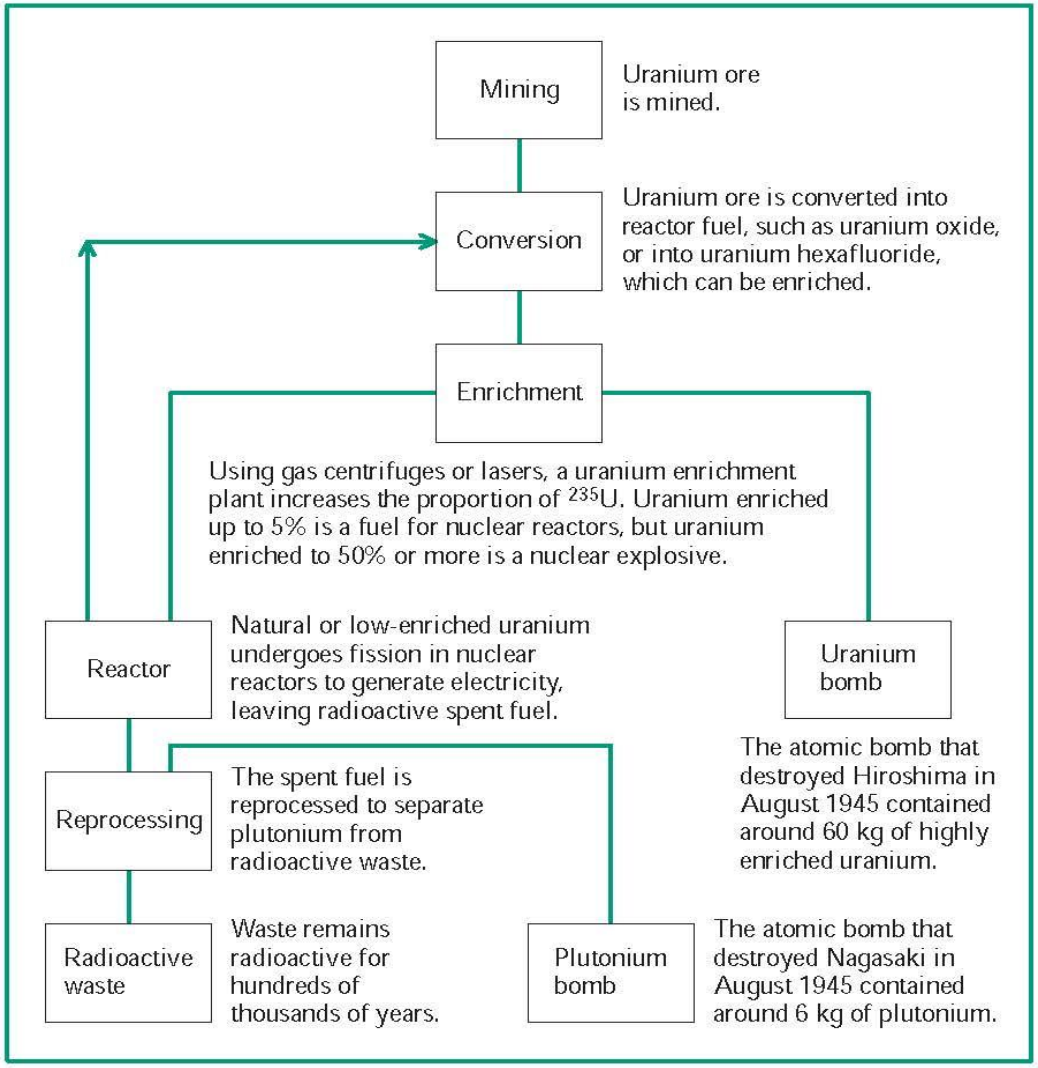

1,000,000
100,000
10,000
1,000
100
Radioactivity
1
10
100
1,000
10,000
100,000
Time (years)

بعد 10 سنوات ، يعود معظم النشاط الإشعاعي من قضبان الوقود المستنفد إلى السترونتيوم -90 ، (عمر النصف 29 سنة) ، وإلى السيزيوم 137 (عمر النصف من 30 سنة) ، وكلاهما له جسيمات بيتا مشعة. ويشكل تشتت السترونتيوم المشع والسيزيوم في البيئة مشكلة بيئية خطيرة. يمكن دمج أيونات كلا المعدنين في الجسم بسهولة لأن السترونتيوم والسيزيوم يحلان بسهولة محل العناصر المماثلة كيميائياً التي هي جزء لا يتجزأ من الأجسام الحيوانية ، بما في ذلك أجسام البشر.

