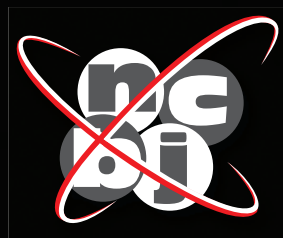




# ENERGETYKA JĄDROWA: SPOTKANIE PIERWSZE

Ludwik Dobrzyński  
Katarzyna Żuchowicz



**narodowe centrum badań jądrowych**  
**national centre for nuclear research**

czerwiec 2012

## Od Autorów

*Niniejszy tekst jest przeznaczony dla wszystkich, którzy chcą zapoznać się z podstawowymi zagadnieniami związanymi z energetyką jądrową. Staraliśmy się, aby każdy fragment był możliwie prosty do przeczytania i zrozumienia bez konieczności sięgania do całości materiału. Niemniej jednak, na takie wyrywkowe czytanie może sobie pozwolić przede wszystkim czytelnik, który zna zasadnicze pojęcia związane z pracą reaktora jądrowego, a także energetyką. W opracowaniu korzystaliśmy częściowo z tekstu broszury: L. Dobrzyński, E. Droste, R. Wołkiewicz, Ł. Adamowski, W. Trojanowski „Spotkanie z promieniotwórczością”, Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana, Świerk, listopad (2010), za zgodą współautorów.*

**Ludwik Dobrzyński**

Wydział Matematyczno - Przyrodniczy Uniwersytetu  
Kardynała Stefana Wyszyńskiego, Warszawa

Dział Edukacji i Szkoleń

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk

**Katarzyna Żuchowicz**

Dział Edukacji i Szkoleń

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Świerk

## Spis treści

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Od Autorów.....                                                          | 2  |
| Spis treści.....                                                         | 3  |
| Czy Polsce jest potrzebna energetyka jądrowa?.....                       | 4  |
| 1. Wstęp.....                                                            | 5  |
| 2. Jądro atomowe i energia w nim zawarta .....                           | 6  |
| 2.1 Jądro i jego struktura.....                                          | 6  |
| 2.2 Tajemnica energii wiązania.....                                      | 6  |
| 3. Reakcja rozszczepienia.....                                           | 7  |
| 4. Reakcja łańcuchowa.....                                               | 8  |
| 5. Energetyka jądrowa.....                                               | 9  |
| 6. Zapasy uranu i niezależność surowcowa.....                            | 11 |
| 7. Reaktor jądrowy i jego elementy .....                                 | 12 |
| 7.1 Rdzeń.....                                                           | 12 |
| 7.2 Moderator i reflektor neutronów.....                                 | 13 |
| 7.3 Chłodzenie rdzenia.....                                              | 13 |
| 7.4 Naturalne reaktory jądrowe.....                                      | 13 |
| 8. Elektrownia jądrowa, reaktory energetyczne i ich bezpieczeństwo.....  | 14 |
| 8.1. Konstrukcja.....                                                    | 14 |
| 8.2. Bezpieczeństwo.....                                                 | 14 |
| 8.3 Reaktory energetyczne dziś i jutro.....                              | 15 |
| 9. Czy promieniowanie z reaktora jest bezpieczne?.....                   | 16 |
| 9.1 Awaria w elektrowni jądrowej.....                                    | 16 |
| 9.2 Czym jest ryzyko radiacyjne? Kilka słów o radiofobii.....            | 16 |
| 10. A co robić z odpadami promieniotwórczymi z reaktora?.....            | 18 |
| 11. Technologia jutra: czy możemy spalać odpady promieniotwórcze?.....   | 20 |
| 12. Odpady promieniotwórcze a promieniowanie środowiska naturalnego..... | 22 |
| 13. Transport wypalonego paliwa.....                                     | 23 |
| 14. Znaczenie energetyki jądrowej dla gospodarki.....                    | 23 |
| 15. Elektrownie jądrowe a ruch turystyczny.....                          | 24 |
| UZUPEŁNIENIE 1: Wartość energetyczna materiałów.....                     | 27 |
| UZUPEŁNIENIE 2: Cykl paliwowy.....                                       | 28 |
| Zakończenie.....                                                         | 31 |

## Czy Polsce jest potrzebna energetyka jądrowa?

Postawione w tytule rozdziału pytanie jest zapewne kluczowym dla większości polskich czytelników. W dyskusjach nad energetyką jądrową pojawia się często pytanie o to, czy energetyka jądrowa nie jest technologią już przestarzałą, czy uruchomienie jej gdzieś w okolicach 2023 roku ma w ogóle sens, czy nie dałoby się lepiej wykorzystać energii wiatrowej, słonecznej czy spalania biomasy dla zapewnienia stabilności energetycznej Polski?

Ponieważ, jak głosi tytuł niniejszej broszury, jest ona tylko „spotkaniem pierwszym”, nie miejsce tu na obszerną analizę i pełną odpowiedź na powyższe pytania. Spróbujemy te zagadnienia ująć szerzej w kolejnej broszurze. Niemniej jednak warto już teraz sobie uzmysłowić, że zgodnie z raportem „Finansowanie inwestycji energetycznych w Polsce” (ING Bank Śląski i firma doradczo-audytorska PricewaterhouseCoopers (PwC), maj 2011; [http://www.pwc.pl/pl\\_PL/pl/publikacje/ING-finansowanie-inwest.pdf](http://www.pwc.pl/pl_PL/pl/publikacje/ING-finansowanie-inwest.pdf)) nie można nie uwzględniać planowanych wyłączeń obecnych, starych bloków energetycznych. Pomijając koszty inwestycyjne planowanych elektrowni jądrowych, polskie firmy energetyczne zajmujące się innymi formami produkcji energii będą musiały przygotować się na wydatki rzędu 170 miliardów złotych w ciągu najbliższych 10 lat (patrz artykuł Dariusza Ciepeli „Inwestycje energetyczne: dobre i złe moce”, <http://www.wnp.pl>, 12.06.2012)! Te wielkie pieniądze są niezbędne na zastąpienie starych elektrowni nowymi, tym bardziej, że oceny potrzeb energetycznych („Polityka energetyczna Polski do roku 2030”) wskazują, iż już w 2020 r. powinniśmy dysponować mocą 44 GW, podczas gdy obecnie wynosi ona 36 GW. Do tego czasu jednak wyłączymy zapewne moc ok. 10 GW - jak widać, zapotrzebowanie na nowe elektrownie jest ogromne.

Wiemy, a przynajmniej większość Polaków jest przekonana, że „Polska węglem stoi”. Istotnie, nasza energetyka oparta jest głównie na węglu. Możemy zatem myśleć o budowie nowych elektrowni węglowych, jak niedawno uruchomiony blok 858 MW w Elektrowni Bełchatów, czy bloki, które mają zostać uruchomione do 2017 r. w elektrowniach Opole i Turów. Pomijając trudności ze znalezieniem wielu nowych lokalizacji dla kolejnych bloków

energetycznych, ich opłacalność silnie będzie zależała od decyzji Unii Europejskiej w sprawie kosztów emisji dwutlenku węgla. Jak się wydaje, bez opanowania umiejętności składowania tego gazu (tzw. technologia CCS, którą dopiero trzeba będzie w Polsce wdrożyć), koszty energii elektrycznej z węgla będą niemałe.

Elektrownie gazowe na gaz ziemny są względnie łatwe do szybkiego zbudowania. Obecnie planuje się budowę szeregu elektrowni tego typu o łącznej mocy ok. 4,5 GW w stosunku do potrzeb ok. 15 GW w przeciągu najbliższych 10 lat. Koszty energii elektrycznej wytwarzanej w takich elektrowniach są stosunkowo wysokie.

Może więc tzw. „energia zielona”, o której mówimy w rozdziale 5, nas uratuje? Do roku 2020 powinniśmy móc pokryć dzięki temu rodzajowi energii do 15% zapotrzebowania, tj. ok. 7 GW. Koszty tej produkcji jednak silnie zależą od różnych regulacji prawnych i dopłat, a dodatkowo należy pamiętać, że np. energia wiatrowa czy słoneczna to źródła pracujące jedynie okresowo i wymagające stałego wspomagania w okresach zapotrzebowania na moce szczytowe. Niezbyt dobrze określona sytuacja finansowa każe podejrzewać, iż te 7 GW, to cel nieosiągalny. Warto tu zacytować zdanie Jamesa Lovelocka (Readers Digest, marzec 2005): *Idea Zielonych, że energia odnawialna zastąpi przestrzeń pozostawioną przez wycofane z użytku elektrownie jądrowe - a także sprostą stałemu wzrostowi zapotrzebowania na energię - jest romantycznym nonsensem*.

Energetyka jądrowa, choć powstanie po 2020 r., jest w opisanej sytuacji niezbędna dla Polski. Zapewnia ona czystość środowiska i najtańszą energię elektryczną dla odbiorcy. Zarzut o przestarzałej technologii jest niepoważny i może padać tylko z ust osób, które nie śledzą uważnie znakomitego rozwoju technologii reaktorów jądrowych. Bezpieczeństwo energetyczne Polski i jej niezależność surowcowa są ważkimi argumentami za budową tej energetyki. Wreszcie, jak staramy się pokazać, dodatkowe korzyści z uruchomienia tego nowego sektora gospodarki są trudne do przecenienia i powinny zdecydowanie przeważać nad często irracjonalnym strachem przed energetyką jądrową.

## 1. Wstęp

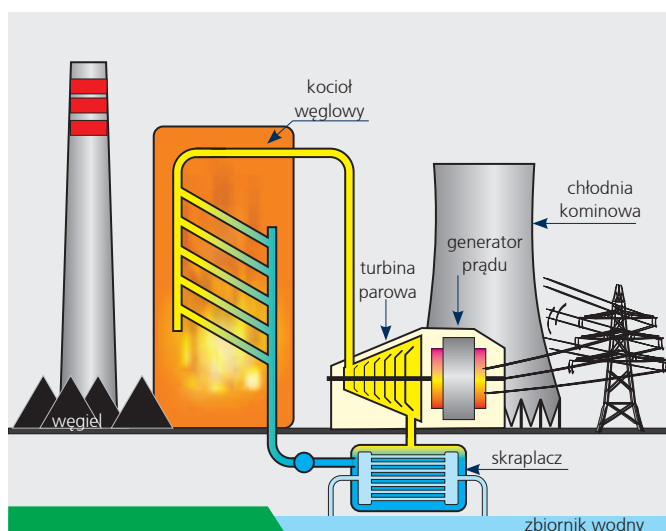
Odkąd człowiek wynalazł ogień, nieustannie z niego korzysta. Ogień daje ciepło i pozwala przyrządzić posiłek,



często poprzedzony zagotowaniem wody. Jeśli w czajniku gotuje się woda, z jego dzióbka lub spod pokrywy wydostaje się para wodna. Para niesie energię ciepłą tym większą im



wyższa jest jej temperatura. Może więc, da się tę energię wykorzystać do wykonania dla nas, a właściwie za nas, pracy. A jeżeli tak, to być może mogłaby ona poruszyć prądnice?



**Schemat elektrowni węglowej**

Nie! Bezpośrednio tak nie da się zrobić, natomiast można skierować parę na turbinę parową, a ta, obracając się, może napędzać generator prądu. Ot i to podstawowy cel naszej broszury, a więc opowiadanie, w jaki sposób wykorzystać energię wytworzonej pary wodnej do produkcji energii elektrycznej.

Jeśli, drogi Czytelniku, sądzisz, że to cała tajemnica, bardzo się mylisz. Spróbujemy Cię wprowadzić w tajniki **energetyki jądrowej**, która od konwencjonalnej - węglowej, różni się rodzajem wykorzystywanego paliwa. Pokażemy jednak, że zmiana paliwa, to bynajmniej nie „jedyna” różnica.

Zapewne słyszałeś o tym, że energetyka jądrowa nie wszystkim się podoba, niektórzy zaś są gotowi niemal swe życie poświęcić na rzecz jej zwalczania. Czy kieruje nimi strach przed nieznanym, czy też głębsza wiedza? Ponieważ nie zawsze umiemy odpowiedzieć na to pytanie, spróbujemy przedstawić nasz pogląd na energetykę jądrową, poparty nauką.

Nie będziemy też ukrywać, że jesteśmy zwolennikami tego rodzaju energetyki – byłaby to z naszej strony zwykła hipokryzja. Jednakże, oprócz chęci podzielenia się wiedzą, kieruje nami troska o Ziemię i jej mieszkańców, nie mniejsza niż w przypadku ekologów, zwalczających działania szkodliwe dla środowiska, w którym przyszło nam żyć.

Reakcje jądrowe, bez których nie ma energetyki jądrowej, nie są wynalazkiem człowieka. Należą do wielu naturalnych procesów zachodzących w przyrodzie. Życie na Ziemi zawdzięczamy, między innymi, ciepłu wytwarzanemu przez zachodzące w niej reakcje jądrowe. W płaszczu i skorupie ziemskiej nieustannie generują one ogromne ilości ciepła – dlatego, mimo oddawania go w przestrzeń kosmiczną, temperatura Ziemi pozwoliła na rozwój życia.

Reaktory jądrowe, o których będziemy jeszcze wiele mówili, to skądinąd wtórny wynalazek: matka-natura stworzyła pierwsze reaktory miliardy lat temu, a ich ślady można znaleźć w Gabonie (południowa Afryka) w miejscowości Oklo. Przyjrzenie się tym śladom jest wielce pouczające, ale o tym powiemy więcej w rozdziale siódmym.

Skąd można czerpać energię elektryczną niezbędną dla zagwarantowania nam komfortu życia? Oczywiście z paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa czy gaz. Możemy też korzystać z energii nazywanej „odnawialną”<sup>1</sup> lub „zieloną”, a więc z energii wodnej, słonecznej, wiatrowej czy biomasy. Abstrahując od nazewnictwa, każde z wymienionych źródeł energii jest lub może być dla nas istotne, a o udziale danego źródła energii zawsze decydować będzie rachunek ekonomiczny. Ten rachunek obejmuje także cenę, którą społeczeństwa są gotowe płacić za poczucie komfortu życia w świecie obecnej cywilizacji. Dzięki wykorzystaniu energii elektrycznej udało się stworzyć warunki do systematycznego wydłużania przeciętnego czasu życia człowieka: okazuje się, że z reguły w tych państwach, w których wykorzystuje się więcej energii elektrycznej, tam ludzie żyją dłużej.

Pisząc o komforcie życia wspomnieliśmy o poczuciu osobistego bezpieczeństwa, czynniku nadzwyczaj istotnym w kontekście naszego opracowania. Musimy także mieć na

<sup>1</sup> pojęcie energii „odnawialnej”, które zagościło w naszym języku jest bardzo niefortunne ponieważ kłóci się ze znaczeniem pojęcia energii jakie znamy w fizyce. Energii nie możemy zniszczyć ani odnawiać



uwadze systematyczny wzrost liczby mieszkańców Ziemi, który powoduje konieczność zwiększania produkcji energii elektrycznej. Wciąż możliwe oszczędzanie tej energii nie jest w stanie skompensować wzrostu zapotrzebowania na nią.

Zanim jednak przejdziemy do zagadnień społecznych i ekonomicznych, spróbujmy opisać skąd bierze się energia jądrowa i jakie cechy różnią ją od energii wyzwolanej, na przykład, podczas spalania węgla.

## 2. Jądro atomowe i energia w nim zawarta

### 2.1 Jądro i jego struktura

Jądro atomowe stanowi nadzwyczaj mikroskopijny fragment atomu. Jeśli rozmiar tego ostatniego już jest trudny do wyobrażenia – na jednym centymetrze można bowiem zmieścić około 50. milionów atomów - rozmiar jądra jest jeszcze kilkadziesiąt tysięcy razy mniejszy. Jądro atomowe jawi się w nim jako „nieznacząca kropka” otoczona chmurą elektronów o ujemnym ładunku elektrycznym. Atom każdego pierwiastka chemicznego charakteryzuje się ściśle określoną liczbą elektronów, zwaną **liczbą atomową** i oznaczaną literą Z.

Atom jako całość jest jednak elektrycznie obojętny, a zatem łączny ładunek elektronów musi być zrównoważony takim samym co do wartości ładunkiem dodatnim. Ten znajdujemy w tej „nieznaczącej” kropce, którą jest jądro. „Kropka” ma swoją wewnętrzną strukturę, składa się bowiem z dwóch rodzajów cząstek, które nazywamy **nukleonami**. Te cząstki, to obojętne elektrycznie neutrony i naładowane dodatnio protony. Liczba tych ostatnich jest identyczna z liczbą elektronów, co zapewnia skompensowanie ładunku w atomie. Jądro atomowe każdego pierwiastka chemicznego ma więc ściśle określoną liczbę protonów, charakterystyczną dla pierwiastka.

A co z liczbą neutronów? Ta, jak się okazuje, dla jąder o tej samej liczbie protonów, może być różna. Mówimy wtedy, że mamy do czynienia z różnymi **izotopami** danego pierwiastka. Jednak tylko część z nich jest trwała i takie izotopy najczęściej znajdujemy w Ziemi, w nas samych, w naszym pożywieniu. Część izotopów nie jest trwała – rozpada się po pewnym czasie. Znaczną liczbę takich izotopów możemy wytworzyć tylko w sztuczny sposób wywołując odpowiednie reakcje jądrowe. Izotopy nietrwałe rozpadają się samorzutnie z czasem charakterystycznym dla każdego z nich (**czasem połowicznego zaniku  $T_{1/2}$** ). Jeśli jest on dla danego izotopu znacznie krótszy od czasu istnienia Ziemi, izotop ten nie miałby szans dotrwania do obecnych czasów.

Dla pełnego scharakteryzowania izotopu musimy więc podać zarówno liczbę atomową jak i liczbę neutronów. Tradycyjnie podajemy jednak nie samą liczbę neutronów, ale łączną sumę neutronów i protonów – **liczbę masową**. Ta nazwa nie jest przypadkowa: masa neutronów i protonów jest w przybliżeniu taka sama, przy czym każda z tych cząstek ma masę około 1840 razy większą od masy elektronu. O masie atomu będzie więc decydowała masa jądra – ta nieznacząca „kropka”. Jak duża jest masa nukleonu? Troszkę większa od **jednej jednostki masy atomowej**<sup>2</sup>, zdefiniowanej jako 1/12 masy izotopu węgla, który ma w jądrze 6 protonów (jak to węgiel) i 6 neutronów.

Zgodnie z tradycją, izotop konkretnego pierwiastka chemicznego o symbolu X zapisujemy symbolem  ${}^A_ZX$ , gdzie A jest liczbą masową. Dla przykładu, wodór ma trzy izotopy: wodór, deuter i tryt, które zapisujemy odpowiednio jako  ${}^1_1H$ ,  ${}^2_1H$  i  ${}^3_1H$ . Jądrem pierwszego jest proton. W jądrze drugiego z tych izotopów mamy proton i neutron, w jądrze trzeciego proton i dwa neutrony. Wszystkie trzy izotopy występują w naszym środowisku, choć w dalece różnej ilości. Zwróćmy uwagę, że za każdym razem w jądrze znajduje się tylko jeden proton, jak na „przypoity” wodór przystało. Jak się okazuje, tryt jest izotopem niestabilnym.

W energetyce jądrowej ważne miejsce zajmuje izotop uranu, którego liczba protonów wynosi 92. Naturalny uran będący składnikiem skorupy ziemskiej został odkryty już w XVIII wieku (1789 r.), a więc przeszło sto lat przed odkryciem promieniotwórczości przez Becquerela. Ma on trzy izotopy o liczbach masowych 238 (99,27%), 235 (0,72%), i 234 (0,0055 %). Zapisujemy je (pomijając w zapisie stałą liczbę atomową Z) jako  ${}^{238}U$ ,  ${}^{235}U$ ,  ${}^{234}U$ . Różnica procentowego udziału wynika z różnicy okresów połowicznego zaniku. Najintensywniej występujący w naturze izotop uranu  ${}^{238}U$  ma okres połowicznego zaniku  $T_{1/2} = 4,5$  miliarda lat, najrzadszy izotop uranu,  ${}^{234}U$ , charakteryzuje się okresem  $T_{1/2} = 250$  tysięcy lat i jest stale tworzony w wyniku rozpadu promieniotwórczego  ${}^{238}U$ .

### 2.2 Tajemnica energii wiązania

Dlaczego jedne izotopy istnieją a inne nie? Tajemnica tkwi w energii. Wiemy, że słynne z anegdoty jabłko spadło (jeśli to prawda) Newtonowi na głowę dlatego, że Ziemia przyciąga jabłko, podobnie zresztą jak inne przedmioty. W języku energii sprowadza się to do tego, że energia jabłka na powierzchni Ziemi jest niższa niż gdy jest ono w górze. Jak mówimy, w górze ma ono większą energię, którą nazywamy potencjalną. Jest ona dla jabłka tym większa, im większa jest wysokość, na której się znajduje.

W istocie rzeczy, każde ciało, każdy układ fizyczny dąży do zminimalizowania swojej energii. Jeśli więc nie obserwujemy pewnych izotopów oznacza to, że jeśli kiedykolwiek istniały, to musiały zniknąć na zasadzie właśnie zmniejszenia energii, miały bowiem energię zbyt wysoką aby dotrwać do naszych czasów. Najprostszym sposobem pozbycia się nadmiaru energii jest wypromieniowanie jej części. Może to nastąpić w drodze wypromieniowania jakiejś cząstki, a więc tzw. promieniowania korpuskularnego, albo promieniowania elektromagnetycznego, którego natura fizyczna niczym nie odbiega od natury światła widzialnego. W wypadku emisji cząstki z jądra mówimy o **rozpadzie promieniotwórczym**.

