**Reaktory jądrowe generacji III/III+,**

**czyli poprawa bezpieczeństwa, wydajności oraz zmniejszenie ilość odpadów**

Igor Królikowski, Michał Orliński

Katedra Energetyki Jądrowej

Wydział Energetyki i Paliw

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**WSTĘP**

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 Rysunek 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 (Obieg II). Pracująca turbina napędza generator, który produkuje energię elektryczną przesyłaną do sieci, a tym samym do jej odbiorców. Para po wyjściu z turbiny z niższą temperaturą oraz ciśnieniem kierowana jest do kondensatora pary, gdzie jest skraplana, a następnie w postaci wody zawrócona do wytwornicy pary. Skroplenie pary w kondensatorze możliwe jest za pomocą Obiegu III, w którym temperatura wody w nim płynącej jest obniżana w chłodni kominowej. Pręty kontrolne umieszczone w zbiorniku reaktora służą do sterowania oraz wyłączania reaktora, możliwe jest to przez ich całkowite lub częściowe wsuniecie do wnętrza rdzenia.

img_01.tif

Rysunek 1. Schemat konstrukcji elektrowni jądrowej.

02_IK.tif

Rysunek 2. Reakcja rozszczepienia

Najważniejszym procesem w reaktorze jądrowym jest reakcja rozszczepienia, która jest źródłem ciepła, schemat reakcji przedstawiono na Rysunku 2. Reakcja rozszczepienia to reakcja jądrowa, w której ciężkie jądro atomu rozszczepialnego pod wpływem neutronu rozpada się na dwa lub więcej produktów rozszczepienia. Dodatkowo w trackie reakcji emitowane są neutrony, które wykorzystane są do inicjowania 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 energię. Neutrony o niższej energii, zwane neutronami termicznymi, chętniej wywołują 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.

Listę możliwych przeznaczeń reaktorów jądrowych przedstawiono poniżej:

* **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. łodzi 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 celu. 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 dodatkowo generować energię elektryczną.

**ENERGIA NEUTRONÓW**

Reaktory dzielą się na reaktory prędkie i termiczne, podział związany jest z energią grupy neutronów, które inicjują reakcje rozszczepienia. Reaktory prędkie 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 kluczowych elementów reaktora jest paliwo, które bazuje na rozszczepialnych izotopach takich jak uran 235 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 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, powłoki pirowęglowe, stopy cyrkonu, magnezu lub aluminium. Materiał zastosowany na koszulkę zależny jest od wymagań jakie musi spełniać: odporność na wysoką temperaturę, odporność na utlenianie, trwałość mechaniczna czy słabe pochłanianie neutronów.

**KONSTRUKCJA REAKTORÓW**

**img_03.tif**

Rysunek 3. Poglądowy rysunek konstrukcji reaktora kanałowego (A) oraz 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 wymianą paliwa oraz na te z okresową wymianą 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 wymianą paliwa należą reaktory kanałowe, gazowe oraz wysokotemperaturowe, natomiast reaktory zbiornikowe należą do drugiej grupy.

**CHŁODZIWO I MODERATOR**

Kolejnymi kluczowymi elementami są chłodziwo oraz moderator, których funkcje mogą pełnić dwa różne materiały lub jak to jest w reaktorach lekkowodnych jeden materiał – woda. W innych typach reaktorów funkcję moderatora i chłodziwa są rozdzielone pomiędzy dwa 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 lub grafitowe.

**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, którego przykładowa konstrukcja przedstawiona jest na Rysunek 1, chłodziwo ze zbiornika reaktora kierowane jest do wymiennika ciepła, gdzie odebrane ciepło wykorzystane jest do wytworzenia pary, która kierowana jest bezpośrednio na turbinę parową. Najbardziej skomplikowany system – trzybiegowy, zastosowany jest w reaktorach chłodzonych sodem. Pomiędzy pierwszym pierwotnym obiegiem sodowy, a trzecim wodno-parowy 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, 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 prędkie, powielający, chłodzony ciekłym sodem (FBR) oraz reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HTR).

