

24 Energia jądrowa?

Popelniliśmy błąd, stawiając znak równości pomiędzy energią nuklearną a bronią nuklearną, tak jakby wszystko co jądrowe, było złe. To jakby medycynę nuklearną zrównać z bronią nuklearną.

Patrick Moore,
były dyrektor Greenpeace International

Energia jądrowa występuje w dwóch smakach. Reakcję o pierwszym smaku, czyli rozszczepienie jądra atomowego, umiemy wykorzystywać w elektrowniach – do rozszczepienia jako paliwa używa się uranu, wyjątkowo ciężkiego pierwiastka. Nie umiemy wykorzystywać w elektrowniach reakcji o drugim smaku, czyli syntezy (fuzji) jądrowej. W syntezie paliwem byłyby lekkie pierwiastki, w szczególności wodor. Reakcja rozszczepienia polega na rozbiciu ciężkich jąder na jądra o średniej wielkości, czemu towarzyszy uwolnienie energii. Synteza jądrowa polega na złączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe, co również uwalnia energię.

Zarówno rozszczepienie, jak i synteza mają pewną istotną właściwość: energia nuklearna zawarta w jednym atomie jest w przybliżeniu milion razy większa niż energia chemiczna zawarta w atomie innego paliwa. Oznacza to, że ilość paliwa i odpadów związana z procesem produkcji energii w reaktorze może być milion razy mniejsza niż ilość paliwa i odpadów w elektrowni na węgiel lub gaz o podobnej mocy.

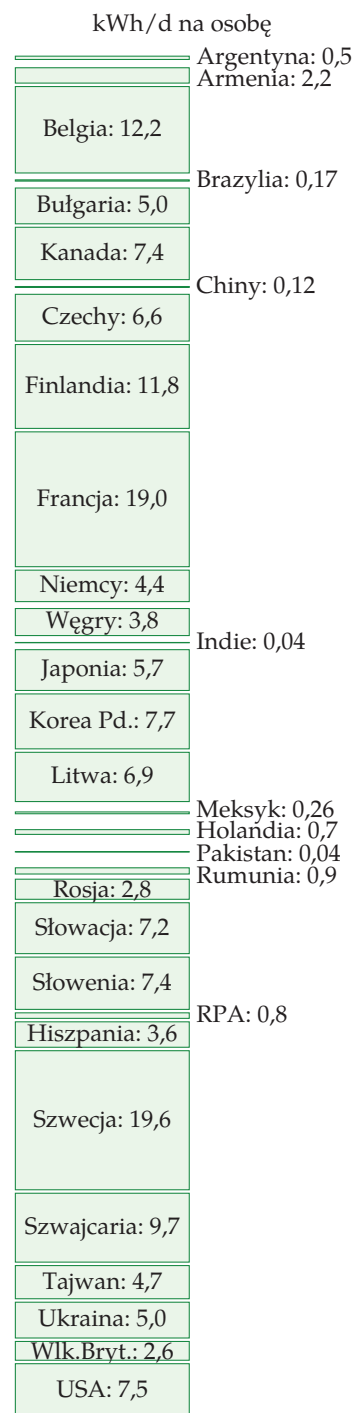
Nadajmy tym kwestiom ludzki wymiar. Ilość paliw kopalnych zużywanych przez „przeciętnego Brytyjczyka” wynosi około 16 kg dziennie – 4 kg węgla, 4 kg ropy i 8 kg gazu [statystyczny Polak zużywa codziennie 10 kg węgla, 1,8 kg ropy i 0,7 kg gazu – red.]

Oznacza to, że każdego dnia paliwa kopalne o tej masie są wydobywane z dziury w ziemi, przewożone, przetwarzane i spalane na nasze konto. Co roku ze spalania węgla i ropy na przeciętnego Brytyjczyka przypada 11 ton odpadu w postaci dwutlenku węgla – to 30 kg dziennie. W poprzednim rozdziale omówiliśmy pomysł polegający na wychwytywaniu dwutlenku węgla, sprężeniu go do formy stałej lub gazowej i przetransportowaniu gdzieś do miejsca składowania. Wyobraźmy sobie, że każdy z nas musi sam wychwycić i złożyć gdzieś swój dwutlenek węgla. 30 kg dwutlenku węgla dziennie to pełen plecak. I to każdego dnia.

Dla porównania ilość naturalnego uranu potrzebnego do wyprodukowania takiej samej ilości energii, ile dostarcza 16 kg paliw kopalnych, w standardowym reaktorze jądrowym wynosi 2 gramy (swoją drogą, owe 2 gramy to więcej niż jedna milionowa tych 16 kg dziennie, gdyż obecnie budowane reaktory spalają jedynie izotop ²³⁵U, który stanowi mniej niż 1% całości uranu). Pozyskanie owych 2 gramów uranu dziennie wymagałoby wydobywania jakichś 200 gramów rudy dziennie. Związane z tym odpady ważą ćwierć grama.

Emisja dwutlenku węgla na pojedynczego Polaka wynosi nieco mniej – 9 ton rocznie (25 kg dziennie) – odrobinę lżejszy plecak.

Strumienie paliw zasilających reaktor i opuszczających go odpadów są więc niewielkie w porównaniu do strumieni związanych z paliwami kopalnymi.



Rys. 24.1. Produkcja energii elektrycznej per capita w elektrowniach jądrowych w 2007 roku, w kWh na osobę dziennie, w każdym kraju dysponującym energią jądrową.

„Małe jest piękne”, jednak w przypadku odpadów jądrowych „małe” nie znaczy „bezproblemowe”. To raczej „pięknie mały” problem.

„Zrównoważona” energia z rozszczepienia jądrowego

Rys. 24.1. pokazuje ilość prądu wyprodukowanego globalnie przez elektrownie jądrowe w 2007 roku, w podziale na poszczególne kraje.

Czy energia jądrowa może być „zrównoważona”? Na moment odłóżmy na bok pojawiające się zazwyczaj pytania o bezpieczeństwo i składowanie odpadów. Kluczową kwestią jest to, jak długo możemy jeszcze rozszczepiać atomy. Jak duże są światowe złoża uranu i innych paliw rozszczepialnych? Czy uranu wystarczy już tylko na dziesięciolecie? A może jednak na setki lat?

W celu oszacowania „zrównoważonej” energii z uranu całkowite rezerwy uranu możliwego do pozyskania na lądzie i w morzu podzieliłem przez 6 mld ludzi i zadałem sobie pytanie: „W jakim tempie możemy tego używać, by wystarczyło na tysiąc lat?”.

Prawie cały możliwy do pozyskania uran znajduje się w morzach i oceanach, a nie w ziemi – woda morska zawiera 3,3 mg uranu na m³ wody, co daje 4,5 mld ton w skali globu. Określiłem uran w oceanach jako „możliwy do pozyskania”, co nieco mija się z prawdą – większość wód morskich jest raczej niedostępna, a oceaniczny pas transmisyjny robi pełną rundę w jakieś tysiąc lat. Co więcej, nikt jeszcze nie pochwalił się pozyskaniem uranu z wody morskiej na skalę przemysłową. Zrobimy więc odrębne rachunki dla dwóch przypadków: w pierwszym oszacujemy tylko zasoby uranu z kopalń, w drugim dodamy również uran oceaniczny.

Ruda uranu, którą da się wydobyć z ziemi po cenach niższych niż 130 dolarów za 1 kg uranu, to jedna tysięczna tych 4,5 mld ton. Jeżeli ceny pójdą w górę, powyżej 130 dolarów, opłacalne stanie się pozyskiwanie uranu ze złóż fosforanów o niskiej koncentracji uranu. Pozyskiwanie uranu z fosforanów jest całkowicie wykonalne, przed 1998 rokiem robiono to w USA i w Belgii. W celu oszacowania zasobów uranu kopalnego zsumuję konwencjonalne rudy uranu i fosforany, co daje zasoby całkowite rzędu 27 mln ton uranu (rys. 24.2).

Rozważymy dwie metody wykorzystania uranu w reaktorze: (a) szeroko stosowana metoda pojedynczego przejścia przez reaktor (*once-through method*) pozwala pozyskać energię głównie z rozszczepialnego izotopu ²³⁵U (który stanowi zaledwie 0,7% ogólnej masy uranu), a odrzuca nierozszczepialny ²³⁸U; (b) reaktory prędkie powielające (*fast breeder reactors*), droższe w budowie, przekształcają ²³⁸U do rozszczepialnego plutonu ²³⁹Pu i produkują mniej więcej 60 razy więcej energii z uranu.