Kiedy w wyniku rozpadu zmieni się liczba protonów w jądrze, automatycznie nastąpi zamiana jednego pierwiastka na inny. Powstałe jądro będzie musiało mieć, oczywiście, inną masę. Ku naszemu zdziwieniu, suma masy nowo powstałego jądra i masy cząstki wyrzuconej (wyemitowanej) z oryginalnego jądra jest mniejsza niż masa jądra, które się właśnie rozpadło. To dziwne, a jakże ważne zjawisko

<sup>2</sup>w fizyce mikroświata masy atomów i jąder atomowych podawane są zazwyczaj w jednostkach o symbolu „u” (w jęz. polskim j.m.a. jednostka masy atomowej, w jęz. angielskim „atomic mass unit”).  $1u = 1,66054 \cdot 10^{-27}$  kg. Masa protonu  $m_p = 1,0072765$  u, masa neutronu  $m_n = 1,008665$  u, masa elektronu  $m_e = 0,00054858$  u. Równoważność masy i energii, opisana bodaj najśłynniejszym wzorem w fizyce  $E = mc^2$ , pozwala nam na wyrażenie tej jednostki w jednostkach energii, jest wtedy równa 931,4943 MeV, gdzie 1 MeV oznacza milion elektronowoltów (eV), energia 1 eV równa jest zaś ok.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J

nosi nazwę **defektu masy**, czyli różnicy między sumą mas poszczególnych składników układu fizycznego a masą tego układu. Co ciekawe, pojawia się ono także, gdy przebiega w odwrotny sposób niż w rozpadzie promieniotwórczym, co zaraz wyjaśnimy.

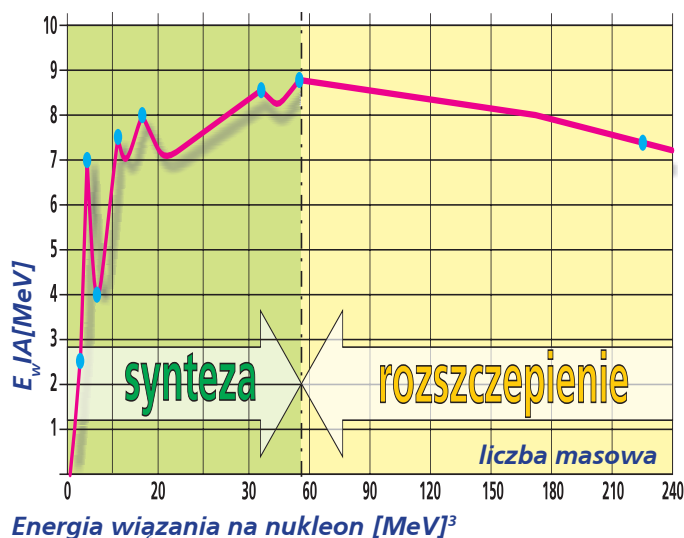
Defekt masy zilustrujemy na przykładzie „budowania” izotopu rtęci, którego zmierzona masa wynosi nie 200 u, lecz tylko 199,924 u. Jeśli połączymy w jedno jądro atomowe 80 protonów i 120 neutronów – razem 200 nukleonów łączna masa wyniesie  $80m_p + 120m_n = 201,622$  u (gdzie  $m_p$  i  $m_n$  oznaczają odpowiednio masy protonu i neutronu), czyli masa jądra atomowego jest mniejsza od sumy mas 200 nukleonów go tworzących o 1,698 u. Wydaje się to dziwne, gdyż ważąc przykładowo pięć jabłek, każde o masie 200 g, spodziewamy się otrzymać 1 kg jabłek.

Zgodnie z formułą Einsteina  $E = mc^2$ , (gdzie  $E$  oznacza energię,  $c$  - prędkość światła, a  $m$  – masę) zmniejszeniu masy układu musi towarzyszyć zmniejszenie jego energii. Brakująca część masy jest zatem równoważna zmniejszeniu energii układu 80 protonów i 120 neutronów przy ich połączeniu w całość. Energia jednak nie może ani brać się znikąd, ani przepaść – obowiązuje **zasada zachowania energii**. Tak więc ta energia, o którą zmniejszyła się całkowita energia układu (tu 80 protonów i 120 neutronów) będzie musiała gdzieś się pojawić – mówimy, że w opisanej reakcji wyzwala się energia. Tę energię nazywamy **energią wiązania**. Zgodnie z przywołaną wcześniej formułą jest równa  $(\Delta m)c^2$ , gdzie  $\Delta m$  oznacza zmianę masy.

We wspomnianym wcześniej rozpadzie jądra atomowego musi także wyzwalać się energia wiązania – inaczej początkowy układ, jakim jest jądro, nie mógłby zmniejszyć swojej energii. Energia, z której korzystamy w energetyce jądrowej jest właśnie energią wiązania. W szczególności można ją wyzwolić w procesie rozszczepienia jądra atomowego, o którym to procesie powiemy w rozdz. 3.

Energię wiązania atomu podajemy w MeV/nukleon. Jeżeli więc energia wiązania w jądrze atomu izotopu rtęci  $^{200}\text{Hg}$  jest równoważna masie ok. 1,7 u, oznacza to uzyskanie w procesie łączenia nukleonów energii 1581,2 MeV (patrz przypis 2). Dzieliąc tę liczbę przez 200 - liczbę wszystkich nukleonów jądra  $^{200}\text{Hg}$  - otrzymujemy energię wiązania: 7,906 MeV/nukleon. Gdyby któryś z nukleonów zdecydował się opuścić jądro, towarzyszyłoby temu wyzwolenie właśnie takiej energii. Tyle samo energii musielibyśmy włożyć, aby wyrwać nukleon z rozpatrywanego izotopu rtęci. Czy ta energia jest duża, czy mała? Bardzo duża! Podczas spalania atomu węgla wyzwala się energia ok. 4 eV, a tu mówimy o energii niemal 8 milionów elektronowoltów, która pojawiłaby się gdyby nasz izotop rtęci chciał wyemitować jeden nukleon. Warto zauważyć, że efekt straty części masy powinien też występować w reakcjach chemicznych - te nie są zasadniczo odmienne od reakcji jądrowych, jednakże różnica mas im towarzysząca, to zaledwie jedna część na miliard, tak więc jest ona niemal niemierzalna<sup>3</sup>. Na rysunku przedstawiony jest przebieg energii wiązania na nukleon dla izotopów o różnych liczbach masowych. Wynika z niego, że energia wiązania wzrasta, gdy lżejsze jądra łączą się w cięższe, a więc przy takim połączeniu musi wyzwolić się odpowiednia energia.

<sup>3</sup> masa molekuly wody wynosi 18,0156 u, czyli ok.  $1,6 \cdot 10^{10}$  eV a średnia energia wiązania to 9,4 eV, co stanowi mniej niż jedną miliardową część masy molekuly



**Energia wiązania na nukleon [MeV]<sup>3</sup>**

Taki proces nazywamy **syntezą jądrową**, w której upatruje się przyszłość **energetyki termojądrowej**. Widzimy także, że zmniejszanie się liczby masowej ciężkich pierwiastków także prowadzi do wzrostu energii wiązania, a więc wyzwolenia się odpowiedniej energii. Takim procesem może być np. emisja z jądra cząstki  $\alpha$  ( $^4\text{He}$ ), może być nim także rozszczepienie jądra.

Energia jądrowa, to po prostu energia wyzwalamy w procesach jądrowych. Teraz skupimy się na tej energii, z której korzystamy w „konwencjonalnej” energetyce jądrowej.

### 3. Reakcja rozszczepienia

Reakcja rozszczepienia jest procesem, w którym jądro ciężkiego pierwiastka (o  $A > 200$ ) dzieli się spontanicznie lub w sposób wymuszony na dwa (w rzadszych wypadkach więcej) ciężkie jądra o porównywalnych masach. W procesie rozszczepienia jąder atomowych część wyzwolonej energii unoszona jest przez inne cząstki (np. neutrony) oraz promieniowanie elektromagnetyczne (fotony gamma -  $\gamma$ ). Najbardziej typową reakcją rozszczepienia, wykorzystywaną w reaktorach jądrowych, jest reakcja bombardowania uranu-235 ( $^{235}\text{U}$ ) **neutronami termicznymi** (tj. neutronami o energii kinetycznej porównywalnej z energią ruchu termicznego cząsteczek powietrza w temperaturze pokojowej, co odpowiada energii kinetycznej neutronu 0,0253 eV i prędkości 2200 m/s).

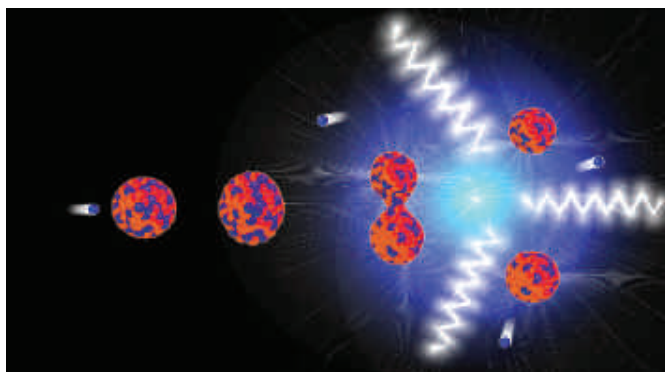
Reakcję rozszczepienia zapisujemy w następujący sposób:



gdzie gwiazdka oznacza, że powstałe jądro izotopu uranu-236 posiada nadmiar energii, jest w **stanie wzbudzonym**.

Powyższy zapis reakcji oznacza, że neutron termiczny ( $n$ ), zaznaczony na rysunku (str. 8) kolorem granatowym, uderza w jądro izotopu uranu ( $^{235}\text{U}$ ). W wyniku reakcji pochłonięcia neutronu powstaje jądro izotopu  $^{236}\text{U}$  w stanie wzbudzonym. Jądro to pozbywa się nadmiaru energii w drodze rozpadu na nowe jądra izotopów ciężkich pierwiastków ( $X$  i  $Y$  to tzw. fragmenty rozszczepienia). Mogą być nimi np.  $^{90}\text{Kr}$ ,  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{137}\text{Te}$ ,  $^{140}\text{Xe}$ ,  $^{143}\text{Ba}$  i inne. Procesowi towarzyszy promieniowanie gamma ( $\gamma$ ), a w zależności od masy powstających fragmentów  $X$  i  $Y$ , uwolnionych zostaje od

zera do ośmiu neutronów, które w pewnych warunkach mogą zainicjować kolejne rozszczepienia. „Wyzwolona energia” jest po prostu sumą energii kinetycznych i energii wzbudzenia wszystkich produktów reakcji: X, Y, n i  $\gamma$ .



Wzbudzenie jądra izotopu  $^{236}\text{U}$  powoduje, że znajdujące się w nim nukleony zostają wprawione w silne oscylacje, w wyniku których jądro ulegnie deformacji: wydłużeniu, a pomiędzy jego skrajnymi częściami pojawi się przewężenie. W ciągu czasu krótszego od około  $10^{-12}\text{s}$  jądro ulegnie dalszemu podziałowi w sposób podobny do podziału kropli wody lub rtęci na dwie krople. Przy odpowiednim oddaleniu tych części od siebie, spajające je dotąd siły jądrowe nie będą mogły przeważać silnego odpychania ładunkowego (kulombowskiego) protonów w obu częściach, co doprowadzi ostatecznie do rozszczepienia jądra na dwa fragmenty rozszczepienia o porównywalnych masach.

Energia wiązania wynosi w jądrze uranu 7,59 MeV na każdy nukleon, a we fragmentach rozszczepienia (X i Y) jest większa o około 0,9 MeV/nukleon. Energia uwalniana w pojedynczej reakcji rozszczepienia  $^{235}\text{U}$  będzie więc równa iloczynowi liczby nukleonów (236 po wchłonięciu neutronu) i różnicy energii wiązań - 0,9 MeV. W wyniku mnożenia otrzymujemy około 200 MeV.

Z rozszczepienia jednego jądra uranu wydzielą się więc około 50 milionów razy większa energia niż podczas spalania jednego atomu węgla. Odpowiadający tej energii defekt masy nie jest jednak duży - wynosi około jedną tysięczną części masy jądra  $^{236}\text{U}$ .

Po uwzględnieniu różnicy mas atomowych otrzymamy wynik pokazujący, że ze spalania 1 kg węgla otrzymamy 2,5 miliona razy mniej ciepła niż z przeprowadzenia reakcji rozszczepienia 1 kg uranu. To właśnie dlatego elektrownie jądrowe są tak wydajne. Poniższa tabela<sup>4</sup> pokazuje rozkład energii pomiędzy różne produkty reakcji rozszczepienia.

| Składowe wyzwanej energii                                  | Wartość [MeV] |
|------------------------------------------------------------|---------------|
| Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia (X i Y)       | 167           |
| Energia kinetyczna neutronów                               | 5             |
| Energia rozpadów promieniotwórczych obu fragmentów (X i Y) | 17            |
| Energia promieniowania gamma                               | 7             |
| <b>Razem</b>                                               | <b>196</b>    |

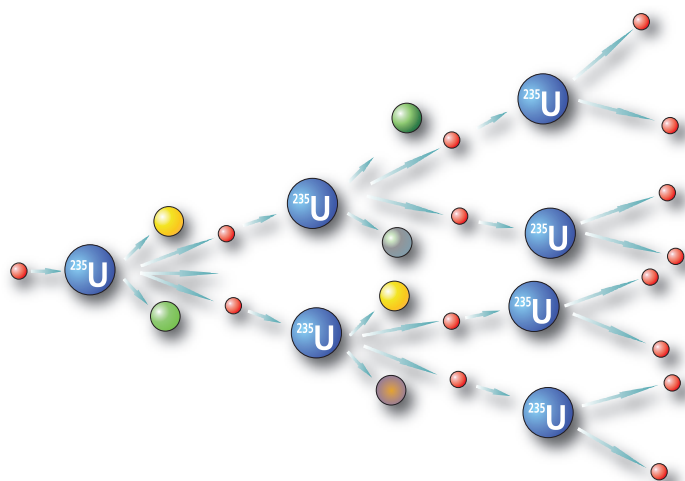
<sup>4</sup>wszystkie powstające fragmenty rozszczepienia - X, Y, są promieniotwórcze

Ogromna wartość energii wyzwanej z niewielkiej masy ma również znaczenie militarne i stanowi o niszczycielskiej sile bomby atomowej. Energia (przypadająca na cząsteczkę) wyzwolana podczas eksplozji konwencjonalnego środka wybuchowego, jakim jest trotyl TNT (o wzorze chemicznym  $(\text{NO}_2)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{CH}_3$ ), jest około 18 milionów razy mniejsza od energii wyzwanej w zjawisku rozszczepienia. Należy jednak pamiętać, że nie każde jądro uranu musi rozpaść się po wchłonięciu neutronu. Pierwsza bomba atomowa zużyła „zaledwie” 6% energii zawartego w niej uranu. Warto wiedzieć, że niszczycielskie działanie bomby jest w większym stopniu związane z działaniem cieplnym i podmuchem powstającym po wybuchu niż z promieniowaniem jądrowym.

$^{235}\text{U}$  jest jedynym naturalnym izotopem rozszczepialnym przez neutrony termiczne. Jego koncentracja w naturalnym uranie (głównie  $^{238}\text{U}$ ) jest jednak bardzo mała - zaledwie 0,72%. Dlatego do celów badawczych czy energetycznych (a także militarnych) należy uran **wzbogacić**. Polega to na odpowiednim zwiększeniu zawartości izotopu uranu o masie 235 w stosunku do izotopu uranu o masie 238.

## 4. Reakcja łańcuchowa

W pojedynczym akcie rozszczepienia jądra  $^{235}\text{U}$  powstaje średnio 2,5 neutronu. Dla uproszczenia przyjmijmy jednak, że tworzą się tylko dwa neutrony. Przyjmijmy dalej, że każdy z nich pochłonięty zostaje przez inne jądro  $^{235}\text{U}$  i wywoła kolejne rozszczepienia, przy czym w każdej takiej reakcji utworzą się dwa neutrony. W wyniku tego procesu otrzymamy w sumie 4 neutrony. Te neutrony mogą wywołać kolejne cztery reakcje, w wyniku których liczba neutronów w układzie zwiększy się do ośmiu itd.



Na rysunku pokazujemy reakcję łańcuchową właśnie na przykładzie dwóch wyzwanych neutronów (zaznaczonych na czerwono), z których każdy inicjuje kolejną reakcję rozszczepienia. W każdym akcie rozszczepienia, fragmenty rozszczepienia (większe kółka) mogą mieć nieco inne masy. Procesem podziału na dwie masy rządzi przypadek – możemy tylko mówić o prawdopodobieństwie pojawienia się danego izotopu. To, co najistotniejsze, to samo-podtrzymywanie się tej reakcji.

Jak widać z rysunku, liczba neutronów w układzie gwałtownie wzrasta, jak w słynnej opowieści o szachu, który został poproszony o zapłacenie za pracę ziarenkami ryżu. Pracownik poprosił o tyle ryżu, ile zmieści się na szachownicy,





jeśli na pierwszym polu położy się dwa ziarenka, na drugim cztery, na trzecim osiem i na każdym kolejnym dwa razy więcej ziarenek niż położono na poprzednim polu. W ten sposób, jak się okazało, bardzo szybko w całym państwie szacha zabrakło ryżu. Nie łatwo wyobrazić sobie, ile to jest  $2^{64}$  ziaren, które powinny się znaleźć na ostatnim polu szachownicy – a jeżeli wiemy, że ziarenko ryżu waży ok. 0,02 g, a  $2^{64} \approx 1,8 \cdot 10^{19}$ , to cały ten ryż waży ok.  $4 \cdot 10^{11}$  (czterysta miliardów) ton! W podanym wyżej opisie reakcji liczba neutronów stale wzrasta, sama reakcja zaś zwana jest **reakcją łańcuchową** lub **powielającą**.

Zauważmy, że w reakcji łańcuchowej nie tylko liczba neutronów gwałtownie wzrasta. Energia w układzie również błyskawicznie rośnie, gdyż każdemu rozszczepieniu towarzyszy wspomniana energia 200 MeV. Energia kinetyczna cząstek i jąder uczestniczących w procesie zamieniana jest podczas ich hamowania w materiale na ciepło.

Wywołując reakcję rozszczepienia w każdym jądrze zawartym w 1g izotopu  $^{235}\text{U}$  wyzwolimy energię  $(6,023 \cdot 10^{23} / 235) \cdot 200 \text{ MeV} = 5,125 \cdot 10^{23} \text{ MeV} = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ J}^5$ . Tak wielką energię ma masa 1000 ton spadająca na powierzchnię Ziemi z wysokości 8,2 km! Energia wyzwolona w eksplozji bomb jądrowych zrzuconych w 1945 roku na Hiroszimę i Nagasaki odpowiadała energii równoważnej wybuchowi ok. 20 000 ton trotylu. Taka energia wyzwala się zaś w całkowitym rozszczepieniu około 1kg izotopu  $^{235}\text{U}$ . Z prostego rachunku wynika, że jeśli chcemy uzyskać moc cieplną 1 MW =  $10^6 \text{ J/s}$  musimy całkowicie rozszczepiać w każdej sekundzie zaledwie ok.  $1,25 \cdot 10^{-5} \text{ g}$  izotopu uranu-235 ( $^{235}\text{U}$ ), co oznacza, że w ciągu doby zużyjemy ok. 1 g tego surowca, a w ciągu roku zaledwie ok. 365 g.

Ponieważ w naturalnym uranie zawartość cennego  $^{235}\text{U}$  wynosi, jak powiedzieliśmy, 0,72%, potrzebowalibyśmy ok. 50,7 kg uranu naturalnego dziennie. Jeśli uwzględnimy fakt, że nie wszystkie neutrony prowadzą do rozszczepienia, masa ta wzrośnie do ok. 61,1 kg. Moc typowej elektrowni wynosi ok. 1000 MW, a więc jej roczne zapotrzebowanie na uran naturalny (przy założeniu pełnego wykorzystania energii z procesu całkowitego rozszczepienia izotopu  $^{235}\text{U}$ ) wynosi

ok. 61 ton. To naprawdę niewiele w porównaniu z setkami wagonów węgla, spalanego w elektrowni węglowej. Potrzebna objętość jest też niewielka: 1 tona metalicznego uranu, to kostka o boku ok. 37 cm!

## 5. Energetyka jądrowa

Jak wspominaliśmy, nasza cywilizacja potrzebuje ogromnej ilości energii, a rozwój technologiczny pociąga dziś za sobą większe potrzeby energetyczne niż kiedykolwiek przedtem. Dostępne dane wykazują, że produkt narodowy brutto (PKB) wzrasta ze wzrostem zarówno produkcji jak i zużycia energii. Dane mówią też, że długowieczność mieszkańców rośnie ze wzrostem krajowego zużycia energii elektrycznej. Obecnie na naszym globie większość zużywanej energii pochodzi ze spalania biomasy (głównie drewna) oraz kopalin (węgla, ropy czy naturalnego gazu). Te naturalne nośniki energii jednak wkrótce się prawdopodobnie wyczerpią lub ich cena znacznie wzrośnie. Obecne oceny mówią o czasie od 50 do 150 lat. Prędzej czy później będziemy potrzebowali energii z innych źródeł. Czy energia jądrowa mogłaby być odpowiedzią na ten problem?

