

ROZDZIAŁ XVI. CIĘŻKIE AWARIE REAKTORÓW JĄDROWYCH I WSPÓŁCZESNA OBRONA PRZED NIMI

16.1 Wstęp

Z całości naszego dotychczasowego wykładu wynika, że konstrukcje reaktorów są maksymalnie bezpieczne, a w zasadzie jedynymi reaktorami, które miały w sobie wbudowane niebezpieczeństwo były reaktory typu RBMK, obecnie niemal w całości wycofane z użytkowania na terenie byłego Związku Radzieckiego. Nie oznacza to jednak, że w historii energetyki jądrowej nie wydarzyły się poważne awarie. Było ich bardzo niewiele, a każda z nich dawała kolejną lekcję konstruktorom i obsłudze reaktorów. W niniejszym rozdziale chcemy przedstawić cztery najpoważniejsze awarie jakie miały miejsce w historii energetyki jądrowej. Była to awaria około Harrisburga w stanie Pensylwania w USA w elektrowni Three Miles Island, w Czarnobylu (Ukraina), a także pożar w wojskowej elektrowni jądrowej Brown's Ferry. Ostatnia poważniejsza awaria nastąpiła podczas oczyszczania paliwa poza reaktorem w 2004 r. w elektrowni jądrowej w Paksz na Węgrzech.

Przypomnijmy, że podstawowymi elementami bezpieczeństwa reaktora są:

- ujemna wartość współczynnika termicznego, tj. ujemne sprzężenie zwrotne powodujące, że wzrostowi temperatury rdzenia towarzyszy zmniejszanie reaktywności reaktora;
- istnienie prętów bezpieczeństwa wpuszczanych automatycznie w głąb rdzenia w sytuacji nadmiernego jego grzania lub istotnego skrócenia okresu reaktora;
- utrzymanie dobrego chłodzenia rdzenia aż do całkowitego wychłodzenia reaktora;
- istnienie systemu barier z obudową bezpieczeństwa i systemu obrony w głąb uniemożliwiającego wydostawanie się produktów rozszczepienia poza budynek reaktora nawet w wypadku awarii.

Jak mówiliśmy w rozdziale VIII, bezpieczeństwo reaktora powierza się układom pasywnym, działającym w oparciu o naturalne procesy fizyczne, czego przykładem może być umieszczenie zbiornika zapasowej wody chłodzącej powyżej zbiornika reaktora, automatyczne systemy wykrywające i usuwające powstający wodór itp. Układy bezpieczeństwa są zwielokrotniane i zróżnicowane, aby uniemożliwić ich wspólną awarię z jednej przyczyny. Ten wzgląd każe ostrożnie patrzeć na możliwość powierzenia bezpieczeństwa reaktora systemowi komputerowemu, gdyż zaawansowany system komputerowy może zawierać trudno zauważalny błąd, który w odpowiednich warunkach spowoduje awarię instalacji.

Normy bezpieczeństwa jądrowego w różnych krajach są różne. Wymagania opracowane przez Europejskie Towarzystwa Energetyczne (*European Utility Requirements*) i zatwierdzone jako wystarczające przez Urzędu Dozoru Jądrowego w krajach Unii Europejskiej przewidują, że w wypadku maksymalnej awarii projektowej (a więc takiej, którą można opanować środkami bezpieczeństwa przewidzianymi przez konstruktora) strefa zagrożeń obejmować ma nie więcej niż 800 m wokół reaktora. Częstość takiej awarii dla obecnie projektowanych reaktorów winna być mniejsza niż raz na 100 000 lat, a najlepsze obecne projekty zapewniają, że będzie ona rzędu raz na 10 milionów lat.

Oczywiście w rozwoju na świecie energetyki jądrowej zdarzały się i zdarzają się drobne awarie polegające np. na pojawieniu się wycieków cieczy promieniotwórczej. Tego typu

Poważniejszymi awariami była wczesna awaria reaktora Windscale w 1957 roku związana z tzw. efektem Wignera. Awaria ta spowodowała wyemitowanie pewnych ilości materiałów promieniotwórczych do atmosfery. W tym samym roku w instalacji wojskowej w Kisztymie na Południowym Uralu nastąpiła awaria zbiornika na wypalone paliwo, zawierającego sporo wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Wówczas emisja materiałów promieniotwórczych do atmosfery, która objęła obszar o długości około 80 km i szerokości ok. 8 km, wyniosła $7,4 \cdot 10^{16}$ Bq. Mimo poważnej aktywności uwolnionej do atmosfery nie zanotowano nie tylko przypadków śmiertelnych, ale także negatywnych skutków zdrowotnych wśród potencjalnie narażonej ludności.