Reaktory pracujące w cyklu paliwowym pojedynczego przejścia używające uranu kopalnego

Elektrownia jądrowa o mocy **1 GW**, pracująca w cyklu paliwowym pojedynczego przejścia przez reaktor, zużywa **162 tony uranu rocznie**. Stąd też zasoby uranu, o których wiemy, możliwe do wydobycia z ziemi, podzielone między 6 mld ludzi, wystarczyłyby na tysiąc lat, o ile na każdego przypadnie **0,55 kWh energii dziennie**. To zrównoważone tempo wyczerpywania uranu pozwoliłoby zasilić zaledwie 136 elektrowni jądrowych i stanowi połowę obecnej produkcji. Bardzo możliwe, że moje szacunki są zaniżone – uranu jeszcze nie brakuje, nie ma więc zachęt do poszukiwań złóż, niewiele działań poszukiwawczych podjęto

	miliony ton uranu
Australia	1,14
Kazachstan	0,82
Kanada	0,44
USA	0,34
RPA	0,34
Namibia	0,28
Brazylia	0,28
Federacja Rosyjska	0,17
Uzbekistan	0,12
<hr/>	
Świat w sumie (zasoby konwencjonalne w ziemi)	4,7
<hr/>	
Fosforany	22
<hr/>	
Woda morska	4 500

Rys. 24.2. Rozpoznane, możliwe do wydobycia zasoby uranu. Górna część tabeli zawiera zasoby zidentyfikowane (*reasonably assured resources + inferred resources*) o koszcie wydobycia poniżej 130 dolarów za kg uranu – stan na 1 stycznia 2005 roku. To zasoby zidentyfikowane na obszarach, gdzie przeprowadzono poszukiwania. W zapasie jest jeszcze 1,3 mln ton zubożonego uranu, produktu ubocznego przetwarzania uranu.



Fot. 24.3. Robotnicy wsuwają pręty paliwowe z uranem do reaktora z moderatorem grafitowym (X-10 Graphite Reactor).

od lat 80-tych XX w, może więc kolejne złoża czekają na odkrycie. W istocie, opracowanie opublikowane w 1980 roku szacowało, że zasoby rud o niskiej zawartości uranu są ponad tysiącrotnie większe niż 27 mln ton założonych tutaj przed chwilą.

Czy obecny sposób wykorzystania kopalnego uranu w reakcji pojedynczego przejścia można uznać za zrównoważony? Trudno powiedzieć z uwagi na brak pewności co do wyników przyszłych poszukiwań uranu. Z pewnością, przy obecnym tempie zużycia energii jądrowej, reaktory pojedynczego przejścia mogą pracować jeszcze przez setki lat. Gdybyśmy jednak chcieli 40-krotnie zwiększyć moc w elektrowniach jądrowych na świecie po to, by odejść od paliw kopalnych i poprawiać standard życia, może się okazać, że reaktory pojedynczego przejścia nie są technologią zrównoważoną.

Reaktory prędkie powielające, używające uranu kopalnego

Uran można wykorzystać 60 razy bardziej efektywnie w reaktorach prędkich powielających, które spalają cały uran – zarówno ^{238}U , jak i ^{235}U (w przeciwieństwie do reaktorów pojedynczego przejścia, które spalają głównie ^{235}U). O ile nie pozbywamy się zużytego paliwa, wyplutego przez reaktor pojedynczego przejścia, ten zubożony uran może zostać ponownie użyty – przepuszczenie uranu przez reaktor pojedynczego przejścia nie musi więc być marnotrawstwem. Gdybyśmy zużyli cały możliwy do wydobycia uran (oraz zapasy uranu zubożonego) w 60-krotnie bardziej efektywnych reaktorach prędkich powielających, uzyskalibyśmy **33 kWh na osobę dziennie**. Spektrum postaw wobec prędkich reaktorów powielających rozciąga się od „to niebezpieczna i nieudana technologia eksperymentalna, na którą trzeba machnąć ręką” do „możemy i natychmiast powinniśmy zacząć budować reaktory powielające”. Nie czuję się kompetentny, by oceniać ryzyko związane z technologią powielania, nie chcę również umieszczać twierdzeń natury etycznej obok faktów. Chcę jedynie pomóc w zrozumieniu liczb. Jedyne twierdzenie natury etycznej, które tutaj promuję, to: „Potrzebujemy planu, który się domyka”.

Reaktor pojedynczego przejścia pracujący na uranie morskim

Uran w morzach i oceanach, pozyskany co do grama i spożytkowany w reaktorach pojedynczego przejścia, odpowiada następującej wartości energii całkowitej:

$$\frac{4,5 \text{ mld ton na planetę}}{162 \text{ ton uranu na gigawatorok}} = 28 \text{ mln gigawatolat na planetę}$$

W jakim tempie możemy pozyskiwać uran z oceanów? Oceany cyrkulują powoli – połowa wód znajduje się w Pacyfiku, a głębokie wody pacyficzne cyrkulują w kierunku powierzchni przy pomocy oceanicznego pasa transmisyjnego w cyklu, który trwa 1600 lat. Wyobraźmy sobie, że pozyskamy 10% uranu na przestrzeni następujących 1600 lat. To tempo pozyskiwania rzędu 280 000 ton rocznie. W reaktorach pojedynczego przejścia dałoby to moc rzędu

$$2,8 \text{ mln gigawatolat} / 1600 \text{ lat} = 1750 \text{ GW}$$

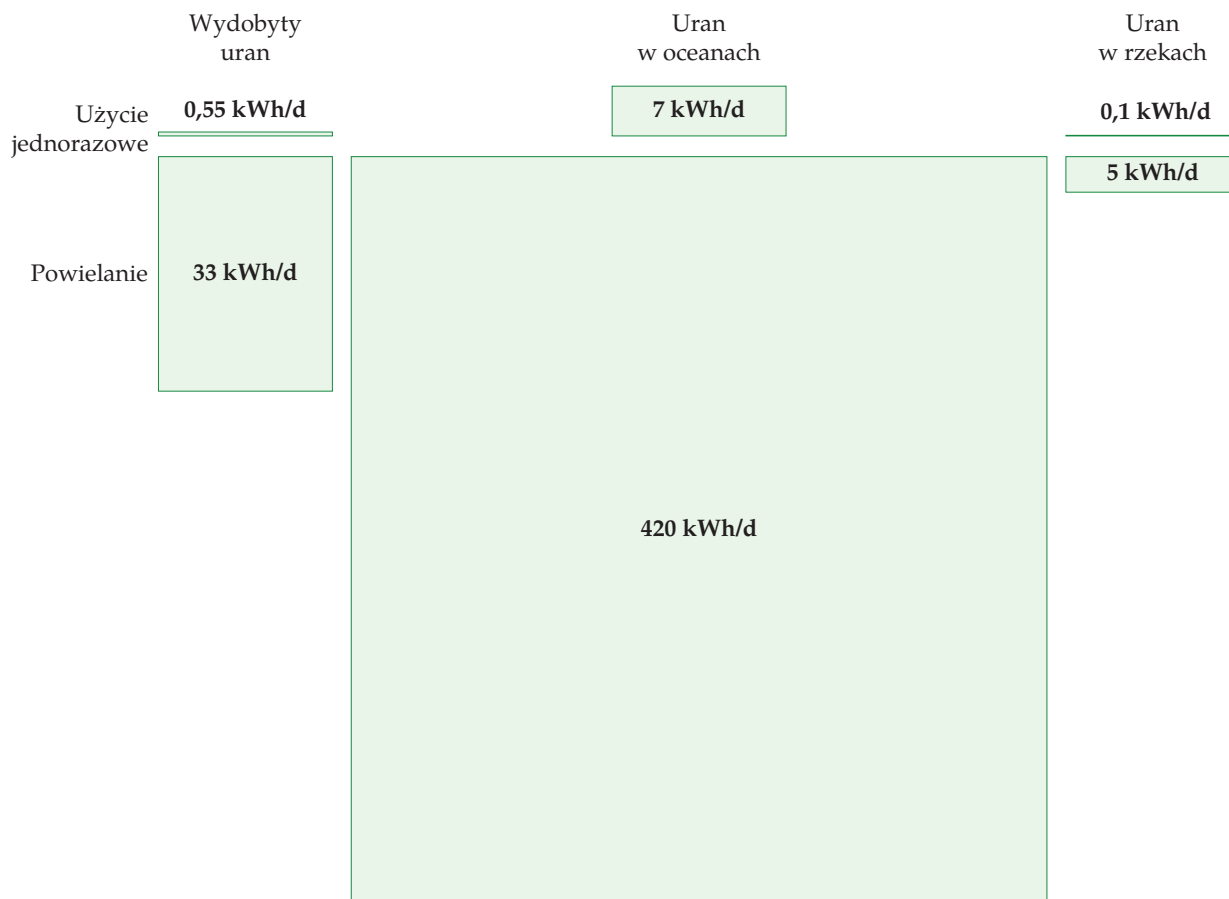
co podzielone między 6 mld ludzi daje **7 kWh na osobę dziennie** (obecnie moc energetyki jądrowej wynosi 369 GW, nasza liczba odpowiada więc 4-krotnemu wzrostowi w stosunku do stanu obecnego). Wnioskuje, że przy pozyskiwaniu



Fot. 24.4. Elektrownia jądrowa Three Mile Island



Fot. 24.5. Zakład Rozwoju Energetyki Jądrowej Dounreay (Nuclear Power Development Establishment), którego podstawowym zadaniem był rozwój technologii reaktorów prędkich powielających.
Fot. John Mullen



uranu z wód morskich i oceanicznych dzisiejsze reaktory pojedynczego przejścia można by uznać za opcję „zrównoważoną” – przy założeniu, że reaktory uranowe pokryją koszt energetyczny procesu pozyskania uranu z oceanu.

