

## Wstęp

Odkrycie, że atomy uranu ulegają rozszczepieniu po pochłonięciu neutronu, dokonane w 1938 r. przez zespół prof. Otto Hahna, otworzyło drogę do jednej z najważniejszych przemian współczesnej techniki. Jest nią przejście od marnotrawstwa zasobów węgla i ropy, nagromadzonych przez naturę w ciągu milionów lat w skorupie ziemskiej, a obecnie spalanych przez człowieka, do świadomego wykorzystania zasobów energii wydzielanej przy rozszczepieniu uranu.

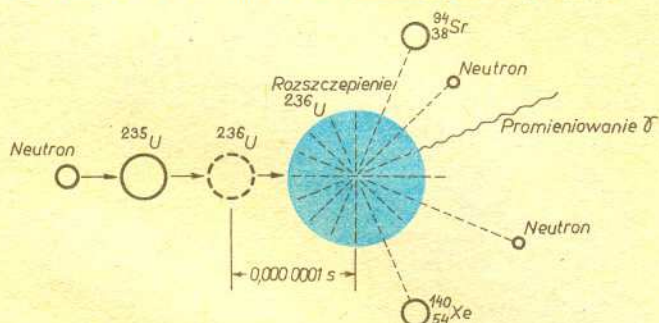
Tylko część ciepła wydzielanego w reakcji jądrowej zamieniana jest na energię elektryczną; charakteryzując bloki energetyczne elektrowni jądrowej zaznacza się dodatkowo, że chodzi o moc produkowanej energii elektrycznej. 1 MWe oznacza 1 megawat energii elektrycznej.

Realizacja potencjalnych korzyści tkwiących w reakcji rozszczepienia nie była łatwa, ale już od pierwszych lat rozwoju techniki jądrowej uczeni i inżynierowie pracowali z najwyższym wysiłkiem i w rekordowym czasie doprowadzili do wprowadzenia reaktorów jądrowych do energetyki. Pierwszy reaktor osiągnął stan krytyczny w USA w grudniu 1942 roku, w 1951 r. uzyskano pierwszy raz energię elektryczną z amerykańskiego reaktora prędkiego EBR-1, w 1954 r. zaczęła w ZSRR pracę elektrownia jądrowa o mocy 5 MWe, a już w 1956 i 1957 roku rozpoczęły pracę pierwsze elektrownie o mocach 50—60 MWe w Calder Hall (Wielka Brytania) i Shippingport (USA).

Dalszy rozwój reaktorów energetycznych przebiegał lawinowo — w końcu 1960 r. ich łączna moc wynosiła 1145 MWe, w 1970 r. 16424 MWe, w 1980 r. 135 tys. MWe, a w końcu 1985 r. doszła do 250 tys. MWe! Tak szybkiego rozwoju nie znała żadna inna gałąź energetyki. I nie dziwnego — pośpiech w doskonaleniu reaktorów jest konieczny, jeśli ludzkość nie chce stanąć wobec perspektywy braku energii, braku głębszego niż przejściowe opóźnienie w budowie elektrowni, bo polegającego na całkowitym wyczerpaniu zasobów paliw kopalnych. Dlatego już dziś energetyka jądrowa uważana jest za podstawowe źródło możliwego przyrostu mocy potrzebnej krajom na całym świecie. W perspektywie następnego stulecia przewiduje się, że wprowadzenie energetyki jądrowej pozwoli zmniejszyć spalanie węgla i ropy i zachować te cenne surowce do wykorzystania w procesach chemicznych.

## Procesy związane z reakcją rozszczepienia

W momencie rozszczepienia jądra uranu  $^{235}\text{U}$ , to jest izotopu rozszczepialnego (bo jest także i izotop  $^{238}\text{U}$ , nierozszczepialny, Naturalny uran jest mieszaniną trzech izotopów: około 99,274% stanowi  $^{238}\text{U}$ , 0,720% —  $^{235}\text{U}$  i 0,006% —  $^{234}\text{U}$ . Z kilkunastu znanych sztucznych izotopów uranu największe znaczenie praktyczne ma  $^{235}\text{U}$ , który ulega rozszczepieniu w wyniku wychwytu neutronów termicznych i może być, obok  $^{235}\text{U}$ , stosowany jako paliwo w reaktorach jądrowych. Wszystkie izotopy uranu są nietrwałe.