ويتركز السترونتيوم ، وهو عنصر من المجموعة الثانية ، في العظام والأسنان ، ليحل محل أيونات الكالسيوم ، وهو أيضًا معدن المجموعة الثانية بشكل ايون ثنائي +2. يمكن لأيونات السيزيوم ، وهو عنصر من المجموعة الأولى ، أن تحل محل أيونات البوتاسيوم ، وهو من المجموعة الأولى وهو ليون احادي +1 ، وهي منتشرة في جميع خلايا الجسم. وبمجرد وجود هذه العناصر في الجسم ، فإن تفككها الإشعاعي ينتج جسيمات بيتا يمكن أن تلحق الضرر بالخلايا التي توجد بها أو بالقرب منها. لذلك يجب مراقبة النفايات المشعة من قضبان الوقود المستهلك لمحطات الطاقة النووية بعناية شديدة، حتى يتم إرساؤها في نهاية المطاف في بيئة آمنة لا يمكنها الهروب منها.

# المشاكل البيئية من وقود اليورانيوم

العديد من الخطوات في دورة الوقود النووي ، كما هو موضح في الشكل التالي تولد نفايات بيئية



# اليورانيوم الخام

الموردين الرئيسيين والمجهزين لخام اليورانيوم هم كندا وأستراليا وروسيا والنيجر وأوكرانيا وكازاخستان. أثناء تعدين اليورانيوم ، يحدث تلوث البيئة بالمواد المشعة. وبما أن اليورانيوم الطبيعي الذي يحدث بشكل طبيعي يتحلل ببطء إلى مواد أخرى مشعة أيضًا ، فإن خام اليورانيوم يحتوي على مجموعة متنوعة من العناصر المشعة. ونتيجة لذلك ، فإن الكمية الكبيرة من مواد النفايات التي تبقى بعد اليورانيوم يتم استخلاصها كيميائياً من الخام هي نفسها مشعة.

المواد المشعة التي تم تجميدها في خام الصخور الأصلي هي في شكل سائل والمخلفات بعد التعدين. وكما هو الحال في عمليات التعدين الأخرى ، عادة ما يتم حجز المخلفات السائلة في أحواض خاصة حتى تنفصل المواد الصلبة. يمكن أن يحدث تلوث المياه الجوفية المحلية إذا كانت هذه الحواجز تسرب أو تخترق. بالإضافة إلى ذلك ، عندما تتعرض المخلفات الصلبة للطقس اويتم ذوبانها جزئياً بسبب هطول الأمطار ، فإنها يمكن أن تلوث إمدادات المياه المحلية. الانبعاثات الغازية يمكن ان تهرب من النفايات السائلة.

ويمكن أن يؤدي تشييد المباني باستخدام مكبات النفايات للمخلفات الصلبة في أساسها إلى مشاكل ، حيث أن الرادون الناتج عن الاضمحلال الإشعاعي للراديوم في المخلفات يكون متحركاً إلى حد بعيد. وكما لوحظ سابقاً ، فإن غاز الرادون يمثل خطرًا خاصًا على عمال مناجم خام اليورانيوم ، حيث أن الغاز المشع موجود دائمًا في الخام ويتم إطلاقه في هواء المنجم. وبالفعل ، كان معدل الإصابة بسرطان الرئة بين عمال المناجم مرتفعاً بشكل خاص إلى أن تم تحسين تهوية المناجم للسماح بتغيرات أكثر في الهواء وبالتالي زيادة كفاءة التخلص من غاز الرادون المتراكم.

# الديوتيريوم والتريتيوم والمفاعلات المائية الثقيلة

يمكن لمفاعل CANDU استخدام اليورانيوم غير المخصب عن طريق استخدام الماء الثقيل بدلا من الماء العادي كوسيط ، لأن القيام بذلك يقلل من احتمال امتصاص النيوترونات وبالتالي عدم إتاحته لمواصلة التفاعل التسلسلي. يحتوي الماء الثقيل على جزء أعلى من المعتاد من الديوتيريوم $^{2}H$ ، وهو نظير غير مشع بشكل طبيعي (0.02 ٪ وفرة نسبية) من الهيدروجين. يتم امتصاص بعض النيوترونات الناتجة عن الانشطار بواسطة نوى الديوتيريوم ، وتنتج التريتيوم $^{3}H$:

$$^{2}H + {}^{1}n \longrightarrow {}^{3}H$$

في الواقع ، تنتج مفاعلات CANDU حوالي 30 ضعفاً من التريتيوم كما تفعل مفاعلات الماء الخفيف. تزداد مستويات التريتيوم في ماء المبرد مع مرور الوقت ، حيث يتراكم نتاج هذا التفاعل. تؤدي الخسائر الصغيرة في سائل التبريد من المفاعلات إلى إطلاق التريتيوم في البيئة المائية.

