

# Podstawy energetyki jądrowej

Przemysław OLBRATOWSKI\*

\* pełnomocnik Dziekana Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego ds. makrokierunku studiów *Energetyka i Chemia Jądrowa*;

więcej informacji o tych studiach można znaleźć na stronie [atom.chem.uw.edu.pl](http://atom.chem.uw.edu.pl).

Energetyka jądrowa nie stanowi fundamentalnej dziedziny wiedzy, takiej jak matematyka czy fizyka. Jest natomiast dziedziną bardzo szeroką – zrozumienie całości występujących tu zagadnień wymaga znajomości fizyki jądrowej, fizyki ciała stałego, termo- i hydrodynamiki, ale również takich nauk jak ekologia, ekonomia czy nawet socjologia. W tym krótkim artykule przedstawimy tylko fizyczne podstawy tej gałęzi przemysłu.

**Skąd energia?** Energetyka jądrowa opiera się na słynnym wzorze Einsteina  $E = mc^2$ . Orzeka on, że z racji samego posiadania masy w każdym ciele zawarta jest pewna energia, zwana energią spoczynkową, równa masie ciała pomnożonej przez kwadrat prędkości światła. Można łatwo obliczyć, że w jednym kilogramie zawarta jest energia 25 mln MWh, czyli tyle, ile przeciętny blok elektrowni wytwarza przez 3 lata lub ile wyzwala się w wybuchu ponad 22 mln ton trotylu. Jednak z materii nie da się wydobyć całej zawartej tam energii spoczynkowej, gdyż zgodnie ze wzorem Einsteina doprowadziłoby to do zupełnego zniknięcia masy, czyli samej materii! Na to, na szczęście, nie pozwalają inne prawa fizyki.

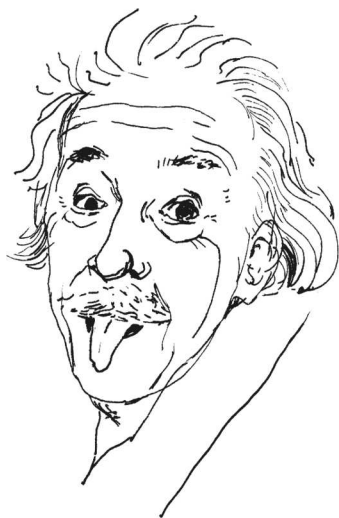
Cóż zatem robić, aby wyrwać materii choć część jej energii spoczynkowej? W energetyce jądrowej wykorzystuje się do tego celu zjawisko rozszczepienia jąder atomowych. W pewnych okolicznościach niektóre jądra mogą się rozszczepić, czyli podzielić na dwa mniejsze, zwane *fragmentami rozszczepienia*. Te dwa nowe jądra zawierają w sumie tyle samo protonów i neutronów co jądro wyjściowe. Jednak ich łączna masa jest nieco mniejsza od masy jądra wyjściowego. Skoro tak, to mniejsza jest też ich energia spoczynkowa! Część energii spoczynkowej jądra wyjściowego musi się zatem w jakiś sposób wydzielić i to właśnie ją możemy wykorzystać. W zjawisku rozszczepienia wydzielą się mniej więcej 0,1% energii spoczynkowej wyjściowego jądra. Oznacza to, że w rzeczywistości z całkowitego rozszczepienia jednego kilograma materii możemy uzyskać nie miliony, lecz tysiące megawatogodzin, czyli z grubsza tyle, ile przeciętny blok elektrowni wytwarza w ciągu jednego dnia. To mniej, ale nadal bardzo dużo. Aby wytworzyć tyle samo energii w elektrowni konwencjonalnej, trzeba spalić około 1000 ton czystego węgla, czyli milion razy więcej!