Rys. 1. Przykładowy schemat reakcji rozszczepienia.

a stanowiący 99,3% uranu naturalnego), następuje wyrzucenie dwóch fragmentów rozszczepienia, to jest atomów pierwiastków, takich jak np. stront i ksenon, a także emisja 2—3 neutronów (rys. 1).

Neutrony te zderzają się z atomami różnych pierwiastków znajdujących się w rdzeniu reaktora, tracą swą energię, czyli spowalniają się, i już jako neutrony powolne — tzw. neutrony termiczne, bo ich prędkości są w stanie równowagi z prędkościami innych atomów o temperaturze otoczenia — zostają pochłonięte przez jądra  $^{235}\text{U}$ , które z kolei ulegają rozszczepieniu. W ten sposób w reaktorze realizuje się łańcuchową reakcję rozszczepienia.

Prawdopodobieństwo zajścia reakcji rozszczepienia zależy od energii neutronu pochłanianego przez jądro  $^{235}\text{U}$ . Również pochłanianie w innych materiałach w rdzeniu zmienia się z energią neutronów. Utrzymanie w rdzeniu optymalnych warunków podtrzymywania reakcji wymaga zmniejszenia energii kinetycznej (spowolnienia) neutronów produkowanych podczas rozszczepienia  $^{235}\text{U}$ .

Proces spowalniania neutronów jest bardzo ważnym elementem zjawisk zachodzących w reaktorze. Najlepszymi materiałami spowalniającymi neutrony, czyli moderatorami, są ciężka woda i grafit, które prawie nie pochłaniają neutronów przy zderzeniach zachodzących w czasie spowalniania. Nieco gorszym moderatorem jest woda zwykła,  $\text{H}_2\text{O}$ , ponieważ atomy wodoru pochłaniają neutrony bardziej niż deuter lub węgiel.

Użycie jako moderatora ciężkiej wody lub grafitu umożliwia stosowanie jako paliwa uranu naturalnego, w którym rozszczepialny izotop  $^{235}\text{U}$  stanowi tylko 0,7%. Przy wprowadzeniu wody jako moderatora trzeba zmniejszyć ilość neutronów wychwytywanych w  $^{238}\text{U}$ , by zrównoważyć wychwyty neutronów w wodorze. Dlatego w reaktorach z moderatorem wodnym stosuje się jako paliwo uran wzbogacony, w którym zawartość rozszczepialnego  $^{235}\text{U}$  jest zwiększona do 3—4%.

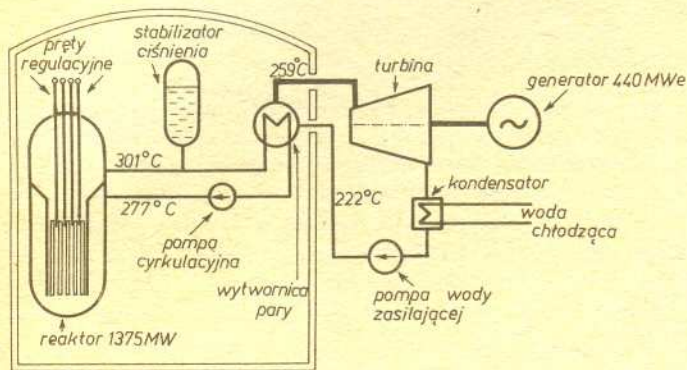
Wzbogacanie jest operacją bardzo trudną, bo oba izotopy mają jednakowe własności chemiczne. Jedyną różniącą je cechą jest łączna liczba neutronów i protonów w jądrze — właśnie 235 lub 238 — i tę różnicę mas jąder wykorzystuje się w procesach wzbogacania. Opierają się one na różnicach w energiach kinetycznych jąder tych dwóch izotopów, co wpływa na różne tempo przepływu gazowych związków obu rodzajów uranu przez półprzepuszczalne membrany w zakładach dyfuzji gazowej lub powoduje separację  $^{235}\text{U}$  od  $^{238}\text{U}$  w potężnych zestawach wirówek. Nawet dzisiaj liczne szczegóły metod wzbogacania uranu są tajne, a zakłady wzbogacania istnieją tylko w kilku krajach. Dlatego kraje, które pragną zachować pełną niezależność od wielkich mocarstw, budują reaktory z paliwem z uranu naturalnego, moderowane grafitem lub  $\text{D}_2\text{O}$  (ciężką wodą; D — oznacza deuter).