Energia pochodząca ze wszystkich źródeł naturalnych, jak energia geotermalna, energia wiatru czy energia promieniowania Słońca - wszystkie one wiążą się z niemałymi kosztami budowy instalacji przetwarzających te "naturalne" formy energii na najwygodniejszą dla nas energię elektryczną, zwłaszcza w przeliczeniu na jednostkę mocy. Trzeba przy tym uwzględnić koszt przygotowania zapasowych, stabilnych źródeł mocy dla - przykładowo - odbiorców prądu z elektrowni wiatrowych, czy spalających biomasę na czas, gdy wiatru nie ma, a dostawa biomasy zmniejszyła się w wyniku lokalnego nieurodzaju.

Energia wodna (hydroenergia) jest ważnym i tanim źródłem energii i może być podstawowym, ale możliwości jej wykorzystania są w wielu krajach ograniczone przez ukształtowanie terenu i liczbę rzek, a w wielu zostały już niemal wyczerpane. Z tego właśnie względu nie można oczekiwać, że energia wodna będzie w wielu krajach, wśród nich w Polsce, energią przyszłości.

Ponadto, korzystanie z paliw kopalnych niesie całkiem niemałe ryzyko. Przykładem tego są liczne wypadki górnicze, mające miejsce w 2010 r. m.in. w Chinach i na Ukrainie oraz zalanie ropą naftową wód Zatoki Meksykańskiej.

Geniusz ludzki być może jeszcze wymyśli jakieś inne wydajne i łatwo dostępne źródła taniej energii, jednakże nie możemy zazwyczaj oczekiwać ich szerokiego zastosowania przed okresem około 50 lat od chwili wynalezienia, a więc w czasie porównywalnym z okresem, w którym będą prawdopodobnie wyczerpywać się zasoby obecnych paliw kopalnych. Musimy zatem podjąć w tej sprawie ważne decyzje i to szybko!

Już dziś dysponujemy wielkim i bardzo wydajnym źródłem energii, a mianowicie - energią jądrową. Inwestycja w energetykę jądrową, to także duże pieniądze. Jednak przytoczona w poprzednim rozdziale relacja pomiędzy masą jąder atomowych i energią, która wydzielana jest w procesach jądrowych (jak procesy rozszczepienia jąder ciężkich, rozpady promieniotwórcze czy reakcje syntezy jąder lekkich) czyni z jąder atomowych najbardziej obiecujący nośnik energii pierwotnej, który możemy wykorzystać.

<sup>5</sup> pierwszy mnożnik ( $6,023 \cdot 10^{23}$ ), to **liczba Avogadro**: liczba atomów (a więc i jąder) w gramocząsteczce, tj. w masie (w gramach) równej liczbie masowej A

Chociaż koszty inwestycji w energetykę jądrową są wysokie, cena energii elektrycznej docierającej do konsumenta okazuje się stosunkowo niska. Całkowity koszt energii elektrycznej wytwarzanej przez elektrownie jądrowe, obejmujący koszty: zabezpieczeń, ochrony przed rozprzestrzenianiem materiałów rozszczepialnych, postępowania z odpadami promieniotwórczymi oraz całkowitej likwidacji elektrowni do tak zwanej „zielonej trawy”, są jednymi z najniższych w branży energetycznej.

| Rodzaj elektrowni                                                                                                                                                      | Koszt 1 kWh [grosze] | Wady                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| kondensacyjne - spalające węgiel kamienny w kotłach pyłowych z instalacjami odsiarczania i odazotowania spalin                                                         | 36                   | zanieczyszczenie powietrza   |
| kondensacyjne - spalające węgiel kamienny w kotłach pyłowych z instalacjami odsiarczania i odazotowania spalin oraz zapewniające wychwyt i składowanie dwutlenku węgla | 36                   | duża ilość popiołów          |
| kondensacyjne - spalające węgiel brunatny w kotłach pyłowych z instalacjami odsiarczania i odazotowania spalin                                                         | 36                   | zanieczyszczenie powietrza   |
| kondensacyjne - spalające węgiel brunatny w kotłach pyłowych z instalacjami odsiarczania i odazotowania spalin oraz zapewniające wychwyt i składowanie dwutlenku węgla | 34                   | duża ilość popiołów          |
| jądrowe z reaktorami lekko - wodnymi III generacji typu PRW                                                                                                            | 29                   | odpady promieniotwórcze      |
| parowo - gazowe na gaz ziemny                                                                                                                                          | 37                   | niestabilność kosztów paliwa |
| spalające gaz ze zintegrowanej z elektrownią instalacji zgazowania węgla kamiennego                                                                                    | 40                   | zanieczyszczenie powietrza   |
| spalające gaz ze zintegrowanej z elektrownią instalacji zgazowania węgla kamiennego oraz zapewniające wychwyt i składowanie dwutlenku węgla                            | 34                   |                              |
| spalające gaz ze zintegrowanej z elektrownią instalacji zgazowania węgla brunatnego                                                                                    | 40                   | zanieczyszczenie powietrza   |
| spalające gaz ze zintegrowanej z elektrownią instalacji zgazowania węgla brunatnego oraz zapewniające wychwyt i składowanie dwutlenku węgla                            | 32                   |                              |
| wiatrowe na lądzie                                                                                                                                                     | 43                   | duże koszty rezerw mocy      |
| wiatrowe na morzu                                                                                                                                                      | 44                   | duże koszty rezerw mocy      |

Z wyliczeń przedstawionych przez Agencję Rynku Energii S.A. w grudniu 2009 r. wynika, że cena wytworzenia prądu w takich elektrowniach jest najniższa. W powyższej tabeli<sup>6</sup> przedstawione są koszty wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej, które uwzględniają wszystkie koszty, o których mówiliśmy wyżej.

<sup>6</sup> uśrednione koszty wytwarzania energii elektrycznej dla elektrowni przewidzianych do uruchomienia do roku 2020 wg. analizy ARE S.A. (Analiza porównawcza kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych, węglowych i gazowych oraz odnawialnych źródeł energii, grudzień 2009)

Ponadto, energia jądrowa może pokryć głód energetyczny ludzkości przez tysiące lat.

Obecnie około 14% energii elektrycznej produkowanej na świecie pochodzi z energetyki jądrowej ([http://www.nei.org/resourcesandstats/nuclear\\_statistics/worldstatistics](http://www.nei.org/resourcesandstats/nuclear_statistics/worldstatistics)). Poniższa tabela pokazuje wykorzystanie energii jądrowej w poszczególnych krajach (dane publikowane w maju 2012; <http://pris.iaea.org/PRIS>).

|    | Kraj              | Udział (%) | Liczba bloków | Moc (MW)       |
|----|-------------------|------------|---------------|----------------|
| 1  | Francja           | 77,71      | 58            | 63 130         |
| 3  | Słowacja          | 54,02      | 4             | 1 816          |
| 4  | Ukraina           | 57,20      | 15            | 13 107         |
| 5  | węgry             | 43,25      | 4             | 1 889          |
| 6  | Słowenia          | 42,04      | 10            | 9 014          |
| 7  | Swajcaria         | 40,85      | 5             | 3 263          |
| 8  | Szwecja           | 39,62      | 10            | 9 326          |
| 9  | Korea Południowa  | 34,64      | 23            | 20 671         |
| 10 | Armenia           | 33,17      | 1             | 375            |
| 11 | Czechy            | 32,96      | 6             | 3 766          |
| 12 | Bułgaria          | 32,58      | 2             | 1 906          |
| 13 | Finlandia         | 31,58      | 4             | 2 736          |
| 14 | Hiszpania         | 19,48      | 8             | 7 567          |
| 15 | USA               | 19,25      | 104           | 101 465        |
| 16 | Tajwan            | 19,02      | 6             | 5 018          |
| 17 | Rumunia           | 18,98      | 2             | 1 300          |
| 18 | Japonia           | 18,14      | 50            | 44 215         |
| 19 | Wielka Brytania   | 17,82      | 17            | 9 703          |
| 20 | Niemcy            | 17,79      | 9             | 12 068         |
| 21 | Rosja             | 17,59      | 33            | 23 643         |
| 22 | Kanada            | 15,33      | 18            | 12 604         |
| 23 | Afryka Południowa | 5,19       | 2             | 1 830          |
| 24 | Argentyna         | 4,97       | 2             | 935            |
| 25 | Pakistan          | 3,77       | 3             | 725            |
| 26 | Indie             | 3,68       | 20            | 4 391          |
| 27 | Holandia          | 3,60       | 1             | 482            |
| 28 | Meksyk            | 3,55       | 2             | 1 300          |
| 29 | Brazylia          | 3,17       | 2             | 1 884          |
| 30 | Chiny             | 1,85       | 16            | 11 816         |
| 31 | Iran              | 0,04       | 1             | 915            |
|    | <b>Suma:</b>      |            | <b>436</b>    | <b>370 229</b> |

Taki sposób wytwarzania energii chroni środowisko. W energetyce jądrowej w zasadzie nie istnieje problem zanieczyszczeń środowiska spalinami czy dwutlenkiem węgla. Energetyka ta nie wnosi też wkładu do tzw. globalnego ocieplenia. Zauważmy, że **energia elektryczna z każdych 22 ton uranu zapobiega emisji około miliona (!) ton dwutlenku węgla, który byłby konsekwencją wytworzenia takiej samej energii przez spalanie węgla.**

Państwa określane jako rynki wschodzące nie lekceważą możliwości jakie stwarza energetyka jądrowa. Tam, gdzie

brak energii elektrycznej jest najbardziej widoczny, a więc np. w Chinach i Indiach, program rozwoju energetyki jądrowej jest prawdziwie imponujący. W samych Chinach działało w marcu 2012 r. 14 reaktorów, 26 było w trakcie budowy, a kolejnych 28 ujętych jest w planach rządowych rozwoju energetyki jądrowej. Według planów rządu po 2025 roku około 10 proc. energii tego wielkiego kraju powinno być wytwarzane w elektrowniach nuklearnych. W tym czasie w Polsce, mamy nadzieję, będą działały dwa bloki pierwszej elektrowni jądrowej o łącznej mocy 3000 MWe.

A jak wygląda konsumpcja różnych rodzajów paliwa? Poniższa tabela pokazuje, ile paliwa rocznie musi zużyć elektrownia o mocy 1000 MWe. Dane do tej tabeli zaczerpnęliśmy z opracowania CERN'owskiego „Energy, Powering Your World” (2000).

| Źródło energii                 | Potrzeby                                         | Dla porównania                                             |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Biomasa                        | 2000 km <sup>2</sup> upraw                       | 3 -krotna wielkość Jeziora Bodeńskiego                     |
| Wiatr                          | 2700 wiatraków o mocy 1,5 MW każdy               | 486 km <sup>2</sup>                                        |
| Słońce (fotowoltaiki)          | 23 km <sup>2</sup> paneli słonecznych na równiku | 2555 boisk piłkarskich                                     |
| Biogaz                         | 20 000 000 świń                                  |                                                            |
| Gaz                            | 1,2 km <sup>3</sup>                              | 470 piramid Cheopsa                                        |
| Ropa                           | 1 400 000 ton                                    | 10 000 000 baryłek oleju lub 100 super-tankowców           |
| Węgiel                         | 2 500 000 ton                                    | 26 260 wagonów towarowych                                  |
| Rozszczepienie jąder           | 20 ton uranu wzbogaconego                        | 160 ton rudy uranowej                                      |
| Reakcja syntezy (termojądrowa) | 100 kg D + 150 kg T                              | 2850 m <sup>3</sup> wody morskiej oraz 10 ton rudy litowej |

W kontekście poruszanych tu spraw warto zwrócić uwagę na wartość opałową różnych paliw. Wartości te podaje poniższa tabela.

| Paliwo              | Wartość opałowa [MJ/kg*] | Roczne zużycie na mieszkańca Polski w 2000 r. |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| Drewno              | 16                       |                                               |
| Węgiel brunatny     | 9                        | 1,6 t                                         |
| Węgiel kamienny     | 13 ÷ 30**                | 2,2 t                                         |
| Gaz naturalny       | 45                       | ok. 350 m <sup>3</sup>                        |
| Ropa nieoczyszczona | 45-46                    | ok. 0,5 t                                     |
| Uran naturalny      | 500 000                  |                                               |

\* 1 MJ ≈ 0,278 kWh \*\* w zależności od jakości węgla

Obecnie mówi się także o wykorzystaniu energii termojądrowej, pochodzącej z syntezy jądrowej. Energetyka oparta o tę reakcję jest szczególnie „oszczędna” jeśli chodzi o materiał, jednak jej wykorzystanie, to muzyka jeszcze dalekiej przyszłości.

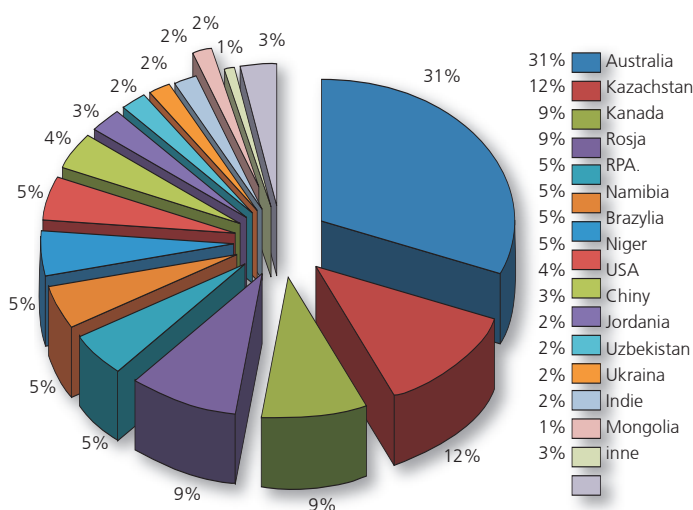
## 6. Zapasy uranu i niezależność surowcowa

Ponieważ uran jest surowcem naturalnym, równie naturalnym staje się pytanie, ile go mamy w skorupie ziemskiej i na jak długo nam on starczy?

Odpowiedź, wbrew pozorom, wcale nie jest prosta. Po pierwsze, należy przyjąć jakiś sposób wykorzystania uranu. Tu najłatwiej wziąć za punkt odniesienia obecną technologię. Po drugie, ważna jest sprawa ceny 1 kg uranu. Ta będzie niewątpliwie wzrastać wraz z wyczerpywaniem się zasobów uranu. I znów najprościej jest przyjąć pewien margines cenowy kosztów wydobycia. Przy obecnych cenach ok. 100 USD/kg i sposobach używania uranu w elektrowniach jądrowych zasoby uranu wyczerpią się za ok. 100 - 300 lat. Wydawać by się mogło, że to dość ponury prognostyk, jeśli chcielibyśmy w energetyce jądrowej upatrywać przyszłości energetycznej globu ziemskiego.

Nie jest jednak tak źle. W miarę wzrostu cen uranu świat będzie przechodził na inne, nieekonomiczne obecnie, typy reaktorów, przede wszystkim tzw. **reaktory powielające**, w tym reaktory oparte o znacznie bogatsze niż uranowe złoża toru. W tej perspektywie, energetyka jądrowa ma szanse zaspokajania potrzeb energetycznych ludzkości nawet przez miliony lat.

Często stawiamy również pytania o niezależność surowcową. W wypadku energetyki jądrowej mamy korzystną sytuację. Uran można kupić z bardzo wielu krajów, a ich relatywne zasoby w ten surowiec pokazuje rysunek<sup>7</sup>. Przy kosztach wydobycia uranu poniżej 130 USD/kg, w Australii obecne złoża uranu są oceniane na ok. 1 700 tys. ton, w Kazachstanie 650 tys. ton, w Kanadzie 485 tys. ton, w Rosji 480 tys. ton itd. – łącznie ok. 5400 tys. ton. W Kanadzie, Australii, Brazylii i Południowej Afryce możliwe jest wydobycie uranu w cenie nawet poniżej 80 USD/kg. Nie tak dawno, bo w końcu lipca 2010 r., poinformowano o znalezieniu w Szwecji, być może, najbogatszych w świecie złóż uranu. W tej sytuacji dość łatwo jest zaopatrzyć się w niezbędną ilość paliwa i zapewnić sobie import z wielu krajów.



### Zasoby uranu na świecie<sup>7</sup>

<sup>7</sup>wg Red Book OECD/NEA-IAEA (2009)



W promieniu ok. 310 km od granic Polski jest 9 czynnych elektrowni jądrowych (24 bloki - reaktorów energetycznych) o łącznej elektrycznej mocy<sup>8</sup> zainstalowanej brutto ok. 16 GWe (<http://www.elektrownia-jadowa.pl> oglądana w marcu 2012 r. zawiera już wyłączoną elektrownię na Litwie).

Polska dopiero przygotowuje się do budowy pierwszego bloku elektrowni jądrowej, a plany mówią o roku 2023 jako roku jego uruchomienia.



## 7. Reaktor jądrowy i jego elementy

### 7.1 Rdzeń

Działanie reaktora jądrowego można opisać w stosunkowo prosty sposób. Wielka energia możliwa do uzyskania w reakcji powielającej musi być wyzwalana w sposób kontrolowany, gdyż, jak pisaliśmy wyżej, rozwijanie się tej reakcji w sposób spontaniczny musi, po przekroczeniu pewnej energii nagromadzonej w uranie, prowadzić do wybuchu jądrowego.

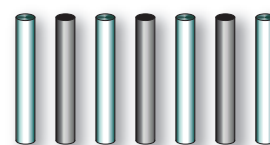
Tempo oraz warunki zachodzenia reakcji powielającej (łańcuchowej) zależą od kształtu bryły uranu oraz energii neutronów, które wywołują rozszczepienie. Jeśli będziemy posiadali czysty metaliczny uran w postaci kuli, to przy niewielkiej masie materiału większość neutronów będzie uciekała z kuli nie napotkawszy na swej drodze jąder uranu i reakcja rozszczepienia nie będzie się rozwijała - jak mówimy, będzie **podkrytyczna**<sup>9</sup>. Kiedy jednak kula będzie miała odpowiednio dużą średnicę, liczba neutronów wpadających na kolejne jądra uranu i wywołujących rozszczepienia będzie wystarczająco duża, by reakcja zachodziła w sposób **krytyczny**. Odpowiadająca tej sytuacji masa uranu nazywa się **masą krytyczną** i dla uranu-235 wynosi ok. 50 kg. Po jej przekroczeniu uzyskamy **masę nadkrytyczną**, wewnątrz której ilość wydzielanej energii w postaci ciepła gwałtownie wzrośnie, prowadząc

ostatecznie do wybuchu. Na tym właśnie polega działanie bomby atomowej.

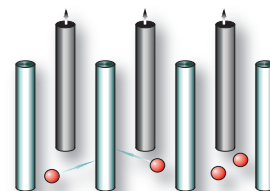
Zauważmy, że jeśli podzielimy masę krytyczną na dwie części ułożone w pewnej odległości od siebie, wybuch nie nastąpi, gdyż część neutronów opuszczających jedną połowę będzie omijała drugą, nie powodując rozszczepienia.

W reaktorze jądrowym niekontrolowana reakcja łańcuchowa jest uniemożliwiona na dwa sposoby. Po pierwsze, paliwo uranowe gromadzone jest w **elementach paliwowych**, w których zawartość uranu jest dużo mniejsza od masy krytycznej. Wewnątrz pojedynczego elementu paliwowego znajduje się znacznie więcej uranu-238 niż uranu-235. Ten pierwszy pełni w zasadzie rolę pochłaniacza, niepozwalającego na rozwinięcie się reakcji łańcuchowej w elemencie. Po drugie, elementy paliwowe są od siebie oddalone i dodatkowo poprzedzielane prętami z materiału silnie pochłaniającego neutrony (np. węglika boru, w którym bor jest takim silnym pochłaniaczem neutronów). Wysunięcie tych prętów do góry (patrz rysunek) powoduje, że neutrony (zaznaczone na rysunku na czerwono) z jednego elementu paliwowego mogą wywołać reakcję rozszczepienia w sąsiednim elemencie paliwowym. Z tego względu pręty te noszą nazwę **prętów sterujących**. Siatka równooddalonych elementów paliwowych i prętów sterujących (zaczienionych na rysunku) stanowi podstawę konstrukcji **rdzenia reaktora**.

Reaktor wyłączony



Reaktor włączony. Pręty sterujące podnoszone do góry



To jednak nie cała tajemnica. Reaktor jądrowy pracuje w tzw. **stanie krytycznym**, co oznacza, że tylko jeden ze średnio uwalnianych 2,5 neutronów wywołuje kolejną reakcję rozszczepienia, pozostałe zostają pochłaniane w różnych elementach reaktora. Taka gospodarka neutronami (utrzymująca się na stałym poziomie liczba neutronów) zapewnia reaktorowi stabilną pracę na określonym poziomie mocy. Najważniejsze jednak jest to, że reaktor osiąga stan krytyczny dzięki neutronom, które powstają z rozpadu niektórych fragmentów rozszczepienia, tzw. **neutronom opóźnionym**. Jest ich w całym bilansie neutronów zaledwie ok. 0,65%. Powstają średnio co kilkanaście sekund, co pozwala na stosunkowo łatwe manewrowanie położeniami prętów sterujących. Gdyby nie było neutronów opóźnionych, pręty sterujące musiałyby reagować na zmiany liczby neutronów co ok. jedną tysięczną sekundy. Tak szybkich układów mechanicznych nie mamy.

Praca reaktora jest więc tak organizowana, że bez neutronów opóźnionych reaktor byłby **podkrytyczny** – więcej neutronów byłoby pochłanianych niż tworzonych. W odróżnieniu od reaktora, bomba atomowa działa w sposób nadkrytyczny, a więc spontanicznie rozwijającej się reakcji powielającej.