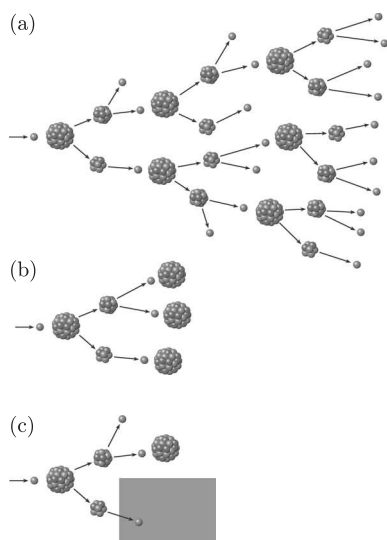
Mogłoby kogoś jednak niepokoić, że energetyka jądrowa zużywa materię, z której zbudowana jest Ziemia, czerpiąc energię elektryczną z masy. Zdajemy sobie jednak sprawę, że w energetyce konwencjonalnej dzieje się dokładnie to samo! Na przykład spalanie węgla polega na łączeniu atomu węgla C z cząsteczką tlenu O<sub>2</sub> w cząsteczkę ditlenku węgla CO<sub>2</sub>. Proces ten dostarcza nam energii, dlatego że cząsteczka ditlenku węgla jest nieco lżejsza niż atom węgla i cząsteczka tlenu razem wzięte, a zatem ma nieco mniejszą od nich energię spoczynkową. Zwykłym spalaniem też rządzi wzór Einsteina, a zatem wytworzenie określonej energii wymaga unicestwienia takiej samej masy jak w energetyce jądrowej.

Samorzutne rozszczepienie się jądra atomowego jest w przyrodzie zjawiskiem tak rzadkim, że nie może służyć wytwarzaniu energii elektrycznej. Niektóre jądra można jednak pobudzić do rozszczepienia, bombardując je wiązką odpowiednich cząstek. Szczególnie dobrze do tego celu nadają się neutrony, gdyż jako cząstki pozbawione ładunku elektrycznego nie są odpychane przez protony jądra atomowego i łatwo wnikają do jego wnętrza.

Gdyby jednak wywołanie każdego kolejnego rozszczepienia wymagało dostarczenia nowego neutronu z zewnątrz, to sprawa byłaby przegrana mimo dużej energii wydzielanej w pojedynczym rozszczepieniu. Nie dałoby się bowiem dostarczać neutronów na tyle szybko, aby wytwarzać jakiegokolwiek rozsądne ilości energii. Na szczęście, fragmenty rozszczepienia same emitują nowe neutrony! Mogą one wnikać do kolejnych jąder i wywołać ich rozszczepienie. Powstałe w tych

Jądra atomowe składają się z dodatnio naładowanych protonów oraz obojętnych elektrycznie neutronów.





Rys. 1. (a) Schemat reakcji łańcuchowej. (b) Schemat reakcji łańcuchowej w bombie. (c) Schemat reakcji łańcuchowej zachodzącej w reaktorze; szarym prostokątem zaznaczono absorber.

rozszczepleniach jądra emitują nowe neutrony i tak dalej. W ten sposób reakcja podtrzymuje się sama i nie wygasa mimo braku neutronów z zewnątrz. Zjawisko to nazywamy *łańcuchową reakcją rozszczepienia* lub w skrócie *reakcją łańcuchową*. Przebieg reakcji łańcuchowej przedstawiono na rysunku 1(a).

Energia wydzielona w reakcji rozszczepienia nie dociera jednak do nas od razu jako energia elektryczna. W pierwszej kolejności różnica między energią spoczynkową jądra wyjściowego a sumą energii spoczynkowych fragmentów rozszczepienia zmienia się w energię kinetyczną tychże fragmentów. Poruszając się z dużymi prędkościami, jądra fragmentów uderzają w inne atomy i wprawiają je w drgania cieplne. Głównym efektem pracy reaktora jest więc po prostu wydzielanie dużych ilości ciepła.

