

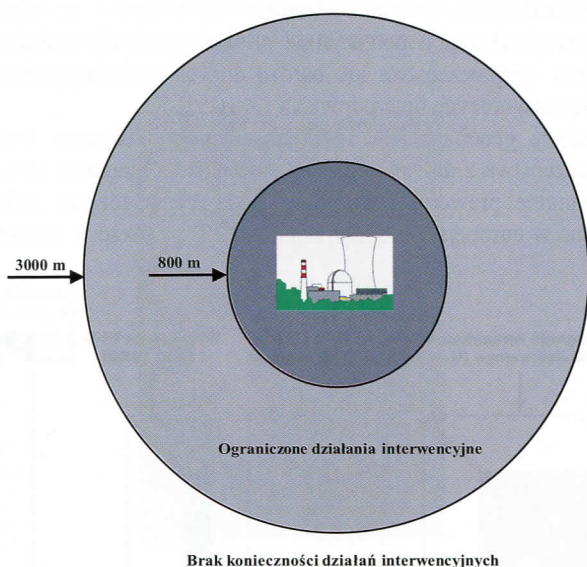
Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych z reaktorami III generacji oferowanych Polsce

Część II. Wymagania bezpieczeństwa dla reaktorów III generacji

Władysław Kielbasa

Jądrowe bloki energetyczne z reaktorami III generacji oprócz tego, że charakteryzują się istotnie lepszymi osiągnięciami eksploatacyjnymi i charakterystykami ekonomicznymi, lepszym wykorzystaniem paliwa i mniejszą ilością wytwarzanych odpadów promieniotwórczych – przede wszystkim są znacznie bezpieczniejsze od poprzedniej generacji.

Wynika to z zasadniczej zmiany założeń do projektowania oraz znacznego zaostrzenia kryteriów bezpieczeństwa stawianych projektom elektrowni jądrowych III generacji. Elektrownie jądrowe II generacji projektowano na tzw. maksymalną awarię projektową (MAP), zakładając że większa awaria (prowadząca do znacznego uszkodzenia rdzenia reaktora wskutek niesprawności wszystkich układów bezpieczeństwa) jest na tyle mało prawdopodobna, iż ryzyko z nią związane jest akceptowalne. Tak więc układy bezpieczeństwa – a zwłaszcza obudowę bezpieczeństwa reaktora – projektowano wówczas uwzględniając tylko MAP i nie zakładając znaczącej degradacji rdzenia – w tym jego stopienia. Natomiast, przy projektowaniu elektrowni jądrowych III generacji zakłada się tzw. rozszerzone warunki projektowe, zgodnie z którymi wymaga się uwzględnienia i ograniczenia skutków radiologicznych – także ciężkich awarii, włączając te prowadzące do całkowitego stopienia rdzenia reaktora.



Rys. 15. Ilustracja ograniczonego wpływu radiologicznego w razie ciężkiej awarii reaktora III generacji

Mgr inż. Władysław Kielbasa – Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa

Takie właśnie wymagania zostały określone w tzw. dokumencie „EUR” „Wymagania europejskich przedsiębiorstw energetycznych dla EJ z reaktorami lekkowodnymi” (European utility requirements for LWR nuclear power plants), opracowanym przez europejski przemysł energetyczny.

Zgodnie z wymaganiami tego dokumentu zastosowane w elektrowni jądrowej środki techniczne muszą – nawet w przypadku całkowitego stopienia rdzenia reaktora – zapewnić bezpieczeństwo ludności i środowiska wokół elektrowni, minimalizując wpływ radiologiczny, związany z awaryjnymi uwolnieniami substancji promieniotwórczych. Co więcej – prawdopodobieństwo wystąpienia ciężkiej awarii związanej ze znaczną degradacją rdzenia reaktora, dzięki zastosowanym rozwiązaniom projektowym i wysokiej niezawodności urządzeń, jest 100-krotnie mniejsze niż w przypadku reaktorów II generacji.

