02_01_IK.tif

Rysunek 1. Schemat elektrowni jądrowej z dwuobiegowym systemem chłodzenia.

Konstrukcja elektrowni jądrowej jest podobna do konstrukcji konwencjonalnej elektrowni opalanej węglem, jedyną różnicą jest źródło ciepła. W konwencjonalnej elektrowni jest to kocioł węglowy opalany węglem, natomiast w elektrowni jądrowej jest to reaktor, w którym zachodzą reakcje jądrowe generujące ciepło. Schemat konstrukcji elektrowni jądrowej przedstawiono na Rysunku 1. Zbiornik reaktora z rdzeniem umieszczony jest w budynku reaktora, który chroni go przed ewentualnymi zagrożeniami takimi jak uderzenie samolotu, czy atak z użyciem broni. Ciepło wytworzone w rdzeniu reaktora transportowane jest przez chłodziwo do wytwornicy pary poprzez obieg pierwotny (Obieg I). Wytwornica generuje parę o wysokiej temperaturze i ciśnieniu, która kierowana jest do turbiny parowej celem jej napędzenia przez obieg wtórny (Obieg II). Pracująca turbina napędza generator, który produkuje energie elektryczną przesyłaną do sieci, a tym samym do jej odbiorców. Para po wyjściu z turbiny z niższą temperaturę oraz ciśnieniem kierowana jest do kondensatora pary, gdzie jest skraplana, a następnie w postaci wody pompowana powrotnie do wytwornicy pary. Chłodzenie pary w kondensatorze jest możliwe z pomocą zimnej wody, która jest chłodzona w chłodni kominowej – Obieg III. Pręty kontrolne umieszczone w zbiorniku reaktora służą do sterowania oraz wyłączania reaktora, możliwe jest to przez ich całkowite lub częściowe wsuniecie do wnętrza rdzenia.

02_IK.tif

Najważniejszym procesem w reaktorze jądrowym jest reakcja rozszczepienia dzięki której wytwarza się ciepło, schemat reakcji przedstawiono na Rysunku 2. Reakcja rozszczepienie to reakcją jądrowa, w której ciężkie jądro atomu rozszczepialnego pod wpływem neutronu rozpada się na dwa lub więcej produkty rozszczepienie. Dodatkowo w trackie reakcji emitowane są neutrony, które wykorzystane są do inicjowana kolejnych reakcji rozszczepienia, w wyniku czego uzyskuje się stałą produkcje ciepła. Neutrony wyemitowane w reakcji rozszczepienia są neutronami prędkimi, czyli neutronami o wysokiej energii, fakt ten sprawia że niechętnie wywołują one reakcje rozszczepienia. W celu wywołania reakcji należy zmniejszyć ich energię, przy pomocy moderatora. Jest to materiał w którym neutrony poprzez interakcje z materiałem tracą swoją energie. Neutrony o niższej energii zwane neutronem termicznym chętniej generuje reakcję rozszczepienia.

Na świecie występuje wiele typów rektorów jądrowych, które można podzielić według różnych kryteriów. Najważniejszymi z nich są:

* przeznaczenie reaktorów
* energia neutronów wywołujących rozszczepienia
* rodzaj i charakterystyka paliwa
* konstrukcja reaktorów
* budowa rdzenia
* rodzaj moderatora i chłodziwa
* system odprowadzania ciepła.

Poniżej przedstawiono przeznaczenie reaktorów jądrowych:

* **reaktory energetyczne**, ich celem jest produkcja energii elektrycznej;
* **reaktory ciepłowniane**, wytwarzają ciepło do ogrzewania;
* **reaktory wysokotemperaturowe**, produkują ciepło do celów technologicznych;
* **reaktory badawcze**, prowadzone są w nich badania naukowe;
* **reaktory napędowe**, wykorzystywane są do napędu np. lodzi podwodnych, lodołamaczy oraz dużych statków;
* **reaktory wytwórcze**, do produkcji plutonu;
* **reaktory szkoleniowe**, wykorzystywane do celów dydaktycznych;
* **reaktory specjalne**, ich głównym celem jest produkcja radioizotopów np. do medycyny.