**OBECNY STAN ENERGETYKI JĄDROWEJ NA ŚWIECIE W LICZBACH**

**img_04.tif**

Rysunek 4. Typy reaktorów funkcjonujących na świecie [http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx]

img_05.tif

Rysunek 5. Liczba reaktorów funkcjonujących w poszczególnych państwach; [http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx]

Obecnie na świecie funkcjonuje 443 reaktorów jądrowych, które łącznie produkują prawie 382 GWel , patrz . W 2014 roku elektrownie jądrowe wyprodukowały łącznie około 24 x 1011 kWhel, co stanowi w przybliżeniu 10% światowej produkcji. W elektrowniach jądrowych dominują reaktory wodne, które stanowią niemal 96% funkcjonujących obecnie na świcie reaktorów. Spośród nich przeważającą większość stanowią reaktory lekko-wodne (około 90%), w których woda stanowi zarówno chłodziwo, jak i moderator. Zaliczane są one do najbezpieczniejszych typów reaktorów, głównie za sprawą naturalnych cech fizycznych, które uniemożliwiają samoczynny wzrost mocy reaktora (tzw. ujemne sprzężenie zwrotne).

Rysunek 5 przedstawia liczbę reaktorów w poszczególnych krajach świata. Zainstalowane moce skupiają się głównie w krajach Europy Zachodniej, USA oraz Japonii - Rysunek 6, a więc rejonach świata, które zaliczane są do najbardziej rozwiniętych. Wyższy status życia wiąże się ze zwiększonym zużyciem energii elektrycznej.

img_06.tif

Rysunek 6. Rozmieszczenie reaktorów jądrowych przedstawione ma mapie świata; [http://www.theguardian.com/environment/interactive/2012/mar/08/nuclear-power-plants-world-map]

**PLAN ROZWOJU ENERGETYKI JĄDROWEJ NA ŚWIECIE**

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną przy jednoczesnym „starzeniu się” bieżących bloków, konieczna jest budowa nowych bloków jądrowych. Rysunek 7 przedstawia bloki, które są planowane, bądź też w budowie, zgodnie z założeniami planu rozwoju dla poszczególnych państw.

Niektóre państwa dokonały już wyboru i są na etapie przygotowań do budowy, bądź uruchomienia pierwszej elektrowni jądrowej na terytorium ich kraju. Decyzje o budowie EJ spowodowane są głównie rosnącą ceną paliw kopalnych, jak również zwiększeniem bezpieczeństwa energetycznego danego kraju, poprzez dywersyfikację źródeł energii. Przeważająca większość nowobudowanych EJ oparta jest o reaktor wodny ciśnieniowy (PWR) - Rysunek 8.

Aktualnie na świecie budowane są reaktory głównie generacji III oraz III+. W Europie budowane są dwa bloki EPR, w USA cztery bloki AP-1000, w Japonii dwa bloki ABWR, w Korei Południowej cztery bloki APR-1400, natomiast w Chinach cztery bloki AP-1000 oraz dwa bloki EPR.

Pomimo, iż na świecie funkcjonuje zaledwie kilka reaktorów generacji III, trwają prace nad IV generacją, które to rozpoczęły się na długo przed planami budowy pierwszej EJ III generacji. Rozwój nowych typów reaktorów podąża w kierunku zwiększenia bezpieczeństwa, poprawy efektywności ekonomicznej, zmniejszenia ilości odpadów oraz zapobieganie wykorzystaniu wypalonego paliwa do produkcji broni jądrowej.

img_07.tif

Rysunek 7. Mapa rozwoju energetyki jądrowej zgodnie z założeniami planu rozwoju energetyki jądrowej poszczególnych państw.

img_08.tif

Rysunek 8. Ilość reaktorów jądrowych w budowie według typu; [http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByType.aspx]

**NATURALNY REAKTOR**

Większość ludzi kojarzy reaktor jądrowy wyłącznie jako wynaturzony twór człowieka, którego historia liczy niespełna 80 lat. Otóż w 1972 r. odkryto pozostałości naturalnych reaktorów jądrowych sprzed 2 mld lat. Znajdujące się tam złoża uranu uzyskały sprzyjające warunki do zapoczątkowania reakcji łańcuchowych. Formacje geologiczne otaczające naturalny reaktor szczelnie uwięziły szkodliwe produkty rozpadu, potwierdzając tym samym słuszność podziemnych składowisk odpadów promieniotwórczych.