Pożar reaktora w elektrowni Brown's Ferry spowodował rozległe uszkodzenia kabli i roczny przestój reaktora, a awaria w Three Miles Island (TMI) spowodowała zniszczenie reaktora. Żadna z nich jednak nie spowodowała poważniejszych skutków zdrowotnych ani wśród obsługi na zewnątrz elektrowni. Niewątpliwie najpoważniejsza awaria zdarzyła się w 1986 r. w Czarnobylu. Natomiast poważna awaria z daleko idącymi skutkami radiologicznymi i zdrowotnymi zdarzyła się w 1986 roku w Czarnobylu. Awarie w TMI i Czarnobylu bardzo poważnie nadwyrężyły zaufanie społeczeństw do energetyki jądrowej, choć te psychologiczne skutki zostały zwielokrotnione przez lata negatywnej kampanii antynuklearnej i powszechnemu wyznawaniu zasady liniowej bezprogowej (LNT).



W celu ujednolicenia kwalifikowania wszystkich sytuacji awaryjnych w obiektach jądrowych na całym świecie, wprowadzono Międzynarodową Skalę Zdarzeń Jądrowych INES (od ang. *International Nuclear Events Scale*) określającą stopień zagrożenia przy awarii lub wydarzeniu odbiegającym od normalnych warunków pracy. Skalę tę przedstawia rys. 16.1, a szczegółowe kryteria zaliczenia zdarzenia do określonej kategorii opisane są

w Uzupełnieniu do niniejszego rozdziału. W tabeli tej podane są także przykłady zaistniałych zdarzeń.

Przyjęta struktura poziomów skali INES przedstawia się następująco:

1. **anomalia**, naruszająca zatwierdzone warunki eksploatacji
2. **incydent**, znaczne skażenie, nadmierne narażenie pracowników
3. **poważny incydent**, narażenie ludności na napromienienie dawką graniczną, poważne skażenie, ostre skutki napromienienia u pracownika(ów)
4. **awaria bez znacznego zagrożenia poza obiektem**, narażenie ludności na napromienienie dawką graniczną – przykładem awaria w wojskowym zakładzie przerobu paliwa w Windscale, Wielka Brytania, w roku 1973 - znaczne uszkodzenie rdzenia reaktora, narażenie pracownika(ów) na napromienienie dawką śmiertelną – przykładem awaria doświadczalnego zestawu krytycznego w Buenos Aires (Argentyna) w 1983 r.
5. **awaria z zagrożeniem poza obiektem**, możliwa konieczność częściowego wprowadzenia planowanych przeciwdziałań, poważne uszkodzenie reaktora – przykładem awaria reaktora wojskowego Windscale (Wielka Brytania) oraz awaria reaktora wojskowego w TMI (USA) w r. 1957
6. **poważna awaria**, znaczne uwolnienie materiałów promieniotwórczych do atmosfery, możliwa konieczność pełnego wprowadzenia planowanych przeciwdziałań – przykładem awaria zbiornika w wojskowym zakładzie przerobu paliwa w Kysztymie (na Południowym Uralu) w r. 1957
7. **wielka awaria**, wielkie uwolnienie substancji promieniotwórczych, rozległe skutki zdrowotne i środowiskowe – przykładem awaria w Czarnobylu (Ukraina) w r. 1986

W elektrowniach jądrowych z reaktorami projektowanymi zgodnie z zasadami bezpieczeństwa obowiązującymi w krajach OECD wystąpiła tylko jedna awaria stopnia 5, tj. awaria w TMI w USA, która nie spowodowała żadnych skutków zdrowotnych ani w elektrowni, ani poza jej obszarem. Inne awarie w elektrowniach jądrowych były stopnia 4 lub niższego.