Reaktory prędkie powielające pracujące na uranie morskim

Skoro prędkie reaktory są 60-krotnie bardziej efektywne, pozyskanie tej samej ilości uranu z oceanów mogłoby dostarczyć **420 kWh dziennie na osobę**. Nareszcie zrównoważona liczba, która przebija obecne zużycie! Niestety, tylko przy jednoczesnym wsparciu dwóch technologii, z których jedna jest jeszcze w powijakach (pozyskiwanie uranu z oceanów), a druga jest niepopularna (reaktory prędkie powielające).

Uran z rzek

Do uranu z mórz i oceanów dołączmy uran z rzek. Rzeki dostarczają uranu w tempie 32 000 ton rocznie. Gdyby wykorzystać 10% tego potencjału, paliwa wystarczyłoby na 20 GW w reaktorach pojedynczego przejścia albo 1200 GW w prędkich reaktorach powielających. Reaktory prędkie powielające dostarczyłyby **5 kWh na osobę dziennie**.

Wszystkie te liczby podsumowujemy na rys. 24.6.

Rys. 24.6. „Zrównoważona” energia z uranu. Dla porównania, produkcja energii z atomu w skali globu wynosi obecnie 1,2 kWh na osobę dziennie. Produkcja energii jądrowej w Wielkiej Brytanii, która niegdyś wynosiła 4 kWh na osobę dziennie, dzisiaj spada.

A co z kosztami?

Jak zwykle w tej książce, w głównych obliczeniach raczej pomijam rachunek ekonomiczny. Niemniej jednak, z uwagi na to, że potencjał mocy opartej na uranie morskim jest jednym z największych na naszej liście „zrównoważonej” produkcji, warto przeanalizować, czy te wartości znajdują jakiegokolwiek uzasadnienie ekonomiczne.

Badacze japońscy wynaleźli technologię pozyskiwania uranu z wody morskiej kosztującą 100–300 dolarów za kilogram uranu w stosunku do obecnego kosztu około 20 dolarów za kg uranu z rudy. Z uwagi na to, że uran zawiera znacznie więcej energii w jednej tonie niż paliwa tradycyjne, ten pięcio- czy nawet piętnastokrotny wzrost kosztu uranu miałby niewielki wpływ na koszt energii jądrowej – cena energii pozyskanej z atomu zależy przede wszystkim od kosztu wybudowania i likwidacji elektrowni jądrowej, a nie od ceny paliwa. Nawet cena 300 dolarów za kg zwiększyłaby koszt energii jądrowej o zaledwie 1,5 grosza na kWh. Koszt pozyskania uranu można by zmniejszyć, gdyby woda morską znalazła jeszcze inne zastosowanie – na przykład chłodziłaby elektrownię.

Jeszcze nie jesteśmy w domu – czy japońska technologia może być użyta na skalę przemysłową? Jaki jest koszt energetyczny pozyskania uranu z wody? W japońskim eksperymencie trzy klatki wypełnione przyciągającym uran absorbentem ważącym 350 kg zgromadziły „ponad 1 kg tzw. żółtego ciasta (70–90% tlenek uranu U₃O₈), w 240 dni”, co odpowiada 1,6 kg rocznie. Klatki miały powierzchnię przekroju poprzecznego 48 m². By zasilić 1-gigawatową elektrownię jądrową z reaktorem pojedynczego przejścia, potrzebujemy 160 000 kg uranu rocznie, czyli 100 000 razy więcej niż w japońskim eksperymencie. Gdybyśmy po prostu zwiększyli produkcję w japońskiej technologii, która pasywnie pozyskuje uran z morza, moc rzędu 1 GW wymagałaby wykorzystania przestrzeni absorpcyjnej o powierzchni 4,8 km² oraz absorbentu o wadze 350 000 ton – to więcej niż waży stal w samym reaktorze. Spróbujmy nadać tym wielkim liczbom ludzki wymiar – gdyby uran dostarczał, dajmy na to, 22 kWh na osobę dziennie, każdy reaktor o mocy 1 GW obsługiwałby 1 mln ludzi, a na każdego z tych ludzi przypadałoby 0,16 kg uranu rocznie. A zatem obsługa każdej z tych osób wymagałoby 1/10 japońskiej instalacji eksperymentalnej, o wadze 35 kg na osobę i przestrzeni absorpcyjnej 5 m² na osobę. Pomysł budowania takich instalacji pozyskiwania uranu jest skalą zbliżony do pomysłu, by „każdy miał swoje 10 m² paneli słonecznych” albo by „każdy miał swoją jednotonową ciężarówkę oraz specjalne miejsce parkingowe”. Wielkie inwestycje to i owszem, ale nie absurdalnie wielkie.

To były obliczenia dla reaktora pojedynczego przejścia. W przypadku reaktorów prędkich powielających potrzeba 60 razy mniej uranu, waga kolektora uranu na osobę wyniosłaby więc 0,5 kg.

Tor

Tor jest pierwiastkiem radioaktywnym podobnym do uranu. Niegdyś używano go do produkcji koszulek żarowych używanych w lampach gazowych. W skorupie ziemskiej jest go trzy razy więcej niż uranu. Gleby zazwyczaj zawierają około 6 cząstek na milion (ppm) toru, a niektóre minerały – 12% tlenku toru. Woda morska zawiera tego pierwiastka mało, jako że tlenek toru nie rozpuszcza się w wodzie. Tor można spalić całkowicie nawet w prostym reaktorze (inaczej niż w przypadku standardowych reaktorów uranowych, które zużywają

Kraj	Rezerwy (1000 ton)
Turcja	380
Australia	300
Indie	290
Norwegia	170
USA	160
Kanada	100
RPA	35
Brazylia	16
Inne kraje	95
Świat w sumie	1 580

Rys. 24.7. Rozpoznane światowe zasoby toru w monocyte (których wydobycie jest opłacalne).

zaledwie 1% uranu naturalnego). Tor wykorzystywany jest w indyjskich reaktorach nuklearnych. Kiedy wyczerpią się rudy uranu, tor stanie się najprawdopodobniej dominującym paliwem jądrowym.

Reaktory zasilane torem dostarczają 3,6 mld kWh ciepła na tonę toru, co oznacza, że reaktor o mocy 1 GW potrzebuje około 6 ton toru rocznie, przy założeniu, że sprawność generatorów wynosi 40%. Światowe zasoby toru szacowane są na około 6 mln ton – cztery razy więcej niż rozpoznane rezerwy pokazane w tabeli 24.7. Podobnie jak w przypadku uranu, te zasoby mogą być niedoszacowane, z uwagi na niskie obecnie zainteresowanie pracami poszukiwawczymi. Załóżmy, podobnie jak w przypadku uranu, że owe zasoby, podzielone równo przez 6 mld ludzi, mają nam wystarczyć na ponad tysiąc lat – tak „zrównoważona” produkcja energii da nam **4 kWh na osobę dziennie**.

Alternatywny reaktor torowy, tzw. „wzmacniacz energii” lub „układ sterowany akceleratorem”(ADS) według szacunków jego wynalazców – laureata nagrody Nobla Carla Rubbia i jego zespołu – może przekształcić 6 mln ton toru w 15 000 terawatolat energii, czyli 60 kWh na osobę dziennie przez tysiąc lat. Zakładając sprawność przekształcania w energię elektryczną rzędu 40%, zapewniliby to 24 kWh na osobę dziennie przez tysiąc lat. Co więcej, odpady ze wzmacniacza energii byłyby znacznie mniej radioaktywne. Zdaniem Rubbia i jego współpracowników w swoim czasie opłaci się wydobywać znacznie więcej toru niż obecnie szacowane 6 mln ton. Jeżeli ich prognoza (wydobycie 300 razy większe) jest słuszna, wówczas tor wraz ze wzmacniaczem energii mogłyby zapewnić 120 kWh na osobę dziennie przez najbliższe 60 000 lat.