**GENERACJA I**

Dnia 2 grudnia 1942 roku w podziemiach uniwersyteckiego stadionu w Chicago został uruchomiony pierwszy prototyp reaktora jądrowego, którego współtwórcą był genialny włoski fizyk Enrico Fermi. Jednakże po udanym rozruchu pierwszego reaktora jądrowego władze amerykańskie całkowicie utajniły pracę nad kontrolowanym wywołaniem reakcji rozszczepienia oraz nadały jej czysto militarnego znaczenia. Od tego momentu starano się wykorzystać olbrzymią energię powstającą w procesie rozszczepienia ciężkich jąder atomowych jako broń o niewyobrażalnej dotąd sile rażenia. Pierwsze reaktory opracowane na potrzeby wojska umożliwiały wymianę paliwa w trakcie pracy reaktora. Zabieg ten umożliwiał pozyskanie z wypalonego paliwa plutonu o wysokiej czystości wymaganej do produkcji broni jądrowej. Pierwsze cywilne reaktory jądrowe powstały na bazie wojskowych projektów i nie były to jednostki przystosowane do wytwarzania dużych ilości energii elektrycznej. Ogromny skok nastąpił w 1953 r., gdy Stany Zjednoczone zdecydowały się przerwać pracę nad wojskowym programem energii jądrowej. Przekazano wówczas ośrodek badań jądrowych wraz z całą dokumentacja w ręce cywilne, co zaowocowało uruchomieniem w 1957 r. pierwszej elektrowni jądrowej z reaktorem typu PWR o mocy 60 MWel. Wybór tego typu reaktora zdeterminował kierunek dalszego rozwoju energetyki jądrowej, głównie ze względu na wymogi przemysłu energetycznego, który preferuje sprawdzone rozwiązania.

**GENERACJA II**

Ponad 85% pracujących obecnie na świecie reaktorów należy do tzw. II-generacji. Zaliczane do niej reaktory budowane były do lat 90-tych. Charakteryzuje je większa moc wytwórcza, podwyższone bezpieczeństwo oraz zmniejszona awaryjność, jak również zwiększona ekonomia, poprzez głębsze wypalenie paliwa oraz niezawodność pracy.

**GENERACJA III**

Awarie elektrowni jądrowych w Three Mile Island oraz Czarnobylu znacząco przyspieszyły pracę nad III generacją reaktorów jądrowych, które miały sprostać nowopowstałym wymogom. Wprowadzone zmiany ukierunkowane są głównie na poprawę bezpieczeństwa oraz efektywności ekonomicznej. Wyżej postawione założenia bezpiecznej eksploatacji osiągnięto głównie poprzez wprowadzenie pasywnych elementów, które nie wymagają dostarczenia energii do poprawnego funkcjonowania, jak również poprzez zwiększenie redundancji w systemach bezpieczeństwa oraz dywersyfikację zarówno źródeł zasilania elektrycznego, jak i systemów odprowadzania ciepła powyłączeniowego. Spełnienie wymogów inwestora prywatnego jest możliwe dzięki skróceniu czasu budowy (do ok. 4 – 5 lat), modularyzacji, modułowości oraz standaryzacji, jak również poprzez wydłużenie czasu eksploatacji elektrowni do 60 lat z możliwością jego przedłużenia. Elektrownie III generacji produkują więcej energii elektrycznej, wytwarzając o 30% mniej odpadów radioaktywnych w porównaniu do reaktorów generacji poprzedniej. Ciągłe zwiększanie wymogów bezpieczeństwa oraz aspekty ekonomiczne doprowadziły do powstania generacji III+. Główną różnicą jest zastosowanie pasywnych systemów odprowadzania ciepła, które nie wymagają dodatkowego zasilania, a ich działanie opiera się na prawach fizyki, oraz ich znaczne zwielokrotnienie(redundancja) i uniezależnienie, a także wydłużony do 7 dni okres bezobsługowego funkcjonowania elektrowni, podczas którego czynnik ludzki nie jest wymagany, a zaawansowane systemy zapewnią bezpieczne wyłączenie elektrowni oraz odbiór ciepła powyłączeniowego bez zewnętrznych źródeł energii oraz bez ingerencji człowieka. Tabela 1 przedstawia wybrane modele reaktorów generacji III oraz III+.

