

Energia jądrowa Korzyści i zagrożenia

gen. bryg. dr n.med. Andrzej Trybusz

Kalisz, 2024 rok

Plan prezentacji

1. Definicja energii jądrowej i możliwości jej wykorzystania.
2. Budowa reaktora jądrowego.
3. Zasady działania elektrowni jądrowej.
4. Systemy bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych.
5. Wady i zalety wykorzystania energii jądrowej dla celów pokojowych.
6. Awarie w elektrowniach jądrowych.

Energia jądrowa - definicja

Energia zmagazynowana w jądrze atomu, która zostaje uwolniona w procesie przemiany jądrowej. Jest równa ilości energii niezbędnej do rozerwania jądra na części składowe, tj. protony i neutrony, związane siłami jądrowymi

Zastosowanie energii jądrowej

- **Radiomedycyna** – pozwala na diagnozowanie chorób oraz leczenie nowotworów poprzez stosowanie radioizotopów i radioterapii;
- **Przemysł** – lotniczy, metalurgiczny, do wykrywania nieszczelności w przewodach czy zbiornikach;
- **Kosmonautyka** – do napędu rakiet oraz zasilania w energię sond kosmicznych (izotopy promieniotwórcze generują o wiele więcej energii niż panele słoneczne);
- **Sektor żywności** – promieniowanie powoduje, że bakterie i grzyby zostają wyeliminowane z żywności;

Zastosowanie energii jądrowej

- **Nauka i kultura** – w archeologii: datowanie węglem ^{14}C w celu określenia wieku zabytków, w konserwacji dzieł sztuki;
- **Procesy odsalania** wody morskiej;
- **Produkcja energii** elektrycznej;
- **Dla celów militarnych** – bomby, pociski, napęd okrętów, w tym podwodnych.

Elektrownia jądrowa

Zasadniczym elementem elektrowni jądrowej jest reaktor.

Ze względu na przebieg reakcji rozszczepienia reaktory dzielimy na:

- Reaktory termiczne (neutrony o niewielkiej energii), które w zależności od głównego czynnika spowalniającego neutrony dzieli się na:
 - moderowane grafitem,
 - moderowane i chłodzone ciężką wodą, stopionymi solami, stopionymi metalami;
- Reaktory epitermiczne – neutrony spowalniane są tylko częściowo;
- Reaktory prędkie – nie mają moderatora spowalniającego, ale wymagają paliwa o większej zawartości Uranu 235 (co najmniej 20%).

Elektrownia jądrowa

Podział reaktorów według konstrukcji układu chłodzenia:

- Zbiornikowe (basenowe) – pręty paliwowe zanurzone są w basenie z płynem chłodzącym, którym zazwyczaj jest woda, pełniąca także rolę moderatora;
- Kanałowe – w których chłodziwo jest w kanałach. Konstrukcja rzadziej stosowana.

Jednym z najczęściej wykorzystywanych reaktorów jest Reaktor Wodny Ciśnieniowy (Pressurized Water Reactor) - PWR.

Elektrownia jądrowa

- Elektrownia jądrowa – wytwarza energię elektryczną poprzez wykorzystanie energii pochodzącej z rozszczepienia jąder atomów.
- Zasada działania:
 - W reaktorze jądrowym w wyniku rozszczepienia jąder atomowych wydziela się dużo ciepła odbieranego przez czynnik roboczy (najczęściej woda pod wysokim ciśnieniem w tzw. obiegu pierwotnym),
 - Woda z obiegu pierwotnego przepływa do wytwornicy pary, gdzie oddaje ciepło wodzie z obiegu wtórnego o niższym ciśnieniu i powraca do reaktora,
 - Para wodna z obiegu wtórnego wytwarzana w wytwornicy pary jest parą mokrą, przechodzi przez systemy osuszające i trafia do turbiny (para mokra zniszczyłaby turbinę),
 - Osuszona para napędza turbinę połączoną z generatorem prądu.

Reaktor wodny ciśnieniowy PWR (Pressurized Water Reactor)

- Podstawowy element elektrowni jądrowej, w którym zachodzi reakcja rozszczepienia paliwa jądrowego, prowadząca do uwolnienia ogromnej ilości energii. Rozszczepienie jest procesem, w którym ciężkie jądro atomowe ulega podziałowi na dwa lżejsze fragmenty, czemu towarzyszy emisja neutronów oraz uwolnienie energii. Wyemitowane neutrony powodują rozszczepienie kolejnych jąder. W ten sposób powstaje reakcja łańcuchowa.