Często reaktory wykorzystuje się do więcej niż jednego cel. Reaktory badawcze mogą służyć również do celów szkoleniowych, a zarazem być reaktorami specjalnymi do produkcji radioizotopów. Wiele reaktorów energetycznych produkuje również ciepło podobnie jak elektrociepłownia, takie połączenie podnosi ich sprawność. Reaktory wysokotemperaturowe mogą dodatkowa generować energię elektryczną.

**Energia neutronów**

Reaktory dzielą się na reaktory prędkie i termiczne, podział związany jest z energią grupy neutronów, które inicjują reakcję rozszczepienie. Reaktory prędki wykorzystują neutrony prędkie, czyli neutrony o wysokich energiach, powyżej 1 MeV. W reaktorach termicznych wykorzystuje się do rozszczepienia neutrony termiczne, ich energia jest mniejsza niż 0.1 eV.

**Paliwo reaktorowe**

Jednym z kluczowym elementem reaktorów jest paliwo, które bazuje na rozszczepialnych izotopach. Najczęściej stosowanymi izotopami są uran 235, uran 238 oraz pluton 239. W reaktorach termicznych głównie wykorzystuje się uran, zaś w prędkich pluton. Pluton może zostać wymieszany razem z uranem tworząc paliwo MOX, które pracuje w reaktorach termicznych. Paliwo uranowe charakteryzuje się stopniem wzbogacenia, czyli procentowym udziałem zawartości izotopu rozszczepialnego w uranie. Reaktory mogą pracować na uranie naturalnym, niskowzbogaconym, średniowzbogaconym oraz wysokowzbogaconym. Uran naturalny wykorzystywany jest głównie w reaktorach gazowych oraz ciężkowodnych. Uran niskowzbogacony zawierający 2-5% U-235 stosowany jest w reaktorach energetycznych lekkowodnych, uran średniowzbogacony, który zawiera od 5-90% U-235 pracuje w reaktorach badawczych. Najbardziej wzbogacony uran, który zawiera ponad 90% U-235, przeznaczony jest dla reaktorów wysokotemperaturowych oraz dla reaktorów badawczych. Uran jako paliwo występuje w kilku postaciach: uran metaliczny, dwutlenek uranu (UO2) oraz węglik uranu (UC).

Paliwo w postaci elementu paliwowego, który może mieć różne kształty: cylindry, pastylki, rurki, płytki czy kule, szczelnie zamknięte jest w „koszulkach”. Wykonane są one z różnych materiałów takich jak stal nierdzewna, powłok pirowęglanowych, stopy cyrkonu czy magnezy lub aluminium. Materiał zastosowany na koszulke zależny jest od wymagań jakie musi spełniać: temperatura, odpornośc na utlenianie, trwałość mechaniczna czy słabe pochłanianie neutronów itp.

**Konstrukcja reaktorów**

03_01_IK.tif

Rysunek 3. Konstrukcja reaktora kanałowego (A) i zbiornikowego (B).

Reaktory energetyczne oparte są o dwie podstawowe konstrukcje: kanałową i zbiornikową. Przedstawicielami reaktorów kanałowych są CANDU i RBMK, natomiast reaktorami zbiornikowymi są PWR oraz BWR. Szkic konstrukcji kanałowej oraz zbiornikowej przedstawiono na rysunku 3. W reaktorze zbiornikowym, rdzeń umieszczony jest w grubościennym zbiorniku stalowym, który może wytrzymać wysokie ciśnienia. W reaktorze kanałowym pod wysokim ciśnieniem są tylko kanały chłodzące o niewielkich średnicach, które przechodzą przez rdzeń reaktora.

Reaktory zbiornikowe prędkie podzielono dodatkowo na dwa różne układy: zintegrowany i niezintegrowany. W układzie zintegrowanym w zbiorniku reaktora znajduje się cały układ pierwotny z rdzeniem, pompami oraz wymiennikiem ciepła w przeciwieństwie do układu niezintegrowanego, gdzie w zbiorniku reaktora znajduje się tylko rdzeń reaktora.