Tabela 1. Wybrane modele reaktorów: Generacja III/III+

tab_01.tif

**WYPADKI W ENERGETYCE JĄDROWEJ**

Od czasu powstania pierwszej komercyjnej elektrowni jądrowej doszło już do kilkukrotnych incydentów, które w większości wypadków zostały bardzo szybko zidentyfikowane, a podjęcie prawidłowych działań pozwoliło uniknąć poważnych awarii. Przeważająca część tychże incydentów spowodowana była głównie błędem ludzkim. Jednakże w przypadku dwóch elektrowni jądrowych konsekwentnie podejmowane złe decyzje operatorów doprowadziły do katastrof, które trwale przyczyniły się do globalnej eskalacji strachu przed energetyką jądrową.

**THREE MILE ISLAND**

Pierwszą z nich była awaria w EJ Three Mile Island (Pensylwania, Stany Zjednoczone) w 1979 roku, na którą złożyły się błędy urządzeń pomiarowych, niestarannie przeprowadzone procedury serwisowe oraz szereg błędnych decyzji podejmowanych przez operatorów, których rezultatem było stopienie rdzenia rektora oraz jednokrotne uwolnienie do środowiska znacznych ilości substancji radioaktywnych w postaci gazu. Wieloletnie badania medyczne, którym poddawane były tysiące osób mieszkających w promieniu 8 km od reaktora, nie wykazały żadnego wpływu awarii na ich stan zdrowia. Przemysł jądrowy odebrał cenną lekcję, której wynikiem była kompletna przebudowa systemu sterowania oraz urządzeń pomiarowych. W późniejszych projektach wprowadzono zwielokrotnienie czujników pomiarowych oraz niezależny sposób wykonywania pomiarów. Obecnie każdy z pomiarów wykorzystuje co najmniej dwa odmienne zjawiska fizyczne, dzięki czemu wzrósł poziom ufności pomiaru.

**CZARNOBYL**

W 1986 roku doszło do kolejnego poważnego wypadku jądrowego w EJ, tym razem w Czarnobylu (Ukraina), którego oficjalną przyczyną były błędy konstrukcyjne reaktora skonstruowanego pierwotnie w celach wojskowych na potrzeby produkcji plutonu. Przyczyną wtórną był błąd ludzki, niejednokrotnie wymieniany jako główny, którego konsekwencją był wybuch wodoru oraz wyrzucenie w powietrze potężnych ilości substancji radioaktywnych, które – jak wykazały późniejsze badania – przyczyniły się do wzrostu zachorowań wśród ludności w zasięgu działania „chmury radioaktywnej”. Awaria nastąpiła w trakcie przeprowadzania eksperymentu, który był rażącym pogwałceniem przepisów dotyczących eksploatacji reaktorów i nie powinien mieć w ogóle miejsca. Ponadto przygotowanie do eksperymentu przebiegało w sposób niewłaściwy, a dodatkowe systemy bezpieczeństwa zostały celowo wyłączone tuż przed jego przeprowadzeniem. Podczas wykonywania testu ujawniły się błędy w konstrukcji reaktora, które, zamiast nagłego spadku mocy, spowodowały jej gwałtowny wzrost w początkowej fazie szybkiego awaryjnego wyłączania reaktora. W wyniku nagłego skoku mocy wydzieliły się ogromne ilości ciepła, które spowodowały rozkład wody używanej do chłodzenia na wodór oraz tlen, co w następstwie doprowadziło do wybuchu tak wytworzonej mieszanki. Potężny wybuch zniszczył wszystkie bariery ochronne, uwolnił do atmosfery ogromne ilości substancji radioaktywnych oraz spowodował odsłonięcie rdzenia reaktora. Ten typ reaktora zawierał również ogromne ilości grafitu, który po wybuchu uległ zapaleniu. Pożar w połączeniu z odkrytym rdzeniem reaktora jądrowego powodował ciągłą emisję do atmosfery substancji radioaktywnych.

