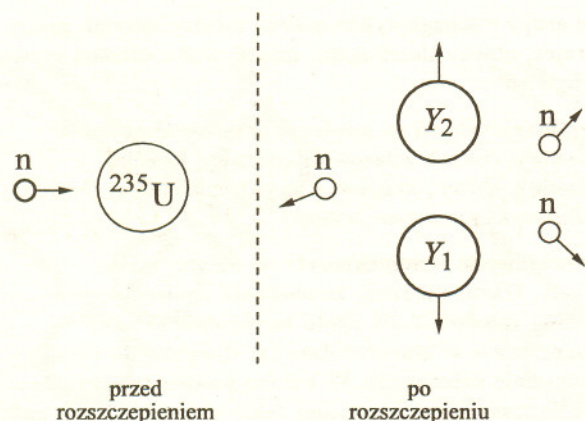


# Promieniotwórcze śmiecie energetyki jądrowej

Maria KACZMARCZYK

Zjawisko rozszczepienia uranu po pochłonięciu powolnego neutronu zostało odkryte w 1938 roku przez dwóch fizykochemików niemieckich: Ottona Hahna i Fritza Strassmana. Otto Hahn badając to nowe zjawisko zidentyfikował w produktach przemiany uranu jądra baru  ${}_{56}\text{Ba}$ , które różnią się ładunkiem aż o 36 jednostek od jąder uranu  ${}_{92}\text{U}$ . Zostało to uznane za dowód rozszczepienia jądra atomu. Wynik ten był nieoczekiwany. Spodziewano się bowiem, że po pochłonięciu neutronu zostanie utworzony promieniotwórczy izotop uranu  ${}^{239}\text{U}$ , rozpadający się przez emisję cząstek  $\beta^-$ . Otto Hahn za odkrycie zjawiska rozszczepienia otrzymał w 1944 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii.

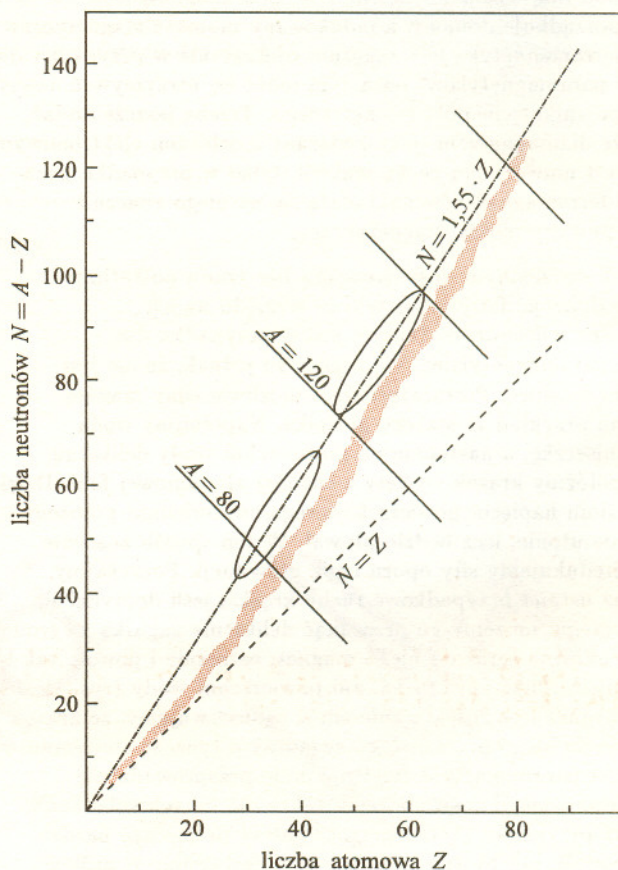
Rozszczepienie jako proces spontaniczny występuje w przyrodzie tylko dla jąder najcięższych i niezwykle rzadko, chociaż już dla jąder o liczbie atomowej  $Z = 40$  i masowej  $A = 90$  proces ten jest egzoenergetyczny, a więc nie wymagający dostarczania energii. Ale nawet dla najcięższych jąder zachodzi on z bardzo małym prawdopodobieństwem, bo np. wartości czasów połowicznego zaniku  $T_{1/2}$  dla jąder uranu  ${}^{238}\text{U}$  w wyniku samorzutnego rozszczepienia są rzędu  $10^{16}$  lat. Prawdopodobieństwo rozszczepienia jądra znacznie wzrośnie, jeśli jądro dostarczona będzie pewna energia, zwana energią aktywacji rozszczepienia. Dla jąder najcięższych pierwiastków wynosi ona kilka megaelektronowoltów. Pochłanianie neutronów przez jądra jest jednym ze sposobów dostarczania tej energii. W przypadku  ${}^{235}\text{U}$  już pochłonięcie neutronu powolnego dostarcza energii większej niż energia aktywacji, ale dla  ${}^{238}\text{U}$  muszą to być neutrony prężkie o energii kinetycznej powyżej 1 MeV. Neutrony są cząstkami szczególnie dobrze nadającymi się do wywoływania rozszczepienia, ponieważ nie mają ładunku elektrycznego i dlatego mogą łatwo wnikać do jądra. Obecnie wiadomo, że w wyniku rozszczepienia jądra po pochłonięciu neutronu powstają dwa jądra o średnich masach, zwane fragmentami rozszczepienia, czemu towarzyszy natychmiastowa emisja 2–3 neutronów o średniej energii kinetycznej około 2 MeV. Sytuację tę dla  ${}^{235}\text{U}$  ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Schematyczny przebieg rozszczepienia jądra  ${}^{235}\text{U}$ .