Warunki projektowe

W dokumencie „EUR” zdefiniowano tzw. warunki projektowe (DBC – design basis conditions), tj. warunki, zgodnie z którymi projektuje się elektrownie jądrowe. Zostały one sklasyfikowane w 4 kategoriach, ze względu na częstość ich występowania i skutki. Musi zostać spełniona reguła, że im poważniejsze są skutki określonego zdarzenia tym mniejsze powinno być prawdopodobieństwo (oczekiwana częstość) jego wystąpienia:

- Warunki normalnej pracy (DBC1) – warunki często występujące w czasie pracy elektrowni jądrowej takie jak: praca na mocy i wszelkie zmiany stanów ruchowych, przeładunki paliwa, czynności utrzymania i remontów.
- Warunki incydentu (DBC2) – to zakłócenia zwane też „przewidywanymi zdarzeniami eksploatacyjnymi”, których wystąpienia w czasie eksploatacji elektrowni jądrowej oczekuje się raz lub więcej razy i które:
 - w najgorszym razie powodują automatyczne wyłączenie reaktora, blok energetyczny można ponownie uruchomić (po szczegółowym przeanalizowaniu zdarzenia, wyjaśnieniu przyczyn jego zaistnienia i zastosowaniu odpowiednich środków zaradczych),
 - nie rozwijają się w poważniejsze uszkodzenia prowadzące do awarii projektowych.
- Warunki awaryjne (DBC3) – to rzadkie awarie (projektowe), mogące wystąpić z częstością mniejszą niż raz na 100 lat pracy reaktora, lecz większą niż raz na 10 tys. lat pracy reaktora, które:
 - mogą skutkować uszkodzeniem jedynie małej frakcji elementów paliwowych, jednakże przed ponownym uruchomieniem bloku konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej inspekcji jego stanu technicznego,
 - samorzutnie nie rozwijają się do cięższej awarii (DBC4),
 - nie skutkują utratą funkcji układu chłodzenia reaktora lub obudowy bezpieczeństwa.

- Warunki awaryjne (DBC4) – to bardzo rzadkie awarie (projektowe) o częstości wystąpienia szacowanej na rzadziej niż raz na 10 tys. lat pracy reaktora a częściej niż raz na 1 mln lat pracy reaktora, których wystąpienia podczas okresu eksploatacji obiektu nie oczekuje się, lecz są one zakładane w projekcie, gdyż mogłyby skutkować uwolnieniem znaczących ilości substancji promieniotwórczych. Są to awarie graniczne, na których skutki musi zostać zaprojektowana elektrownia jądrowa, w razie wystąpienia awarii tej kategorii:
 - wymaga się zachowania geometrii rdzenia reaktora umożliwiającej jego efektywne chłodzenie,
 - ponowne uruchomienie jądrowego bloku energetycznego może nie być możliwe.

Rozszerzone warunki projektowe

W dokumencie „EUR” zdefiniowano też tzw. rozszerzone warunki projektowe (DEC – design extension conditions), stanowiące określony zbiór sekwencji awarii pozaprojektowych, obejmujący tzw. sekwencje złożone i wybrane ciężkie awarie. Rozwiązania projektowe elektrowni jądrowej muszą zapewnić ograniczenie i łagodzenie skutków takich stanów awaryjnych tak, aby nie zostały przekroczone określone tzw. „kryteria ograniczonego oddziaływania radiologicznego” na zewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora.

Sekwencje złożone są to pewne mało prawdopodobne sekwencje (np. jednoczesne uszkodzenie zwielokrotnionych układów lub urządzeń) wykraczające poza założenia projektowe. Rozpatruje się je w kategoriach uszkodzeń urządzeń lub błędów operatora, które mogą potencjalnie prowadzić do znaczących uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska – lecz nie do stopienia rdzenia. Do sekwencji złożonych zalicza się szczególnie: przewidywane stany przejściowe bez awaryjnego wyłączenia reaktora prętami bezpieczeństwa, całkowity zanik zasilania elektrycznego prądem przemiennym oraz stany awaryjne związane z ominięciem obudowy bezpieczeństwa.

