

Działanie elektrowni jądrowej

- Działanie elektrowni jądrowej

Działanie elektrowni jądrowej

Odkrycie reakcji łańcuchowych stworzyło możliwość czerpania energii z przemian zachodzących w jądrach atomowych. Aby móc ją wykorzystywać w kontrolowany sposób, skonstruowano reaktory jądrowe, które w wielu krajach stanowią obecnie podstawę energetyki. Z tego rozdziału dowiedziecie się, jak kontrolować reakcje łańcuchowe i w jaki sposób działają reaktory jądrowe.



Energetyka atomowa, pomimo pewnych zagrożeń wynikających z jej wykorzystywania, stanowi obecnie najwydajniejsze i jedno z najczystszych źródeł energii elektrycznej.

Źródło: Vlastimil Ott, Flickr, CC BY SA <https://www.flickr.com/photos/plastique/4021279909/sizes/o/>.

Przed przystąpieniem do zapoznania się z tematem, należy znać poniższe zagadnienia

- rodzaje promieniowania jądrowego i jego wpływ na organizmy żywe,
- definicję izotopu promieniotwórczego,
- definicję aktywności promieniotwórczej,
- jak obliczyć zmianę (zachodzącą w czasie) średniej liczby jąder izotopu promieniotwórczego za pomocą prawa rozpadu promieniotwórczego,
- definicję okresu połowicznego rozpadu,

- przykłady sztucznych reakcji jądrowych wywołanych bombardowaniem cząsteczkami alfa,
- równoważność masy i energii,
- definicję deficytu masy,
- ogólny schemat reakcji rozszczepienia izotopu uranu ^{235}U ,
- przebieg reakcji łańcuchowej rozszczepiania jądra uranu ^{235}U .

Nauczysz się

- jak kontroluje się przebieg reakcji łańcuchowej w reaktorach jądrowych,
- jakie korzyści i zagrożenia niesie ze sobą energetyka jądrowa.

Reakcje łańcuchowe są źródłem ogromnych ilości energii. Problem leży w tym, że jeśli chcemy je wykorzystać, musimy nauczyć się je kontrolować. Jednym z rezultatów każdej reakcji rozszczepienia jest wyrzut neutronów. [Paliwo jądrowe](#) w większości elektrowni jądrowych stanowi [wzbogacony uran](#). Podczas każdego aktu rozszczepienia tego pierwiastka wyrzucane są trzy neutrony mogące spowodować kolejne reakcje. Część neutronów po prostu opuszcza obszar, w którym umieszczono materiał rozszczepialny, a część zostaje pochłonięta przez stabilne jądra izotopu ^{238}U . Aby reakcja samoistnie nie zanikła, przynajmniej jeden z trzech powstałych neutronów musi zostać wychwycony przez jądro niestabilne izotopu ^{235}U .

Na przebieg reakcji wpływają również masa materiału rozszczepialnego (bez odpowiedniej masy reakcja by w ogóle nie zaszła), **masa krytyczna** i rozmiar tego materiału – **rozmiar krytyczny**. Zbyt mały rozmiar i źle dobrany kształt są przyczyną ucieczki neutronów i samoistnego wygaszania przebiegu reakcji.

Reakcja łańcuchowa polega na tym, że neutrony powstające w wyniku rozszczepienia jednego jądra mogą wywoływać kolejne rozszczepienia. O przebiegu tej reakcji decyduje przede wszystkim to, ile nowych rozszczepień powoduje jedno rozszczepienie poprzednie.

Jeśli w każdym „pokoleniu” neutronów liczba rozszczepień pozostaje stała, reakcja przebiega w sposób kontrolowany (tak dzieje się w reaktorze jądrowym). Jeśli