Reaktor wodny ciśnieniowy PWR (Pressurized Water Reactor)

- Reaktor PWR wypełniony jest wodą, w której zanurzone są pręty zawierające paliwo jądrowe, którym najczęściej jest izotop uranu ^{235}U . Ruda uranu występująca w przyrodzie ma ok. 0,7% izotopu ^{235}U , co wymaga wzbogacenia do zawartości 3-5% ^{235}U , żeby otrzymać samopodtrzymujący się cykl rozszczepień.

Reaktor wodny ciśnieniowy PWR (Pressurized Water Reactor)

- Wypełniająca reaktor woda pełni dwie funkcje. Zmniejsza energię kinetyczną neutronów rozpędzonych po rozszczepieniu, które nie mogłyby zostać pochłonięte przez jądra Uranu 235 i zainicjować kolejnych rozszczepień. Drugą funkcją jest odprowadzenie ciepła wygenerowanego w reaktorze. Fragmenty rozszczepienia poruszające się w obrębie pręta paliwowego tracą swoją energię kinetyczną prowadząc do rozgrzania pręta. Znajdująca się w reaktorze woda przepływa wokół prętów paliwowych odbierając od nich ciepło.

Reaktor wodny ciśnieniowy PWR (Pressurized Water Reactor)

- W reaktorach PWR paliwem jest najczęściej dwutlenek Uranu (UO_2) sprasowany w pastylki (pelety). Pastylki są umieszczane w koszulkach tworzących pręty paliwowe, grupowane w zestawach paliwowych. Wysokość pastylki paliwowej to ok. 15 mm, średnica 9 mm. Wysokość pręta paliwowego to ok. 3,5 m. 230 pastylek mieści się w pręcie, 250 prętów wchodzi w skład zestawu, a ok. 200 zestawów tworzy rdzeń reaktora.

Reaktor wodny ciśnieniowy PWR (Pressurized Water Reactor)

- Reaktor jądrowy otoczony jest zbiornikiem ciśnieniowym. Jest to grubościenny zbiornik, w którym znajduje się rdzeń reaktora, czyli zespoły elementów paliwowych zawierających pręty paliwowe, pręty kontrolne i bezpieczeństwa, a także cały obieg pierwotny. Zbiornik ciśnieniowy współczesnych reaktorów typu PWR ma kilkanaście metrów wysokości i kilka metrów średnicy przy masie kilkuset ton. Wykonany jest ze stali ferrytowej lub stopowej o grubości kilkunastu centymetrów

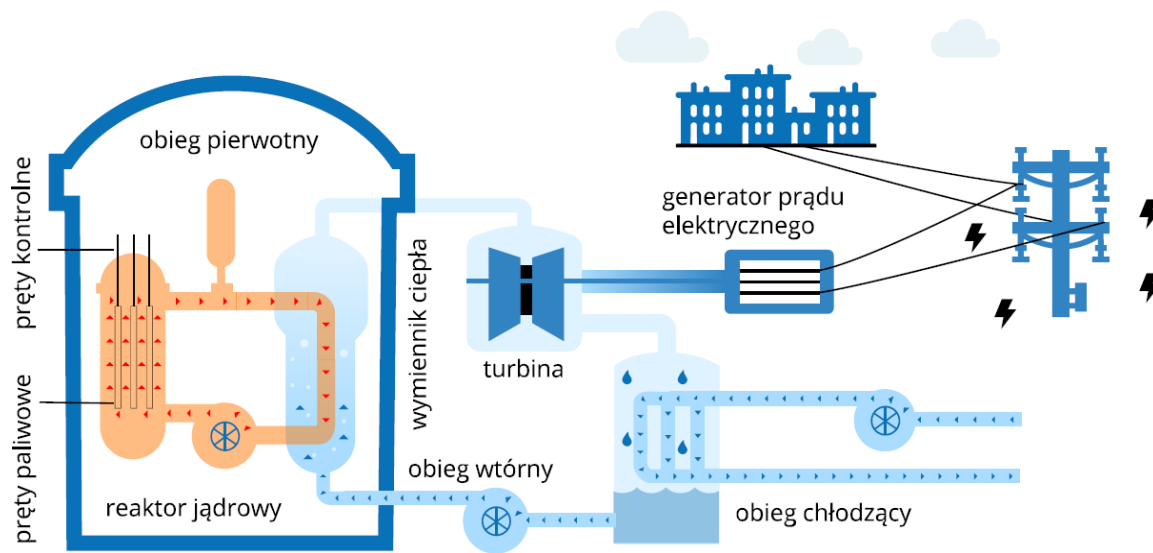
Reaktor wodny ciśnieniowy PWR (Pressurized Water Reactor)