16.2 Awaria w Windscale (INES 4)

W Windscale (Wielka Brytania) działały od 1951 r. dwa reaktory (w tych latach mówiono na nie *stosy*) wojskowe o mocy 180 MWt, moderatorze grafitowym i chłodzeniu powietrzem, nastawione na produkcję plutonu militarnego (ok. 30 kg rocznie). Paliwem był naturalny uran w koszulkach ze stopu litu z aluminium. Sam wypadek zdarzył się 8 października 1957 r., kiedy to w wyniku błędu ludzkiego popełnionego podczas wyżarzania grafitu¹ sam grafit zapalił się². Błąd polegał na tym, że w procesie wyżarzania miast trzymania prętów

¹ Podczas pracy w reaktorze uszkodzenia radiacyjne w graficie powodują zmiany strukturalne, polegające na tworzeniu się licznych dyslokacji i puchnięcie grafitu (tzw. *efekt Wignera*). Tego rodzaju deformacje sieci krystalicznej oznaczają kumulację w niej pewnej energii, tzw. *energii Wignera*, która może spontanicznie ulec wyzwoleniu w postaci impulsu cieplnego. Aby więc uniknąć niekontrolowanych skoków termicznych w rdzeniu reaktora, uczeni brytyjscy wpadli na prosty pomysł wyżarzania co pewien czas grafitu w temperaturze 250°C, aby ten powrócił do swej oryginalnej pierwotnej struktury. Niestety urządzenia monitorujące i sterujące w reaktorach w Windscale nie były nastawione na kontrolę tego, co dzieje się w trakcie wyżarzania, a więc i na pełną skuteczność tego procesu.

² W normalnych warunkach chłodzenia powietrzem, jak w Windscale, zapalenie grafitu zapewne by nie nastąpiło, niemniej jednak w warunkach ekstremalnych, przy nadmiarze tlenu taka reakcja grafitu jest możliwa i tak się właśnie stało.

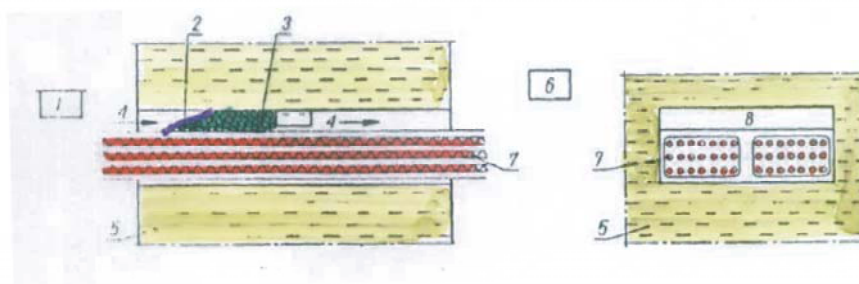
sterujących w dole, operator, który stwierdził, że wyzwalamy energię Wignera zachowuje się eratycznie wyciągnął pręty sterujące do góry, aby zwiększyć temperaturę wewnątrz rdzenia. Operator nie zdawał sobie sprawy (gdyż nie było odpowiednich monitorów), że w niektórych partiach rdzenia temperatura jest już znacznie wyższa niż w tych, z których rutynowo zbierano informację o temperaturze. Wszystkie przyczyny awarii nie są do dziś dobrze znane i nie miejsce tu, aby podawać możliwe hipotezy. W każdym razie w efekcie awarii 150 kanałów paliwowych uległo rozszczelnieniu. Chłodzenie palącego się grafitu powietrzem stało się niemożliwe, gdyż dostawa powietrza tylko by zwiększała pożar. Próbowano więc chłodzenia dwutlenkiem węgla, co z kolei powodowało wydzielanie się trującego tlenku węgla (CO). Po trzech dniach użyto wreszcie do gaszenia wody, co ostatecznie pozwoliło po czterech dniach stłumić pożar, choć w zamyśle było czynnością bardzo ryzykowną: stopiony metal w kontakcie z wodą utlenia się zabierając z wody tlen, a uwalniając wodór, który w kontakcie z powietrzem mógł eksplodować i rozerwać obudowę bezpieczeństwa.