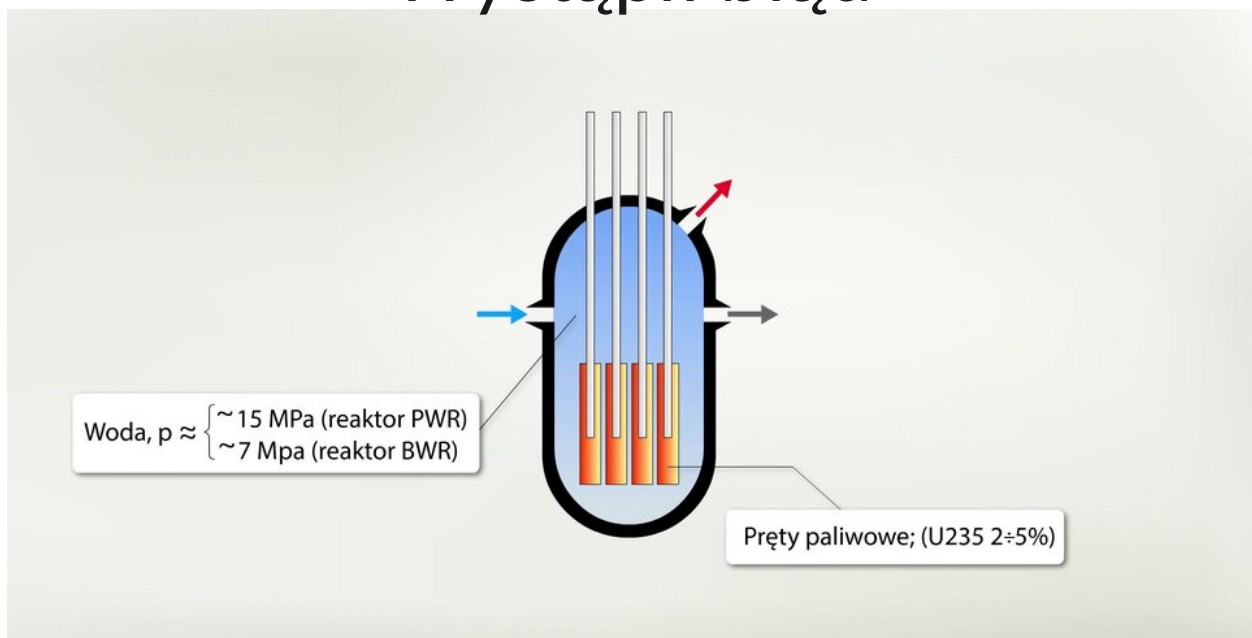
natomiast liczba ta rośnie, reakcja ulega szybkiemu nasileniu, a wydzielana energia gwałtownie wzrasta.

Szybkość rozwoju reakcji zależy także od tego, jak szybko neutrony wywołują kolejne rozszczepienia. Szczególnie istotną rolę odgrywają neutrony emitowane bezpośrednio podczas rozszczepienia (tzw. neutrony natychmiastowe), które mogą bardzo szybko inicjować kolejne reakcje.

Reakcja łańcuchowa może zachodzić zarówno z udziałem neutronów o dużych energiach (prędkich), jak i neutronów spowolnionych (termicznych). W reaktorach jądrowych stosuje się rozwiązania konstrukcyjne (np. moderator i pręty kontrolne), które umożliwiają utrzymanie reakcji na stałym, bezpiecznym poziomie.

Aby móc kontrolować przebieg reakcji jądrowych, skonstruowano reaktory jądrowe. Najważniejszym elementem takiego urządzenia jest **rdzeń**, w którym znajdują się elementy paliwowe i moderator.

Wystąpił błąd



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1Y1xCVD91P93>

Budowa i zasada działania reaktora

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o, licencja: CC BY 3.0.

Film dotyczący budowy i działania reaktora.

Paliwo jądrowe jest umieszczane w reaktorze nie w postaci jednego wsadu, tylko jako osobne elementy paliwowe (często pręty). Dzięki temu do rdzenia można wprowadzić moderator wykonany z substancji spowalniającej prędkość neutronów ([ciężka woda](#), grafit, tlenek berylu), a tym samym zwiększyć prawdopodobieństwo wychwycenia neutronów przez jądra materiału rozszczepialnego. Łatwiejsze są też odprowadzenie wytwarzanego ciepła oraz kontrolowanie ilości paliwa w rdzeniu.

Przebiegiem reakcji łańcuchowej sterują pręty kontrolne, które mogą być wsuwane do reaktora na różne głębokości lub też całkowicie z niego wyprowadzane. Pręty kontrolne wykonane są z materiałów, które charakteryzują się dużą zdolnością wychwytywania neutronów (kadm, bor), dzięki czemu liczbę tych cząstek w rdzeniu można zmniejszać lub zwiększać. Ważną rolę odgrywają zwłaszcza tzw. pręty bezpieczeństwa – ich zadaniem jest przerwanie przebiegu reakcji. Gdy reakcja wymyka się spod kontroli, są one wstrzeliwane do rdzenia – wtedy praca reaktora zostaje przerwana. Zmiana strumienia neutronów pozwala na regulację mocy rdzenia.