Z eksploatacyjnego punktu widzenia reaktory dzielą się na te z ciągłą wymiana paliwa oraz na te z okresową wymiana paliwa. Ciągła wymiana paliwa nie wymaga wyłączenia reaktora i dokonywana jest podczas pracy reaktora. Okresowa wymiana paliwa następuje po zakończonej kampanii paliwowej skutkującej wyłączeniem reaktora i przeładunkiem paliwa. Do reaktorów z ciągłą wymiana paliwa należą reaktory kanałowe, gazowe ora wysokotemperaturowe, natomiast reaktory zbiornikowe należą do drugiej grupy.

**Chłodziwo i moderator**

Kolejnymi kluczowymi elementami są chłodziwo oraz moderator, których funkcje mogą pełnić dwa różne materiału lub jak to jest w reaktorach lekkowodnych jeden materiał – woda. W innych typach reaktorów funkcję moderatora i chłodziwa są rozdzielone pomiędzy dwa różne materiały. Moderatorem może być: ciężka woda, lekka woda, grafit, beryl, natomiast chłodziwem generalnie jest lekka lub ciężka woda, dwutlenek węgla, hel, ciekły sód lub ołów. Nazwy reaktorów często odnoszą się właśnie do tych materiałów: reaktory ciężko wodne, wodne, gazowe, sodowe czy grafitowe itp.

**Odprowadzanie ciepła**

Ciepło wytworzone w paliwie odbierane jest przez chłodziwo, które to może transportować je w jednym obiegu, dwóch obiegach lub trzech. W reaktorze jednoobiegowym chłodziwo, którym jest woda doprowadzone jest do wrzenia w rdzeniu, para wytworzona w taki sposób bezpośrednio kierowana jest na turbinę. W dwubiegowym reaktorze przedstawionym na Rys., chłodziwo ze zbiorniku reaktora kierowane jest do wymiennika ciepła, gdzie odebrane ciepło wykorzystane jest do wytworzenia pary, która kierowana jest bezpośrednio na turbinę parowa. Najbardziej skomplikowany system – trzyobiegowy zastosowany jest w reaktorach chłodzonych sodem. Pomiędzy pierwszym pierwotnym obiegiem sodowym, a trzecim wodno-parowym obiegiem z turbiną umieszczono jeszcze jeden obieg sodowy. W tym systemie występują dwa wymienniki ciepła sód-sód oraz sód-woda.

**Typy reaktorów**

Dojrzałymi technologicznie reaktorami wykorzystywanymi komercyjnie w energetyce głównie są reaktory wodne. Najczęściej spotykaną konstrukcją jest dwuobiegowy reaktor PWR. Jest to reaktor zbiornikowy ciśnieniowy, który jest chłodzony lekką wodą pełniącą również funkcję moderatora. Woda utrzymywana jest w zbiorniku głównym pod wysokim ciśnieniem, aby nie dochodziło do jej wrzenia w wysokich temperaturach. Kolejnym powszechnie stosowanym reaktorem jest reaktor wrzący BWR. Jak sugeruje nazwa, w tej jednoobiegowej konstrukcji dochodzi do wrzenia wody w zbiorniku głównym. Innym lekkowodnym reaktorem jest RBMK, który jest oparty na konstrukcji kanałowej, który razem z PWR oraz BWR wspólnie określane są reaktorami lekkowodnymi – LWR. Kolejnym kanałowym reaktorem jest CANDU, jednak w tej konstrukcji wykorzystano jako moderator i chłodziwo ciężką wodę. Do rektorów dojrzałych technologicznie zaliczają się również reaktory chłodzone gazem – GCR.

Reaktory rozwojowe są to konstrukcje w fazie prób, badań i udoskonaleń. Niektóre z nich pracują już kilka lat jednak ostateczne decyzje odnośnie zastosowanych rozwiązań jeszcze nie zostały przyjęte. Do tej grupy zalicza się reaktor na neutrony prędkich, powielający, chłodzony ciekłym sodem – FBR oraz reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem – HTR.