التريتيوم مشع ، باعث منخفض لجسيمات بيتا مع نصف عمر 12.3 سنة. أقل من 1٪ من التريتيوم في البيئة الحالية يحدث بشكل طبيعي. والباقي ينجم عن تجارب الأسلحة النووية في العقود الماضية اضافة الى الإطلاقات من مفاعلات الطاقة النووية. تصنف وكالة حماية البيئة الأمريكية التريتيوم كمسرطن بشري ؛ هناك أدلة على أن التريتيوم مولد طفرات وراثية ومشوِّه (يسبب عيوب خلقية). الحد الأقصى حسب تصنيف وكالة حماية البيئة الاميركية لتركيزالتريتيوم في مياه الشرب هو 740 بيكريل لكل لتر ؛ وفي كندا هو ما يقرب من 10 أضعاف ذلك. تحتوي مياه بحيرة هورون وبحيرة أونتاريو ، التي تقع على طول شواطئها العديد من مفاعلات CANDU ، على حوالي 7 بيكيريل لكل لتر من التريتيوم ، مقارنة بـ 2 بيكيريل لكل لتر في بحيرة سوبيريور ، التي لا يوجد بها مفاعلات نووية قريبة.

# اليورانيوم المنضب او المستنفد

اليورانيوم المستنفد هو ما يتبقى من اليورانيوم الطبيعي مرة واحدة معظمه نظيره $^{235}U$، وdستخدم في مفاعلات الطاقة وفي صناعة الأسلحة النووية ، كذلك يتم استخراج $^{234}U$ منه. في الواقع ، يتم إنتاج حوالي 200 كيلوغرام من اليورانيوم المستنفد مقابل كل كيلوجرام من العنصر الغني للغاية ، حيث أن اليورانيوم هو فقط 0.7٪ من $^{235}U$. ولأن اليورانيوم كثيف جداً (70٪ أكثر كثافة من الرصاص) ، فإنه مفيد لصنع أسلحة خارقة للدروع ، وخاصة المقذوفات المستخدمة ضد الدبابات. عندما تضرب القذائف أهدافاً صلبة ، يبدأ اليورانيوم بالاشتعال ويخلق الاحتراق سحب من الغبار تحتوي على أوكسيد اليورانيوم. يستقر هذا الغبار وتتلوث التربة في المنطقة ، ولكن قبل ذلك ، يمكن استنشاقه من قبل الناس في المنطقة المجاورة. بما أن معظم الـ $^{235}U$ تم استخلاصها من اليورانيوم (لاستخدامها في القنابل وإنتاج الطاقة) ، وبما أن $^{235}U$ لديها مثل هذا العمر الطويل جدًا ، فإن اليورانيوم المستنفد يكون أقل إشعاعًا من حيث انبعاثات جسيمات الفا (بمقدار النصف تقريبًا) من العنصر الطبيعي. ومع ذلك ، فإن انبعاث جسيمات بيتا من بنات $^{235}U$ لا تزال موجودة. وقد تم الإعراب عن القلق بشأن تأثير النشاط الإشعاعي المتبقي من اليورانيوم المنضب على الجنود والمدنيين المعرضين له أثناء الحرب.

## القنابل القذرة

القنبلة القذرة عبارة عن متفجرات تقليدية كيميائية ممزوجة بالمواد المشعة التي ستتوزع على مساحة واسعة نتيجة انفجار القنبلة. ويمكن للقنابل القذرة أن تصنع من قبل الإرهابيين ، باستخدام المواد المشعة المسروقة من المستشفيات أو من معاهد البحوث ، أو التي يتم شراؤها في السوق السوداء من إمدادات ناشئة في بلدان تعرضت لخلل بفقدان الأمن في منشآتها للطاقة النووية. على الرغم من أن الخطر الفعلي على صحة الإنسان من تشتيت مواد القنابل القذرة في البيئة قد يكون صغيراً جداً ، إلا أن الخوف الذي ستولده على الجمهور ، وعلى حساب إزالة التلوث في مناطق واسعة سيكون كبيراً.

ومن التهديدات الإرهابية المماثلة ، التعطل المتعمد للطائرات المختطفة في محطات الطاقة النووية أو في حاويات الوقود النووي. ومع ذلك ، ينكر معظم المديرين التنفيذيين في صناعة الطاقة النووية إمكانية اختراق محطات توليد الطاقة أو الحاويات ، وإطلاق النشاط الإشعاعي في مثل هذه الاعمال الضارة.