- W zbiorniku reaktora, oprócz prętów paliwowych, znajdują się też pręty kontrolne i pręty bezpieczeństwa zbudowane z materiałów pochłaniających neutrony (kadm, bor), służące do kontrolowania reakcji rozszczepienia, sterowania mocą reaktora oraz jego szybkiego wyłączenia.
- Wsuniecie prętów kontrolnych pomiędzy pręty paliwowe powoduje, że wyemitowane w wyniku rozszczepienia neutrony zostają pochłonięte i nie inicjują kolejnych aktów rozszczepienia, maleje energia wydzielana w reaktorze lub dochodzi do jego całkowitego wyłączenia.
- W przypadku awarii pręty bezpieczeństwa samoczynnie opadają, wygaszając reakcję łańcuchową.

Elektrownia jądrowa

- Elektrownia jądrowa różni się od ciepłych elektrowni konwencjonalnych źródłem uzyskiwanego ciepła potrzebnego do wytworzenia pary wodnej. W elektrowniach konwencjonalnych pozyskuje się je ze spalania węgla, ropy naftowej lub gazu ziemnego. W elektrowni jądrowej z reakcji rozszczepienia jąder uranu lub plutonu. Pozostałe elementy elektrowni tj. wytwarzające energię elektryczną turbiny wykorzystujące energię pary wodnej, są w obu typach elektrowni takie same.
- Elektrownie jądrowe bywają mylnie nazywane elektrowniami atomowymi. Elektrownią atomową jest każda elektrownia spalająca np. węgiel kamienny, brunatny, gaz. Reakcje w tym wypadku zachodzą na poziomie atomu. W elektrowni jądrowej reakcje zachodzą na poziomie jądra atomowego.

Elektrownia jądrowa



Schemat elektrowni jądrowej z reaktorem typu PWR

Systemy bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych

- Zasadnicze problemy dotyczące bezpieczeństwa pracy reaktora jądrowego to:
 - Obecność znacznych ilości silnie promieniotwórczych izotopów w rdzeniu reaktora (w paliwie),
 - Ciepło powyłączeniowe.
- Systemy podstawowe, pomocnicze i awaryjne reaktora jądrowego powinny zapewnić ciągłą i niezawodną izolację materiałów promieniotwórczych od otoczenia oraz właściwe chłodzenie rdzenia reaktora w każdych warunkach pracy, także w stanach awaryjnych.

Systemy bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych

- **Ciepło powyłączeniowe** – powstaje w wyniku rozszczepienia atomów bądź pochłonięcia neutronów. Po przerwaniu procesu rozszczepienia (np. w sytuacji awaryjnej) reaktor wymaga stałego chłodzenia. W przypadku zaprzestania ilość ciepła wydzielającego się w reaktorze jest tak duża, że może dojść do znacznego wzrostu temperatury pary wodnej i jej ciśnienia. W temperaturze ok. 600 stopni Celsjusza zaczyna dochodzić do reakcji pary wodnej z cyrkonem (materiał z którego zbudowane są koszulki paliwowe) w wyniku której powstaje wodór. Wodór zmieszany z powietrzem stanowi mieszaninę wybuchową mogącą spowodować wybuch reaktora. Jest to jednak wybuch chemiczny, a nie jądrowy.

Systemy bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych

- W najbardziej rozpowszechnionych reaktorach chłodzonych wodą (typu PWR) można wyodrębnić cztery bariery:
 - **Struktura paliwa jądrowego** – najczęściej są to pastylki (pelety), umieszczane w koszulkach, wykonane z dwutlenku Uranu UO_2 , który jest w stanie zatrzymać w swej strukturze większość produktów rozszczepienia,
 - **Koszulka paliwowa** – otaczająca pastylki paliwowe, wykonana ze stopu cyrkonu cienkościenna rurka, której zadaniem jest zatrzymanie gazowych produktów rozszczepienia,
 - **Zbiornik ciśnieniowy reaktora** – obejmuje zespoły elementów paliwowych zawierających materiał rozszczepialny,
 - **Obudowa bezpieczeństwa** – budynek ze zbrojonego i wstępnie naprężonego betonu, który mieści w sobie reaktor i cały pierwotny obieg chłodzenia, większość układów pomocniczych i awaryjnych (odporny na pociski, uderzenie dużego samolotu pasażerskiego).