<sup>8</sup>przy opisie elektrowni ciepłych - zarówno konwencjonalnych, jak i jądrowych stosowana jest jednostka mocy elektrycznej - GWe, moc cieplną podaje się w GW<sub>th</sub>. Moc cieplna jest ok. 3-krotnie większa od mocy elektrycznej

<sup>9</sup>reakcja łańcuchowa może przebiegać na trzy różne sposoby: podkrytyczny, krytyczny i nadkrytyczny. W **stanie podkrytycznym** większość neutronów wyzwolonych w wyniku rozszczepienia jąder uranu nie trafia w następne jądra i nie wywołuje następnych rozszczepień, a zatem neutronów jest coraz mniej i reakcja powoli wygasa. W **stanie krytycznym** ze wszystkich neutronów wyzwolonych w jednym akcie rozszczepienia dokładnie jeden wywołuje następne rozszczepienie, dzięki czemu liczba neutronów nie zmienia się i reakcja przebiega cały czas na takim samym poziomie. W **stanie nadkrytycznym** neutrony z jednego rozszczepienia jądra uranu powodują więcej niż jedno następne rozszczepienie, przez co neutronów jest coraz więcej i reakcja rozwija się, staje się samopodtrzymującą



Mówiliśmy już, że reakcję rozszczepienia  $^{235}\text{U}$  wywołują najchętniej **neutrony termiczne**<sup>10</sup>, a więc neutrony o energii kinetycznej porównywalnej z energią ruchu cieplnego w temperaturze zbliżonej do pokojowej. Problem jednak w tym, że neutrony prężkie, powstałe w procesie rozszczepienia, mają energie rzędu miliona elektronowoltów, a nie ułamka elektronowolta. Dla tak wysokich energii prawdopodobieństwo wywołania rozszczepienia jest niewielkie. Aby wykorzystać jak największą liczbę neutronów do procesu rozszczepienia należy zatem neutronom rozszczepieniowym odebrać większość ich energii.

## 7.2. Moderator i reflektor neutronów

Wbrew pozorom, jest to łatwe. Wystarczy mieć w reaktorze ośrodek zwany **moderatorem neutronów**, który nie pochłania neutronów (lub pochłania je w nieznaczającym stopniu), ale odbiera im energię, czyli spowalnia. Wykorzystujemy tu efekt znany nam ze stołu bilardowego.

Gdy ze stojącą na stole bilą (granatową) zderzy się czołowo inna rozpędzona bila o tej samej masie (biała), ta pierwsza



odleci, druga zaś zatrzyma się – przekaze pierwszej całą swą energię. Jest to możliwe tylko dla czołowego zderzenia identycznych kul. Przy innych niż czołowe zderzeniach przekazana zostanie tylko część energii, ale i tak rozpędzona bila bardzo zwolni.

Dla neutronu niemal identyczną „bilą” jest proton. Pojedynczych protonów mamy dużo w wodzie, w której znajduje się wodór, a jądrem atomu wodoru jest właśnie proton. Woda będzie więc stanowiła dobry moderator. Nie wchodząc w szczegóły, dobrymi moderatorami są też ciężka woda, beryl i grafit. Rodzaj moderatora jest jedną z ważnych charakterystyk rdzenia reaktora. Dla zwiększenia wykorzystania neutronów, rdzeń otoczony jest dodatkowo **reflektorem neutronów**: materiałem, w którym neutrony wylatujące z rdzenia mają możliwość zderzenia się z jądrami reflektora. W wyniku zderzenia mogą wrócić do rdzenia, aby tam mieć kolejną szansę zainicjowania reakcji rozszczepienia.

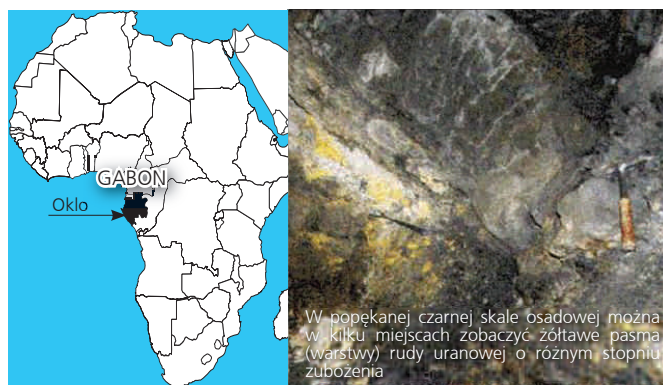
<sup>10</sup> W wypadku bomby atomowej korzysta się głównie z neutronów rozszczepieniowych o energiach rzędu 1 MeV

## 7.3. Chłodzenie rdzenia

W trakcie pracy reaktora, temperatura elementów paliwowych i prętów sterujących może przekroczyć nawet 2000°C, tak więc rdzeń musi być intensywnie chłodzony, gdyż w przeciwnym wypadku szybko by uległ uszkodzeniu. Dlatego też rdzeń reaktora jest zanurzony w potężnym basenie wodnym. To jednak nie wystarcza: ciepło należy odbierać dynamicznie (str. 14). W istocie rzeczy, efektywne i niezawodne chłodzenie rdzenia jest podstawowym elementem bezpiecznej pracy reaktora jądrowego: wszystkie dotychczasowe poważniejsze awarie reaktorów były skutkiem przegrzania rdzenia.

## 7.4. Naturalne reaktory jądrowe

Jak wspomniano we Wstępie, natura zdecydowanie wyprzedziła XX wiek atomu – o jakieś 2 miliardy lat! W Oklo znaleziono bowiem ślady miejsc, w których zawartość uranu-235 była niższa niż standardowe 0,72% - tamtejszy uran jest, jak mówimy, **zubożony**. Oznacza to, że ten izotop uranu był w jakiś sposób zużywany. Jak to się mogło dzieć? Jeśli wokół rudy uranowej było sporo wody, służyła ona jako moderator neutronów. Powstawało więcej neutronów termicznych, które inicjowały reakcje rozszczepienia. Oczywiście, w miarę pracy temperatura wody podnosiła się, woda odparowywała i taki reaktor przestawał pracować. Po pewnym czasie woda naciekała i reaktor wznowiał pracę. Taki cykl powtarzał się tak długo, jak długo zawartość uranu-235 w rudzie była wystarczająca na rozwijanie się reakcji łańcuchowej. Po nadmiernym zubożeniu uranu, naturalny reaktor stawał się nieczynny. Dziś w Oklo możemy obserwować nie tylko rudę uranową ze zubożonym uranem. Możemy też obserwować niektóre produkty reakcji: rozproszone fragmenty rozszczepienia – odpady promieniotwórcze - pozostałości po pracy reaktorów. To ważna lekcja dla nas wszystkich: te odpady pozostały w większości na miejscu, nie rozproszyły się na duże obszary. Oczywiście, większość promieniotwórczych izotopów nie dotrwała do naszych czasów, gdyż się rozpadła.



W popękanej czarnej skale osadowej można w kilku miejscach zobaczyć żółtawe pasma (warstwy) rudy uranowej o różnym stopniu zubożenia

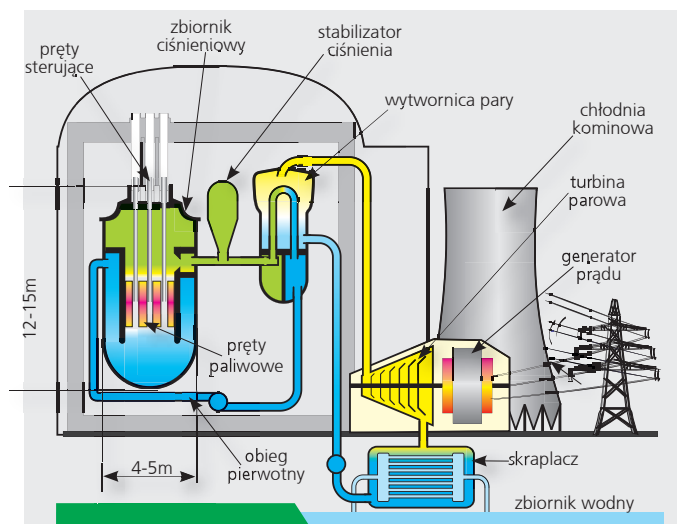


## 8. Elektrownia jądrowa, reaktory energetyczne i ich bezpieczeństwo

### 8.1. Konstrukcja

Wbrew częstym opiniom ogólny schemat elektrowni jądrowej nie różni się wiele od konwencjonalnej elektrowni ciepłej. Źródłem energii potrzebnej do wytworzenia pary jest tutaj, zamiast np. kotła opalanego węglem, reaktor jądrowy. Na rysunku pokazany jest schemat takiej elektrowni korzystającej z jednego z dwóch najczęściej stosowanych obecnie tzw. reaktorów wodno-ciśnieniowych (PWR od ang. *Pressurized Water Reactor*).

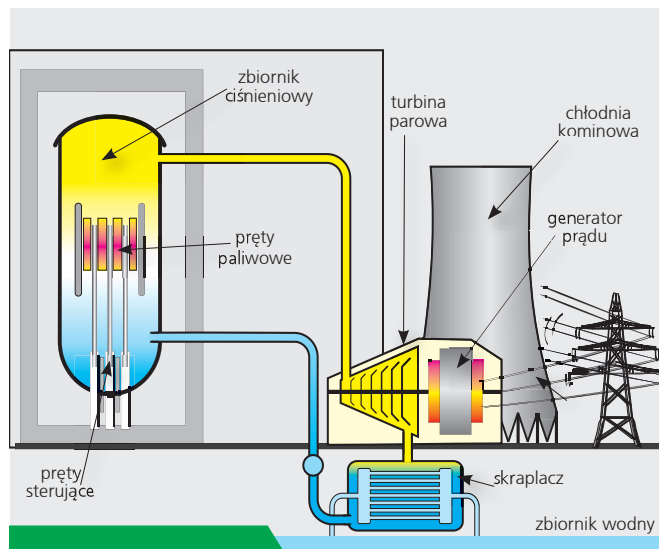
Woda chłodząca, cyrkulująca pod ciśnieniem rzędu 15 MPa, nagrzewa się do kilkuset (ok. 330) stopni Celsjusza podczas omywania rdzenia. Jej ciepło używane jest do wytworzenia w wymienniku ciepła (**wytwornicy pary**) pary o wysokiej temperaturze i ciśnieniu. Wysokie ciśnienie wody w obiegu wymaga stabilizowania, które zapewnia stabilizator ciśnienia. W wypadku spadku ciśnienia w obiegu podgrzewa się wodę w zbiorniku stabilizatora, aby wytworzyć nad nią większe ciśnienie pary. Gdy zaś ciśnienie jest za wysokie, otwiera się górny zawór, przez który część pary uchodzi do zbiornika zrzutowego. Ewentualnie wtryskuje się do stabilizatora trochę zimnej wody celem obniżenia ciśnienia pary nad wodą.



**Schemat elektrowni z reaktorem wodno-ciśnieniowym (PWR)**

Para wodna wytworzona w wytwornicy pary kierowana jest na turbinę parową i uruchamia łopatki turbiny. Ruch przenoszony jest na ruch wirnika generatora prądu. Skroplona para wraca do wytwornicy pary. Sam proces skraplania jest wspomagany wodą pobieraną ze zbiornika wodnego.

Innym, popularnym typem energetycznego reaktora jądrowego jest reaktor wrzący (BWR od ang. *Boiling Water Reactor*), którego schemat pokazuje kolejny rysunek. W odróżnieniu od reaktora PWR tutaj nie woda, lecz para wodna jest zarówno chłodziwem, jak i tzw. czynnikiem roboczym – wytwornice pary nie są potrzebne, gdyż ta jest wytwarzana już wewnątrz reaktora. Po osuszeniu para przekazywana jest na turbinę. Ze względów technicznych pręty sterujące wprowadzane są pomiędzy elementy paliwowe od dołu, a nie od góry, jak w wypadku reaktora typu PWR.



**Schemat elektrowni z reaktorem wrzącym (BWR)**

Reaktor nie musi być chłodzony wodą. Działają na świecie reaktory chłodzone gazem, a nawet ciekłymi metalami. Ze względu na objętość niniejszego opracowania, nie będziemy ich omawiać. Jednakże to, na co powinniśmy zwrócić uwagę, to stopień bezpieczeństwa reaktora.

### 8.2. Bezpieczeństwo

Od chwili pojawienia się obiektów jądrowych z największą uwagą analizowano potencjalne zagrożenia i podejmowano działania dla ochrony ich personelu i społeczeństwa przed skutkami możliwych awarii. Bezpieczeństwo elektrowni jądrowej opiera się na założeniu, że ryzyko związane z energetyką jądrową powinno być mniejsze niż ryzyko związane z innymi metodami wytwarzania energii elektrycznej. Nie można pominąć również 50 lat doświadczenia w dziedzinie unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych.

Ogólne zasady bezpieczeństwa dla elektrowni jądrowych w części dotyczącej projektowania i budowy można podsumować następująco<sup>11</sup>:

- projekt ma zapewnić, że instalacja jądrowa nadaje się do niezawodnej, stałej i łatwej eksploatacji, przy czym nadrzędnym celem jest zapobieganie wypadkom. Wcieleniem tej zasady jest reguła wpajana wszystkim pracownikom, mówiąca że bezpieczeństwo jest ważniejsze niż produkcja (energii elektrycznej)!,
- w projekcie trzeba stosować zasadę głębokiej obrony, z szeregiem poziomów obrony i z wielokrotnymi barierami zabezpieczającymi przed uwalnianiem materiałów radioaktywnych. Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń lub kombinacji uszkodzeń mogących prowadzić do poważnych konsekwencji ma być jak najmniejsze,
- rozwiązania techniczne stosowane w projekcie winny być uprzednio sprawdzone w pracy innych obiektów lub poprzez wykonane doświadczenia,
- na wszystkich etapach projektowania oraz przygotowania eksploatacji trzeba uwzględniać problemy współpracy człowieka z maszyną i możliwość błędu człowieka,

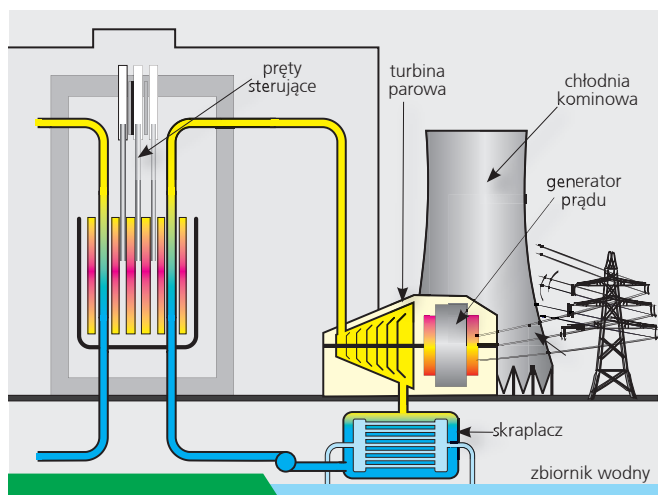
<sup>11</sup> wg A. Strupczewski, *Nie bójmy się energetyki jądrowej*, SEP, COSiW, Warszawa (2010)

- projekt musi zapewnić, że narażenie personelu instalacji na promieniowanie i możliwość uwolnienia materiałów radioaktywnych do otoczenia są tak małe jak jest to rozsądnie osiągalne.

Rysunek pokazuje mnogość systemów (barier) bezpieczeństwa radiacyjnego w typowym reaktorze BWR, począwszy od konstrukcji elementu paliwowego, który powinien zatrzymywać fragmenty rozszczepienia, a skończywszy na tzw. obudowie bezpieczeństwa.

Konstruktorzy reaktorów przestrzegają zasady, że każdy element, który mógłby zawieść w reaktorze, musi mieć swój zwielokrotniony układ bezpieczeństwa. Każdy z nich powinien działać w oparciu o inne zjawisko fizyczne, aby wszystkie stopnie elementów bezpieczeństwa nie mogły przestać działać z tego samego powodu.

Układy bezpieczeństwa reaktora działające w oparciu o proste zjawiska fizyczne (grawitacja, konwekcja, różnica ciśnień itp.) noszą nazwę **układów pasywnych**. Dzięki nim, obecnie konstruowane reaktory tzw. III generacji mają



**Schemat elektrowni z reaktorem typu RBMK**

powiedzieć, że był to reaktor przeznaczony do celów militarnych (choć nie wykorzystywany, o ile wiemy, w tym celu), o konstrukcji, która nie byłaby dopuszczona do eksploatacji w żadnym kraju poza ówczesnym ZSRR. Niezależnie od błędów technicznych konstrukcji tego reaktora (RBMK), do awarii doprowadziły też jednocześnie popełnione liczne błędy obsługi.

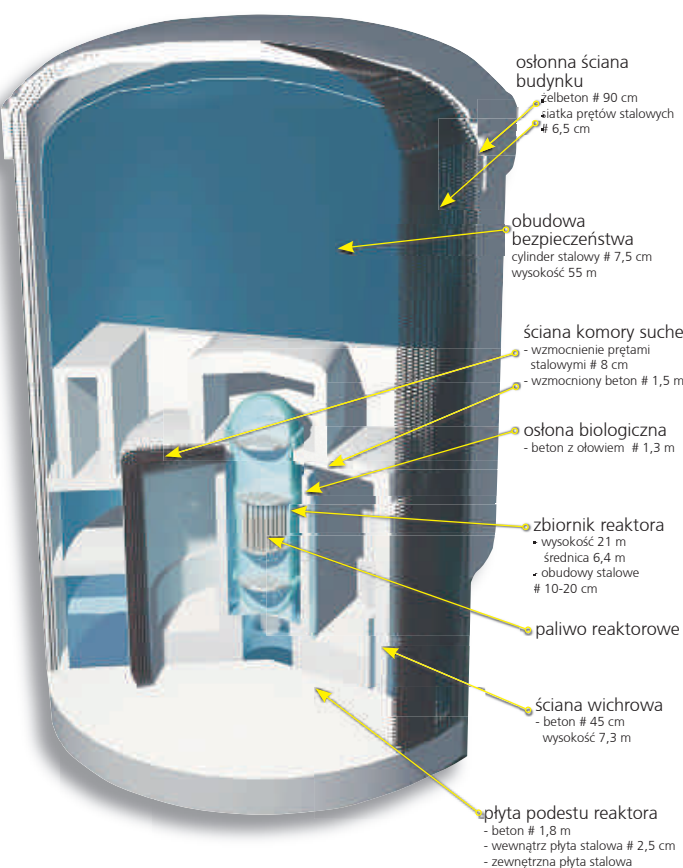
Reaktory typu czarnobylskiego zostały wyłączone z eksploatacji na Ukrainie i Litwie. Niemniej jednak kilka reaktorów energetycznych o podobnej konstrukcji, po poprawieniu niektórych elementów bezpieczeństwa, wciąż pracuje na terytorium Federacji Rosyjskiej.

Przy okazji warto podkreślić, że wybuch jądrowy reaktora nie jest możliwy. We wszystkich awariach, jak w Czarnobylu czy Fukushima mieliśmy do czynienia z wybuchami pary wodnej i wodoru.

Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych można także mierzyć częstością wypadków w miejscach pracy. Na przykład w Stanach Zjednoczonych częstość wypadków, w wyniku których należy pracownikowi uniemożliwić lub ograniczyć dostęp do pracy, albo które prowadzą do konieczności zmiany przez niego miejsca i rodzaju pracy, jest znacznie mniejsza w elektrowniach jądrowych niż np. w przemyśle budowlanym mieszkaniowym.

Często podnoszonym problemem jest także kwestia skutków ataku terrorystycznego, np. uderzenia samolotu w budynek reaktora. Przy obecnych konstrukcjach ścian takie uderzenie może skończyć się jednak tylko na zniszczeniu samolotu, a nie budynku, co zostało potwierdzone doświadczalnie!

Inne działania terrorystyczne także nie mogą poważnie zagrozić reaktorowi – to obiekt konstruowany ze szczególną troską o jego fizyczne bezpieczeństwo.



### **Mnogość barier bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych (BWR dla przykładu)**

nadzwyczaj wysoki stopień niezawodności: awaria związana z przegrzaniem rdzenia nie może zdarzyć się częściej niż raz na sto tysięcy lat pracy! Takich norm bezpieczeństwa nie ma żaden inny przemysł i bezpieczeństwo reaktora nie jest dziś problemem. Niewątpliwie, reaktory energetyczne planowane do zainstalowania w Polsce będą spełniały te wysokie standardy bezpieczeństwa. Przy takim stwierdzeniu pada z reguły pytanie o awarię reaktora w Czarnobylu (w 1986 roku). Bez wdawania się w szczegóły należy

## **8.3 Reaktory energetyczne dziś i jutro**

Obecnie, po wydarzeniach w Fukushima, Niemcy, Włochy i Szwajcaria zweryfikowały swe podejście do energetyki jądrowej. Niemcy zamierzają wyłączyć swoje elektrownie do 2022 r., Szwajcarzy do 2034 r. Jednocześnie jednak w 2011 r. aż 60 krajów zwróciło się do Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej o konsultację w sprawie budowy elektrowni. Nawet Stany Zjednoczone, które po awarii Three Miles Island (w 1979 r.) nie rozbudowywały energetyki jądrowej,



wydały pierwsze pozwolenia na budowę reaktorów. Jeszcze w 2012 r., oczekuje się budowy elektrowni jądrowych w Białorusi, Bangladeszu, Emiratach Arabskich, Turcji i Wietnamie.