Reaktor podczas pracy wydziela olbrzymie ilości ciepła. Do odprowadzenia energii z rdzenia wykorzystuje się między m.in. ciekły sód, który nie pochłania neutronów, a tym samym nie wpływa na pracę reaktora. Chłodziwami reaktorowymi mogą być nie tylko ciecze, lecz także gazy mające dobre właściwości cieplne (przewodnictwo cieplne, wysoka temperatura wrzenia, wysokie ciepło właściwe). Chłodziwo przepływa do **wymiennika ciepła**, gdzie swoje ciepło przekazuje wodzie. Ona zaś – już w postaci pary wodnej pod wysokim ciśnieniem – napędza turbiny poruszające się wirnikami generatorów (prądnic). Ich ruch obrotowy zamieniany jest w energię elektryczną (podobnie jak w [dynamie](#) rowerowym).

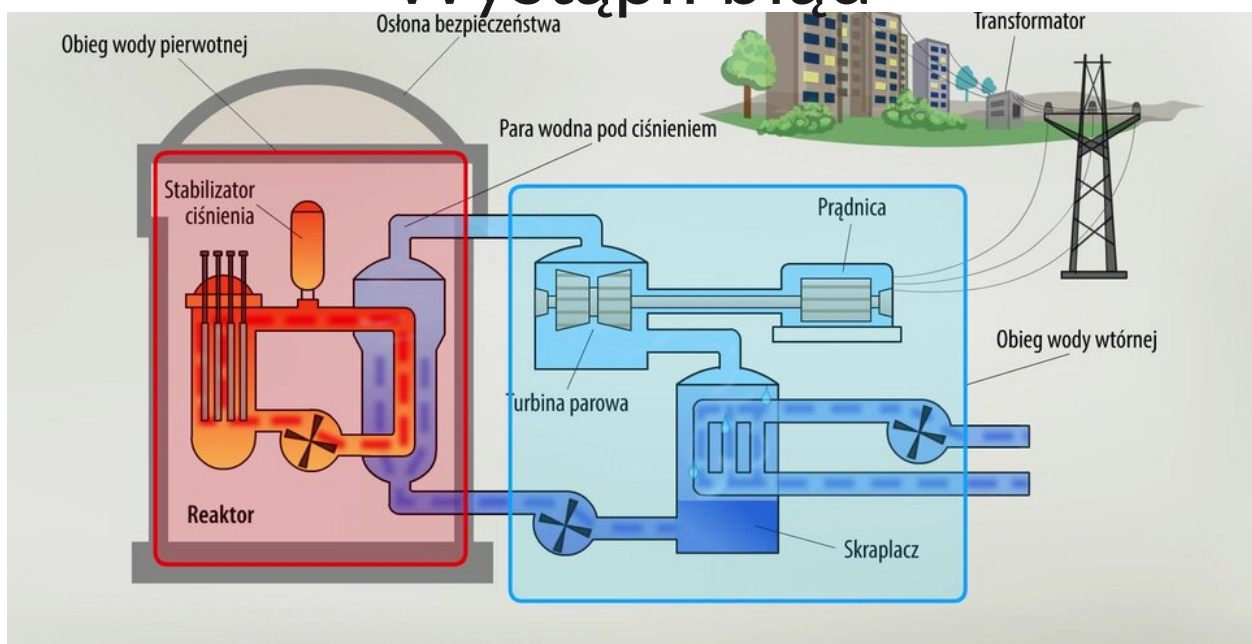
Reaktory stosowane są do:

- wytwarzania energii elektrycznej,
- produkcji paliwa jądrowego (w postaci plutonu ^{239}Pu) do celów militarnych,
- produkcji izotopów radioaktywnych (np. mających zastosowanie w medycynie),
- eksperymentów naukowych w fizyce, biologii itd.

Elektrownie atomowe działają podobnie jak konwencjonalne elektrownie ciepłne – w obu przypadkach obiegiem roboczym jest obieg parowo-wodny. **Sprawność elektrowni atomowej** waha się w granicach 30–40%, czyli jest nieznacznie niższa niż sprawność elektrowni konwencjonalnej. Elektrownia atomowa wytwarza jednak dużo większą moc – jednostkowy blok energetyczny elektrowni jądrowej jest w stanie wyprodukować od 900 do 1400 MW czystej energii. Jedyną wadą elektrowni atomowych jest produkcja odpadów promieniotwórczych.