**Stabilnie, a nie lawinowo.** Reakcja łańcuchowa zachodzi zarówno w reaktorze jądrowym, jak i w bombie atomowej. W konstrukcji bomby chodzi o to, aby jak największa energia wydzielona w jak najkrótszym czasie. W idealnym przypadku wszystkie neutrony wyemitowane z jednego rozszczepienia powinny uderzyć w kolejne jądra i wywołać kolejne rozszczepienia. Przyjmijmy, że w reakcji rozszczepienia powstają dwa neutrony. Każde rozszczepienie wywoła więc dwa kolejne. Liczba rozszczepień w jednostce czasu będzie rosłać wykładniczo i nastąpi wybuch. W przypadku reaktora chcemy natomiast, aby tylko jeden neutron wyemitowany z rozszczepienia wywołał następne rozszczepienie. Liczba rozszczepień w jednostce czasu będzie wtedy stała, czyli stała będzie moc reaktora. Cel nasz możemy osiągnąć, umieszczając w reaktorze specjalny materiał zwany *absorberem*, który pochłonie nadmiarowe neutrony z każdego rozszczepienia, zostawiając tylko ten jeden. Zilustrowano to na rysunku 1(b)(c).

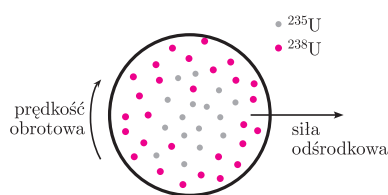
**Za szybko i za mało?** Choć przebieg reakcji łańcuchowej jest koncepcyjnie bardzo prosty, to jednak jej rzeczywiste przeprowadzenie natrafia na przynajmniej dwa problemy. Pierwszy jest natury fundamentalnej i wynika stąd, że świat jąder atomowych rządzi się prawami mechaniki kwantowej, wedle której nic nie dzieje się na pewno, a jedynie z pewnym prawdopodobieństwem. Również neutron uderzający w jądro atomowe nie wywołuje rozszczepienia na pewno, a jedynie z pewnym prawdopodobieństwem, które w dodatku zależy od prędkości neutronu. Jeśli neutron ma małą prędkość, to szansa na rozszczepienie jest duża, ponieważ neutron przelatuje przez jądro długo i ma dużo czasu na wywołanie reakcji. Analogicznie neutron o dużej prędkości ma małe szanse na wywołanie rozszczepienia. Aby wystarczająco wydajnie rozszczepiać jądra, neutrony muszą mieć prędkości około 8000 km/h. Są to neutrony... powolne, zwane *termicznymi*, ponieważ takie byłyby prędkości ich ruchów termicznych w temperaturze pokojowej. Natomiast neutrony emitowane przez fragmenty rozszczepienia mają prędkości rzędu 80 000 000 km/h i są na ogół zbyt szybkie, aby skutecznie wywoływać rozszczepienia. Nazywamy je neutronami prędkimi.

Tylko niektóre jądra podlegają reakcji rozszczepienia wywołanej przez neutrony. Na Ziemi występuje naturalnie w wystarczających ilościach tylko jedno z nich – jest nim  $^{235}\text{U}$ . Dlatego właśnie izotop ten jest podstawowym paliwem dla energetyki jądrowej.

Druga trudność z wywołaniem reakcji łańcuchowej polega na tym, że naturalny uran, jaki otrzymuje się z rudy, zawiera zaledwie 0,7% izotopu rozszczepialnego. Pozostałe 99,3% to  $^{238}\text{U}$ , który nie podlega rozszczepieniu. Z tego powodu w naturalnym uranie bardzo trudno jest utrzymać reakcję łańcuchową.