Z perspektywy 29 lat od katastrofy w Czarnobylu można stwierdzić, że głównymi poszkodowanymi wypadku EJ w Czarnobylu byli mieszkańcy Białorusi oraz Ukrainy, jednakże skutki działania były znacznie mniejsze od przewidywanych. Skażenie atmosfery nad Polską było znacznie poniżej progu zagrożenia, a wielu specjalistów uważa, iż ogólnopolskie podawanie płynu Lugola było w rzeczywistości zbędne.

Katastrofa czarnobylska wprowadziła do przemysłu jądrowego zmiany, polegające na bardziej szczegółowych badaniach związanych z dodatnim współczynnikiem reaktywności. W reaktorach nowej generacji nie występują działania, które powodowałyby choćby tymczasowy niezamierzony przez operatora wzrost mocy. Ponadto zostało wzmocnione działanie naturalnie występujących procesów, które powodują samoistne „wygaszenie” reaktora w przypadku nagłego skoku mocy.

**FUKUSHIMA**

Seria wypadków jądrowych w EJ Fukushima I (Japonia), w przeciwieństwie do poprzednich dwóch katastrof, była spowodowana rekordowej wielkości falą tsunami, która powstała w wyniku silnego trzęsienia ziemi. O ile w Japonii bardzo częstym zjawiskiem są trzęsienia ziemi i elektrownia była na takie zjawisko bardzo dobrze przygotowana, o tyle nie spodziewano się, iż powstanie tak ogromna fala, której wysokość wynosiła blisko 14 m. Po wystąpieniu trzęsienia ziemi wszystkie 4 reaktory jądrowe zostały automatycznie wyłączone oraz włączyły się prądotwórcze generatory Diesla, by zapewnić energię elektryczną do pomp odprowadzających tzw. ciepło powyłączeniowe. Mur ochronny o wysokości około 6 metrów nie był wystarczający do zatrzymania nadchodzącej fali tsunami. Wdzierająca się w głąb lądu woda zalała generatory diesla, które były nieprawidłowo chronione przed tego typu zjawiskiem. Liczne uszkodzenia sieci trakcyjnej uniemożliwiły pozyskanie energii elektrycznej spoza terenu elektrowni. Ponadto uszkodzenia dróg zablokowały dostawę generatorów prądotwórczych z zewnątrz, a także przyjazd wozów strażackich i pozostałych jednostek ratowniczych. Po pewnym czasie woda w awaryjnych zbiornikach odbioru ciepła uległa podgrzaniu do temperatury uniemożliwiającej dalszy odbiór ciepła powyłączeniowego. Rosnąca wewnątrz temperatura spowodowała produkcję wodoru z wody chłodzącej. Z czasem w obudowie bezpieczeństwa wzrastał poziom wodoru, by w konsekwencji doprowadzić do wybuchu, który spowodował uwolnienie do atmosfery ogromnych ilości lotnych substancji radioaktywnych. Bardzo podobnie wyglądała sytuacja w pozostałych trzech blokach, gdzie niewystarczający odbiór ciepła spowodował wzrost ciśnienia, a w rezultacie wybuch, który spowodował wydostanie się gazów radioaktywnych nagromadzonych w obudowie bezpieczeństwa bloku elektrowni jądrowej.

Po tej katastrofie reaktory generacji III+ są zaprojektowane, by móc odbierać ciepło powyłączeniowe przez ponad tydzień, nie używając do tego energii elektrycznej z zewnątrz, a wykorzystując jedynie prawa fizyki, które zachodzą w sposób naturalny, jak np. naturalna konwekcja.

**BEZPIECZEŃSTWO REAKTORÓW GENEACJI III/III+**

Reaktory jądrowe budowane w generacji III/III+ są przygotowane na wszystkie znane scenariusze, których prawdopodobieństwo wystąpienia jest na tyle duże, że racjonalne staje się przygotowanie ich na ten typ zdarzeń. Dlatego obudowy bezpieczeństwa są odporne na uderzenie dużego samolotu pasażerskiego. Zwielokrotnienie oraz uniezależnienie systemów bezpieczeństwa powoduje niezawodną eksploatację oraz skuteczne działanie nawet w czasie poważnych awarii fundamentalnych systemów eksploatacyjnych. Reaktory generacji III+ przygotowane są również na najcięższą awarię, w wyniku której dochodzi do stopienia rdzenia, który jest „wyłapywany”, zabezpieczony oraz chłodzony przez tzw. „core capture”.