Wady i zalety wykorzystania energii jądrowej

- Spośród zalet można wymienić:
 - Wytwarzanie energii jądrowej odbywa się przy niemal całkowitym braku emisji do atmosfery szkodliwych zanieczyszczeń, takich jak dwutlenek węgla czy inne gazy.
 - Produkcja energii w elektrowniach jądrowych pozwala zmniejszyć wykorzystanie surowców nieodnawialnych np. węgiel kamienny i brunatny.
 - Możliwość zastosowania energii jądrowej nie tylko w energetyce, ale w innych dziedzinach.
 - Elektrownia jądrowa, w odróżnieniu od energii wiatrowej, wytwarza znacznie mniej hałasu, co zmniejsza uciążliwość dla mieszkańców obszarów znajdujących się w jej bezpośrednim sąsiedztwie.
 - W przeciwieństwie do odnawialnych źródeł, takich jak wiatr, czy promieniowanie słoneczne, elektrownia jądrowa nie jest w żaden sposób uzależniona od zmiennych warunków atmosferycznych.

Wady i zalety wykorzystania energii jądrowej

- Energia jądrowa może także wpływać negatywnie na środowisko i społeczeństwa:
 - W przypadku awarii elektrowni jądrowej może dojść do rozprzestrzeniania się izotopów promieniotwórczych (mniejsze zagrożenie stanowi promieniowanie pochodzące ze zniszczonego reaktora). Poziom tych izotopów promieniotwórczych kilkanaście kilometrów poza terenem elektrowni nie będzie tak duży żeby emitowane promieniowanie stanowiło zagrożenie dla zdrowia. W budowanych od połowy lat 90-tych reaktorach III generacji realną groźbę poważnej awarii ocenia się jak 1:400 000 000 (prawdopodobieństwo rażenia człowieka piorunem wynosi 1:3 000). Także zasięg potencjalnego skażenia powodujący poważne skutki zdrowotne byłby niewielki (w promieniu ok. 800 metrów od obiektu).
 - W procesie wytwarzania energii jądrowej powstają niebezpieczne odpady radioaktywne, które muszą zostać odpowiednio zutylizowane.
 - Konieczność dewastacji terenów na potrzeby wybudowania elektrowni i poniesienia dużych kosztów inwestycyjnych.
 - Konieczność ciągłej pracy reaktora ze względu na nieoptymalność wygaszenia i ponownego uruchomienia.

Awarie w elektrowniach jądrowych

- Wbrew obiegowym opiniom, awarie w elektrowniach jądrowych zdarzają się bardzo rzadko. W ciągu ponad 70 lat wykorzystywania energetyki jądrowej odnotowano 3 poważne awarie w których doszło do wybuchu reaktora jądrowego:
 - Three Mile Island (USA, Pensylwania) – 28.03.1979 r.
 - Czarnobyl (ZSRR, Ukraina) – 26.04.1986 r.
 - Fukushima (Japonia) – 11.03.2011
- Każda z tych awarii miała istotny wpływ na świadomości ludzi pociągając za sobą negatywne skutki dla rozwoju energetyki jądrowej.

Awarie w elektrowniach jądrowych

Three Mile Island:

W trakcie awarii stopieniu uległ rdzeń reaktora, a poza obudowę bezpieczeństwa wydostała się nieznaczna ilość produktów rozszczepienia. Przyczyną stopienia się rdzenia reaktora była awaria systemu chłodzenia, co spowodowało wzrost temperatury rdzenia do 2700 stopni Celsjusza.

W wyniku awarii jedna osoba zmarła na zawał serca, nikt nie został napromieniowany w stopniu zagrażającym zdrowiu lub życiu. Przez 18 lat prowadzono obserwacje medyczne 30 tysięcy osób mieszkających w momencie awarii w promieniu 8 km. od elektrowni. Nie ujawniły się żadne niepokojące konsekwencje zdrowotne.

Wypadek spowodował przede wszystkim wyhamowanie rozwoju energetyki jądrowej w USA. Plany budowy kolejnych 40 elektrowni jądrowych oraz 51 reaktorów zostały odwołane.

Spółeczne poparcie dla energii jądrowej, które przed wypadkiem wynosiło 70%, przez dwie dekady po nim spadło do ok. 50%.

Awarie w elektrowniach jądrowych

Czarnobyl:

W reaktorach w elektrowni jądrowej w Czarnobylu jako moderatora wykorzystywano grafit, co powodowało, że w przypadku zaburzeń systemu chłodzenia, dochodzi do zwiększenia mocy, odwrotnie niż w reaktorach gdzie moderatorem jest woda (spadek mocy).