Wykorzystanie terenu

Wyobraźmy sobie, że Wielka Brytania na serio zaczyna odchodzić od paliw kopalnych i buduje masę nowych reaktorów, nawet jeżeli nie będzie to „zrównoważone”. Czy wszystkie reaktory potrzebne do znacznego uniezależnienia transportu i ciepłownictwa od węgla zmieszczą się w Wielkiej Brytanii? Musimy znać wartość mocy na jednostkę powierzchni elektrowni jądrowej, a ta wynosi około $1\,000\text{ W/m}^2$ (rys. 24.10). Wyobraźmy sobie, że w elektrowni jądrowej produkujemy 22 kWh na osobę dziennie – to w sumie 55 GW (mniej więcej tyle, ile w energetyce jądrowej we Francji), które mogłyby być dostarczone przez 55 elektrowni jądrowych, każda zajmowałaby 1 km^2 . To mniej więcej 0,02% powierzchni kraju. Elektrownie wiatrowe o tej samej mocy średniej potrzebowałyby 500 razy więcej przestrzeni – 10% kraju. Gdyby elektrownie jądrowe sytuować parami wzdłuż wybrzeża (o długości około 3 000 km), wówczas mielibyśmy dwie elektrownie na 100 km. Chociaż wymagana powierzchnia jest raczej skromna, owe elektrownie zajęłyby 2% wybrzeża (2 kilometry z każdych stu).

Założmy, że w Polsce również pozyskujemy z atomu 22 kWh na osobę dziennie. To w sumie 34 GW, dostarczone na przykład przez 34 elektrownie jądrowe o mocy 1 GW, z których każda zajmuje 1 km^2 . To 0,01% powierzchni kraju. Elektrownie wiatrowe o tej samej mocy średniej zajęłyby 7% kraju.

	Wydobyty tor
Reaktor konwencjonalny	4 kWh/d
Reaktor z akceleratorem	24 kWh/d

Rys. 24.8. Potencjał toru

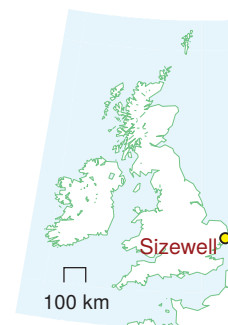
Ekonomia rozbiórki

Jaki jest koszt likwidacji i rozbiórki elektrowni jądrowych? Agencja ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych dysponuje rocznym budżetem 2 mld funtów na następne 25 lat. Przemysł jądrowy sprzedawał każdemu Brytyjczykowi 4 kWh dziennie przez około 25 lat, z czego wynika, że koszt po stronie Agencji ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych wynosi 2,3 p/kWh (10 groszy/kWh). To szczodre subsydium, trzeba jednak powiedzieć, że nie tak szczodre, jak dotacje do energii z morskich farm wiatrowych (ponad 30 groszy/kWh).

Dla Polski, dopiero planującej rozpoczęcie programu jądrowego, istotne są również koszty wybudowania elektrowni jądrowych i dostosowania systemu elektroenergetycznego. Całkowity koszt budowy proponowanych elektrowni może wynieść nawet 110 mld zł. Dodatkowo trzeba będzie przystosować sieci przesyłowe i rozdzielcze (szacowania zazwyczaj dla źródeł wielkiej mocy nakłady te wynoszą około 70% nakładów na same elektrownie).

Koszt wybudowania 1 000 MW mocy szacuje się na 13–21 mld zł. Koszt wybudowania adekwatnej liczby farm wiatrowych jest dzisiaj zbliżony – wynosi około 16 mld zł dla 1400 turbin wiatrowych o mocy 2 MW (dostarczających średnią moc 700 MW, porównywalną do 1000-megawatowego bloku jądrowego).

Przejdźmy do kosztu likwidacji elektrowni. Tutaj warto oprzeć się na doświadczeniach naszego sąsiada – Litwy. Koszt likwidacji i rozbiórki elektrowni jądrowej w Ignalinie na przestrzeni lat 1999–2014 szacuje się na 2,6 mld euro (10,5 mld zł).



Fot. 24.9. Elektrownia jądrowa Sizewell. Blok Sizewell A (na zdjęciu bliżej) o mocy 420 MW, został zamknięty pod koniec 2006 roku. Sizewell B (na zdjęciu z tyłu) ma moc 1,2 GW.
Fot. William Connolley

Bezpieczeństwo

Kwestia bezpieczeństwa energetyki jądrowej na Wyspach wciąż budzi niepokój. W zakładzie przetwarzania wypalonego paliwa jądrowego w technologii THORP w Sellafield, wybudowanym w 1994 kosztem 1,8 mld funtów, doszło do nasilającego się z czasem wycieku z pękniętej rury między sierpniem 2004 a kwietniem 2005 roku. Na przestrzeni tych 8 miesięcy **85 000 litrów** cieczy zawierającej wzbogacony uran wyciekło do systemu rynien, wyposażonego w mechanizmy bezpieczeństwa, które miały błyskawicznie wykrywać każdy wyciek powyżej **15 litrów**. Niestety wyciek nie został zauważony, bowiem obsługa nie dokończyła kontroli działania systemów bezpieczeństwa, a poza tym i tak miała w zwyczaju ignorować alarmy.

System bezpieczeństwa składał się z kilku elementów. Niezależnie od usterki systemu alarmowego rutynowe pomiary bezpieczeństwa cieczy w systemie rynien powinny wykryć nienormalną obecność uranu w ciągu miesiąca od momentu powstania wycieku. Niestety operatorzy często zarzucali rutynowe pomiary, bo mieli co innego na głowie, a kiedy już wykonali pomiar i wykryli odbiegającą od normy obecność uranu w rynnie (28 sierpnia 2004, 26 listopada 2004 oraz 24 lutego 2005 roku), nie podjęto żadnych działań.

Do kwietnia 2005 roku wyciekły **22 tony** uranu, a mimo to nie zadziałał żaden z systemów wykrywania wycieków. Wyciek w końcu wykryto w *księgowości* – gryzpiórki policzyły, że zakład opuszcza 10% mniej uranu niż dostarczył do przetworzenia klient! Dzięki Bogu, że prywatnej firmie przyświeca chęć



Rys. 24.10. Sizewell zajmuje mniej niż 1 km². Niebieska sieć ma długość 1 km. © Crown copyright; Ordnance Survey

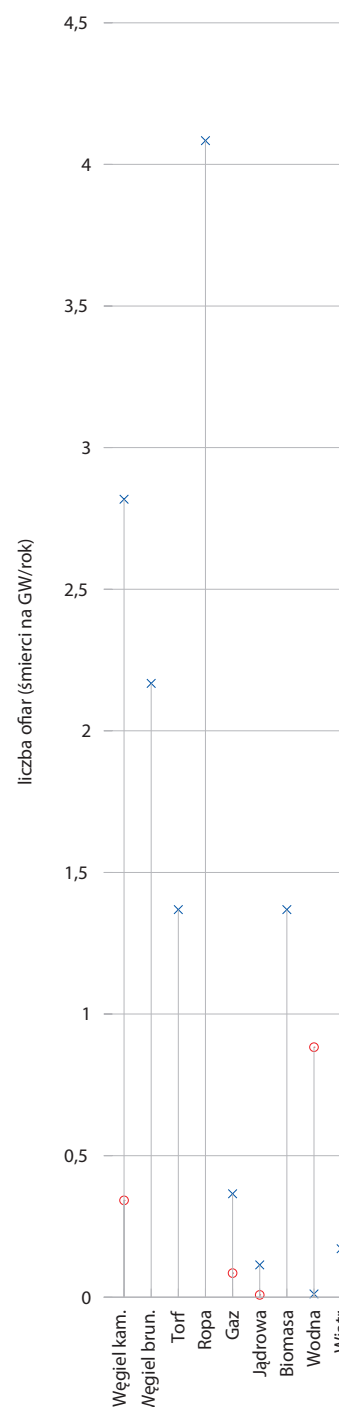
zysku! Słowa krytyki ze strony Głównego Inspektora Instalacji Nuklearnych były miażdżące: „Wydaje się, że obsługa zakładu pozwalała, by instrumenty stale działały w trybie alarmowym, zamiast reagować na alarmy i usuwać sygnalizowane usterki”.

Skoro już pozwalamy prywatnym firmom budować nowe reaktory, jak zapewnić respektowanie wysokich standardów bezpieczeństwa? Nie mam pojęcia.

Mimo wszystko nie powinniśmy mdleć ze strachu na myśl o atomie. Energetyka jądrowa nie jest niewyobrażalnie niebezpieczna. Jest po prostu niebezpieczna, tak jak niebezpieczne są kopalnie węgla, magazyny paliwa, spalanie paliw kopalnych i turbiny wiatrowe. Nawet jeżeli nie mamy gwarancji, że wypadki w elektrowniach jądrowych już się nigdy nie zdarzą, ocenę atomu warto oprzeć na obiektywnym porównaniu z innymi źródłami energii. Weźmy elektrownie węglowe, które narażają społeczeństwo na promieniowanie radioaktywne, ponieważ pył węglowy zazwyczaj zawiera uran. W istocie, według opracowania opublikowanego w piśmie „Science”, Amerykanie żyjący poblizu elektrowni węglowych są narażeni na wyższe dawki promieniowania niż ci żyjący w poblizu elektrowni jądrowych.