Na świecie działa 436 reaktorów energetycznych (według danych WNA *World Nuclear Association* z 2011 r.), ponadto w budowie są 63, planowanych w najbliższym dziesięcioleciu jest 152, a rozpatruje się jeszcze budowę dalszych 350. Zatem, mimo jednoznacznie negatywnych decyzji wspomnianych wcześniej krajów, następuje, jak widać, odradzanie się energetyki jądrowej. W Unii Europejskiej działa 133 reaktorów, 4 znajdują się w budowie, a planowanych jest jeszcze 16. W Chinach działa zaledwie 14 reaktorów, ale 27 jest w budowie, 51 w fazie planów i 120 w fazie propozycji. W Indiach pracuje 20 reaktorów, buduje się 6, planuje 17 i proponuje 40. Oczywiście należy brać też pod uwagę, że w najbliższych dziesięcioleciach szereg reaktorów trzeba będzie zamknąć, więc sumaryczna produkcja energii elektrycznej pochodzącej z energetyki jądrowej nie wzrośnie w tak znaczący sposób, jak liczba nowo wybudowanych reaktorów.

Odpowiedź na pytanie, dlaczego mimo wydarzeń w Fukushima nawet Japończycy nie rezygnują<sup>12</sup> z energetyki jądrowej, inne kraje zaś wyraźnie stawiają na jej rozwój jest dość prosta: to kwestia kosztów. Szwedzi, którzy po awarii reaktora w Czarnobylu zadeklarowali wycofanie się z energetyki jądrowej, dziś tę energetykę rozbudowują. Energetyka jądrowa jest konkurencyjna co do kosztów, a ma szereg zalet, choćby z punktu widzenia braku szkodliwego wpływu na środowisko.

## 9. Czy promieniowanie z reaktora jest bezpieczne?

### 9.1 Awaria w elektrowni jądrowej

Jak w wypadku każdej instalacji przemysłowej i tu istnieje, choć nadzwyczaj niewielkie, ryzyko związane z awarią samego reaktora, z uwolnieniem promieniowania jonizującego, z niewłaściwym postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi i nadmiernym rozproszeniem materiałów rozszczepialnych lub promieniotwórczych. Osobista ocena każdego z tych rodzajów ryzyka jest jednak trudnym zadaniem, jako że nie należą one do kategorii ryzyka "dobrowolnego", które ponosimy np. wsiadając do samochodu i jadąc po szosie.

Aby dokonać oceny ryzyka tego typu, popatrzmy na liczbę wypadków śmiertelnych przypadających na jednostkę wyprodukowanej energii. Wypadki w konwencjonalnym górnictwie węglowym i przy wydobywaniu ropy naftowej wraz z konsekwencjami zanieczyszczenia powietrza wywołanym spalaniem paliw kopalnych pokazują, że ryzyko śmiertelne jest dla zwykłego przemysłu wydobywczego około 40-krotnie wyższe niż w całym szeroko rozumianym przemyśle jądrowym: od górnictwa uranowego do potencjalnych awarii elektrowni jądrowych.

W XX wieku zdarzały się wielkie katastrofy - jak przerwanie tamy wodnej (Vaiont, Włochy, 1963 r.) lub poważny wypadek w fabryce chemicznej (Bhopal,

Indie, 1984), które powodowały natychmiastową śmierć kilkunastu, a nawet ponad dwustu tysięcy ludzi (przerwanie tamy na rzece Baiqiao w Chinach w 1975 r.), podczas gdy w najgorszej, bardzo niezwyklej w całej historii energetyki jądrowej awarii, a mianowicie podczas pożaru reaktora w Czarnobylu, zginęło 31 ratowników, w tym 28 wskutek pochłonięcia zbyt wysokiej dawki promieniowania. Do roku 2010 zmarło jeszcze następne 19 osób spośród ówczesnych ratowników usuwających awarię palącego się reaktora, kilkoro dzieci zmarło na raka tarczycy. Zanotowano ok. 6700 nowych raków tarczycy, które nie spowodowały zgonów.

O potężnych zagrożeniach, jakie niesie sama natura mogliśmy się przekonać, gdy na Oceanie Indyjskim fale tsunami pochłonięły w 2005 r. około 300 000 ofiar. W marcu 2011 r. w Fukushima (Japonia) zginęło w falach tsunami ok. dwudziestu tysięcy ludzi, o których mniej się pamięta niż o zniszczonych reaktorach i podwyższonym poziomie promieniowania w miejscu elektrowni jądrowej w Fukushima. Tam nikt nie stracił ani zdrowia, ani życia!

Istnieją oceny, zgodnie z którymi cały amerykański program jądrowy niesie **ryzyko radiacyjne** porównywalne ze zmianą, jaką wywołałoby podniesienie ograniczenia prędkości samochodów z 80 do 81 km/h!

## 9.2. Czym jest ryzyko radiacyjne?

### Kilka słów o radiofobii

Emitowane z jąder cząstki mogą jonizować materię, tj. odrywać elektrony z atomów materii, przez którą przechodzą. Wywołane tym zmiany w chemii organizmów mogą spowodować szkodliwe zmiany na poziomie komórkowym, które w granicznych wypadkach mogą grozić powstaniem komórek nowotworowych, w skrajnych przypadkach - śmiertelnym nowotworem. Prowadzona od dziesięć lat "czarna propaganda" dotycząca takich pojęć, jak atom, izotop, promieniowanie spowodowała istnienie w społeczeństwach **radiofobii**, polegającej na irracjonalnym strachu przed promieniowaniem jonizującym. Strach ten stosunkowo łatwo wywołać i podtrzymać w społeczeństwie ponieważ promieniowania jonizującego nie widzimy, nie czujemy, nie ma ono smaku a jednak może być groźne.

Jest kilka przyczyn takiej sytuacji:

- wiedza o promieniowaniu jonizującym liczy sobie tylko ok. 100 lat - obecnie nikt się nie boi komet czy zaćmienia Słońca - od kilkuset lat wiadomo, jak i dlaczego takie zjawiska obserwujemy. Boimy się rzeczy nieznanych,
- zaniedbania edukacyjne ogółu społeczeństw,
- w pamięci społeczeństw tkwi, jak nieusuwalna zadra, pamięć o bombach jądrowych, które w 1945 roku unicestwiły Nagasaki i Hiroszimę (zabijając około dwieście tysięcy ludzi) podczas trwania II wojny światowej na Pacyfiku, a jednocześnie ignoruje się fakt, że dzięki zastosowaniu w medycynie promieniowania jonizującego uratowano już miliony istnień ludzkich,
- brak wiedzy o tym, że ewentualne groźne skutki obecności promieniowania jonizującego nie dotyczą poziomu promieniowania, z którym człowiek styka się na co dzień.

<sup>12</sup> W Japonii planuje się uruchomienie w najbliższym czasie dwóch reaktorów



Poziom promieniowania z uwzględnieniem możliwych skutków biologicznych nazywamy **dawką** i mierzymy ją w jednostkach zwanych **siwertami** (Sv)<sup>12</sup>. W istocie rzeczy, dawka to energia zdeponowana przez określone promieniowanie jonizujące w jednostce masy organizmu.

Średni poziom promieniowania na kuli ziemskiej, związany z promieniowaniem kosmicznym, promieniowaniem wydobywającym się ze skorupy ziemskiej, wreszcie z zawartością izotopów promieniotwórczych w naszych organizmach, wynosi ok. 3 mSv na rok. Biorąc pod uwagę naturalne źródła promieniowania w naszym otoczeniu można obliczyć, że przez każdego z nas przechodzi w każdej sekundzie ok. 15 000 cząstek promieniowania jonizującego. Mimo tego zmasowanego ataku cząstek, jakoś żyjemy, a nasza długowieczność rośnie. Ten poziom promieniowania nie może więc być uznany za szkodliwy. Otóż, elektrownia jądrowa emituje do atmosfery pewną ilość materiałów promieniotwórczych, jednak poziom promieniowania wokół elektrowni jądrowej nie przekracza 1/100 mSv na rok i jest więc około 300 razy mniejszy w porównaniu z poziomem naturalnego promieniowania środowiska - tym bardziej nie może wpływać na zdrowie okolicznej ludności. Pojawiające się czasem doniesienia np. o zwiększonej liczbie białaczek dziecięcych wywołanych promieniowaniem emitowanym z elektrowni jądrowych należy traktować z bardzo dużym dystansem, o czym także świadczą analizy poważnych towarzystw naukowych, jak np. COMARE.

Sytuacja zmienia się drastycznie, gdy reaktor jądrowy ma poważną awarię. Brak chłodzenia rdzenia może bowiem spowodować powstanie gorącej pary wodnej, ta zaś w reakcji chemicznej z koszulkami cyrkonowymi paliwa tworzy dwutlenek cyrkonu i wodór. Ciśnienie pary wodnej może spowodować wybuch pary, wodór zaś w połączeniu z tlenem może też wybuchnąć. Ten właśnie scenariusz został zrealizowany w Czarnobylu w 1986 r., a także w elektrowni Daiichi w Fukushima w Japonii w 2011 r.

Gwałtowny wzrost temperatury w rdzeniu może doprowadzić do stopienia się rdzenia, a jego rozproszenie podczas wybuchu może wprowadzić do atmosfery ogromne ilości izotopów promieniotwórczych. Dla ludzi znajdujących się w miejscu wybuchu stanowi to śmiertelne niebezpieczeństwo bowiem dawki promieniowania, które pochłoną w krótkim czasie, mogą przekraczać poziom kilku siwertów, co może skutkować zgonem w wyniku pojawienia się ostrej choroby popromiennej. Właśnie tak silne napromienienie ratowników palącego się reaktora w Czarnobylu było przyczyną śmierci wspomnianych 28 osób. W Fukushima zaś, otrzymane maksymalne dawki, jak już mówiliśmy, nie spowodowały zagrożenia życia, tym bardziej nie było ani jednego przypadku śmiertelnego.

Prądy powietrzne mogą rozprzestrzenić wielkie ilości uwolnionego materiału promieniotwórczego na duże przestrzenie. Znajdujący się w atmosferze izotop jodu I-131 (pierwiastek ten sublimuje, czyli łatwo pojawia się w postaci gazowej i dlatego jako pierwszy rozprzestrzenia się wokół miejsca awarii reaktorowej), wchłaniany łatwo przez tarczycę, może wywołać w skrajnym wypadku raka tarczycy.

<sup>12</sup> z definicji 1Sv=1J/kg; W istocie rzeczy, siwert oznacza jednostkę **równoważnika dawki**, w którego obliczeniu uwzględnia się rodzaj promieniowania jonizującego (nie każdy jonizuje bowiem materię w identyczny sposób). To, co nazywamy **dawką pochłoniętą**, a więc energię promieniowania zdeponowaną w jednostce masy organizmu, mierzymy w grejach (Gy), przy czym 1 Gy=1 J/kg. Po pomnożeniu dawki pochłoniętej przez odpowiedni współczynnik „jakości” promieniowania otrzymujemy równoważnik dawki. Mówi on w istocie, ile razy dane promieniowanie jest skuteczniejsze z biologicznego punktu widzenia od promieniowania gamma

Opad promieniotwórczy spowoduje skażenie terenów, w szczególności promieniotwórczymi izotopami Cs-137, Sr-90 i innymi. Skażenie terenu przełoży się na np. skażenie mleka od krowy spożywającej skażoną trawę. W rezultacie narażone zostaną szczególnie dzieci, które spożywają duże ilości mleka. Z całą pewnością skutków takich ekstremalnych awarii reaktorów nie wolno lekceważyć. Jednak nie każda wielka awaria musi owocować skutkami szkodliwymi dla ludzi i środowiska, czego dobrym przykładem jest awaria reaktora w Three Miles Island (USA, 1979 rok). Pomimo stopienia rdzenia, nikt z załogi reaktora oraz nikt z mieszkańców Pensylwanii nie ucierpiał.

Jak pokazuje historia, znacznie groźniejsze od bezpośrednich skutków chmury radioaktywnej okazują się konsekwencje radiofobii, czyli wspomnianego już wcześniej irracjonalnego i panicznego strachu przed promieniowaniem. Taki strach wywołał bowiem po awarii w Czarnobylu np. bardzo wiele (ocenianych w Europie na ok. 100 000 przypadków!) bezsensownych aborcji. Władze kilku krajów ustalając niskie wartości progowe, powyżej których poziomy promieniowania uznawane zostały za szkodliwe, spowodowały wybijanie stad reniferów w Szwecji i w Laponii, pozbawiając tamtejszą ludność naturalnego pożywienia. Ta sama przyczyna spowodowała niepotrzebne przesiedlenie ok. 130 000 mieszkańców terenów wokół Czarnobyla.

Temat ten, fascynujący sam w sobie, można byłoby rozwijać i podawać wiele przykładów. Może jednak posłużymy się choćby najprostszym przykładem pokazującym w czym leży problem radiofobii.

Pamiętajmy, że jeden rozpad promieniotwórczy w czasie 1 sekundy to jednostka aktywności - **“bekerel”** o symbolu Bq.

Torebka chipsów o masie ok. 400 g zawiera w sobie aktywność promieniowania gamma ok. 1300 Bq, w jednym litrze mleka znajdziemy aktywność 45 Bq, izotopy promieniotwórcze w całym naszym ciele mają aktywność rzędu 8000 Bq. Gdybyśmy jedli jedną torebkę chipsów na dzień, nie wspominając o naszym wewnętrznym źródle promieniowania, otrzymalibyśmy od tych izotopów dawkę przekraczającą w ciągu roku tę, którą otrzymałaby (powyżej poziomu naturalnego) ludność Fukushimy na znacznej części terenu, z którego podjęto ewakuację. Obecne oceny pokazują, że skutki awarii elektrowni jądrowej w Fukushima będą co najmniej kilkunastokrotnie mniejsze niż w wyniku awarii w Czarnobylu i nie należy oczekiwać żadnych wymiernych efektów wzrostu nowotworów. Na plus dla Japończyków należy zapisać natomiast szybkość i rzetelność przekazywania informacji o zaistniałej sytuacji. Informacje z kół rządowych są w Japonii przyjmowane spokojnie - relacja władza - społeczeństwo oparta jest na wzajemnym zaufaniu, a społeczeństwo jest stale przygotowywane do racjonalnego reagowania na trzęsienia ziemi, częste w tamtym rejonie globu. Takiej otwartości w przekazywaniu komunikatów o katastrofie zabrakło w wypadku elektrowni w Czarnobylu, gdzie informacja była jednak bardzo długo skrywana przed własnym narodem.

Zupełnie szczególnym przypadkiem są kosztowne skutki obecnej radiofobii w Niemczech. Decyzja o rezygnacji z energetyki jądrowej okazuje się kosztować to państwo miliardy Euro. Takie koszty poniosą Niemcy ze względu na konieczność importu brakującej energii elektrycznej

z Francji i Republiki Czeskiej, w przyszłości niewykluczone, że również z Polski. Rozwój energii słonecznej i wiatrowej jest bardzo kosztowny, również, prędzej czy później, dla podatnika. Konieczność zwiększenia importu gazu z Rosji może dodatkowo uzależnić energetycznie Niemcy od Rosji.

Niewątpliwie należy chronić społeczeństwa przed zagrożeniami dotyczącymi zanieczyszczeń wody i powietrza, zapewniać sprawność urządzeń mechanicznych i elektrycznych. Za każdym razem jednak musi być zachowana odrobina rozsądku. Postawienie sobie za cel nadmiernej czystości wody może skończyć się tak wielką jej ceną, że ludzie przestaną jej używać w celach higienicznych, co oczywiście skończy się katastrofą. W ciągu tygodnia ginie na naszych drogach ok. 50 osób, a więc rocznie ponad 2500 osób, co jednak nie powstrzymuje milionów kierowców przed wsiadaniem do auta<sup>13</sup>. Jednocześnie, gdyby w wyniku katastrofy jądrowej ucierpiałby nawet 1% liczby tych ludzi, wzbudziłoby to nieprawdopodobnie ostrą reakcję Polaków oraz ba! całego świata.

W istocie rzeczy dawki uznane (decyzjami administracyjnymi) za niebezpieczne są bardzo niskie: na poziomie 1/3 dawek otrzymywanych i tak od natury. I nie byłoby w tym może nic złego, gdyby nie fakt, że koszt tej wymuszonej prawem ochrony jest niewspółmiernie wysoki do zysków. "Odgórnie" decyzje wymuszają w wielu krajach próg ochrony przed promieniowaniem jonizującym na poziomie 1 mSv rocznie dla ogółu społeczeństwa - często taki przepis dotyczy regionów, gdzie naturalne promieniowanie jest oceniane na kilkanaście czy nawet kilkadziesiąt mSv rocznie. To tak jak wymaganie od mieszkańców regionów podzwrotnikowych aby zaopatrzili koła swoich pojazdów w zimowe opony i nakładane łańcuchy. Nieuchronnie nasuwa się pytanie: ile jesteśmy w stanie płacić za nawet złudne poczucie bezpieczeństwa?

## 10. A co robić z odpadami promieniotwórczymi z reaktora?

Szczególną troską energetyki jądrowej jest problem **odpadów promieniotwórczych**, które powstają w trakcie pracy reaktora jądrowego.

Jest całkiem oczywistą rzeczą, że w wyniku reakcji rozszczepienia muszą tworzyć się nowe izotopy - fragmenty rozszczepienia. Liczba neutronów w jądrze uranu (143 lub 146) znacznie przekracza liczbę protonów (92), co zapewnia względną stabilność jąder uranu (okresy połowicznego zaniku <sup>238</sup>U - 4,5 mld lat, <sup>235</sup>U - 0,7 mld lat). W lżejszych, stabilnych jądrach stosunek liczby neutronów do protonów jest niższy. Dlatego też, jeśli jądro uranu dzieli się na dwa mniejsze liczba neutronów w każdym fragmencie rozszczepienia jest większa niż niezbędna dla zapewnienia mu trwałości. Fragmenty rozszczepienia są więc z natury nietrwałe - promieniotwórcze.

Oprócz fragmentów rozszczepienia, pochłanianie neutronów przez paliwo jądrowe prowadzi do powstawania izotopów pierwiastków transuranowych (o  $Z > 92$ ), w szczególności rozszczepialnego jądra izotopu plutonu

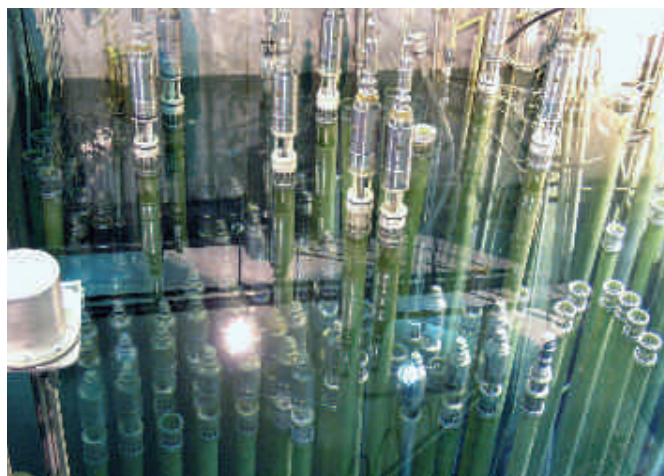
<sup>239</sup>Pu ( $Z=94$ ), wykorzystywanego w reaktorach powielających jako paliwo (mówimy wtedy o cyklu uranowo-plutonowym – patrz Uzupełnienie 2). Ten sam izotop plutonu, tworzący się np. w reaktorze typu PWR, wnosi ostatecznie całkiem spory wkład do produkowanej energii. Szczególną troskę wykazuje się w przechowywaniu plutonu, gdyż ten właśnie izotop może być wykorzystany w celach militarnych, choć wcale nie tak łatwo, jak się niektórym wydaje.

Należy też pamiętać, że w trakcie pracy reaktora następuje aktywacja<sup>14</sup> jego materiałów konstrukcyjnych. Typowym produktem takiej aktywacji jest <sup>60</sup>Co. Materiały konstrukcyjne stają się więc ostatecznie odpadami promieniotwórczymi, z którymi należy właściwie postępować.

Popatrzmy na niektóre typowe produkty rozszczepienia <sup>235</sup>U i zwróćmy uwagę na ich okresy połowicznego zaniku,  $T_{1/2}$ . Niektóre ze szczególnie długozyciowych izotopów promieniotwórczych znajdujących się w wypalonym paliwie podane zostaną w oddzielnej tabeli (str. 20).