Błędne decyzje operatorów systemu bezpieczeństwa, a także błędy konstrukcyjne prętów bezpieczeństwa spowodowały niekontrolowany wzrost mocy reaktora i temperatury co doprowadziło do rozpadu cząsteczek wody na wodór i tlen. W efekcie nastąpiła seria wybuchów, które uszkodziły korpus reaktora. Znajdujący się w rdzeniu grafit o bardzo wysokiej temperaturze, po rozerwaniu korpusu i dostępie powietrza zaczął się palić. Grafitowe bloki płonęły przez kilka dni, powodując uwolnienie do atmosfery dużych ilości promieniotwórczych izotopów.

Wśród bezpośrednich ofiar katastrofy znajdowali się uczestnicy akcji ratunkowej i pracownicy elektrowni. Szacuje się, że katastrofa pociągnęła za sobą 51 ofiar śmiertelnych i ok. 10 tys. osób, u których stwierdzono choroby będące wynikiem napromieniowania.

Awarie w elektrowniach jądrowych

Czarnobyl (cd.):

W rezultacie tej katastrofy wiele państw zrezygnowało z planów rozwoju energetyki jądrowej (Hiszpania, Szwajcaria, Belgia, Holandia), a we Włoszech doszło do zamknięcia elektrowni jądrowych.

Nad rejonami północno-wschodniej Polski przeszła radioaktywna chmura. W ramach działań profilaktycznych, chroniących głównie przed radioaktywnym jodem 131 podano w ciągu 3 dni (od 29.04.1986) płyn Lugola 18,5 mln. osobom. Zalecono także karmienie dzieci tylko mlekiem w proszku lub skondensowanym. Zakazano też wypasu bydła.

W 2006 r (wywiad dla tygodnika „Polityka”) prof. Zbigniew Jaworowski (ekspert w Komitecie Naukowym ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego) stwierdził, że według aktualnie posiadanej wiedzy, niczyje zdrowie w naszym kraju nie było zagrożone z powodu Czarnobyla. Powołując się na badania licznych organizacji międzynarodowych z początków XXI w. podkreślił, że liczba nowotworów tarczycy wśród dzieci wcale nie wzrosła w związku z wybuchem w Czarnobylu. Zaczęły one po prostu być lepiej wykrywane w wyniku skrupulatnych badań ludności.

Stwierdzono natomiast ogromny wzrost chorób psychosomatycznych (układu oddechowego, trawiennego, nerwowego), co oznacza, że ludzie panicznie bali się i nadal boją się zagrożenia, które nie istniało.

Awarie w elektrowniach jądrowych

Fukushima:

W marcu 2011 r. Japonia została dotknięta skutkami trzęsienia ziemi (energia wstrząsu sejsmicznego porównywalna z energią wszystkich bomb z czasów II wojny światowej). Jednym z najbardziej dotkniętych rejonów była okolica elektrowni jądrowej Fukushima I. Trzęsienie ziemi wywołało w rejonie elektrowni awarię sieci energetycznej, co oznaczało, że prąd z elektrowni nie był odbierany, ale także nie mógł być dostarczany. W elektrowni działał przez godzinę zespół generatorów elektrycznych z silnikami diesla, który umożliwił prace układów chłodzenia w wyłączonych reaktorach Fukushimy I (odprowadzanie ciepła powyłączeniowego).

Wystąpienie fali tsunami o wys. ok. 15 m. spowodowało przelanie się wody przez barierę przeciwsztormową o wysokości 6m, oddzielającą elektrownię od oceanu i unieruchomiło system zasilania układów chłodzących. Wzrost temperatury w reaktorze powyżej 600 stopni Celsjusza spowodował reakcję pary wodnej z cyrkonem (z którego zbudowane są koszulki paliwowe) w wyniku której powstał wodór. Wodór zmieszany z powietrzem doprowadził do wybuchu reaktora.

Awarie w elektrowniach jądrowych

Fukushima (c.d.):

W wyniku katastrofy nikt nie zginął. Do tej pory wskutek promieniowania zmarły dwie osoby (choroby nowotworowe). Promieniowanie było też przyczyną chorób nowotworowych u kilku osób, które żyją. W każdym wymienionym przypadku były to osoby pracujące w elektrowni w trakcie awarii lub biorące udział w likwidacji jej skutków. U osób zamieszkujących okolice elektrowni nie obserwuje się żadnych istotnych skutków zdrowotnych związanych z promieniowaniem jonizującym.

Budowane obecnie reaktory jądrowe III generacji posiadają tak zwane rekombinatory wodoru, które w przypadku gwałtownego wzrostu temperatury w reaktorze i wydzielania się wodoru (np. w wyniku reakcji pary wodnej z cyrkonem) zamieniają go w parę wodną wykluczając możliwość wybuchu. Rekombinatory te nie wymagają zasilania prądem elektrycznym.