Zużyte paliwo wymieniane jest średnio co trzy lata i musi być składowane w miejscach specjalnie do tego przeznaczonych. Odpady promieniotwórcze najczęściej są wynikiem pracy samej elektrowni – takimi odpadami są np. promieniotwórczy uran ^{235}U nie do końca zużywany w elementach paliwowych lub pluton wytworzony w reaktorze. Odpady promieniotwórcze mogą być również efektem działań związanych z pozyskaniem rud uranu (promieniotwórcze hałdy usypane w pobliżu kopalni).

Wystąpił błąd



Film dostępny pod adresem [/preview/resource/R1LRv7ktyYr5W](#)

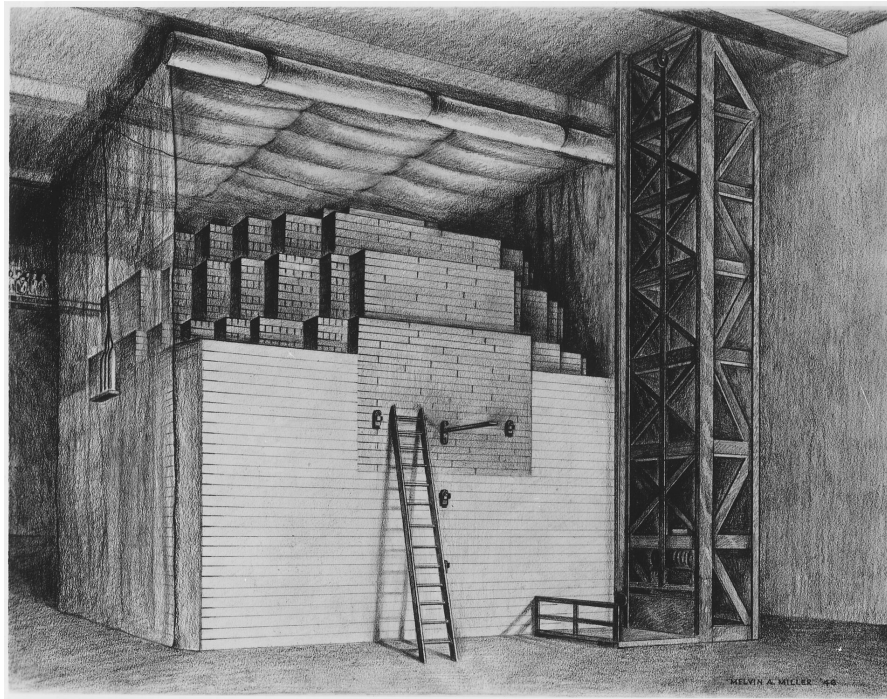
Budowa i zasada działania elektrowni jądrowej.

Źródło: Tomorrow Sp.z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Film dotyczący budowy i zasady działania elektrowni jądrowej.

Ciekawostka

Pierwszy reaktor jądrowy, nazywany wówczas stosem atomowym, został zbudowany w 1942 r. przez Enrico Fermiego – włoskiego fizyka. Reaktor ustawiono pod trybuną stadionu Stagg Field. Dzięki temu reaktorowi 2 grudnia 1942 r. udało się przeprowadzić pierwszą reakcję łańcuchową kontrolowaną przez człowieka, w efekcie czego uzyskano energię jądrową.



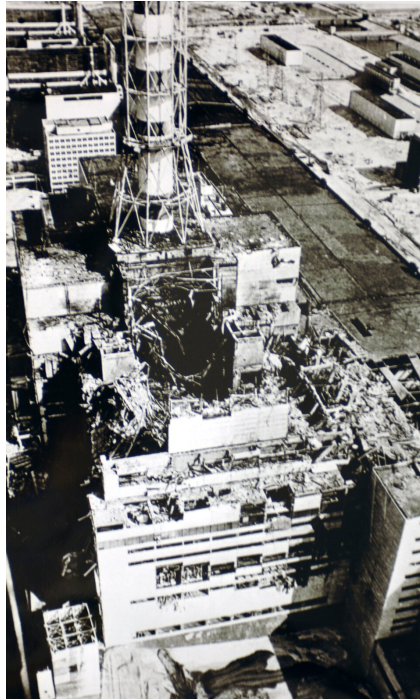
Pierwszy reaktor jądrowy, skonstruowany przez Enrico Fermiego w 1942 r.

Źródło: Krzysztof Jaworski Melvin A. Miller of the Argonne National Laboratory (<https://commons.wikimedia.org>).