Ale użycie wody zwykłej ma ogromne zalety. Pozwala ona na budowę reaktora o mniejszych rozmiarach, bo wódór jako najlżejszy z pierwiastków najskuteczniej odbiera energię od neutronów, a ponadto woda może odgrywać podwójną rolę — moderatora i chłodziwa.

Głównym źródłem ciepła związanego z reakcją rozszczepienia jest energia kinetyczna wspomnianych na początku fragmentów rozszczepienia. Po rozszczepieniu uranu rozbiegają się one z ogromną prędkością, ale w toku zderzeń z otaczającymi je atomami oddają im one swą energię, powodując ich szybsze drgania — czyli podnosząc temperaturę paliwa. Każde rozszczepienie uranu wiąże się z wydzieleniem energii  $1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$ , z czego blisko 95% pozostaje w paliwie, a reszta unoszona jest do moderatora, chłodziwa i elementów konstrukcyjnych.

## Budowa reaktora

Elementy paliwowe w reaktorze ukształtowane są zwykle w postaci prętów, w których centrum znajdują się pastylki paliwowe, a powłokę stanowi tzw. koszulka, wykonana z metalu o wysokiej wytrzymałości, małym pochłanianiu neutronów i dobrej przewodności cieplnej. Koszulka od zewnątrz omywana jest wodą, odbierającą ciepło od paliwa i unoszącą je poza reaktor, do wytwornicy pary, gdzie następuje przekazanie ciepła do wody, będącej czynnikiem roboczym w obiegu wtórnym. Para powstająca w wytwornicy pary kierowana jest na turbinę napędzającą generator elektryczny (rysunek 2). Woda pierwszego obiegu po ochłodzeniu w wytwornicy pary powraca do rdzenia, by ponownie odebrać ciepło od elementów paliwowych.



Rys. 2. Schemat elektrowni jądrowej.

Taki schemat stosowany jest obecnie w najbardziej rozpowszechnionych na świecie wodnych reaktorach ciśnieniowych, znanych u nas pod nazwą WWER (Wodo-Wodianoj Energeticzeskij Reaktor), a w krajach zachodnich pod nazwą PWR (Pressurized Water Reactor). Reaktory te zdobyły sobie uznanie dzięki ich znakomitemu wynikowi w zakresie bezpieczeństwa jądrowego (w ciągu 30 lat pracy różnych elektrowni z tymi reaktorami nie doszło do żadnego wypadku, który spowodowałby śmierć lub utratę zdrowia człowieka), dzięki łatwości obsługi, niezawodności działania i konkurencyjności ekonomicznej.

Do regulacji mocy w reaktorze WWER stosuje się zestawy prętów pochłaniających neutrony, które dla obniżenia ilości rozszczepień w rdzeniu reaktora — tj. dla obniżenia mocy — wsuwa się do rdzenia pomiędzy elementy paliwowe, a dla podniesienia mocy wyciąga się z rdzenia.

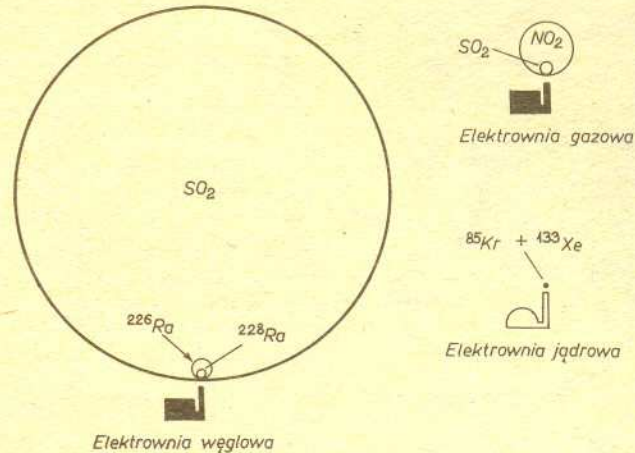
Niezależnie od nich można do chłodziwa reaktora wprowadzać roztwór kwasu borowego, który silnie pochłania neutrony. Wysokie stężenie tego roztworu utrzymuje się na początku cyklu pracy reaktora, gdy w rdzeniu znajduje się uran świeży, niewypalony. W miarę wypalania uranu, które powoduje, że atomów  $^{235}\text{U}$  jest coraz mniej, a produktów rozszczepienia (też pochłaniających neutrony) coraz więcej, stężenie kwasu borowego w wodzie zmniejsza się, a przy końcu kampanii jest ono bliskie zeru.