Z kolei ciężkie awarie to skrajnie mało prawdopodobne stany awaryjne – poważniejsze niż awarie projektowe (DBC3 lub DBC4), związane ze znaczącą degradacją rdzenia, mogące potencjalnie prowadzić do znaczących uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska. Ciężka awaria prowadząca do stopienia rdzenia reaktora mogłaby wystąpić, np. po natychmiastowym zerwaniu rurociągu obiegu chłodzenia o maksymalnej średnicy i przy całkowitej niesprawności wszystkich zwielokrotnionych (zwykle poczwórnych) układów bezpieczeństwa, z których zaledwie jeden wystarczy do awaryjnego wychłodzenia reaktora i doprowadzenia go do trwale bezpiecznego stanu. Jeśliby pomimo wszystko jednak doszło do ciężkiej awarii, włączając stopień rdzenia reaktora, to substancje promieniotwórcze, uwolnione wówczas z (przegrzanego) paliwa jądrowego i obiegu chłodzenia reaktora, muszą zostać zatrzymane wewnątrz obudowy bezpieczeństwa.

Cele projektowe

Dla awarii projektowych oraz „rozszerzonych warunków projektowych” określono następujące tzw. cele projektowe:

- W razie wystąpienia awarii projektowych (DBC3 i DBC4):
 - brak konieczności działań interwencyjnych w odległości powyżej 800 m od reaktora,
 - ograniczone skutki ekonomiczne.
- W razie wystąpienia „rozszerzonych warunków projektowych” (DEC):

- brak konieczności wczesnych działań interwencyjnych (ewakuacja w ciągu pierwszych 7 dni) w odległości powyżej 800 m od reaktora,
- brak konieczności średnioterminowych działań interwencyjnych (ograniczenie spożycia lokalnie produkowanej żywności i wody, ewakuacja na okres do 1 miesiąca) w odległości powyżej 3 km od reaktora,
- brak konieczności długoterminowych działań interwencyjnych (przesiedlenie) w odległości powyżej 800 m od reaktora,
- ograniczone skutki ekonomiczne.

Tak więc nawet w razie ciężkiej awarii związanej z całkowitym stopieniem rdzenia reaktora, której wystąpienie jest bardzo mało prawdopodobne (rzędu raz na 10 mln lat pracy reaktora) – poważniejsze skutki radiologiczne zostałyby ograniczone do strefy o promieniu 800 m od reaktora.

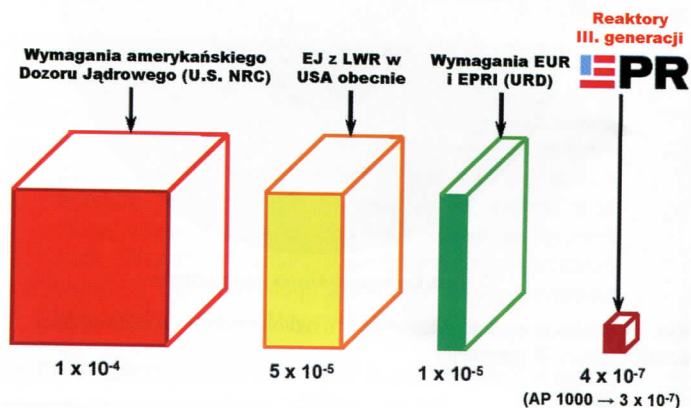
Powyższe kryteria można zastosować do określenia zasięgu tzw. „obszaru ograniczonego użytkowania wokół elektrowni jądrowej” – w tym przypadku wystarczy obszar o promieniu tylko do 800 m od reaktora (w praktyce będzie to więc teren wewnątrz ogrodzenia elektrowni). Dla porównania – dla elektrowni jądrowej budowanej nad Jeziorem Żarnowieckim w latach 80. XX w. ustanowiono tzw. „strefę wyłączenia” o promieniu 1800 m, tj. o powierzchni 9-krotnie większej. Ponieważ w „strefie ograniczonego użytkowania terenu” nie mogą znajdować się budynki mieszkalne, więc nawet w razie najcięższych awarii nie byłoby konieczności wczesnej ewakuacji ani stałego przesiedlania ludności.