W wyniku awarii uwolniła się do atmosfery stosunkowo duża aktywność, szczególnie izotopu ^{131}I (740 TBq), prowadząca ostatecznie do skażenia terenu na obszarze ok. kilkuset km^2 . Spośród 238 osób, których poddano badaniu ze względu na wchłonięcie promieniotwórczego jodu przez tarczycę, około połowa z nich otrzymała dawkę rzędu 160 mSv na tarczycę, co jest około trzykrotnie mniejszą dawką od dopuszczalnej.

Oba reaktory w Windscale zostały po opisanej awarii wycofane z eksploatacji.

16.3 Pożar w Browns Ferry (INES 4)

Pożar w elektrowni jądrowej Browns Ferry wybuchł 22 marca 1975 roku w największej wówczas elektrowni jądrowej w USA z dwoma reaktorami BWR o mocy po 1100 MWe. Trwał on przez 7 godzin, spowodował szkody szacowane na około 10 milionów USD i roczne wyłączenie z eksploatacji obu bloków elektrowni.



Rys. 16.2 Przepust kablowy przez obudowę bezpieczeństwa w elektrowni jądrowej Browns Ferry (1. Pomieszczenie kablów, 2. Warstwa ognioodporna, 3. Masa wypełniająca, 4. Przepływ powietrza, 5. Beton, 6. Hala reaktora, 7. Kable, 8. Obszar do wypełnienia)

W chwili awarii oba bloki pracowały na pełnej mocy, a trzeci blok był w fazie budowy. Awaria została zapoczątkowana działaniem elektryka, który sprawdzał szczelność przepustów w obudowie bezpieczeństwa przy pomocy standardowego testu, w którym przybliżało się do badanego miejsca płonąca świeca i obserwowało zachowanie płomienia. Przepusty były wypełnione pianką poliuretanową tworzącą uszczelnienie między pomieszczeniem kablowym a wnętrzem obudowy bezpieczeństwa (rys. 16.2).

Początkowo, podczas budowy elektrowni, przepust był pokryty powłoką zabezpieczającą przed pożarem, nałożoną po obu stronach przepustu. Jednakże badany w dniu pożaru przepust utracił tę oryginalną powłokę, gdy rozszczelniono go celem przeprowadzenia dodatkowych kabli. Test szczelności przeprowadzano przed położeniem nowej powłoki ochronnej. Co więcej, piankę poliuteranową zamieniono na piankę innego rodzaju, znacznie łatwiej palną.

Ciśnienie powietrza w obudowie bezpieczeństwa jest z reguły niższe niż na zewnątrz, co zapobiega możliwości wydostawania się produktów promieniotwórczych na zewnątrz reaktora. Ponieważ w sprawdzanych przewodach tuż za sterownią reaktora rzeczywiście była dziura, płomień został zassany do wnętrza otworu i zapalił gąbkę poliuteranową w otworze, a to z kolei pociągnęło za sobą zapalenie się izolacji kabli, z których niektóre stanowiły część układu bezpieczeństwa reaktora.

Próby ugaszenia pożaru bez użycia wody okazały się nieskuteczne, a wody nie chciano użyć, ponieważ trzeba by ją nalać do otworu, w którym znajdowały się kable elektryczne. Gaśnice CO₂ nie pomagały, bo silny prąd powietrza zasysanego do obudowy usuwał dwutlenek węgla z miejsca pożaru. W miarę rozprzestrzeniania pożaru i przepalania kolejnych kabli sterowanie chłodzeniem reaktora stawało się coraz trudniejsze i groziło odsłonięciem i przepaleniem rdzenia. Ostatecznie po 16 godzinach podjęto ryzykowną decyzję użycia wody. Kierownik prac nakazał ewakuację obiektu i osobiście skierował wąż strażacki do wnętrza przepustu. Udało się: pożar ugaszono bez większych komplikacji, choć około 1600 kabli zostało spalonych, w tym 628 kabli należących do układu bezpieczeństwa. Na szczęście awaria nie spowodowała uwolnienia materiałów promieniotwórczych do atmosfery, ale w wyniku lekcji wyciągniętej z tej awarii wprowadzono bardzo daleko idące zmiany we wszystkich elektrowniach jądrowych na całym świecie, wymagające wielomiesięcznych przestojów i przebudowy pomieszczeń.