### Fragmenty rozszczepienia <sup>235</sup>U<sup>15</sup>

| Pierwiastek | Liczba masowa A | $T_{1/2}$ | Wydajność (%) |
|-------------|-----------------|-----------|---------------|
| Stront      | 89              | 51 dni    | 4,8           |
| Stront      | 90              | 28 lat    | 5,8           |
| Itr         | 91              | 58 dni    | 5,4           |
| Cyrkon      | 95              | 65 dni    | 6,3           |
| Ruten       | 103             | 40 dni    | 3,0           |
| Ruten       | 106             | 1 rok     | 0,4           |
| Antymon     | 125             | 2,76 lat  | 0,02          |
| Tellur      | 127             | 109 dni   | 0,04          |
| Tellur      | 129             | 31 dni    | 0,35          |
| Cez         | 137             | 30 lat    | 6,2           |
| Cer         | 141             | 33 dni    | 6,0           |
| Cer         | 144             | 285 dni   | 6,0           |
| Promet      | 147             | 2,6 lat   | 2,4           |
| Samar       | 151             | 90 lat    | 0,44          |



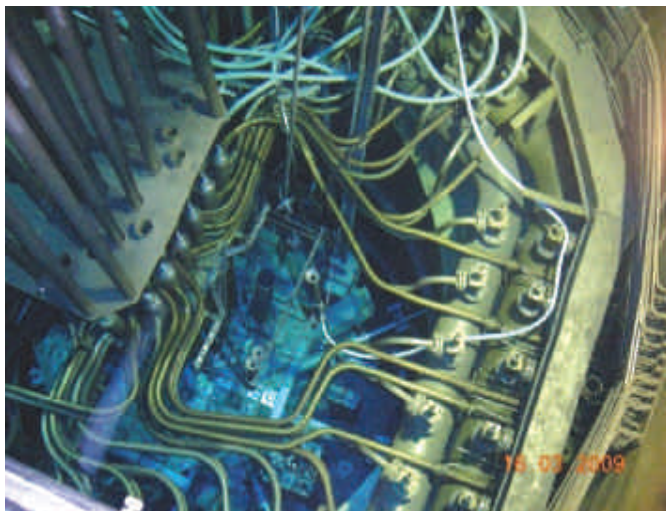
**Wypalone paliwo zanurzone w wodzie w basenie przechowawczym reaktora MARIA**

<sup>13</sup> z danych WHO (Światowa Organizacja Zdrowia) wynika, że na świecie rocznie ginie w wypadkach samochodowych ponad 1,2 miliona osób rocznie, a liczba rannych sięga ~50 milionów. Ginią najczęściej ludzie w wieku 15 - 44 lat. Liczba ofiar wypadków wzrosła do 2020 roku o ok. 60%. W samej Europie Zachodniej obserwuje się 11 zgonów na 100 000 mieszkańców (w niektórych regionach Afryki ok. 28,3) co oznacza około 2 zgonów/min, a przy tym co sekundę dwie osoby są ranne (bardzo dziękujemy p. mgr Ewie Droste za te dane)

<sup>14</sup> aktywacją nazywamy proces pochłaniania neutronów przez jądra atomowe pierwiastków składników materiału - w wyniku czego powstają izotopy promieniotwórcze

<sup>15</sup> wg T.Jevremovic, Nuclear Principles in Engineering, Second Edition, Springer (2009)





**Reaktor MARIA w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku. W odsłoniętym rdzeniu reaktora widać niebieską poświatę – promieniowanie Czerenkowa**

Postępowanie z odpadami promieniotwórczymi, w szczególności z wypalonym paliwem, to istotny problem techniczny, który musi być rozwiązany jeśli energetyka jądrowa ma być bezpieczna i w pełni akceptowalna przez ludzi.

W odróżnieniu od węgla, paliw ciekłych lub gazu, paliwo jądrowe nigdy nie wypala się całkowicie. Wynika to z faktu, że w trakcie „wypalania” tego paliwa powstaje w nim również wiele jąder, które silnie pochłaniają neutrony – typowym przykładem jest  $^{135}\text{Xe}$ . Z czasem neutrony tworzone w reakcjach rozszczepienia są głównie wychwytywane (pochłaniane) przez takie właśnie produkty wcześniejszych reakcji. Zwielokrotnienie liczby neutronów w pojedynczym akcie rozszczepienia nie wystarcza wtedy do podtrzymania reakcji łańcuchowej. W takiej sytuacji element paliwowy nie może służyć dalej jako paliwo, staje się natomiast wysokoaktywnym odpadem promieniotwórczym. Co gorsza, okres połowicznego zaniku izotopów pierwiastków wyprodukowanych w reakcjach rozszczepienia jest często bardzo długi, rzędu dziesiątków tysięcy lat, tak więc przy przechowywaniu wypalonego paliwa należy bardzo długo zachowywać szczególną ostrożność. To właśnie powoduje, że problem przechowywania odpadów z reaktora jest istotny ze względów społecznych, politycznych i ekonomicznych. Na szczęście, typowa elektrownia jądrowa o mocy 1000 MWe wytwarza rocznie jedynie około 3 m<sup>3</sup> odpadów



**Z prawej kanister na zeszkliwione wypalone paliwo. Typowy rozmiar: wysokość 1,3 m, średnica 40 cm. Obok pokazany jest pojemnik transportowy przeznaczony do przewożenia wypalonych elementów paliwowych**



**Pojemniki transportowe na wypalone paliwo, wykorzystane do wywozu wypalonego paliwa z reaktorów EWA i MARIA zlokalizowanych w Świerku**

promieniotwórczych (ok. 27 ton). Po 10 latach ich aktywność spada 1000-krotnie. W odróżnieniu od wielu odpadów, przemysłowych (plastiki, eternit, chemikalia, złom...) odpady promieniotwórcze rozpadają się stosunkowo szybko.

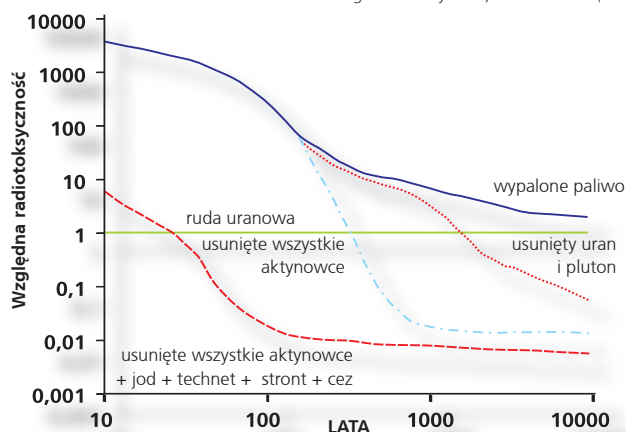
Promieniotwórcze jądra atomowe, będące fragmentami rozszczepienia, produkują podczas swych rozpadów energię, która następnie przekształca się w ciepło. Wypalone paliwo jądrowe przechowuje się zatem na ogół przez jakiś czas w wodnych basenach przechowawczych, w których temperatura wypalonego paliwa spada. W miarę kolejnych rozpadów promieniotwórczych w paliwie i ubywania nuklidów promieniotwórczych (gdy interesują nas tylko właściwości jąder atomowych danego izotopu, wygodne jest stosowanie słowa „nuklid”) spada aktywność wypalonego paliwa. Jeśli nie planuje się jego recyklingu (opisanego dalej), jest ono przechowywane wprawdzie przez kilkadziesiąt (20-50) lat w wodzie w basenie przechowawczym zlokalizowanym na terenie elektrowni, a następnie, przez kolejne kilkadziesiąt lat (30-50) w kolejnym „suchym” przechowalniku w atmosferze gazowej, by po takim okresie można było je składować w specjalnych podziemnych składowiskach odpadów promieniotwórczych: dawnych kopalniach soli, ilach i skałach granitowych.

Można jednak wybrać inny scenariusz: **recyklingu** wypalonego paliwa. Po roku lub kilku latach przechowywania wypalonego paliwa w basenie przechowawczym można je przesłać do fabryk, w których będzie ono podlegać procesowi chemicznemu, prowadzącemu do odzyskania pierwiastków rozszczepialnych (uranu i plutonu, które mogą być ewentualnie użyte do produkcji świeżego paliwa) oraz ważnych dla gospodarki izotopów innych pierwiastków (np. promieniotwórczych izotopów pierwiastków ziem rzadkich). Pozostały materiał (ok. 3% masy początkowej), na ogół w ciekłej postaci, podlega procesowi zeszkliwienia (zeszkliwienia, witrifikacji) i zostaje załadowywany do potężnych pojemników metalowych (patrz zdjęcie), po czym wysłany na składowisko odpadów. Warto zauważyć, że produkty rozszczepienia tworzą w szkło tlenki o strukturze typowej dla szkła. Takie szkło jest odporne na wymywanie, a także wystarczająco trwałe, aby nie zmieniało swoich właściwości w czasie niezbędnym do osiągnięcia oczekiwanego spadku aktywności. Procedura witrifikacji nie jest powszechna, gdyż – niezależnie od kosztów - wymaga dysponowania bardzo zaawansowanymi technologiami.



## Wpływ procesu przerobu wypalonego paliwa na radiotoksyczność wysokoaktywnych odpadów powstałych w wyniku jądrowego cyklu energetycznego

wg. G.J. van Tuyle i in., Nucl. Tech. 101(1993)1



| Izotop            | Okres połowicznego rozpadu [lata] | Radiotoksyczność [Sv/kg] |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| $^{99}\text{Tc}$  | $2,1 \cdot 10^5$                  | $4,9 \cdot 10^2$         |
| $^{129}\text{I}$  | $1,6 \cdot 10^7$                  | $0,7 \cdot 10^3$         |
| $^{135}\text{Cs}$ | $2,3 \cdot 10^6$                  | $0,8 \cdot 10^2$         |
| $^{237}\text{Np}$ | $2,1 \cdot 10^6$                  | $0,3 \cdot 10^4$         |
| $^{238}\text{Pu}$ | 88                                | $1,4 \cdot 10^8$         |
| $^{239}\text{Pu}$ | $2,4 \cdot 10^4$                  | $0,6 \cdot 10^6$         |
| $^{240}\text{Pu}$ | $6,6 \cdot 10^3$                  | $2,1 \cdot 10^6$         |
| $^{242}\text{Pu}$ | $3,7 \cdot 10^5$                  | $0,4 \cdot 10^5$         |
| $^{241}\text{Am}$ | 432                               | $0,3 \cdot 10^8$         |
| $^{243}\text{Am}$ | $7,4 \cdot 10^3$                  | $1,5 \cdot 10^6$         |
| $^{244}\text{Cm}$ | 18                                | $0,5 \cdot 10^9$         |

[dane o radiotoksyczności na podstawie GSI-Nachrichten 2/99, str.15]

Przetwórnice wypalonego paliwa we Francji, Wielkiej Brytanii i Belgii wytwarzają około 1000 ton rocznie zeszkłonego paliwa (2500 kanistrów). W każdym kanistrze, do którego pakujemy zeszkłone odpady mieści się ich 400 kg. Podczas jednego roku pracy reaktora o mocy (elektrycznej) 1000 MW<sub>e</sub> powstaje 5 ton takiego szkła lub 12 kanistrów. Taką ilość łatwo transportować oraz przechowywać w odpowiednich warunkach osłonowych. Tabela pokazuje najbardziej długożyciowe izotopy powstające w paliwie jądrowym, rysunek zaś pokazuje, jak wielki wpływ ma przerób paliwa na jego długożyciowość. Widać wyraźnie, że usunięcie aktywnowców<sup>16</sup> i podstawowych fragmentów rozszczepienia spowodowałoby, że średni czas życia takiego odpadu promieniotwórczego wyniósłby zaledwie kilkadziesiąt lat, a wówczas nie mielibyśmy już żadnego problemu z jego przechowywaniem.

Z podanych wyżej powodów, niezależnie od problemów związanych z geologicznymi składowiskami odpadów promieniotwórczych, wiele uwagi poświęca się tzw. Technologii Rozdziału i Transmutacji P&T (od ang. *Partitioning and Transmutation*), które pozwoliłyby na

<sup>16</sup> aktywnowce - grupa pierwiastków chemicznych wydzieleną z układu okresowego, Grupa ta liczy 15 metali. Każdy z nich zajmuje to samo miejsce w układzie okresowym, co metal, od którego pochodzi ich nazwa - aktywn. Wszystkie aktywnowce są promieniotwórcze. Praktycznie tylko tor, proaktyn i uran występują w skorupie ziemskiej, ponieważ ich okres połowicznego zaniku jest porównywalny z wiekiem Ziemi

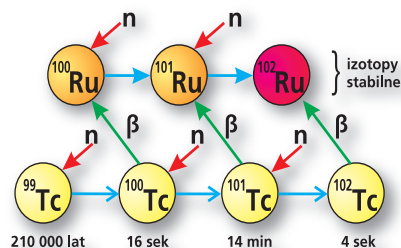
wydzielenie plutonu i tzw. **poniższych aktywnowców**<sup>17</sup> (w szczególności np. Am i Cm), lekkich pierwiastków ziem rzadkich, niektórych długożyciowych (patrz tabela obok) produktów rozszczepienia oraz przekształceniu ich (transmutacji) w materiały krótkożyciowe, a nawet stabilne. To jednak technologia jutra.

Trudno może uwierzyć, ale zamknięta w szklawie, przypadająca na statystycznego człowieka ilość odpadów promieniotwórczych związanych z wytwarzaniem "jądrowej" energii elektrycznej (potrzebnej mu w trakcie jego życia) mieści się... w jego dłoni.

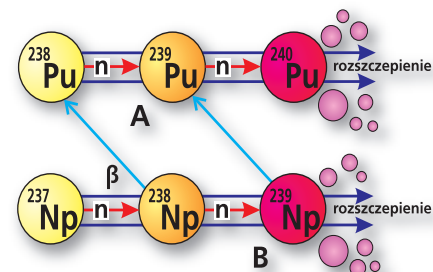
## 11. Technologia jutra: czy możemy spalać odpady promieniotwórcze?

Zdefiniujmy wpierrw, co będziemy rozumieli pod użytymi wyżej nazwami: **transmutacja** i **spalanie** odpadów promieniotwórczych.

### Przykład reakcji - transmutacja technetu



### Przykład reakcji spalania neptunu i plutonu

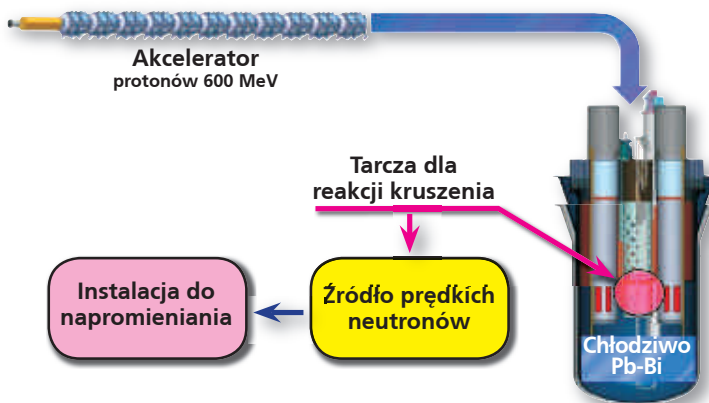


Źródło: W. Gudowski. Royal Inst. Techn. Sztokholm, Szwecja

Transmutacja jest procesem przekształcania, na skutek pochłonięcia neutronu, długożyciowego izotopu promieniotwórczego w izotop, którego okres połowicznego zaniku byłby krótszy, lub który nawet byłby pierwiastkiem stabilnym. W odróżnieniu od tego procesu - spalanie (spopielenie) jest procesem, w którym pochłonięcie neutronu prowadzi do powstania izotopu rozpadającego się w drodze rozszczepienia do izotopu trwałego. Przykłady obu procesów pokazują poniższe rysunki. Zaznaczmy, że pokazane na rysunkach procesy inicjują nie neutrony termiczne, lecz neutrony prędkie, o energiach rzędu megaelektronowoltów (MeV).

Obecnie prowadzi się intensywne prace badawcze mające na celu wydajne wykorzystanie obu mechanizmów. Reaktory pracujące na neutronach prędkich, a także układy sterowane akceleratorem stwarzają nadzieję, że nagromadzone

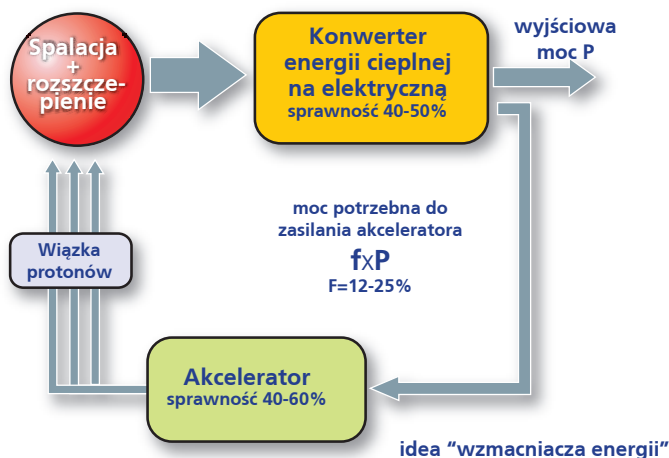
<sup>17</sup> w języku angielskim takie aktywnowce nazywa się *minor actinides*, (czyli takie aktywnowce bez U i Pu, które mogą pojawić się w paliwie reaktorowym). W języku polskim brak jest oficjalnej nazwy. Nazwa *poniższe aktywnowce* została zasugerowana przez mgr inż. J. Kaniowskiego, eksperta Państwowej Agencji Atomistyki



### Reaktor o mocy cieplnej w stanie podkrytycznym 50-100 MW; w stanie krytycznym ok. 100 MW

dotąd odpady promieniotwórcze pochodzące z energetyki jądrowej, jak i te, które pojawiają się w przyszłości, można będzie przekształcić w odpady krótkożyłowe, znacznie łatwiejsze do przechowania.

**„Wzmacniacz energii”** (tej nazwy nie należy brać dosłownie) jest pomysłem, propagowanym już pod koniec ubiegłego wieku szczególnie przez prof. Carlo Rubię z CERN’u w Szwajcarii. Idea polega na wykorzystaniu reaktora podkrytycznego i neutronów prędkich powstałych w tzw. **reakcji kruszenia (spalacji)**, wyzwalanej przez protony o energii rzędu 1 GeV z odpowiedniego akceleratora. Protony o takiej wysokiej energii w zderzeniu z jądrami ciężkich pierwiastków (choćby ołowiu) powodują skruszenie jądra na bardzo drobne fragmenty, w tym neutrony. Duża liczba neutronów otrzymywana w procesie spalacji wykorzystywana jest do powstawania w reaktorze rozszczepialnego izotopu  $^{233}\text{U}$  z  $^{232}\text{Th}$  (mówimy tu o cyklu **torowo-uranowym**). Sam reaktor podkrytyczny mógłby być użyty do spalania odpadów promieniotwórczych. Główną ideą projektu jest możliwość otrzymania z rozszczepienia tak dużej energii, że jej część można wykorzystać do zasilania akceleratora, a pozostałą na dostarczenie energii elektrycznej odbiorcom zewnętrznym. Ocenia się, że stosunek energii produkowanej przez reaktor do energii potrzebnej do zasilania akceleratora może wynosić nawet 15. Stąd też nieco „reklamarska” nazwa - wzmacniacz energii.

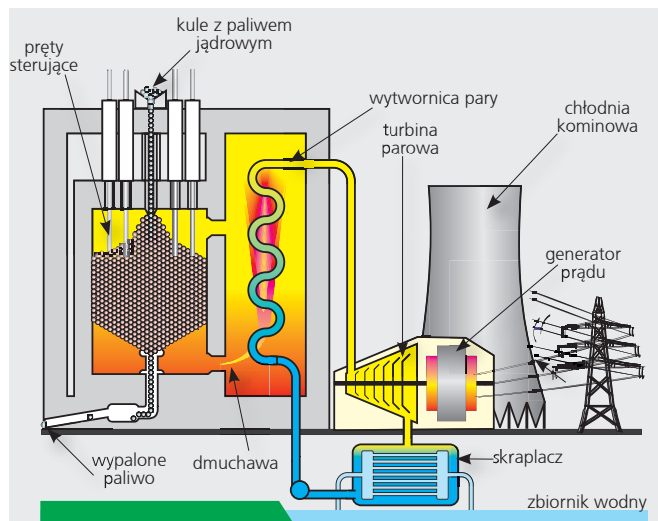


Podkrytyczność takiego reaktora gwarantuje bezpieczeństwo całego urządzenia: wystarczy wyłączyć wiązkę protonów, by zatrzymać reakcję łańcuchową. Ponadto, w cyklu torowo-uranowym nie powstaje pluton „militarny”, produkcja pierwiastków transuranowych

w takim układzie hybrydowym będzie zaś dwa lub trzy rzędy wielkości mniejsza niż w obecnie pracujących reaktorach. Prace nad rozwojem układów sterowanych akceleratorem prowadzone są w Europie, Japonii, Korei, Belgii, Rosji i USA. Aby pokazać ich użyteczność potrzebny jest akcelerator protonów dający prąd 1-10 mA i tarcza, w której można wytworzyć moc powyżej 1MW, oba układy związane z podkrytycznym rdzeniem reaktora. W sprawdzenie tych nowych idei zaangażowało się kilka krajów europejskich. Jest rzeczą możliwą, że pierwsze instalacje ADS (od ang. *Accelerator-Driven Systems*) będą zbudowane w stosunkowo niedalekiej przyszłości. Nadzieję taką niesie w szczególności belgijski projekt MYRRHA. Schemat proponowanej instalacji przedstawia rysunek obok. Pomysł wykorzystania tego typu urządzeń nie jest jedyną nową ideą nowoczesnej atomistyki.

Ponieważ poważnym problemem jest tworzenie się podczas pracy reaktora izotopów plutonu, testuje się obecnie innego rodzaju paliwo, tzw. **paliwo z bierną matrycą** (ang. *Inert Matrix Fuel*). W takim paliwie mamy matrycę będącą stosunkowo prostym związkem, jak np. węgiel krzemu czy tlenek magnezu, w którym znajdują się rozproszone ziarna rozszczepialnego paliwa (np.  $^{235}\text{Pu}$ ). Zauważmy, że nie ma tu  $^{238}\text{U}$ , nierozszczepialnego przez neutrony termiczne, a będącego głównym źródłem tworzenia się  $^{239}\text{Pu}$ . Wykorzystanie tego typu paliwa daje nadzieję na stopniowe pozbycie się nagromadzonych, nadmiernych światowych zapasów niebezpiecznego („militarnego”) plutonu. Obecne elektrownie jądrowe i przetwórnice paliwa produkują około 100 ton plutonu rocznie. Tylko nieznaczna tego część jest wykorzystywana do produkcji paliwa typu **MOX** (od ang. *mixed oxides* – mieszanki tlenków uranu i plutonu), a ze względu na militarne zastosowania i toksyczność plutonu należy dbać o jego niezawodne zabezpieczenie. Użycie paliwa z bierną matrycą pozwalałoby też na spalanie pomniejszych aktywności (Am, Np, Cm). O paliwie tego typu myśli się też przy planowaniu przyszłych reaktorów tzw. IV generacji.