Łączna energia wyzwolona podczas jednego aktu rozszczepienia jądra ciężkiego wynosi około 200 MeV, co stanowi około 0,1% energii spoczynkowej jądra rozszczepianego. Wydziela się ona głównie w postaci energii kinetycznej fragmentów rozszczepienia i emitowanych przez nie neutronów oraz w postaci promieniowania gamma i energii cząstek  $\beta$  oraz neutrino. Rozszczepieniu wszystkich jąder ( $2,6 \cdot 10^{24}$ ) składających się na 1 kg  ${}^{235}\text{U}$  towarzyszy wydzielenie  $8 \cdot 10^{13}$  J ciepła. Jest to energia równoważna energii uzyskiwanej ze spalania 2500 ton najlepszego węgla. Zatem energia z rozszczepienia 1 kg uranu  ${}^{235}\text{U}$  jest 2,5 miliona razy większa od energii spalania węgla o takiej samej masie. Ten prosty rachunek wskazuje, o ile bardziej efektywne pod względem ilości wydzielonego ciepła jest paliwo jądrowe w porównaniu z węglem. Urządzenia służące do wyzwalamienia energii jądrowej (w sposób kontrolowany) nazywają się reaktorami jądrowymi. Paliwem w reaktorze jest najczęściej uran naturalny wzbogacony w uran  ${}^{235}\text{U}$  lub pluton  ${}^{239}\text{Pu}$ . Na całym świecie już obecnie pracuje około 500 reaktorów jądrowych (w 1989 roku – 434). Większość z nich przeznaczona jest do produkcji energii cieplnej, która następnie jest zamieniana na energię elektryczną.

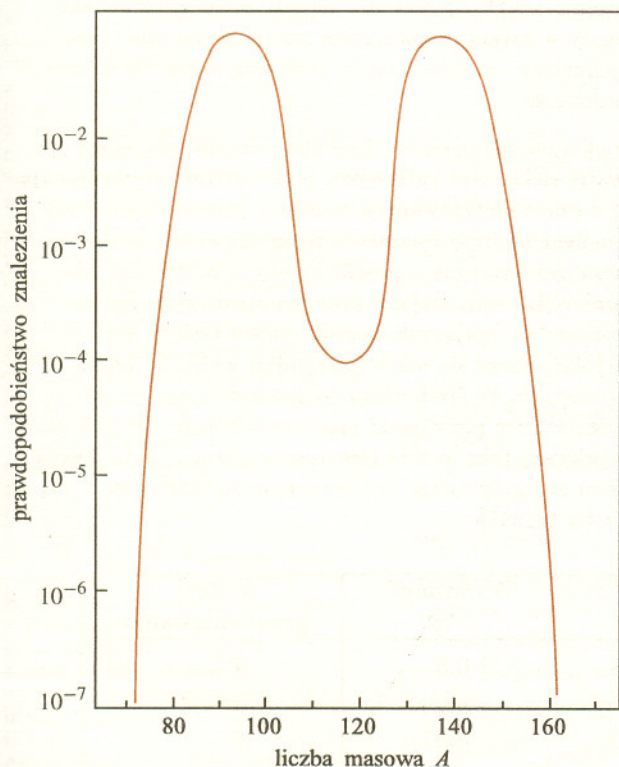
Podczas pracy reaktora jądra atomowe paliwa ulegają rozszczepieniu na fragmenty o niejednakowych  $Z$  i  $A$ .