Ciekawostka

26 kwietnia 1986 r. doszło do największej w historii energetyki jądrowej awarii elektrowni jądrowej. Miało to miejsce w Czarnobylu – miejscowości leżącej na terenie obecnej Ukrainy. Należy podkreślić, że awaria reaktora nie pojawiła się na skutek normalnej eksploatacji bloku energetycznego, tylko była skutkiem przeprowadzanego w tym czasie eksperymentu. Do katastrofy przyczyniła się konstrukcja samego reaktora, który pierwotnie przeznaczony był do celów wojskowych (produkcja plutonu). Chłodziwem w urządzeniach tego typu jest woda. Reaktor uległ znacznemu przegrzaniu – wysoka temperatura doprowadziła do **termolizy** wody, czyli do jej rozkładu na tlen i wodór. Powstała **mieszanina piorunująca**, po czym nastąpił wybuch. Radioaktywny materiał wypełniający

elementy paliwowe, który przedostał się do wody jeszcze przed jej odparowaniem, po zniszczeniu kopuły ochronnej skażył bezpośrednio otoczenie elektrowni. Sytuację pogorszył drugi wybuch, który całkowicie zniszczył reaktor; a chmura promieniotwórcza osiągnęła wysokość kilometra.



Fotografia elektrowni atomowej w Czarnobylu wykonana po jej awarii.

Źródło: IAEA Imagebank (<https://www.flickr.com>).

Awaria w Czarnobylu spowodowała, że wiele społeczeństw zaczęło krytycznie odnosić się do tego sposobu wytwarzania energii. Jednak potrzeby energetyczne są na tyle duże, że nie da się zrezygnować z tej metody produkcji energii.

Nie wolno zapominać, że elektrownie węglowe również są źródłem substancji radioaktywnych – zanieczyszczeń oraz hałd o podwyższonym stopniu radioaktywności (węgiel jest wydobywany z dużych głębokości, gdzie poziom radioaktywności jest większy niż na powierzchni Ziemi). Nie zawsze pamiętamy też o ofiarach wypadków w kopalniach, a do takich zdarzeń dochodzi każdego roku. Tymczasem o ofiarach śmiertelnych katastrofy elektrowni jądrowej możemy mówić jedynie w przypadku Czarnobyla.

Katastrofa w Czarnobylu i wypadki w innych elektrowniach atomowych doprowadziły do zmian konstrukcyjnych w nowo budowanych elektrowniach. Zaczęto wykorzystywać zjawiska fizyczne, które przebiegają bez udziału człowieka – np.

zjawisko konwekcji zachodzi zawsze w określonych warunkach i nie można go przerwać. Chłodzenie reaktora nie jest już wymuszane systemem pomp, tylko uzyskiwane dzięki naturalnemu krążeniu substancji chłodzącej. Konstrukcje reaktorów są wyposażone w cztery niezależne systemy chłodzenia, z których każdy jest w stanie samodzielnie schłodzić rdzeń. Czynnikiem najbardziej poprawiającym bezpieczeństwo jest jednak zastosowanie wody jako moderatora i jednocześnie chłodziwa. Reakcje jądrowe wymagają spowalniania neutronów, ponieważ neutrony prędkie nie wywołują reakcji rozszczepienia uranu ^{235}U . Jeżeli temperatura wzrośnie ponad normę, woda przechodzi w stan pary, zmienia się jej gęstość i możliwości spowalniania maleją. Zaczynają zanikać rozszczepienia jąder uranu, spada ilość wytwarzanej energii i w rezultacie maleje moc reaktora.

W latach 60. XX wieku zaczęto się interesować cyklem torowo-uranowym. W skorupie ziemskiej jest znacznie więcej toru niż uranu, zwłaszcza uranu ^{235}U (pokłady tego izotopu są od trzech do czterech razy mniejsze, niż pokłady toru). Tor, a przede wszystkim ^{232}Th nie jest materiałem rozszczepialnym. Jądro ^{232}Th pochłania neutrony i tak powstaje promieniotwórczy izotop ^{232}Th , który ulega samorzutnemu rozpadowi i tworzy izotop ^{233}Pa (protaktyn). On również nie jest trwały; po następnym rozpadzie powstaje rozszczepialny izotop uranu ^{233}U . Konstrukcje reaktorów wykorzystujących ten izotop są opracowywane w wielu krajach świata. Takim przedsięwzięciem najbardziej zainteresowane są Indie (kraj ten ma bardzo duże złoża toru), gdzie potrzeby energetyczne są ogromne. Prace nad takim paliwem prowadzone są również w Polsce.