Do technologii jutra należy zaliczyć też budowę reaktorów wysokotemperaturowych typu HTGR (*High Temperature Gas Reactor*) opartych o cykl torowo-uranowy. W skorupie ziemskiej toru jest znacznie więcej niż uranu. W strumieniu prędkich neutronów tor można przekształcić w rozszczepialny izotop  $^{233}\text{U}$ . Taki reaktor ma cały szereg nowych elementów



Rysunek elektrowni wykorzystującej reaktor wysokotemperaturowy

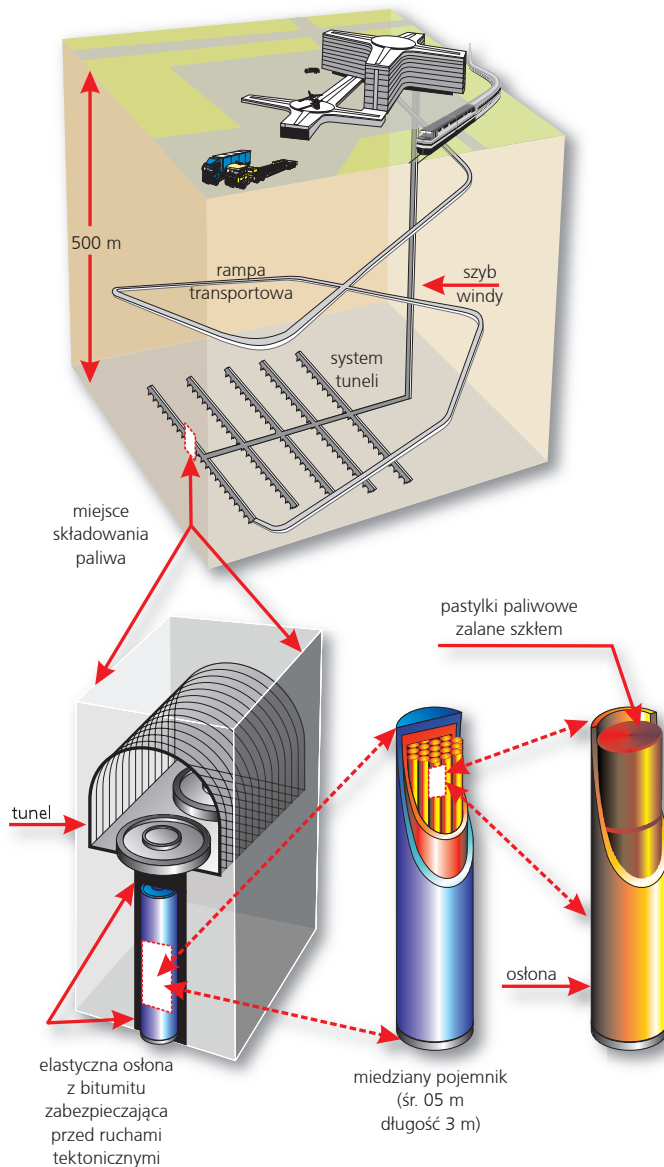
odróżniających go od klasycznych reaktorów typu PWR czy BWR. Najnowsze pomysły to: nowe paliwo w formie kul z ceramiki węglowej, zawierającej ziarna paliwa, a także chłodzenie gazem, którego temperatura na wylocie miałaby kilkaset stopni Celsjusza. Przy tak wysokich temperaturach możliwe jest prowadzenie szeregu reakcji chemicznych, które mogą służyć np. w instalacjach do odsalania wody morskiej, produkcji wodoru, a także gazyfikacji węgla. Schemat tego typu reaktora z tzw. usypanym złożem, wolno spadającym w dół w miarę wypalania, pokazuje rysunek. Niewypalone do końca paliwo wraca do ponownego wypalania. Jest to w gruncie rzeczy reaktor powielający, tyle że nie oparty o cykl uranowo-plutonowy: tworzącym się paliwem nie jest  $^{239}\text{Pu}$ , lecz  $^{233}\text{U}$ .

## 12. Odpady promieniotwórcze a promieniowanie środowiska naturalnego

Przechowywanie wypalonego paliwa lub innych długożyciowych i wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych na poziomie 400-1000 m pod ziemią zapewnia większe bezpieczeństwo niż przechowywanie ich na powierzchni. W dyskusjach nad niebezpieczeństwem związanym ze składowaniem odpadów promieniotwórczych, wytwarzanych obecnie przez przemysł jądrowy zapomina się często, że skorupa ziemska zawiera znaczną ilość zupełnie naturalnych substancji promieniotwórczych, z których niektóre stale dyfundują w kierunku powierzchni Ziemi i tworzą część tła naturalnego promieniowania środowiska. Można pokazać<sup>18</sup>, że wszystkie odpady zgromadzone do roku 2000, po schłodzeniu ich przez okres 500 lat, będą miały aktywność odpowiadającą promieniowaniu naturalnemu gleby ziemskiej o objętości  $30 \times 30 \times 2 \text{ km}^3$  (te 2 kilometry odpowiadają głębokości podziemnych składowisk odpadów promieniotwórczych). Innymi słowy, po 500 latach odpady te przestaną być niebezpieczne. Przypomnijmy, że dużo naszych „normalnych” śmieci, zwykłych odpadów przemysłowych – jak pojemniki z tworzyw sztucznych czy trujące chemikalia – potrafi przetrwać w skorupie ziemskiej znacznie, znacznie dłużej.

Jeśli opanujemy technikę transmutacji i spalania, cały problem przechowywania odpadów z reaktorów będzie znacznie prostszy niż dzisiaj. Jednak już teraz można powiedzieć, że przechowywanie odpadów głęboko pod ziemią nie przedstawia dla ludzi żyjących w pobliżu składowiska podziemnego istotnego zagrożenia, chyba że ktoś przez przypadek zechce wykorzystać teren składowiska w inny sposób i np. przełamując bariery technologiczne, stanowiące ochronę składowiska, zacznie w nim kopać. Nawet jednak w tym wypadku niebezpieczeństwo będzie miało na pewno charakter lokalny, a nie globalny. Świadomość tego efektu nie zwalnia nas jednak z maksymalnej staranności o to, aby przechowywane wypalone paliwo lub inne tego typu odpady były zapakowane szczelnie i nie były uwalniane do otoczenia. Stąd narodziła się koncepcja szkliwienia odpadów, gdyż nawet gdyby do tych odpadów dostała się woda, nie rozpuści ona szkła.

Inna koncepcja, wypracowana w Australii, to tworzenie „syntetycznej skały”, w której uwieszone są produkty rozszczepienia. „Skała”, o nazwie angielskiej **Synroc**, to



### Rysunek ideowy składowiska podziemnego

W miedzianym pojemniku mogą też znajdować się zeszkliwione odpady promieniotwórcze po recyklingu. Typowa średnica szybu wentylacyjnego, jak np. w Onkalo, Finlandia, to 5,7 m, natomiast tunelu składowiska, to 3,5 m., a tunelu wejściowego – 5,5 m. W Onkalo najniższy poziom kontrolny znajduje się na głębokości 520 m. Długość tunelu na głębokości 420 m wynosi 5,5 km, a jego nachylenie 1:10

mieszanek dwutlenku tytanu ( $\text{TiO}_2$ ), holandytu ( $\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$ ) i perowskitu ( $\text{CaTiO}_3$ ), w którą można wbudować, tj. stworzyć odpowiednią strukturę krystaliczną, fragmenty rozszczepienia. W takiej ceramice zawartość odpadów promieniotwórczych może stanowić do nawet 30% masy!

Zwróćmy także uwagę na fakt, że konwencjonalna elektrownia węglowa o mocy 1000 MW produkuje rocznie ok. 7 milionów ton dwutlenku węgla, około 200 000 ton dwutlenku siarki – gazów silnie zanieczyszczających środowisko. Ponadto powstaje w tym czasie około 200 000 ton popiołu zawierającego toksyczne ciężkie metale, a także pierwiastki promieniotwórcze i to w niemałej ilości. Np. we Francji, szczególnie bogatej w elektrownie jądrowe, na jednego mieszkańca przypada rocznie 14 ton odpadów przemysłowych, z których 140 kg, to odpady generalnie niebezpieczne. W tej ilości mieści się jednak tylko mniej niż 1 kg odpadów jądrowych, w tym zaledwie 20-30 g odpadów długożyciowych, a w nich 10 g wysokoaktywnych.

<sup>18</sup> obliczenia prof. dr hab. Zbigniewa Jaworowskiego



### 13. Transport wypalonego paliwa

Wbrew stereotypom i nieraz alarmistycznym doniesieniom mediów, transport wypalonego paliwa nie jest niebezpieczny. Zauważmy, że w trakcie ostatnich 40 lat w samych Stanach Zjednoczonych było ok. 3000 transportów tego typu.



#### Test zderzeniowy zbiornika transportowego dla wypalonego paliwa jądrowego

Przyczepa ze zbiornikiem typu B o wadze 22 ton zderzyła się z prędkością ok. 100 km/godz. ze ścianą z betonu o wadze 690 ton. [http://www.sandia.gov/tp/SAFE\\_RAM/SEVERITY.HTM](http://www.sandia.gov/tp/SAFE_RAM/SEVERITY.HTM)

Paliwo było transportowane na samochodach ciężarowych, i pociągami na łączną odległość rzędu 2,5 miliona kilometrów. Podczas takich transportów nigdy nie wydarzył się wypadek. Podobnie jest w Europie. Bezpieczeństwo przewożonemu paliwu częściowo gwarantuje ciężki (120 ton) pojemnik stalowy (fotografie zbiorników wykorzystanych do wywieżenia z Polski wypalonego paliwa z reaktorów EWA i MARIA pokazywaliśmy na str. 19). Jego ściany mają grubość około 50 cm, są więc około 15 razy grubsze niż w cysternach wiozących benzynę. Do każdej tony wypalonego paliwa używa się trzykrotnie więcej materiału na zbiornik i osłonę biologiczną. Zbiorniki muszą być tak zbudowane, aby wytrzymały półgodzinny pożar i upadek z 9 m na beton. Muszą one także przejść test na dziurawienie i zatopienie. Buduje się je nawet tak, aby wytrzymały zderzenie z samolotem odrzutowym! W każdym zbiorniku nie przewozi się naraz więcej niż dziewięć wypalonych elementów paliwowych. W ostatnim okresie zaczęto modyfikować konstrukcję pojemników, aby wytrzymały one również ewentualny atak terrorystyczny.

### 14. Znaczenie energetyki jądrowej dla gospodarki



**Produkcja radiofarmaceutyków w tzw. komorach gorących w Ośrodku Radioizotopów POLATOM, NCBJ**

Trudno przecenić wpływ energetyki jądrowej na gospodarkę kraju. Pomijając zwiększenie ilości miejsc pracy wśród lokalnej społeczności (około 800 zatrudnionych w samej elektrowni), elektrownia jądrowa daje pośrednio pracę nawet kilkunastu tysiącom osób zatrudnionych w innych sektorach.

Specyfika energetyki jądrowej każe podnieść poziom nauczania w szkołach w całym kraju, kreuje nowe kierunki specjalizacji na wyższych uczelniach. Przemysł jądrowy zamawia szereg badań naukowych i technicznych, co rozwija potencjały uczelni i instytutów naukowych i rzutuje na podniesienie w kraju ogólnego poziomu wiedzy. Rozwija się przy tym:

- precyzyjny przemysł budowlany, ciężki przemysł (budowa kotłów wysokociśnieniowych i turbin), precyzyjny przemysł maszynowy (np. zaworów wysokociśnieniowych); już teraz polskie firmy uczestniczą w budowie reaktora w Olkiluoto w Finlandii,
- przemysł elektryczny i elektroniczny, decydujący o prawidłowym zasilaniu wszystkich podzespołów, monitoringu i sterowaniu reaktora,
- przemysł chemiczny,
- lokalna gastronomia i baza turystyczna itp.

Istnienie przemysłu jądrowego wymusza rozwój nauk i usług medycznych.

Same elektrownie mogą produkować izotopy promieniotwórcze potrzebne dla medycyny. Również polski reaktor MARIA produkuje szereg izotopów na potrzeby polskiej i światowej medycyny.

Rozwój infrastruktury elektrowni, to także rozwój środków transportu, ale też usług biurowych, finansowych, ubezpieczeniowych i najróżniejszych prac typu serwisowego. Doświadczenia Południowej Korei (*Nuclear Technology and Economic Development in the Republic of Korea*, IAEA, Wiedeń 2009) pokazują, że postawienie na energetykę jądrową zaowocowało około pięciokrotnym zwiększeniem dochodów i produkcji w różnych branżach przemysłowych. Przy tym warto zauważyć, że rozwija się kultura pracy, gdyż normy jakościowe stawiane wszystkim urządzeniom i procedurom w tej szczególnej kategorii przemysłu są nadzwyczaj wysokie.

Istotne znaczenie dla gospodarki ma wpływ energetyki jądrowej na ograniczenie zużycia paliw kopalnych i emisji szkodliwych gazów cieplarnianych do atmosfery. Jest to szczególnie istotne w przypadku naszego kraju, w którym niemal całość wytwarzanej energii elektrycznej opiera się na węglu.

Koszty środowiskowe elektrowni jądrowej są nieznaczne w porównaniu z kosztami samej produkcji energii elektrycznej. Niesłyszane jest też stabilność dostaw energii elektrycznej i wysoki współczynnik wykorzystania mocy elektrowni jądrowych. Należy także pamiętać, że przy odpowiedniej lokalizacji, elektrownia jądrowa może także przysyłać do aglomeracji miejskich ciepło: energia zawarta w paliwie jądrowym zamieniana jest w jednym procesie technologicznym w energię elektryczną i ciepłą. Mówimy wtedy o kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej. Zalety

skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła dostrzeżone zostały przez Komisję Europejską, co znalazło swój wyraz w Dyrektywie 2004/8/WE z dnia 11 lutego 2004 r. w sprawie promowania kogeneracji. Kogenerację uznano za jeden z najlepszych sposobów oszczędzania energii pierwotnej i zmniejszania emisji CO<sub>2</sub>. Tak wytwarzana energia cieplna nie jest droższa od tradycyjnej, a nie pociąga za sobą zwiększenia emisji zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych. Jej koszty, jako energii i tak produkowanej w trakcie pracy reaktora, są bardzo niskie. To, co decyduje o ostatecznych kosztach dla odbiorcy, to odległość, na którą należy to ciepło przesłać.

Elektrownie jądrowe odprowadzają podatki nie tylko do kasy państwa, ale też do kas lokalnych społeczności, a mówimy tu o kwotach rzędu milionów złotych rocznie. Takie zasilenie budżetów regionów wpływa z kolei na zwiększenie standardów życia, opiekę medyczną, rozwój żłobków, przedszkoli i szkół, nie tylko lokalnych gmin ale i regionów.

Budowa elektrowni w Polsce stwarza szansę rozwoju nowych technologii. W naszych warunkach, gdy pierwsze elektrownie musimy kupić z zagranicy, stoimy przed szansą rozwoju nowych technologii w oparciu o doświadczenia innych krajów. Jak wspomnieliśmy, rozwój energetyki jądrowej w Polsce może znakomicie podwyższyć ogólną kulturę pracy, a więc i jakość produkcji nawet w sektorach odległych od jądrowego.

## 15. Elektrownie jądrowe a ruch turystyczny

Częstym argumentem lokalnych społeczności na terenach, w których planuje się umieszczenie elektrowni jądrowej, jest obawa o spadek wartości terenów i obawa o zmniejszenie się ruchu turystycznego. Szczególnie tam, gdzie zainwestowano w turystykę, gdzie powstały domy wczasowe, gospodarstwa agroturystyczne itp., można obawiać się, że turyści nie będą mieli ochoty spędzać urlopu w cieniu betonowych budowli elektrowni jądrowej.

Obie obawy, choć zrozumiałe, są od strony gospodarczej słabo uzasadnione. Pozytywnie na wartość terenu wpływa silne doinwestowanie gminy oraz gmin sąsiednich z tytułu lokalizacji elektrowni jądrowej na terenie gminy.



**Obraz o nazwie Wodnik (Acquarius)** – na jednej z chłodni kominowych elektrowni jądrowej w Cruas we Francji. Autorem muralu jest Jean-Marie Pierret (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:CruasPaintingAquarius.JPG>) (marzec 2012)

Odpowiedzi na obawy dotyczące zmniejszenia ruchu turystycznego są trzy:

- zwiększone wpływy dla gmin,
- napływ turystów zaintrygowanych, jak też taka elektrownia jądrowa wygląda,
- zwiększenie zatrudnienia na danym terenie.



**Komin chłodni w elektrowni jądrowej w Soweto (Południowa Afryka)** za pozwoleniem autora, p. Duane Braund

Dobłą praktyką jest tworzenie przy elektrowniach ośrodków edukacyjno - informacyjnych. Taki ośrodek daje operatorowi możliwość współpracy z lokalną społecznością i wypełnienie zadań edukacyjnych dla szerszej grupy. Wycieczka do elektrowni może być dla wielu atrakcyjna. W jedynym w Polsce ośrodku jądrowym w Świerku, reaktor MARIA odwiedzany jest rocznie przez ponad 6000 osób i to tylko dlatego, że ośrodek nie jest w stanie zaprosić do zwiedzania większej liczby chętnych! A przecież elektrownia budzi większe zainteresowanie niż reaktor badawczy, o czym świadczą przykłady choćby z pobliskiego czeskiego Temelina czy Dukovan. Przewidywana liczba zwiedzających



budowaną elektrownię jądrową Hinkley Point w hrabstwie Somerset na wybrzeżu Morza Północnego, to nawet 250 tysięcy rocznie, a przecież każdy turysta musi coś zjeść, wypić i gdzieś przenocować.

Pozostaje jeszcze sprawa estetyczna – możliwe zeszpecenie krajobrazu. To będzie jednak zależało od inwencji architektów i ich dyskusji z okoliczną ludnością. Niemniej jednak raczej nie należy się spodziewać, aby (kwestia gustu) elektrownie dodawały krajobrazowi uroku. Ciekawą inicjatywą wydaje się zatrudnienie artystów, którzy umieją nadać indywidualny, atrakcyjny charakter budowli, jak to zrobiono np. z chłodnią kominową w elektrowni w Cruas we Francji ([flickr.com](http://www.flickr.com)).<sup>19</sup>

Niedawno Filipiny ogłosiły interesującą akcję zwiedzania wnętrza nieczynnej elektrowni jądrowej Bataan. Elektrownia dysponuje domem i własną plażą, z której do woli mogą korzystać turyści. To dość ciekawa inicjatywa, gdyż zamiast rozebrać elektrownię, co byłoby bardzo kosztowne, może ona przynosić dochód z turystyki. Dziś kosztuje ona podatników około 10 000 USD dziennie. Można zapytać, dlaczego ta elektrownia nie jest czynna? Odpowiedź jest prosta: upadł reżim Marcosa, który zdecydował o budowie, tuż wcześniej zdarzyła się awaria w Czarnobylu i zapanował strach ... jak podczas budowy u nas pierwszej elektrowni jądrowej w Żarnowcu. Trzeba jednak oddać sprawiedliwość niektórym krytykom, którzy zwrócili uwagę na fakt zbyt bliskiego



**Elektrownia jądrowa Vandellos (fot. ENDESA)**

W tej sytuacji należy wyważyć proporcje pomiędzy kosztem ewentualnego dysonansu estetycznego, a zyskami gminy z tytułu opisanych wyżej przychodów.

Bardzo często cytowanym przykładem znakomitej koegzystencji przemysłu energetycznego i turystyki jest plaża *Platja de l'Almadrava* w Vandellos w Hiszpanii. Ruch turystyczny na tej plaży jakby ignorował istnienie elektrowni jądrowej (nota bene o ładnej architekturze, patrz foto), a nawet usytuowanych opodal kominów elektrowni gazowej. Z tytułu turystyki przez region Costa Dorada, na którym usytuowana jest plaża, przewijają się około 1,5 mln hiszpańskich turystów rocznie, którzy zostawiają w regionie ponad 400 mln Euro.



**Efektywne oświetlenie elektrowni jądrowej, Indie**



**Elektrownia jądrowa w Forsmark, Szwecja**



**Vysoký Hradek w Republice Czeskiej (fot. Pavel Kerner)**

<sup>19</sup> więcej przykładów zdobnictwa budowli elektrowni jądrowych można znaleźć na stronie internetowej <http://weburbanist.com/2010/07/18/nuclear-coverup-10-cool-examples-of-cooling-tower-art/>.



usytuowania elektrowni Bataan w stosunku do linii uskoków tektonicznych. Operatorzy elektrowni, firma Napocor, twierdzą jednak, że ta elektrownia jest w stanie wytrzymać trzęsienie ziemi nawet o skali 9 w skali Richtera. Zwolennicy elektrowni, firma Napocor w szczególności, mają nadzieję, że ożywienie ruchu turystycznego pozwoli nie tylko pokryć przynajmniej część kosztów utrzymania elektrowni, ale także wzbudzić do niej zaufanie i w końcu uruchomić ją. Z drugiej strony, gdyby elektrownia była czynna, nikt nie pozwoliłby turystom na wchodzenie do sterowni i robienia sobie tam zdjęć.