Rys. 2. Uproszczony wyrostek ścieżki stabilności ze względu na rozpad beta oraz obszarów występowania fragmentów rozszczepienia  ${}^{235}\text{U}$  (zaznaczone elipsami).

W procesie wypalania paliwa powstaje około 80 różnych produktów rozszczepienia. Na rysunku 2, wykreślonym we współrzędnych  $x = Z$  (liczba protonów),  $y = N$  (liczba neutronów), zestawiającym wszystkie jądra występujące w przyrodzie i stabilne ze względu na rozpady beta (nazywanym wykresem ścieżki stabilności beta), fragmenty rozszczepienia uranu  $^{235}\text{U}$  są umiejscowione w obszarach objętych elipsami. Odpowiada im znaczny nadmiar neutronów w stosunku do liczby neutronów właściwej dla jąder stabilnych. Oznacza to, że fragmenty rozszczepienia są jądrami nietrwałymi i rozpadają się głównie przez emisję elektronów (rozpad beta minus).

W wyniku rozpadu promieniotwórczego fragmentów zostają wytworzone dalsze, zwykle również promieniotwórcze, izotopy o różnych wartościach okresów połowicznego zaniku. W sumie, podczas rozszczepienia paliwa jądrowego powstaje około 200 radionuklidów, które w układzie okresowym pierwiastków zajmują miejsca od, mniej więcej, cynku  $^{72}\text{Zn}$  ( $Z = 30$ ) do terbu  $^{161}\text{Tb}$  ( $Z = 65$ ). W wyniku rozszczepienia  $^{235}\text{U}$  pojawiają się najczęściej fragmenty o liczbach masowych około 95 oraz około 140. Krzywa wydajności rozszczepienia uranu  $^{235}\text{U}$  za pomocą neutronów, przedstawiona na rysunku 3, wskazuje na to, że prawdopodobieństwo natrafienia na fragmenty rozszczepienia jest bardzo zależne od ich masy.



Rys. 3. Rozkład mas fragmentów rozszczepienia  $^{235}\text{U}$ .

Energetyka jądrowa, oparta na kontrolowanych reakcjach rozszczepienia, stwarza możliwości i nadzieje na zaspokojenie przez wiele kolejnych lat rosnącego zapotrzebowania ludzkości na energię. Co więcej, prawidłowo funkcjonujące elektrownie jądrowe są ekologicznie czystsze niż konwencjonalne elektrownie węglowe.

Jest jednak i druga strona medalu, a mianowicie, poważne kłopoty z wykorzystaniem w reaktorze paliwem. W odróżnieniu od kotła elektrowni węglowej w reaktorze jądrowym nie udaje się osiągnąć całkowitego „spalenia” paliwa jądrowego. Zawiera ono nie wypalone do reszty paliwo, promieniotwórcze pierwiastki transuranowe (m.in. neptun i pluton), które powstały z paliwa po wychwycie neutronów i rozpadach beta, a przede wszystkim – ogromne ilości wysoce promieniotwórczych fragmentów rozszczepienia. Aktywność ich jest ogromna – wynosi  $2 \cdot 10^{17}$  rozpadów na sekundę, na każdy megawat mocy cieplnej wytwarzanej przy długotrwałej eksploatacji reaktora. Te odpady produkcyjne elektrowni jądrowych mogą być w części przetwarzane dla wydobycia z nich resztek paliwa. Pozostała część, na którą składają się promieniotwórcze fragmenty rozszczepienia, stanowi „promieniotwórcze śmiecie” sprawiające sporo kłopotów z ich składowaniem w sposób nie stwarzający zagrożenia dla ludzi i środowiska. Te „promieniotwórcze śmiecie”, wytwarzane podczas pracy reaktora, nie mogą przedostać się do środowiska, ponieważ stworzyłyby to ogromne zagrożenie dla człowieka. Odpady promieniotwórcze powstają w różnych postaciach: jako substancje gazowe, ciekłe i stałe. Ponieważ nawet po wypaleniu w reaktorze (z paliwem wzbogaconym w  $^{235}\text{U}$ ) w paliwie występuje procentowo więcej atomów  $^{235}\text{U}$ , niż zawiera ich uran naturalny (0,72%), poddaje się je procesom przerobu w celu wydobycia z niego niewypalonego  $^{235}\text{U}$  i plutonu.