W celu porównania zagrożeń związanych z różnymi źródłami energii potrzebujemy nowej jednostki miary. Wybieram zgon na gigawatorok. Spróbuję teraz wyjaśnić, co mam na myśli, mówiąc, że dane źródło energii ma wskaźnik śmiertelności w wysokości 1 zgon na gigawatorok. 1 gigawatorok to energia wyprodukowana przez elektrownię o mocy 1 GW, pracującą z pełną mocą przez 1 rok. Zużycie energii na Wyspach wynosi około 45 GW lub też 45 gigawatolat rocznie. Gdybyśmy więc pozyskiwali energię ze źródeł o wskaźniku śmiertelności 1 zgon na gigawatorok, oznaczałoby to, że system podaży energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii zabija rocznie 45 osób. Dla porównania – co roku na brytyjskich drogach ginie 3000 osób. Jeżeli więc *nie* prowadzisz kampanii na rzecz likwidacji dróg, mógłbyś dojść do wniosku, że 1 zgon na gigawatorok, jakkolwiek smutny to fakt, jest całkiem do przyjęcia. Oczywiście wolelibyśmy 0,1 zgonu na gigawatorok, niestety błyskawicznie zdajemy sobie sprawę, że produkcja energii z paliw kopalnych musi wiązać się z ludzkim kosztem wyższym niż 0,1 zgonu na gigawatorok. Weźmy tylko wypadki na platformach wiertniczych, helikoptery zaginione na morzu, pożary rurociągów, wybuchy w rafineriach i wypadki w kopalniach węgla. W Wielkiej Brytanii co roku wydarzają się dziesiątki wypadków w łańcuchu produkcji energii z paliw kopalnych.

Przeanalizujemy rzeczywiste wskaźniki śmiertelności całego wachlarza źródeł energii elektrycznej. Różnice między poszczególnymi krajami są znaczne. Na przykład w Chinach wskaźnik śmiertelności w kopalniach węgla jest 50-krotnie wyższy niż w większości krajów. Rys. 24.11 prezentuje wyniki opracowania Paul Scherrer Institute oraz projektu Unii Europejskiej pod nazwą ExternE, gdzie dokonano kompleksowych szacunków wszystkich skutków produkcji energii. Według obliczeń Unii Europejskiej węgiel kamienny i brunatny oraz ropa mają najwyższe wskaźniki śmiertelności, następną jest energia z torfu i biomasy, ze wskaźnikiem powyżej 1 zgonu na gigawatorok. Najlepiej wypadają atom i wiatr, ze wskaźnikiem poniżej 0,2 zgonu na gigawatorok. W opracowaniu Unii Europejskiej najlepiej wypada hydroenergetyka, która jest jednak gorzej pozycjonowana przez Paul Scherrer Institute, z uwagi na inny dobór badanych krajów.



Rys. 24.11. Wskaźniki śmiertelności dla poszczególnych technologii produkcji prądu.

X: szacunki Unii Europejskiej w ramach projektu ExternE.
O: Paul Scherrer Institute

Energia jądrowa bezpieczna z natury

W wyniku presji zaniepokojonej opinii publicznej inżynierowie zaprojektowali szereg reaktorów o podwyższonych parametrach bezpieczeństwa. Elektrownia w technologii GT-MHR jest podobno bezpieczna z natury, co więcej, ma większą sprawność przekształcania ciepła w energię elektryczną niż konwencjonalne elektrownie jądrowe [gt-mhr.ga.com].

Mity i nieporozumienia

Powszechnie wskazuje się na dwie wady energetyki jądrowej – koszty budowy oraz odpady. Przeanalizujemy niektóre aspekty tych kwestii.

Wybudowanie elektrowni jądrowej wymaga ogromnych ilości betonu i stali, co wiąże się z ogromną emisją CO₂.

Stal i beton użyte do budowy elektrowni jądrowej o mocy 1 GW mają ślad węglowy rzędu 300 000 t CO₂.

Rozkładając tę „ogromną” ilość na 25-letni okres funkcjonowania reaktora, otrzymamy intensywność emisji CO₂ w g CO₂ na kWh(e):

$$\begin{aligned} \text{intensywność emisji CO}_2 \\ \text{związana z budową elektrowni} &= \frac{300 \times 10^9 \text{ g}}{10^6 \text{ kWh} \times 220\,000 \text{ h}} \\ &= 1,4 \text{ g/kWh(e)} \end{aligned}$$

To znacznie mniej niż w przypadku elektrowni gazowej (najefektywniejszej z elektrowni na paliwa kopalne) o intensywności emisji 400 g CO₂/kWh(e). Międzypaństwowy Panel ds. Zmian Klimatu (IPCC) szacuje, że intensywność emisji CO₂ w całym cyklu życia elektrowni jądrowej (od budowy, poprzez przetwarzanie paliwa aż po likwidację i rozbiórkę) wynosi mniej niż 40 g CO₂/kWh(e) (Sims i in., 2007).

Nie chcę być źle zrozumiany – nie jestem pronuklearny. Jestem prorachunkowy.

Czy odpady z reaktorów jądrowych to wielki problem?

Jak stwierdziliśmy na początku tego rozdziału, ilość odpadów z reaktora jest stosunkowo niewielka. Pyły z elektrowni węglowej wyprodukowane w ciągu roku ważyłyby 4 mln ton (co odpowiada objętości mniej więcej 40 litrów na osobę na rok), natomiast odpady jądrowe z dziesięciu brytyjskich elektrowni jądrowych mają objętość zaledwie 0,84 litrów na osobę rocznie – czyli butelki wina na osobę rocznie (rys. 24.13).

Większość tych odpadów ma niski poziom radioaktywności. 7% to odpady średnioaktywne, a zaledwie 3% (25 ml rocznie) – wysokoaktywne.

Odpady wysokoaktywne to rzeczywiście paskudztwo. Zazwyczaj przez pierwsze 40 lat przetrzymywane są w reaktorze, gdzie są składowane w basenach z wodą i ochładzane. Po tych 40 latach poziom radioaktywności spada tysiąckrotnie. Potem spada nadal – jeżeli przetworzymy odpady, oddzielając uran i pluton do ponownego użycia w paliwie jądrowym, po 1000 lat te niegdyś wysokoaktywne odpady osiągną poziom radioaktywności charakterystyczny dla rudy uranu. Dlatego inżynierowie specjalizujący się w składowaniu odpadów powinni tworzyć plany zabezpieczania odpadów wysokoaktywnych na jakieś tysiąc lat.



Fot. 24.12. Elektrownia w Czarnobylu (u góry) oraz opuszczone miasto Prypeć, powstałe na potrzeby pracowników elektrowni (na dole).
Fot. Nik Stanbridge

Czy to trudne? Tysiąc lat to niewątpliwie bardzo długo w perspektywie trwania rządów i krajów! To jednak niewielkie ilości i, jak sądzę, niewielkie zmartwienie w porównaniu do wszystkich innych odpadów, które zrzucamy na barki przyszłych pokoleń. 25 ml odpadów jądrowych rocznie dałoby mniej niż 2 litry na przestrzeni życia pojedynczego Brytyjczyka. Nawet jeżeli pomnożymy to przez 60 mln ludzi, da się tym zarządzać – to 105 000 m³. Odpowiada to objętości 35 stadionów olimpijskich. Gdyby tak ułożyć te odpady w metrowej warstwie, to zajęłyby 0,1 km².

Istnieje już wiele miejsc, do których nie mamy dostępu. Nie wolno mi wchodzić do Twojego ogrodu. Ty nie powinieneś wchodzić do mojego. Żadne z nas nie będzie mile widziane w letniej rezydencji rodziny królewskiej w Balmoral. Ostrzeżenia „wstęp wzbroniony” są wszędzie. W ten czy inny sposób wyłączaliśmy z użytku Downing Street, lotnisko Heathrow, tereny wojskowe, opuszczone kopalnie. Czy tak trudno wyobrazić sobie, że wyłączamy z użytku na tysiąc lat jeszcze jeden kawałek gruntu, wielkości 1 km², zapewne gdzieś głęboko pod ziemią?

Porównajmy owe 25 ml wysokoaktywnych odpadów na osobę rocznie z innymi, tradycyjnymi odpadami, które obecnie produkujemy – odpady komunalne: 517 kg na osobę rocznie, odpady niebezpieczne: 83 kg na osobę rocznie.

Czasami porównuje się odpady jądrowe, które planujemy wygenerować, z już wygenerowanymi w istniejących reaktorach. Oto liczby dla Wielkiej Brytanii. Prognozowana objętość odpadów o wyższej aktywności do roku 2120, pozostałych po likwidacji istniejących bloków jądrowych, wyniesie 478 000 m³. Z tego 2% (około 10 000 m³) stanowić będą odpady wysokoaktywne (1290 m³) i zużyte paliwo (8150 m³), razem zawierające 92% materiału radioaktywnego. Budowa 10 nowych reaktorów jądrowych (10 GW) oznaczałaby dodatkowe 31 900 m³ zużytego paliwa, co zmieściłoby się w 10 basenach pływackich.