## Powody budowy elektrowni jądrowych w Polsce

Oczywiście budowa reaktora jądrowego z jego wielokrotnymi systemami zabezpieczeń, układami regulacji, potężnymi osłonami i systemami zatrzymywania produktów rozszczepienia jest bardziej skomplikowana i droższa od budowy elektrowni spalającej węgiel. Ale jeśli uwzględni się, że dla zaopatrzenia elektrowni na węgiel trzeba także rozbudować kopalnię i zapewnić środki transportu węgla, to okaże się, że nakłady inwestycyjne na całość niezbędnych przedsięwzięć są porównywalne. A koszty eksploatacyjne elektrowni jądrowych są znacznie niższe niż elektrowni węglowych. Powodem jest różnica w ilości paliwa zużywanego przez oba te typy elektrowni. Do elektrowni jądrowej o mocy 1000 MWe trzeba dostarczyć w ciągu roku 6 wagonów

z paliwem jądrowym, natomiast do elektrowni na węgiel o tej samej mocy potrzeba 38 000 wagonów węgla. W sumie — energia wytwarzana w elektrowni jądrowej jest tańsza.

A ponadto, owe setki tysięcy ton węgla są w elektrowni konwencjonalnej spalane, czemu towarzyszy nieuchronnie emisja ogromnych ilości związków siarki, azotu i pierwiastków ciężkich, szkodliwych nie tylko dla środowiska, ale i dla samego człowieka. Elektrownie jądrowe natomiast zapewniają przy normalnej eksploatacji utrzymanie pod kontrolą wszystkich wydzielanych szkodliwych produktów. Rysunek 3, na którym pokazano ilości powietrza potrzebne do rozcieńczenia szkodliwych substancji emitowanych z elektrowni węglowej i elektrowni jądrowej do poziomu dopuszczalnego, stanowi tego najlepszą ilustrację.



Rys. 3. Roczne objętości powietrza potrzebne dla rozcieńczenia uwalnianych lotnych zanieczyszczeń do stężeń dopuszczalnych. 1 mm na rysunku odpowiada dwóm kilometrom.

Polska jest krajem, który dotychczas opierał swą energetykę na spalaniu węgla. Efektem tego jest emisja około 2 mln ton  $\text{SO}_2$  rocznie, zgromadzenie już ponad 130 mln ton odpadów stałych (z czego rocznie wykorzystuje się około 5 mln ton) i zanieczyszczenie powietrza tak wielkie, że jedna trzecia ludności Polski mieszka w rejonach zagrożenia ekologicznego lub nawet katastrofy ekologicznej. Planowane wprowadzenie energetyki jądrowej w naszym kraju stanowi realną szansę na powstrzymanie dalszego wzrostu zanieczyszczeń środowiska naturalnego. Jest ono także niezbędne dla pokrycia rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Problem nie polega już dziś na decyzji czy budować elektrownie jądrowe, ale na pytaniu, jak zrobić to najszybciej i najlepiej.

Przewidziana w planach gospodarczych moc 7860 MWe w 2000 r. odpowiada zbudowaniu Elektrowni Jądrowej Żarnowiec z 4 blokami z reaktorami WWER o mocy 465 MWe każdy, następnej elektrowni jądrowej z 4 blokami o mocy po 1000 MWe i dalszych dwóch bloków o mocy po 1000 MWe w następnej elektrowni. Potrzeby energetyczne kraju są wyższe, ale realne możliwości budowy elektrowni jądrowych nie pozwalają przewidywać oddania do eksploatacji większych mocy. I tak zadania stojące przed nami w tej dziedzinie są ogromne. Wielkość ich można sobie uzmysłowić biorąc pod uwagę fakt, że obecnie w Polsce nie pracuje jeszcze żadna elektrownia jądrowa, a szczupła kadra wychowana jest na doświadczeniach z budowy i eksploatacji dwóch reaktorów badawczych w Świerku, których łączna moc nie przekracza 40 MW cieplnych.

Zbudowanie w ciągu 14 lat dziesięciu reaktorów energetycznych wielkiej mocy, które łącznie będą dostarczać krajowi energię równą połowie obecnego rocznego zapotrzebowania, wymagać będzie wspólnego wysiłku najlepszych inżynierów i organizatorów, a także naukowców. Naukowców — bo nie wszystkie problemy reaktorowe zostały już rozwiązane. Wśród tych, które wymagają nadal badań, jest problem najbardziej kontrowersyjny — sprawa bezpieczeństwa elektrowni jądrowych.