W ten sposób zmniejsza się aktywność odpadów i uzyskuje się możliwość powtórnego wykorzystania surowców energetycznych. Przerób wypalonego paliwa jest poprzedzany okresem „schładzania” (6–12 miesięcy) w przyreaktorowych basenach wodnych. Tam w wyniku rozpadu krótkożytych izotopów-produktów rozszczepienia zachodzi zmniejszenie ich aktywności. Odpady promieniotwórcze (przed ich przerobem) mogą być też przechowywane na sucho, np. upakowane w kasetach ustawionych w podziemnych lub naziemnych zbiornikach betonowych, gdzie są chłodzone powietrzem lub innymi gazami (np.  $\text{CO}_2$ ).

Głównym motywem rozwoju technologii przerobu paliwa wypalonego jest zmniejszenie w ten sposób ryzyka przy długoterminowym jego składowaniu. Podczas gdy okres  $T_{1/2}$  ogromnej większości produktów rozszczepienia nie przekracza 30 lat, okres półrozpadu plutonu  $^{239}\text{Pu}$  wynosi około 24 000 lat. Zagrożenie wnoszone przez odpady z procesu przerobu paliwa wypalonego po oddzieleniu od nich plutonu i zmagazynowaniu w podziemnych sztolniach zmniejsza się do poziomu zagrożenia wywołanego obecnością rudy uranowej dopiero po około 600 latach. Natomiast gdyby z odpadów nie został oddzielony pluton, to zagrożenie nimi, nawet po stu tysiącach lat, pozostałoby wyższe niż zagrożenie spowodowane rudami uranowymi. Pluton i inne aktywnowce powinny być dlatego oddzielone od produktów rozszczepienia przeznaczonych do ostatecznego składowania, należy je również unieszkodliwić.

W przypadku energetyki jądrowej masa surowców potrzebna do uzyskania określonej ilości energii jest znacznie mniejsza niż masa surowców konwencjonalnych. Dlatego też odpadów promieniotwórczych powstaje nieporównanie mniej niż w innych dziedzinach energetyki opartej np. na spalaniu węgla. Niepalne odpady stałe poddaje się prasowaniu w celu maksymalnego zmniejszenia ich objętości. Następnie są one ładowane do beczek i zalewane cementem. Objętość odpadów palnych najskuteczniej redukuje się przez ich spalenie, a gazy spalania przepuszcza się przez system filtrów w celu oczyszczenia ich z pyłów i związków chemicznych mogących zawierać nuklidy promieniotwórcze. Popioły natomiast poddaje się wymieszaniu z cementem, piaskiem i wodą i załadowuje się do beczek. Przerób ciekłych odpadów promieniotwórczych polega na ich stężeniu do jak najmniejszej objętości, przetworzeniu w postać stałą i następnie np. zatopieniu w masie asfaltowej. Obecnie najbardziej perspektywiczną i sprawdzoną metodą przekształcania odpadów w postać stałą jest ich zeszkliwanie. Podczas prażenia ich w temperaturze 400–800°C sole azotowe produktów rozszczepienia przekształcają się w tlenki. Dalsze prażenie tlenków odpowiednio długo w temperaturze 900–1200°C prowadzi do powstania szkła borowo-krzemowego. Wytwarza się również szkła fosforowe przez odparowanie roztworów w obecności kwasu fosforowego i następnie prażenie w temperaturze 800–1100°C. Masę szklaną wylewa się do cylindrycznych pojemników ze stali nierdzewnej, które są hermetycznie zamykane i transportowane na składowiska odpadów radioaktywnych.