Ćwiczenie 1

Dlaczego w niektórych elektrowniach jądrowych stosuje się dwa obiegi parowo-wodne – nazywane obiegiem pierwotnym i obiegiem wtórnym? Odpowiedź uzasadnij.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Podsumowanie

- Łańcuchowe reakcje jądrowe są źródłem olbrzymich ilości energii. Aby móc ją wykorzystać, musimy te reakcje kontrolować. Do sterowania przebiegiem reakcji jądrowych służy reaktor.

- Pierwszy reaktor jądrowy został skonstruowany w 1942 r. w Stanach Zjednoczonych przez włoskiego fizyka Enrica Fermiego.
- Reaktor składa się z rdzenia, w którym umieszczone są elementy paliwowe, moderatora, prętów sterujących, układu chłodzenia i osłony antyradiacyjnej.
- Energię ciepłą wytwarzaną przez reaktor elektrownie jądrowe wykorzystują do zamiany wody w parę wodną. Ta napędza wirniki turbin i tak powstaje prąd elektryczny. Elektrownie jądrowe działają podobnie jak konwencjonalne elektrownie ciepłownicze; różnica polega na sposobie uzyskiwania energii.
- Korzyści płynące z wykorzystania elektrowni atomowych są olbrzymie; pozwalają one uzyskiwać niemal nieograniczone ilości czystej energii. Główne wady to konieczność składowania materiałów radioaktywnych i zapewnienie szeroko pojętego bezpieczeństwa pracy.
- Do największej awarii elektrowni atomowej doszło w 1986 r. w Czarnobylu, na terenie dzisiejszej Ukrainy. Skażeniu promieniotwórczemu uległ obszar ponad 100000 km².

Ćwiczenie 2

Jakie konstrukcje reaktorów jądrowych są obecnie stosowane i w jaki sposób zapewniane jest w nich bezpieczeństwo.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu , GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 3

Dlaczego nie można używać ołowiu lub żelaza jako moderatorów?

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu , GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Ćwiczenie 4

Zapisz przebieg następującej reakcji: ^{232}Th jest bombardowany neutronami. Powstaje z niego ^{233}Th , następnie tworzy się z niego protaktyn ^{233}Pa , a po kolejnym rozpadzie – uran ^{233}U . Zapisz, jakie cząstki (oprócz wymienionych jąder) powstają w tych procesach.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu , GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.



Źródło: Dariusz Kajewski, licencja: CC BY 3.0.

Słownik

ciężka woda

woda, w której wysoki procent stanowią atomy izotopu wodoru – deuteru (^2H). W elektrowniach jądrowych wykorzystywana jest jako moderator (spowalniacz neutronów).

dynamo

prądnica rowerowa.

element paliwowy

jednostka [paliwa jądrowego](#) (stałego lub ciekłego) otoczona hermetycznym zamknięciem (koszulką). Elementy paliwowe umieszczane są w rdzeniu reaktora w tzw. siatce, tak aby zachować między nimi odstęp. Pozwala to na lepsze chłodzenie tych elementów i manewrowanie paliwem.

moderator

substancja spowalniająca neutrony (grafit, ciężka woda).

paliwo jądrowe

rozszczepialny materiał paliwowy reaktora (pluton, wzbogacony uran).

sprawność elektrowni atomowej

stosunek uzyskanej energii elektrycznej do energii cieplnej wytworzonej w reaktorze (elektrowni). Straty energetyczne w elektrowniach jądrowych są duże i ich sprawność zbliżona jest do wartości $\frac{1}{3}$ (maksymalnie w granicach 40%).

termoliza

rozkład substancji na cząsteczki lub atomy zachodzący pod wpływem temperatury

współczynnik powielania neutronów

wielkość bezwymiarowa oznaczana literą „ k ”; odpowiada stosunkowi liczby neutronów powstających na pewnym etapie reakcji łańcuchowej do liczby neutronów powstałych we wcześniejszym etapie. Reakcja łańcuchowa nie zanika, jeśli $k \geq 1$.

wymiennik ciepła

urządzenie służące do wymiany ciepła między płynami.

wzbogacony uran

uran ^{238}U , który zawiera więcej uranu ^{235}U niż naturalny uran (ponad 0,72%).