W Wielkiej Brytanii pracują obecnie reaktory o mocy 11 000 MW. W Polsce planuje się budowę dwóch elektrowni jądrowych o mocy 3000 MW każda. Jeśli plany te zostaną zrealizowane, na każdego Polaka przypadnie prawie tyle samo odpadów radioaktywnych, co na Brytyjczyka.

Jeżeli zaczniemy produkować niesamowite ilości energii z rozszczepienia i syntezy, czy nie pogłębimy problemu zmian klimatu – z uwagi na dodatkową energię, która zostanie uwolniona do środowiska?

To pytanie to kaszka z mlekiem. Całkiem łatwo na nie odpowiedzieć, jako że wszystko w tej książce wyraziliśmy za pomocą jednego zestawu jednostek. Najpierw przywołajmy główne liczby dotyczące globalnego bilansu energetycznego ze str. 28 – średnia moc promieniowania słonecznego zaabsorbowanego przez atmosferę, lądy i oceany wynosi 238 W/m²; podwojenie stężenia gazów cieplarnianych zwiększyłoby absorpcję ciepła netto o 4 W/m². Uważa się, że owo 1,7-procentowe zwiększenie pochłaniania ciepła to zła wiadomość dla klimatu. Moc promieniowania Słońca w 11-letnim cyklu słonecznym zmienia się w zakresie 0,25 W/m². Załóżmy teraz, że za 100 lat będzie nas 10 mld i że każdy cieszyć się będzie europejskim standardem życia, zużywając dziennie 125 kWh energii pozyskanej ze źródeł kopalnych, energetyki jądrowej lub geotermii. Na osobę przypadłoby 51 000 m² powierzchni Ziemi. Dzieląc moc/os. przez powierzchnię/os., dowiadujemy się, że wartość tej dodatkowej energii



Rys. 24.13. Brytyjskie odpady jądrowe, w przeliczeniu na osobę rocznie, mają objętość niewiele większą niż butelka wina.

wyprodukowanej przez człowieka wyniesie $0,1 \text{ W/m}^2$. To jedna czterdziesta tych 4 W/m^2 , które tak nas martwią, i nieco mniej niż zmienność słoneczna rzędu $0,25 \text{ W/m}^2$. Tak więc energia wyprodukowana przez człowieka *może w przyszłości* przyczynić się do globalnych zmian klimatu, jednak w bardzo niewielkim stopniu.

Mówi się, że budowa elektrowni jądrowych trwa zbyt długo, by faktycznie robiło to różnicę.

Problemy związane z budową elektrowni jądrowych są wyolbrzymiane za pomocą pewnej mylącej techniki prezentowania danych, którą nazwałem „magicznym polem gry”. Zgodnie z tą techniką, pozornie porównuje się dwie sprawy, ale gdzieś po drodze podstawa porównania ulega zmianie. Redaktor działu *Środowisko* dziennika „Guardian”, podsumowując wyniki raportu *Oxford Research Group*, napisał: „By energetyka jądrowa rzeczywiście przyczyniła się do redukcji globalnych emisji CO_2 na przestrzeni życia kolejnych dwóch pokoleń, powinno powstać prawie 3000 nowych reaktorów, a inaczej – jeden tygodniowo przez następne 60 lat. Cywilny program atomowy tej skali, obejmujący budowę i dostawy, to marzenie ściętej głowy, rzecz niewykonalna. Najwyższe zanotowane do tej pory tempo to 3,4 nowych reaktorów rocznie”. Rzeczywiście, 3000 jest jakby większe niż 3,4! Dzięki technice „magicznego pola gry” mamy tutaj przeskok i na skali **czasowej**, i na skali **przestrzennej**. Podczas gdy pierwsza liczba (3000 nowych reaktorów **na przestrzeni 60 lat**) to zapotrzebowanie w skali **całej planety**, druga liczba (3,4 nowych reaktorów **rocznie**) to maksymalne tempo budowy reaktorów w **pojedynczym kraju** (Francji)!

Uczciwiej byłoby pozostać przy porównaniu w skali planety. We Francji znajduje się 59 z 429 reaktorów działających na świecie, można więc założyć, że maksymalne tempo budowy reaktorów w skali globu to dziesięciokrotność wyniku francuskiego, to znaczy 34 nowe reaktory rocznie. Natomiast wymagane tempo (3000 nowych reaktorów na przestrzeni 60 lat) to 50 nowych reaktorów rocznie. Twierdzenie, że „Cywilny program atomowy tej skali, obejmujący budowę i dostawy, to marzenie ściętej głowy” to duża przesada. Tak, konieczny jest wysoki przyrost, ale tego samego rzędu co już obserwowany w przeszłości.

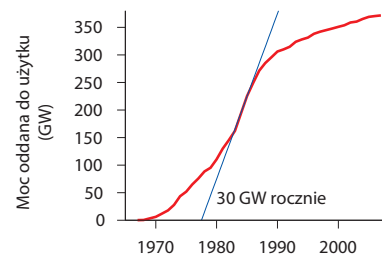
Czy sensownie zakładam, że maksymalne tempo rozwoju atomu na świecie wyniosło 34 nowe reaktory rocznie? Spójrzmy na dane. Rys. 24.14 pokazuje tylko te elektrownie jądrowe, które działały w roku 2007. Tempo rozwoju energetyki jądrowej było najwyższe w 1984 roku i wyniosło (chwila napięcia...) około 30 GW rocznie – około 30 reaktorów o mocy 1 GW. Jesteśmy w domu!

A co z syntezą jądrową?

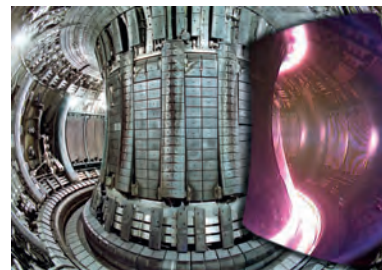
Mówimy, że chcemy nałapać słońca do pudełka. To piękna idea. Sęk w tym, że nie wiemy, jak zrobić to pudełko.

Sébastien Balibar, dyrektor ds. badań, CNRS

Synteza jądrowa jest w fazie spekulacji i eksperymentu. Nie możemy radośnie zakładać, że w zakresie syntezy nastąpi przełom, ale chętnie ocenię, ile energii dostarczy synteza, o ile ów przełom nastąpi.



Rys. 24.14. Całkowity przyrost mocy na świecie w elektrowniach jądrowych wybudowanych od roku 1967 i wciąż funkcjonujących. Tempo rozwoju energetyki jądrowej było najwyższe w 1984 roku i wyniosło 30 GW rocznie.



Fot. 24.15. Wnętrze eksperymentalnego reaktora termojądrowego. Na zdjęcie komory próżniowej JET nałożono zdjęcie plazmy, zrobione zwykłą kamerą telewizyjną.

Fot. EFDA-JET

Za najbardziej obiecujące uważa się dwie reakcje syntezy:

reakcja D-T, w której deuter łączy się z trytem, tworząc hel, oraz

reakcja D-D, w której deuter łączy się z deuterem.

Deuter, naturalnie występujący ciężki izotop wodoru, można pozyskać z wody morskiej. Tryt – jeszcze cięższy izotop wodoru, nie występuje naturalnie w dużych ilościach (ponieważ ma zaledwie 12-letni okres półtrwania), ale można go pozyskać z litu.

ITER to międzynarodowy projekt mający na celu opracowanie stabilnie działającego reaktora termojądrowego. Prototyp ITER będzie przeprowadzał reakcje D-T. Preferuje się D-T, bo wiąże się z uwolnieniem większej ilości energii, a poza tym do działania potrzebuje „zaledwie” temperatury rzędu 100 mln °C, podczas gdy reakcja D-D wymaga 300 mln °C (temperatura w środku Słońca wynosi 15 mln °C).

Oddajmy się fantazjom i załóżmy, że projekt ITER odniesie sukces. Ile zrównoważonej energii może nam zapewnić? Elektrownie wykorzystujące reakcję D-T, zasilane litem, znajdą się w kłopotcie, kiedy skończy się lit. Zanim to nastąpi, być może pojawią się inne wytwory futurologii – reaktory termojądrowe zasilane samym deuterem.

Owe futurystyczne źródła energii nazwę syntezą litu i syntezą deuteru, w oparciu o główne paliwo, które trzeba będzie zapewnić. Oszacujmy, ile energii może dostarczyć jedno i drugie źródło.

Synteza litu

Światowe rezerwy litu szacowane są na 9,5 mln ton w złożach rud. Gdyby całość tych rezerw spożytkować na syntezę na przestrzeni tysiąc lat, zapewniłoby to **10 kWh na osobę dziennie**.