**Wzbogacić lub spowolnić.** Opisane powyżej trudności można, na szczęście, skutecznie przezwyciężyć. Można bowiem zwiększyć zawartość  $^{235}\text{U}$  w paliwie jądrowym, oddzielając go od  $^{238}\text{U}$  – proces ten nazywamy *wzbogacaniem*. Ponieważ jednak wszystkie izotopy tego samego pierwiastka mają niemal identyczne własności chemiczne, wzbogacanie musi odbywać się przy użyciu metod fizycznych, z których najpopularniejsza jest metoda wirówki. Uran naturalny w postaci gazowego  $\text{UF}_6$  umieszcza się w szybko wirującym cylindrze,

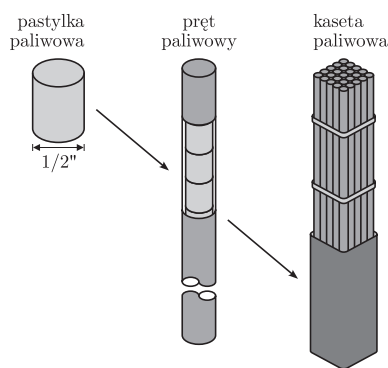
Jądra różnych pierwiastków chemicznych różnią się liczbą protonów. Przykładowo, jądro o 92 protonach to jądro uranu, oznaczanego symbolem chemicznym U. Jądra o ustalonej liczbie protonów mogą zawierać różne ilości neutronów. Jądra jednego pierwiastka, różniące się liczbą neutronów, nazywamy izotopami tego pierwiastka. Izotopy oznaczamy, pisząc u góry po lewej stronie symbolu chemicznego łączną liczbę protonów i neutronów. Izotop uranu o 143 neutronach oznaczamy zatem symbolem  $^{235}\text{U}$ .



Rys. 2. Schemat wirówki.

jak to pokazano na rysunku 2. Ponieważ jądra  $^{238}\text{U}$  są nieco cięższe od jąder  $^{235}\text{U}$  ze względu na dodatkowe trzy neutrony, więc działająca na nie siła odśrodkowa jest większa, przez co jądra te gromadzą się przy ściankach cylindra. W środku natomiast pozostaje głównie  $^{235}\text{U}$ , skąd możemy go odpompować odpowiednią rurką. Zwiększenie zawartości  $^{235}\text{U}$  do kilkunastu procent wystarczy do podtrzymania reakcji łańcuchowej, nawet mimo małej skuteczności rozszczepiania jąder przez neutrony prędkie. Reaktory działające na takiej zasadzie nazywamy *reaktorami prędkimi*.

Neutrony powstające podczas rozszczepienia można także spowolnić, aby były bardziej skuteczne w wywoływaniu kolejnych rozszczepień. W tym celu przepuszcza się je przez materiał zwany *moderatorem*. Odbijając się wielokrotnie od jąder atomowych moderatora, neutrony wytracają prędkość, aż osiągną stan równowagi termicznej z moderatorem, czyli aż osiągną prędkości termiczne. Reaktory działające w ten sposób nazywa się *reaktorami termicznymi*. Mogą one działać przy wzbogaceniu uranu do kilku procent, a nawet na uranie naturalnym. Obecnie wszystkie działające na świecie przemysłowe reaktory energetyczne należą do tej właśnie kategorii.

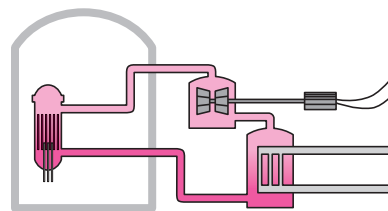


Rys. 3. Budowa kasety paliwowej.

**Budowa reaktora jądrowego.** Głównym elementem reaktora jest paliwo ze wzbogaconego uranu – w postaci ditlenku uranu  $\text{UO}_2$ , gdyż uran metaliczny jest trudny w użyciu, a w pewnych warunkach nawet samozapalny. Z  $\text{UO}_2$  przygotowuje się ceramiczne pastylki paliwowe w kształcie walca o wysokości około 1 cm i średnicy kilku milimetrów. Pastylki te umieszcza się w rurkach ze stopu cyrkonu, wytwarzając w ten sposób pręty paliwowe. Pręty grupuje się z kolei w kasetach paliwowych. Konstrukcja ta pokazana jest na rysunku 3. Wreszcie kasety umieszczone jedna obok drugiej tworzą rdzeń reaktora, czyli jego najważniejszą część, w której zachodzi reakcja rozszczepienia. W zależności od reaktora rdzeń może mieć rozmiary od kilkudziesięciu centymetrów do kilkunastu metrów i ważyć od kilkudziesięciu kilogramów do kilkuset ton.