Z reaktora o mocy elektrycznej 1000 MW, który zużywa rocznie 30 ton paliwa uranowego, powstaje rocznie tylko około 4 m<sup>3</sup> wysoko aktywnych odpadów oraz około 300 m<sup>3</sup> odpadów ciekłych o niskiej i średniej aktywności. Żadnych z tych odpadów nie wyrzuca się po prostu do środowiska. Najlepszą lokalizacją składowisk odpadów są wyrobiska wyeksploatowanych kopalń, nie używane tunele komunikacyjne, stare fortyfikacje podziemne, złoża solne czy pokłady gliny na głębokości do 100 m. Składowiska odpadów lokalizuje się na obszarach, gdzie nie ma wody gruntowej, uskoków gruntu, pęknięć tektonicznych skorupy ziemskiej. Miejsca te nie powinny być zagrożone trzęsieniami ziemi.

Tak dobrane warunki przechowywania gwarantują w maksymalnym stopniu, że pojemniki zawierające zgromadzone „śmiecie” nie będą narażone na mechaniczne pęknięcia i uszkodzenia zagrażające rozsypaniem się ich w środowisku. Pewne zagrożenie może wiązać się z procesami zachodzącymi wewnątrz „śmieci”, które np. na skutek tzw. uszkodzeń radiacyjnych zachodzących w materiałach zeszkliwionych mogą prowadzić do kruszenia szkła oraz osłon zewnętrznych, tj. samych pojemników.

Dla porównania, elektrownia węglowa o mocy 1000 MW spalając w roku 3 miliony ton węgla wytwarza ponad milion ton pyłów i szlaki, około 100 000 ton dwutlenku siarki i tlenków azotu oraz kilka milionów ton dwutlenku węgla, które trafiają na odkryte hałdy albo uchodzą w powietrze.

Analizy możliwości wydostania się na powierzchnię substancji radioaktywnych ze składowisk i wynikającego stąd zagrożenia ludności wskazują, że ryzyko związane ze zmagazynowanymi głęboko pod ziemią odpadami radioaktywnymi jest nieporównywalnie mniejsze od ryzyka wywołanego przenikającym do środowiska radem ze złóż naturalnego uranu.

Stosowane obecnie metody przechowywania odpadów radioaktywnych należą do bezpiecznych. Obowiązujące w tym zakresie zasady są rygorystyczne. Gdyby na przełomie XIX i XX wieku zaczęły obowiązywać takie rygory w całym powstającym wtedy przemyśle – nie mielibyśmy obecnie w ogóle problemu zanieczyszczenia środowiska.

Więszym zagrożeniem dla ludzi i środowiska mogą być awarie elektrowni jądrowych, podczas których wyzwalały się z rozhermetyzowanych prętów z paliwem jądrowym promieniotwórcze fragmenty rozszczepienia i wydostają się na zewnątrz jak z puszek Pandory, powodując skażenie środowiska substancjami promieniotwórczymi na dużych obszarach, sięgających czasami nawet tysięcy km<sup>2</sup>. Podobnie rzecz się ma w przypadku wybuchu bomb atomowych. W środowisku rozprzestrzeniają się wtedy długożyciowe pierwiastki promieniotwórcze. Dotychczas największą taką awarią elektrowni jądrowej była awaria bloku energetycznego w Czernobylu w 1986 roku (*Delta* 1/1993).

Liczba atomowa	Symbol chemiczny	Okres półtrwania	Wydajność %	Rodzaj promieniowania
35	<sup>83</sup> Br	2,39 godz.	0,5	$\beta^-$ , $\gamma$
36	<sup>85</sup> Kr	10,76 lat	0,293	$\beta^-$ , $\gamma$
38	<sup>88</sup> Kr	2,84 godz.	3,57	$\beta^-$ , $\gamma$
	<sup>89</sup> Sr	50,5 dni	4,79	$\beta^-$
	<sup>90</sup> Sr	28,8 lat	5,77	$\beta^-$
43	<sup>92</sup> Sr	2,71 godz.	5,3	$\beta^-$
	<sup>99</sup> Tc	$2,13 \cdot 10^5$ lat	6,06	$\beta^-$
53	<sup>131</sup> I	8,04 dni	3,1	$\beta^-$ , $\gamma$
55	<sup>137</sup> Cs	30,14 lat	6,15	$\beta^-$ , $\gamma$
58	<sup>141</sup> Ce	32,5 dni	5,7	$\beta^-$ , $\gamma$
	<sup>144</sup> Ce	284,9 dni	6,0	$\beta^-$ , $\gamma$
62	<sup>151</sup> Sm	90 lat	0,45	$\beta^-$ , $\gamma$

Niektóre izotopy powstające w reakcji rozszczepienia <sup>235</sup>U.