Pozytywnych przykładów jest więcej. W październiku 2009 r. Biuro Analiz i Dokumentacji Senatu RP opublikowało raport, z którego jasno wynika, że rozwój energetyki jądrowej nie hamuje rozwoju turystyki, a przeciwnie – niejednokrotnie ją potęguje. I tak, wycieczki organizowane przez władze elektrowni jądrowej Tihange w Belgii przyciągają turystów, którzy przy okazji korzystają też z innych uroków tego historycznego miasta. Usytuowany obok Flamanville we Francji ośrodek dydaktyczny Visiatome przyciąga dziesiątki tysięcy turystów rocznie. Tuż obok elektrowni jądrowej w Temelinie (Republika Czeska) stoi renesansowy zameczek

Vysoký Hradek otoczony parkiem krajobrazowym z początku XIX wieku, z kompleksem stawów rybnych. Zamek należy do jednych z najczęściej odwiedzanych przez turystów obiektów na południu Czech. Mieści się w nim centrum informacji elektrowni z atrakcyjnymi wystawami, z interaktywną ekspozycją dotyczącą energii jądrowej



**Budynek Visiatome (Francja)** Źródło: CEA

oraz salą kinową, w której widzowie, dzięki animacjom komputerowym, mają okazję zajrzeć do najciekawszych, najbardziej niedostępnych miejsc elektrowni a także otrzymać podstawowe informacje z dziedziny fizyki jądrowej (jako atrakcja turystyczna prezentowana jest komora mgłowa). Centrum oferuje również pokazy filmów popularno-naukowych w kinie trójwymiarowym "Energy Mystic".

Z kolei, w trosce o popularność, elektrownia jądrowa w Olkiluoto (Finlandia) ufundowała w grudniu 2007 r. nagrody i wsparła finansowo organizację Mistrzostw Finlandii w łyżwiarstwie Figurowym w miejscowości Rauma, znajdującej się niedaleko elektrowni oraz ufundowała renowację zabytkowej 100-letniej fińskiej chaty rybackiej należącej do lokalnego muzeum (region Satakunta).

W podsumowaniu wspomnianego raportu stwierdza się, że: *Nie znaleziono żadnych przykładów świadczących o tym, że usytuowanie elektrowni atomowej wpływa negatywnie na ruch turystyczny w danej miejscowości. Wręcz przeciwnie – pokazano, że obecność takiej elektrowni może stymulować wzrost liczby turystów (Belgia, Francja, Czechy, Szwecja). Wykazano pozytywny wpływ elektrowni atomowych na rozwój okolicznych gmin. Na podstawie analizy wyników ankiety skierowanej do wielu państw można zaryzykować twierdzenie, że lokalizacja elektrowni atomowej w rejonie w jakimś stopniu interesującym turystycznie nie zmniejsza ruchu turystycznego, ale może go jeszcze generować.*



**Nowobudowana, z udziałem Polaków, elektrownia jądrowa OL 3 w Olkiluoto (Finlandia)** Źródło: TVO



**Elektrownia jądrowa w Temelinie (Czechy)**  
Źródło: energetyka.pl



Wystawa poświęcona różnym formom energii, Visiatome Źródło: CEA

## UZUPEŁNIENIE 1: wartość energetyczna materiałów

### wartość energetyczna różnych materiałów

| Nośnik energii                                                       | kJ/kg                         |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| D-D (synteza)                                                        | $3 \cdot 10^{11}$             |
| $^{235}\text{U}$ (całkowite rozszczepienie przez neutrony termiczne) | $7,0 \cdot 10^{10}$           |
| $\text{D}_2\text{O}$ (reakcja syntezy D-D)                           | $3 \cdot 10^9$                |
| Paliwo typu $\text{UO}_2$ , wzbogacenie 2,5%, neutrony termiczne     | $1,5 \cdot 10^9$              |
| Naturalny uran, neutrony termiczne                                   | $5 \cdot 10^8$                |
| $^{210}\text{Po}$ (rozpad $\alpha$ )<br>$T_{1/2} = 138,4$ dni        | moc wydzielana $\sim 200$ W/g |
| $^{238}\text{Pu}$ (rozpad $\alpha$ )<br>$T_{1/2} = 87,74$ lat        | moc wydzielana $\sim 0,5$ W/g |

### Nośniki konwencjonalne

| Materiał                | kJ/kg                     |
|-------------------------|---------------------------|
| Wodór                   | $\sim 120 \cdot 10^3$     |
| Metan                   | $\sim 50 \cdot 10^3$      |
| Paliwa kopalne          | $(10 \div 50) \cdot 10^3$ |
| Wodospad wysokość 100m  | $\sim 1$                  |
| Różne baterie chemiczne | 100 ÷ 400                 |
| Sprężyna                | 0,16                      |

| Porównanie typowych paliw | Ciepło spalania (kJ/kg)   |
|---------------------------|---------------------------|
| Węgiel kamienny           | $(20 \div 37) \cdot 10^3$ |
| Węgiel brunatny           | $\sim 17 \cdot 10^3$      |
| Koks                      | $\sim 32 \cdot 10^3$      |
| Drewno (suche)            | $(10 \div 15) \cdot 10^3$ |
| Ropa                      | $(40 \div 42) \cdot 10^3$ |
| Benzyny                   | $(41 \div 44) \cdot 10^3$ |
| Oleje opałowe             | $(37 \div 42) \cdot 10^3$ |

$$1 \text{ MeV} = 1\,000\,000 \text{ eV}$$

Spalenie (w tlenie) jednego atomu węgla  $\sim 4 \text{ eV}$

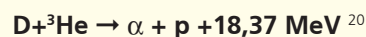
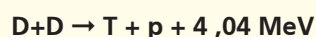
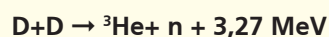
Jądrowe (nuklearne) źródła energii, oparte na reakcji

rozszczepienia jąder ciężkich ,

np.  $^{235}\text{U} + n_{\text{th}} \rightarrow \text{produkty rozszczepienia} + 196 \text{ MeV}$

Termojądrowe (termonuklearne) źródła energii,

oparte na reakcji fuzji lekkich jąder:



<sup>20</sup> źródło: Egbert Boeker & Rienk van Grondelle Environmental Physics Polskie wydanie - „FIZYKA ŚRODOWISKA” PWN (2002)

## UZUPEŁNIENIE 2:

### Cykl paliwowy

Na tzw. cykl paliwowy składa się kilka kroków. Krok pierwszy, to wydobywanie rudy uranowej. Rudę tę kruszy się i mieli na drobny proszek. Następnie podlega ona procesowi chemicznemu pozwalającemu na odseparowanie uranu ze skały, w wyniku czego otrzymujemy tlenek uranu:  $U_3O_8$ . Elektrownia jądrowa generująca np. moc elektryczną 1000 MWe zużywa rocznie około 200 ton  $U_3O_8$ .

Następny krok polega na wzbogaceniu uranu w izotop  $^{235}U$ . Krok ten poprzedzony jest przekształceniem tlenku uranu w gazowy sześćfluorek uranu ( $UF_6$ ). Gaz rozdziela się w odpowiedni sposób na dwa strumienie: usuwanie  $^{238}U$  powoduje, że jeden z nich staje się bogatszy w  $^{235}U$ , drugi zaś - uboższy. Pierwszy będzie następnie wykorzystany do produkcji paliwa jądrowego, drugi zaś, tzw. zubożony uran, można otrzymać w formie metalicznej i, ze względu na jego dużą gęstość, wykorzystywać w charakterze bardzo efektywnej osłony przed promieniowaniem gamma. Większość elektrowni jądrowych korzysta z paliwa o stopniu wzbogacenia w  $^{235}U$  od 2 do 4%. Spośród rozlicznych rodzajów reaktorów energetycznych tylko jeden, kanadyjski reaktor o nazwie CANDU może korzystać z naturalnego uranu. Nie oznacza to jednak, że energia wytwarzana w tym reaktorze jest tańsza, gdyż zmniejszony koszt paliwa rekompensowany jest koniecznością użycia drogiej ciężkiej wody jako moderatora.

Wypalone w reaktorze jądrowym paliwo jest przechowywane, a następnie przetwarzane w celu odzyskania materiałów rozszczepialnych ( $^{235}U$  i  $^{239}Pu$ ) lub przygotowane do wieloletniego przechowywania. Paliwo wyprowadzone z reaktora zawiera 94%-95% uranu oraz około 1% plutonu, które mogą być zużyte do produkcji świeżego paliwa. Ten 1% plutonu stanowi znaczny rezerwuuar energii: w 1g plutonu drzemie energia odpowiadająca spalaniu tony ropy naftowej lub 100g uranu! Warto zauważyć, że odzyskiwany uran zawiera tylko około 1%  $^{235}U$ , jednak jest to i tak więcej niż

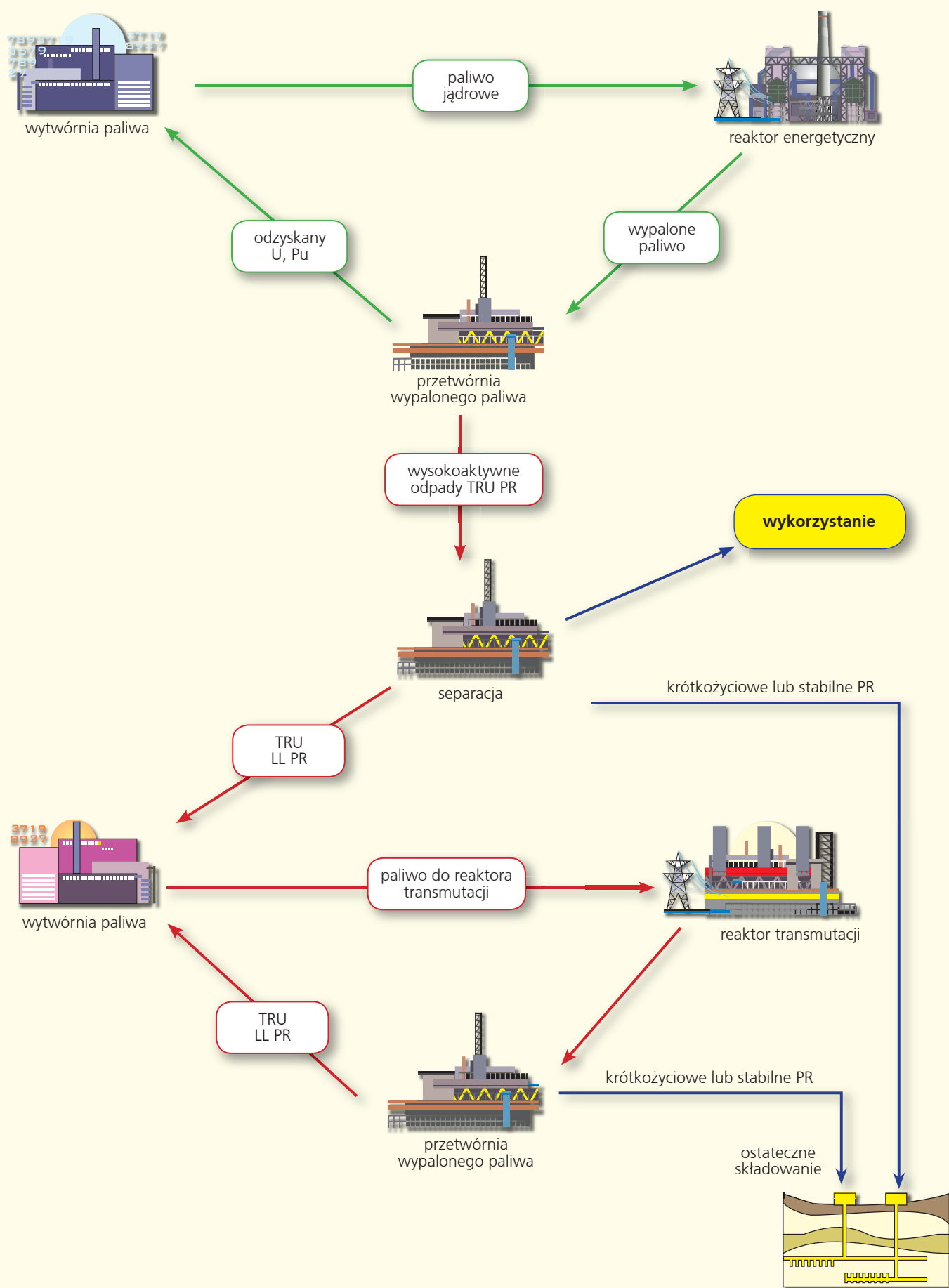
w naturalnej rudzie uranowej. Dzisiaj, to co rozumie się przez cykl zamknięty, to właśnie recykling paliwa. W procesie zwanym PUREX tworzy się świeże paliwo: odpowiednio spreparowany pluton, zmieszany ze wzbogaconym uranem, składa się na tzw. paliwo MOX (od ang. *mixed-oxide fuel*). Do tworzenia tego typu paliwa można też użyć zapasów plutonu nagromadzonego przez przemysł militarny. W Europie znajduje się siedem fabryk przerobu paliwa, a około 30 reaktorów może wykorzystywać paliwo MOX. Dziś reaktory lekkowodne produkują rocznie około 7000 ton wypalonego paliwa, a tylko ok. 15% zostaje poddane procesowi recyklingu. Ten ostatni jednak oznacza pięciokrotne zmniejszenie objętości wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych i dziesięciokrotne zmniejszenie ich radiotoksyczności.

Pozostałe 4% pierwiastków w wypalonym paliwie stanowi odpad promieniotwórczy: fragmenty rozszczepienia i pomniejsze aktywnowce. Te ostatnie są długożyciowe. Można je sprasować do postaci pastylek i poddać procesowi transmutacji w przyszłych reaktorach przeznaczonych do spalania odpadów promieniotwórczych. Wykonanie w jednym kroku transmutacji i spalania odpadów, w tym wszystkich długożyciowych aktywnowców i ziem rzadkich w podkrytycznym układzie reaktorowym sterowanym akceleratorem (ADS), stwarza zamknięty cykl paliwowy przyszłości. Jego możliwy schemat pokazuje rysunek (str. 30). Jak omówiono w tekście głównym, wysokoaktywne odpady promieniotwórcze pozostające po procesie przerobu poddawane są na ogół procesowi zeszklenia, ładowane do pojemników ze stali nierdzewnej i wysłane do finalnego składowiska odpadów.

Jeśli wypalone paliwo nie jest poddane recyklingowi, mamy do czynienia z cyklem otwartym. Z reguły przed wysłaniem do podziemnego składowiska odpadów dąży się do około 100-krotnego lub większego zmniejszenia radiotoksyczności wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych.

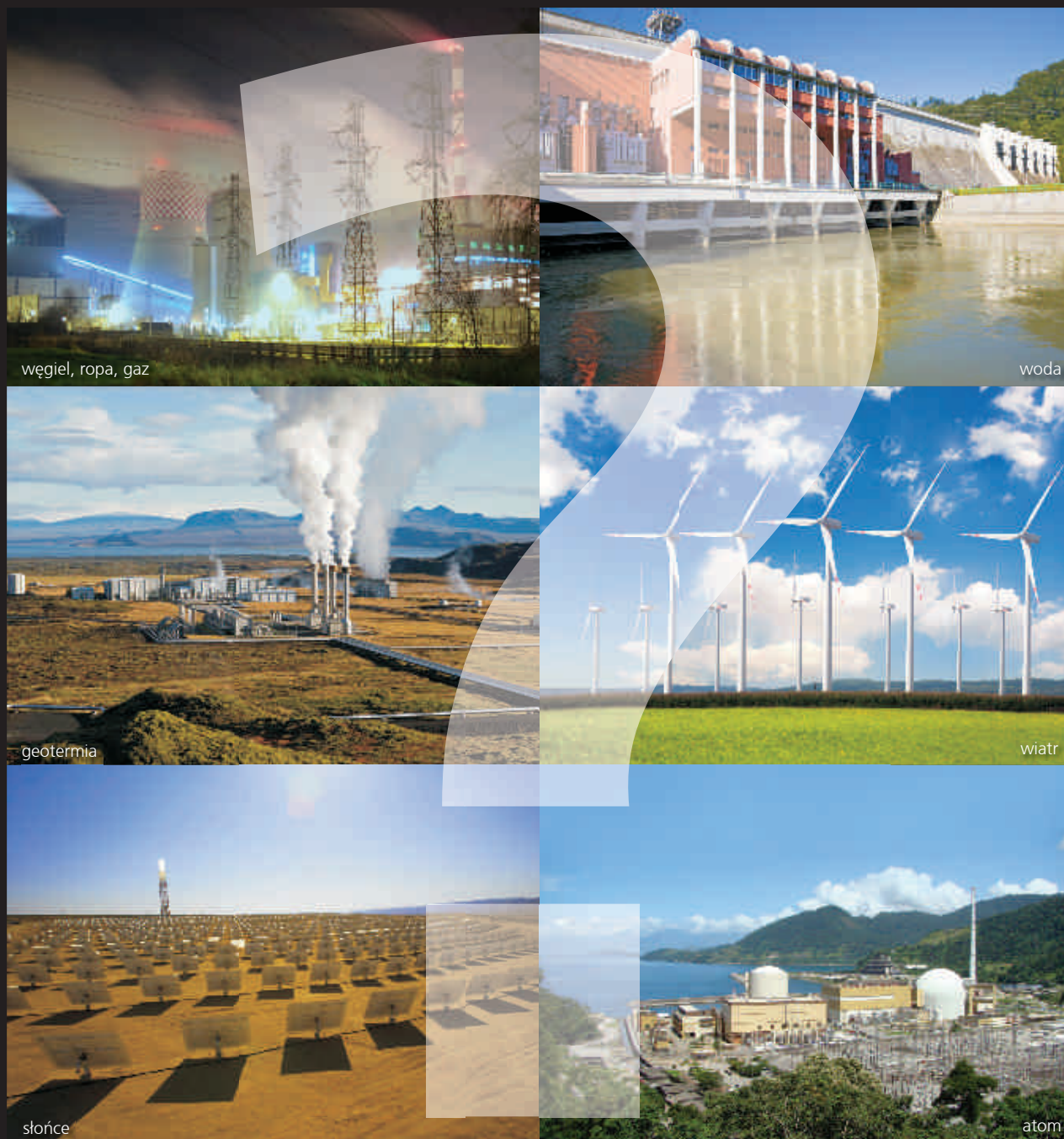






**Schemat możliwego, zamkniętego cyklu paliwowego**  
**połączonego z transmutacją długożyciowych fragmentów rozszczepienia (TRU - transuranowce, PR - produkty**  
**rozszczepienia, LL - izotopy długożyciowe)**

*W latach 80. ubiegłego wieku kryzys związany z dostawami ropy naftowej spowodował, iż Francja postawiła na trzykrotne zwiększenie udziału energetyki jądrowej w produkcji energii elektrycznej. Dziś, wg Bruno Comby'ego, twórcy stowarzyszenia Environmentalists for Nuclear Energy, tania energia elektryczna z francuskich elektrowni jądrowych zredukowała o 90% zanieczyszczenie atmosfery dwutlenkiem węgla.*



*“Nie mamy czasu na eksperymentowanie z wyimaginowanymi źródłami energii; cywilizacja znajduje się w stanie istotnego zagrożenia i musi korzystać z energii jądrowej - jedynej obecnie bezpiecznej, dostępnego źródła energii - teraz - lub cierpieć wkrótce ból zadany przez naszą znieważoną planetę”*

**James Lovelock**

*brytyjski uczony, ekolog, twórca koncepcji Gai  
("The Independent", 24.05.2004 r.)*



## Zakończenie

Niniejsze opracowanie na pewno nie jest podręcznikiem – stanowi zaledwie wprowadzenie w niektóre zagadnienia związane z energetyką jądrową. Skupiliśmy się na wyjaśnieniu niewprowadzonemu czytelnikowi, jak działa elektrownia, czy jest bezpieczna oraz jakie rodzi problemy i społeczne skutki jej obecność w kraju i na konkretnym terenie, w którym jest umieszczona. Jest rzeczą bardzo trudną przekonanie kogokolwiek, kto jest uprzedzony do energetyki jądrowej, że jest ona zdecydowanie konkurencyjna w stosunku do innych technologii wytwarzania energii elektrycznej. Niemniej jednak, we wszelkich dyskusjach nad tą sprawą, należy zachować umiar i pamiętać, że realizacja wszelkich pomysłów stworzenia źródeł energii tam, gdzie tej energii brakuje lub może wkrótce zabraknąć, wymaga czasu, a poza tym trzeba brać pod uwagę, w jakiej skali chce się problem energii rozwiązać. Czym innym jest zasilanie w energię elektryczną gospodarstwa domowego, czym innym przemysłu ciężkiego i transportu.

Czas gra ważną rolę i potrzebna jest determinacja wszystkich podmiotów zaangażowanych w projekt budowy pierwszej elektrowni jądrowej, tak by nie skończyło się wyłączeniem starych instalacji energetycznych i brakiem nowych. Energetyka jądrowa budzi ogromne emocje, a strach przed nią potrafi paraliżować obiektywny osąd. Być może, lektura naszego opracowania spowoduje spokojniejszą ocenę „atomu”. Ułatwiłoby to nam wszystkim dyskusję nad przyszłością energetyczną Polski.

## Podziękowanie

Autorzy składają podziękowania Koleżankom i Kolegom z Działu Edukacji i Szkoleń za pozwolenie na skorzystanie ze wspólnego materiału zawartego w broszurze „Spotkanie z promieniotwórczością” (IPJ, Świerk, listopad 2010). Szczególne podziękowanie należy się p. mgr. Ewie Droste za bezpośrednią pomoc w tworzeniu niniejszego materiału.

Podziękowania składamy także prof. Andrzejowi Strupczewskiemu (NCBJ) oraz Koleżankom i Kolegom z PGE EJ1 za cenne uwagi i sugestie.