Dodatkowo, lit można znaleźć w wodzie morskiej, gdzie osiąga stężenie 0,17 cząstek na milion (ppm). Szacuje się, że pozyskanie litu z wody morskiej w ilości 100 mln kg/rok wymaga energii rzędu 2,5 kWh(e) na gram litu. Jeżeli reaktory



Synteza
litowa:
10 kWh/d

Synteza litowa
(woda morska):
105+ kWh/d

Rys. 24.16. Synteza oparta na litie, zużywanym w sposób „zrównoważony”, mogłaby zaspokoić obecny poziom konsumpcji energii. Lit kopalny zapewniłby 10 kWh na osobę dziennie przez tysiąc lat, lit morski dostarczyłby 105 kWh na osobę dziennie przez ponad milion lat.

Rys. 24.17. Jeżeli uda się przeprowadzić syntezę opartą na deuterze, będzie to obfite źródło energii przez miliony lat. Skala tego diagramu została zmniejszona dziesięciokrotnie w pionie i w poziomie, by potencjał tej syntezy zmieścił się na stronie. Dla porównania, w tej samej skali prezentujemy czerwony i zielony słupek z rys. 18.1.

termojądrowe z grama litu wyprodukują 2300 kWh(e), da to 105 kWh na osobę dziennie (przy populacji wielkości 6 mld). Przy takim tempie eksploatacji litu w oceanach wystarczy na ponad milion lat.

Synteza deuteru

O ile naukowcom i inżynierom uda się przeprowadzić reakcję D-D, mamy kilka bardzo dobrych wiadomości. W każdej tonie wody jest 33 g deuteru, a energia uwolniona z syntezy zaledwie jednego grama deuteru to niewyobrażalnie 100 000 kWh. Zważywszy, że masa oceanu wynosi 230 mln ton na osobę, deuter każdemu powinien zapewnić 30 000 kWh energii dziennie (to ponad stukrotność zużycia energii przeciętnego Amerykanina). I to w populacji dziesięciokrotnie większej niż obecna. I to przez milion lat (rys. 24.17).

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

171 **Rys. 24.1.** – Źródło: Światowe Towarzystwo Nuklearne (World Nuclear Association) [5qntkb]. Moc całkowita działających obecnie reaktorów wynosi 372 GW(e), co wiąże się ze zużyciem 65 000 ton uranu rocznie. Stany Zjednoczone mają 99 GW, Francja – 63,5 GW, Japonia – 47,6 GW, Rosja – 22 GW, Niemcy – 20 GW, Korea Pd. – 17,5 GW, Ukraina – 13 GW, Kanada – 12,6 GW, a Wielka Brytania – 11 GW. W 2007 roku wszystkie reaktory na świecie wygenerowały 2608 TWh energii elektrycznej, co daje średnią dzienną produkcję 300 GW lub też 1,2 kWh na osobę dziennie.

172 **Elektrownia jądrowa o mocy 1 GW, pracująca w cyklu paliwowym pojedynczego przejścia, zużywa 162 tony uranu rocznie.** Źródło: www.world-nuclear.org/info/inf03.html. Działanie elektrowni o mocy 1 GWe o sprawności cieplnej 33%, pracującej ze współczynnikiem obciążenia 83%, wiąże się z następującym „ślądem uranowym” (wykorzystaniem uranu): przy wydobyciu – 16 600 ton 1-procentowej rudy uranu; po rozdrobieniu rudy – 191 t tlenku uranu (zawierające 162 t naturalnego uranu); po wzbogaceniu i wyprodukowaniu paliwa – 22,4 t tlenku uranu (zawierające 20 t uranu wzbogaconego).

173 **Reaktory prędkie powielające produkują mniej więcej 60 razy więcej energii z uranu.**

– Źródło: www.world-nuclear.org/info/inf98.html. Obecnie liderem w rozwoju reaktorów prędkich powielających jest Japonia.

– **Oszacowano, że zasoby rud o niskiej zawartości uranu są ponad tysiąckrotnie większe niż 27 mln ton założonych tutaj przed chwilą.**

Deffeyes i MacGregor (1980) szacują zasoby uranu w stężeniach 30 ppm lub większych na 3×10^{10} ton (średnia zawartość uranu w rudach przetwarzanych w RPA w 1985 oraz 1990 roku wynosiła 150 ppm (fosforany zwykle zawierają 100 ppm uranu).

A oto, jak na temat rezerw uranu wypowiedziała się World Nuclear Association w lipcu 2008 roku:

„Raz na jakiś czas pojawiają się wątpliwości, czy rozpoznane zasoby uranu wystarczą do zaspokojenia stale rosnącego zapotrzebowania. Mylny paradygmat granic rozwoju (...) nie bierze pod uwagę, jak niewiele wiemy o tym, co rzeczywiście znajduje się w skorupie ziemskiej. Nasza wiedza z zakresu geologii pozwala nam sądzić, że rozpoznane zasoby metali są zaledwie odsetkiem tego, co się tam znajduje”.

„Szacunki odnośnie możliwych do wydobycia zasobów uranu i uranu, który opłaci się pozyskać z rud (...) zależą od intensywności działań poszukiwawczych w przeszłości i zasadniczo opierają się na tym, co wiadomo, a nie na tym, co rzeczywiście występuje w skorupie ziemskiej”.

„Światowe możliwe do wydobycia zasoby uranu (5,5 Mt) (...) wystarczą na ponad 80 lat. To dłużej niż w przypadku większości minerałów. Zgodnie z obecną wiedzą geologiczną dalsze prace poszukiwawcze oraz wyższe ceny uranu z pewnością przyczynią się do odkrycia kolejnych złóż, kiedy obecne zaczną się wyczerpywać”.

„Racjonalni gracze zainwestują w poszukiwania tych nowych rezerw tylko jeżeli będą mieli dużą szansę zwrotu z inwestycji, co zazwyczaj wymaga pozytywnych bodźców cenowych, wywołanych niedostateczną podażą. Jeżeli tylko system gospodarczy funkcjonuje prawidłowo i maksymalizuje efektywność wykorzystania kapitału, rezerwy żadnego minerału, w żadnym momencie, nie powinny wystarczać na dłużej niż na kilkadziesiąt lat”.

[Eksploracja kosztuje; na przykład poszukiwania uranu generują koszt rzędu 1–1,50 dolarów na kg uranu (3,4 dolara/MJ), co stanowi 2% aktualnej ceny uranu, wynoszącej 78 dolarów/kg. Dla kontrastu, koszty poszukiwania ropy wyniosły średnio 6 dolarów za baryłkę (1050 dolarów/MJ) (12% ceny aktualnej), co najmniej na przestrzeni ostatnich 30 lat.]

„W przeciwieństwie do wielu metali eksploatowanych od wieków, dopiero co zaczęliśmy wykorzystywać uran. Do tej pory miał miejsce tylko jeden cykl eksploatacji – odkrycie – produkcja, stymulowany w dużej mierze przez wysokie ceny uranu pod koniec lat 70.”

„Za wcześniej, by mówić o długofalowych brakach uranu, kiedy cały przemysł jądrowy jest tak młody, że wymagał zaledwie jednego cyklu pozyskania uranu”. www.world-nuclear.org/info/inf75.html

Więcej w: Herring (2004); Price i Blaise (2002); Cohen (1983).

IPCC, cytując OECD prognozuje, że przy tempie wykorzystania z roku 2004 konwencjonalne zasoby uranu i uran w fosforanach wystarczy na 670 lat w reaktorach pojedynczego przejścia, na 20 000 lat w reaktorach prędkich powielających z odzyskiem plutonu oraz na 160 000 lat w reaktorach prędkich powielających odzyskujących uran i wszystkie aktywnowce (Sims i in., 2007).

- 175 **Badacze japońscy opracowali technologię pozyskiwania uranu z wody morskiej.** Oszacowanie kosztu na poziomie 100 dolarów za kg pochodzi z prac: Seko i in. (2003) oraz [y3wnzr]; szacunki na poziomie 300 dolarów za kg pochodzą z Agencji Energetyki Jądrowej przy OECD (Nuclear Energy Agency) (2006, str. 130).

Pozyskiwanie uranu z wody morskiej polega na zanurzeniu na kilka miesięcy włókniny w oceanie; płótno zrobione jest z włókien polimerowych, którym poprzez naświetlenie przed zanurzeniem nadaje się lepkość. Lepkie włókna zbierają uran w ilości 2 g na kilogram włókna.

- **Koszt pozyskania uranu można by zmniejszyć, gdyby woda morska znalazła jeszcze inne zastosowanie – na przykład chłodziłaby elektrownię.** Pomysł zasilanej energią jądrową wyspy produkującej wodór przedstawił C. Marchetti. Reaktory powielające chłodzone wodą morską pozyskiwałyby uran z wody chłodniczej w ilości 600 t uranu na 500 000 000 000 t wody.
- **Światowe zasoby toru w monocyte.** Źródło: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, styczeń 1999. [yl7tkm]. Cytowane w UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67, listopad 2004.