Ciężka woda ( $\text{D}_2\text{O}$ ) różni się od zwykłej wody tym, że atomy wodoru H są zastąpione atomami deuteru – izotopu wodoru, którego jądro oprócz protonu zawiera też jeden neutron.

W reaktorach termicznych znajduje się moderator, którym jest najczęściej zwykła woda, choć może być też ciężka woda lub grafit. Skoro w reaktorze wydziela się ciepło, to trzeba reaktor chłodzić, gdyż w przeciwnym razie może się on stopić. Kolejnym elementem jest więc chłodziwo. Najczęściej jest nim także woda, ale stosuje się również gazy lub nawet ciekłe metale. Wreszcie absorber neutronów ma zwykle postać prętów wykonanych z boru, kadmu lub hafnu. Pręty te, zwane prętami kontrolnymi, można wsuwać lub wysuwać z rdzenia, sterując w ten sposób szybkością reakcji łańcuchowej. Schemat najprostszej elektrowni jądrowej znajduje się na rysunku 4. Zauważmy, że zasada wytwarzania prądu elektrycznego w elektrowni jądrowej jest dokładnie taka sama jak w konwencjonalnej. Tyle tylko, że źródłem ciepła podgrzewającego wodę nie jest tu kocioł, lecz reaktor jądrowy.



Rys. 4. Schemat najprostszej elektrowni jądrowej. Rdzeń umieszczony jest w stalowym zbiorniku reaktora. Od dołu do zbiornika doprowadzana jest woda, która przepływa między prętami paliwowymi, pełniąc jednocześnie funkcję moderatora i chłodziwa. Woda podgrzewa się tak bardzo, że zamienia się w parę, która następnie obraca turbinę. Turbina napędza prądnicę, a para przechodzi przez skraplacz, gdzie ponownie zamienia się w ciecz, i powraca do zbiornika reaktora.

**Energia przyszłości?** Przy obecnej technologii reaktorów termicznych światowe zasoby uranu starczą na nieco ponad 100 lat, czyli mniej więcej na tyle, co zasoby węgla. Jednak znajdujący się w reaktorze nierozszczepialny  $^{238}\text{U}$  pod wpływem bombardowania neutronami przemienia się w sztuczny izotop rozszczepialny  $^{239}\text{Pu}$ . Pluton ten już wykorzystuje się jako wtórne paliwo, ale jego ilości, powstające w reaktorach termicznych, są niewielkie. W reaktorach prędkich można natomiast wytworzyć warunki, w których każde rozszczepienie prowadzi do powstania więcej niż jednego nowego jądra rozszczepialnego. Zjawisko to, zwane powielaniem paliwa, pozwala na niemal całkowite wykorzystanie nie tylko  $^{235}\text{U}$ , ale także stokrotnie bardziej rozpowszechnionego  $^{238}\text{U}$ . Zamiast o 100 latach można więc mówić o 10 000 lat! Możliwości wykorzystania toru (Th) jako paliwa jądrowego czy też wydobycie uranu z wody morskiej mogą wydłużyć tę perspektywę do kilkuset tysięcy lat.

Niezależnie od tego, jak potoczy się historia, w najbliższych latach będziemy świadkami trudnego, ale też fascynującego zmagania się ludzkości z jednym z największych wyzwań, jakim jest zaspokojenie potrzeb energetycznych. W zmaganiach tych energia jądrowa zawsze pozostanie ważną alternatywą.