Probabilistyczne cele bezpieczeństwa

Na potrzeby projektowania elektrowni jądrowej określono następujące probabilistyczne cele bezpieczeństwa jądrowego:

- częstość uszkodzeń rdzenia reaktora $< 10^{-5}$ /reaktor-rok (R-R),
- częstość dużych uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska, przekraczających tzw. „kryterium ograniczenia oddziaływania” (określone wartości liczbowe) $< 10^{-6}$ /R-R,
- częstość sekwencji potencjalnie prowadzących do uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa lub bardzo dużych uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska $\ll 10^{-6}$ /R-R.

Reaktory generacji III+ spełniają te probabilistyczne kryteria bezpieczeństwa z dużym zapasem. Jak widać z diagramu (rys. 16) maksymalne prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia reaktora ustalone w europejskim dokumencie „EUR”, a także w analogicz-



Rys. 16. Częstość uszkodzeń rdzenia reaktora na reaktor-rok



nym amerykańskim dokumencie „URD”⁵⁾, jest 10-krotnie niższe od poziomu aktualnie wymaganego przez amerykański dozór jądrowy (U.S. NRC). Natomiast projekty reaktorów III generacji (tu przykładowo reaktory wodnociśnieniowe: EPR i AP 1000) charakteryzują się prawdopodobieństwem ponad 100-krotnie niższym – jest ono mniejsze niż raz na milion lat eksploatacji reaktora. Przy tym prawdopodobieństwo dużych uwolnień substancji promieniotwórczych do środowiska jest jeszcze ok. 10-krotnie mniejsze niż prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia reaktora (tzn. jest ono mniejsze niż raz na 10 mln lat pracy reaktora).

Dodatkowe wymagania dotyczące ograniczenia skutków ciężkich awarii

- Wymaga się praktycznego wykluczenia sekwencji ciężkich awarii mogących prowadzić do wczesnego uszkodzenia obudowy bezpieczeństwa, takich jak:
 - wybuch wodoru,
 - rozerwanie zbiornika reaktora pod wysokim ciśnieniem,
 - wybuch parowy,
 - awarie reaktywnościowe.
- Wymaga się zapewnienia ograniczenia skutków ciężkich awarii przez obudowę bezpieczeństwa, a szczególnie przez:
 - utrzymanie wewnątrz obudowy bezpieczeństwa lub zbiornika reaktora i chłodzenie materiału stopionego rdzenia,
 - ograniczenie przecieków z obudowy bezpieczeństwa,

– wydłużenie okresu czasu, po którym wymagana jest jakakolwiek interwencja operatora.

- Wymaga się stosowania podwójnej obudowy bezpieczeństwa reaktora, składającej się z:
 - powłoki wewnętrznej (obudowa pierwotna) – obliczonej na parametry awaryjne i chroniącej otoczenie elektrowni jądrowej przed skutkami wszelkich awarii reaktora spowodowanych czynnikami wewnętrznymi,
 - powłoki zewnętrznej (obudowa wtórna) – chroniącej reaktor przed wszelkimi zdarzeniami zewnętrznymi, uwzględniając zamachy terrorystyczne (w tym z użyciem dużego samolotu pasażerskiego), stanowiącej także dodatkowe zabezpieczenie przed niekontrolowanymi uwolnieniami do środowiska substancji promieniotwórczych. Obudowa wtórna może całkowicie lub częściowo otaczać obudowę pierwotną, przy czym wymaga się, aby obejmowała ona wszystkie hermetyczne przepusty przechodzące przez obudowę pierwotną.
- Obiekty elektrowni jądrowej muszą być obliczone na obciążenia sejsmiczne – tzw. „trzęsienie ziemi bezpiecznego wyłączenia” charakteryzujące się maksymalnym poziomym przyspieszeniem gruntu = 0,25 g (co odpowiada intensywności ok. VII stopni w skali EMS-98).

⁵⁾ Utility Requirements Document, opracowany przez amerykański Instytut EPRI.