W wyniku czego nie jest możliwe wystąpienie poważnych awarii z uwolnieniem ogromnych ilości substancji radioaktywnych w nowoczesnych elektrowniach jądrowych, opartych na reaktorach generacji III oraz III+.

**PROGRAM POLSKIEJ ENERGETYKI JĄDROWEJ**

Podstawowym celem polityki energetycznej państwa jest zapewnienie odpowiedniego poziomu zaspokajania potrzeb energetycznych społeczeństwa oraz gospodarki po konkurencyjnych cenach i w sposób zgodny z wymaganiami ochrony środowiska. Bezpieczeństwo energetyczne Polski można osiągnąć głównie poprzez dywersyfikację źródeł energii oraz zmianę struktury wytwarzania energii elektrycznej z wysokoemisyjnej na nisko- oraz zeroemisyjną. W tym kontekście szczególne znaczenie zyskuje energetyka jądrowa, która spełnia większość z przedstawionych powyżej wymagań. Rosnące ceny za emisję CO2 oraz „starzejące” się bloki działające w oparciu o węgiel kamienny oraz brunatny zmuszają nas do budowy nowych jednostek pokrywających tzw. „pasmo podstawowe” (minimalne, ciągłe zapotrzebowanie na energię elektryczną). Niestety OZE ze względu na niski współczynnik wykorzystania mocy w ciągu roku oraz zależność od warunków pogodowych nie jest w stanie zapewnić energię elektryczną dla „pasma podstawowego”, dlatego jedyną, ekonomicznie uzasadnioną alternatywą są elektrownie jądrowe.

Program polskiej energetyki jądrowej zakłada ustalenie lokalizacji oraz wybór technologii do końca 2016 roku. Wciąż jeszcze trwają badania lokalizacyjne oraz środowiskowe, jednakże najbardziej prawdopodobną lokalizacją wydaje się być „Choczewo” w gminie Choczewo.

Na podstawie przedstawionych w programie polskiej energetyki jądrowej wymogów, jakie musi spełniać pierwsza elektrownia jądrowa w Polsce, możemy utworzyć listę potencjalnych typów reaktorów - Tabela 2. Wyśrubowane wymogi bezpieczeństwa, przy jednoczesnym założeniu, iż technologia musi być sprawdzona i w momencie wyboru musi funkcjonować w dowolnym miejscu na świecie przynajmniej jedna elektrownia jądrowa oparta o ten typ reaktora, ogranicza nam prawdopodobne typy reaktorów do zaledwie kilku.

Tabela 2. Rozważane typy reaktorów jądrowych dla polskiej elektrowni jądrowej.

tab_02.tif

**Bibliografia**

1. Z. Celiński, Reaktory jądrowe – typy i charakterystyka, Politechnika Warszawska.
2. Z. Celiński, Przewidywany rozwój energetyki jądrowej – generacje reaktorów energetycznych, Część II, Energetyka, Marzec 2004.
3. B. Dziunikowski, O fizyce i energii jądrowej, Kraków, AGH – Uczelniane wydawnictwo naukowo-dydaktyczne 2001.
4. G. Jezierski, Elektrownia jądrowa a konwencjonalna, Energetyka cieplna i zawodowa, nr 10, 2000.
5. S. Taczanowski, Przyszłościowe koncepcje energetyki jądrowej, Postępy fizyki, Tom 51, 2000
6. G. Jezierski, Energia jądrowa wczoraj i dziś, WNT, 2006, ISBN 83-204-3246-4
7. IAEA International Atomic Energy Agency, IAEA Annual Report 2013, <https://www.iaea.org/publications/reports/annual-report-2013-0>, [dostęp: 20 kwietnia 2015]
8. <http://www.atom.edu.pl/>, [dostęp: 27 kwietnia 2015]
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Generation\_III\_reactor>, [dostęp: 20 kwietnia 2015]
10. <http://en.wikipedia.org/wiki/Generation\_II\_reactor>, [dostęp: 20 kwietnia 2015]