„Inne rudy o wyższej zawartości toru, takie jak toryt, mogłyby stać się jego źródłem, jeżeli popyt znacząco wzrośnie”. [yju4a4] nie uwzględni danych dla Turcji, które można znaleźć tutaj: [yeyr7z].

- 176 **Reaktory zasilane torem dostarczają $3,6 \times 10^9$ kWh (3,6 mld kWh) ciepła na tonę toru.**

Źródło: www.world-nuclear.org/info/inf62.html.

Jest pole do usprawnień w dziedzinie reaktorów na tor, więc ta wartość może w przyszłości znacząco wzrosnąć.

- **Alternatywny reaktor torowy, tzw. „wzmacniacz energii”.** Więcej w: Rubbia i in. (1995), web.ift.uib.no/~lillestol/EnergyWeb/EA.html [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].

- 177 **Przemysł jądrowy sprzedawał każdemu Brytyjczykowi 4 kWh dziennie przez około 25 lat.** Całkowita produkcja energii do roku 2006 wyniosła około 2200 TWh. – Źródło: *Przegląd Energetyczny Stephena Saltera (Stephen Salter's Energy Review)* na zamówienie Szkockiej Partii Narodowej.

- Agencja ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych dysponuje rocznym budżetem 2 mld funtów. Tak się składa, że ten budżet likwidacyjny zdaje się rosnać i rosnać. Ostatnie szacunki co do całkowitego kosztu likwidacji i rozbiórki mówią o 73 mld funtów, news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm. Z drugiej strony jednak budżet ten jest przeznaczony nie tylko na sprzątanie po cywilnych elektrowniach jądrowych, ale głównie na zakład produkcji bomb atomowych w Sellafield, czyli sprzątanie po wojsku.

- **Koszt po stronie Agencji ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych wynosi 2,3 p/kWh (10 groszy/kWh).** W rzeczywistości owe 2 mld mają służyć likwidacji nie tylko cywilnych elektrowni jądrowych, ale też wojskowych zakładów wytwarzania broni jądrowej w Sellafield. Lwia część tej sumy służy więc sprzątanu po wojsku, a nie po produkcji energii. Oznacza to, że podany tu koszt likwidacji starych elektrowni jądrowych za 1 kWh jest przeszacowany.

- **koszty postawienia elektrowni jądrowych i dostosowania polskiego systemu elektroenergetycznego.** [3xz2675] i [2vj2je]
- **Koszt likwidacji i rozbiórki elektrowni jądrowej w Ignalinie.** [3xaph2c].

- 178 **Słowa krytyki ze strony Głównego Inspektora Instalacji Nuklearnych były miażdżące...** (Weightman, 2007).

- **Energetyka jądrowa nie jest niewyobraźalnie niebezpieczna. Jest po prostu niebezpieczna.** Więcej na temat zagrożeń w: Kammen i Hassenzahl (1999).

- **Amerykanie żyjący w pobliżu elektrowni węglowych są narażeni na wyższe dawki promieniowania niż ci żyjący w pobliżu elektrowni jądrowych.** – Źródło: McBride i in. (1978). Zawartość uranu i toru w węglu wynosi odpowiednio około 1 ppm i 2 ppm. Więcej na stronach: gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html, www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf.

- **Atom i wiatr mają najniższe wskaźniki śmiertelności.** Więcej w: Jones (1984). Te wskaźniki pochodzą z opracowań prognozujących przyszłość. Spójrzmy jeszcze w przeszłość.

W Wielkiej Brytanii energetyka jądrowa wygenerowała 200 gigawatolat energii elektrycznej, przy czym doszło do jednego nieszczęśliwego wypadku – w 1978 roku zginął pracownik elektrowni jądrowej w Chapelcross [4f2ekz]. 1 zgon na 200 gigawatolat to imponująco niski wskaźnik w porównaniu z przemysłem paliw kopalnych.

W skali świata historyczne wskaźniki zgonów związanych z atomem są trudne do oszacowania. Nikt nie zginął w wyniku stopienia rdzenia reaktora w Three Mile Island, a związany z tym wyciek od czasu wypadku być może uśmiercił jedną osobę. W Czarnobylu bezpośrednio w wyniku katastrofy zginęły 62 osoby, a 15 okolicznych mieszkańców zmarło na raka tarczycy. Szacuje się, że na nowotwory związane z awarią zmarło 4000 osób w okolicach Czarnobyla i kolejne 5 000 na całym świecie (spośród 7 mln narażonych na opad radioaktywny) (Williams i Baverstock, 2006). Trudno jednak wskazać, które to zgony, jako że nowotwory (w tym wiele spowodowanych promieniowaniem naturalnym) i tak odpowiadają za 25% zgonów w Europie.

By policzyć globalny wskaźnik śmiertelności dla energetyki jądrowej, możemy podzielić szacowaną liczbę ofiar katastrofy w: Czarnobylu (9000 zgonów) przez skumulowaną produkcję energii z atomu w latach 1969–1996, czyli 3685 gigawatolat. Daje to wskaźnik na wysokości 2,4 zgonów na gigawatorok.

Odnosnie zgonów przypisywanych energetyce wiatrowej Caithness Windfarm Information Forum (www.caithnesswindfarms.co.uk) wymienia 49 nieszczęśliwych wypadków w skali globu w latach 1970 – 2007 (35 pracowników przemysłu energetyki wiatrowej oraz 14 osób postronnych). W 2007 roku Paul Gipe wymieniał 34 wypadki śmiertelne w skali globu [www.wind-works.org/articles/BreathLife.html]. W połowie lat 90. wskaźnik śmiertelności związany z energetyką wiatrową wynosił 3,5 zgonu na gigawatorok. Według Paula Gipe’a do końca roku 2000 globalny wskaźnik śmiertelności dla energii z wiatru spadł do 1,3 zgonów na gigawatorok.

A więc notowane do tej pory wskaźniki śmiertelności zarówno energii nuklearnej, jak i wiatrowej są wyższe niż wskazują prognozy na przyszłość.

- 179 **Stal i beton użyte do budowy elektrowni jądrowej o mocy 1 GW mają ślad węglowy rzędu 300 000 t CO₂.** Elektrownia nuklearna o mocy 1 GW zbudowana jest z 520 000 m³ betonu (1,2 mln ton) i 67 000 ton stali [2k8y7o]. Założywszy, że na 1 m³ betonu przypada 240 kg CO₂ [3pvf4], ślad węglowy betonu wynosi jakieś 100 000 t CO₂. Wg Blue Scope Steel [4r7zpg] ślad węglowy stali wynosi około 2,5 tony CO₂ na tonę stali, stąd też 67 000 ton stali ma ślad węglowy rzędu 170 000 ton CO₂.
- 180 **Dyskusja dotycząca odpadów jądrowych.** Źródła: www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7].
Porównanie już wygenerowanych i potencjalnych odpadów jądrowych pochodzi z Komisji ds. Zarządzania Odpadami Radioaktywnymi – Committee on Radioactive Waste Management (2006).
- **W Polsce planuje się budowę dwóch elektrowni jądrowych o mocy 3000 MW każda.** [2uf4v9e].
 - 182 **Światowe rezerwy litu szacowane są na 9,5 mln ton.** Największe zasoby litu znajdują się w Boliwii (56,6%), Chile (31,4%) i Stanach Zjednoczonych (4,3%), www.dnpm.gov.br
 - **Lit można znaleźć w wodzie morskiej...** Bada się szereg technologii pozyskiwania litu z wody (Steinberg i Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar i in., 2001).
 - **Synteza oparta o rezerwy litu.**
Gęstość energetyczna naturalnego litu wynosi około 7500 kWh na gram (Ongena i Van Oost, 2006). Szacunki określające sprawność przekształcania tej energii w elektryczną w reaktorach termojądrowych są różne – od 310 kWh(e)/g litu naturalnego (Eckhartt, 1995) do 3400 kWh(e)/g (Steinberg i Dang, 1975). Zakładam tu 2300 kWh(e)/g w oparciu o szeroko cytowane twierdzenie, że „elektrownia termojądrowa o mocy 1 GW będzie wykorzystywać około 100 kg deuteru i 3 tony naturalnego litu rocznie, produkując około 7 mld kWh energii”. [69vt8r], [6oby22], [63i2lp].

Więcej na temat reakcji rozszczepienia w: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Centrum Informacji o Uranie (Uranium Information Center) – www.uic.com.au. www.world-nuclear.org, [wnchw]; na temat kosztów: Zaleski (2005); na temat składowisk odpadów: [shrln]; na temat reaktorów powielających oraz toru: www.energyfromthorium.com; więcej na temat reakcji syntezy na stronach: www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.html