Obecnie we wszystkich elektrowniach jądrowych prowadzi się systematyczną analizę zagrożeń pożarowych oraz wprowadza pasywne systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych. Kable mają izolację nie podtrzymującą palenia, co nie zmienia faktu, że ich odporność na pożar jest systematycznie badana. Jeśli w jakiejś chwili stwierdzi się, że izolacja nie spełnia odpowiednich wymagań, kable wymienia się. Zespoły kabli zasilania umieszcza się w odrębnych trasach oddzielonych przegrodami lub odległością od tras kabli sterujących, a każdy z trzech lub czterech równoległych i niezależnych systemów bezpieczeństwa posiada odrębne trasy kablowe. Dzięki temu pożar w jednym ciągu kabli nie może pozbawić elektrowni zasilania i sterowania w dwóch pozostałych systemach bezpieczeństwa. Dodatkowo, ciągi kabli przepuszczane są co parę metrów przez przegrody betonowe uniemożliwiające propagowanie się ognia wzdłuż kabli. Niezależnie od tych zabezpieczeń działa rozbudowany system detekcji pożaru, układ gaszenia wodą i innymi mediami (gazem, pianą, proszkiem). System wentylacji zapewnia skuteczne usuwanie dymu, który bardzo utrudnia akcję gaśniczą. Poszczególne rejony ogniowe oddziela się przegrodami (np. drzwiami przeciwpożarowymi), wytrzymującymi pożar przez pół godziny do godziny. Poza nurtem bezpośredniej ochrony przeciwpożarowej prowadzi się ścisłą ewidencję materiałów łatwopalnych. Oczywiście wszystkie te prace i zabezpieczenia są kosztowne, jednak można powiedzieć, że między innymi dzięki tym pracom budowane dziś elektrownie jądrowe są dobrze zabezpieczone przed pożarem.

16.4 Three Miles Island (TMI; INES 5)

W elektrowni jądrowej TMI działały dwa reaktory typu PWR: TMI-1 o mocy 800 MWe i TMI-2 o mocy 900 MWe. Awaria zdarzyła się 28 marca 1979 r. w niemal nowym reaktorze TMI-2 (reaktor TMI-1 działał od 1974 r.) i zaczęła się od drobnej niesprawności w układzie sprężonego powietrza, co spowodowało zamknięcie wody zasilającej we wtórnym obiegu, a w ślad za tym przerwanie dostawy wody do wytwornicy pary i niewielki wzrost temperatury w obiegu pierwotnym. Cała, stosunkowo niewielka ilość wody znajdująca się w obiegu wtórnym została w ciągu kilku minut zamieniona w parę, gdyż reaktor pracował na pełnej mocy. Pompy awaryjnego zasilania rozpoczęły działanie, jednakże woda nie mogła przepłynąć z tych pomp do wytwornicy pary, ponieważ po świeżo przeprowadzonym przeglądzie remontowym przez pomyłkę zostawiono w układzie kilka zaworów zamkniętych. Reaktor przez cały czas grzał wodę w obiegu pierwotnym, ciepło to jednak nie mogło być odebrane, gdyż po stronie wtórnego obiegu nie było wody. Spowodowało to grzanie wody obiegu pierwotnego i wzrost ciśnienia w tym obiegu.

W ciągu około jednej sekundy reaktor został wyłączony przez system automatycznego sterowania. W tym momencie zawór bezpieczeństwa znajdujący się nad stabilizatorem ciśnienia otworzył się zgodnie z przewidywaniem, lecz po upływie 10 sekund powinien się zamknąć, co się nie stało, a czego nie zauważono. W rezultacie, oprócz pary, która po skropleniu przedostaje się do zbiornika zrzutowego, do którego zaczęła przez zawór wyciekać znaczna porcja wody z obiegu pierwotnego, ciśnienie w zbiorniku podwyższyło się tak, że ścianka zbiornika pękła i woda zaczęła wypływać wraz z parą na zewnątrz. Jednocześnie ilość wody dostarczanej do wytwornicy pary znakomicie się zmniejszyła. Wskaźnik ciśnienia natomiast pokazywał dużą wartość. Operator zorientował się, że zawory odcinające są zamknięte i polecił mechanikowi otworzyć je, po czym uwaga personelu skupiła się na procesie zalewania wodą wytwornic pary.

Obsługa miała powody, aby uważać, że zawór się zamknął, gdyż przyrządy wykazywały, iż sygnał zamknięcia został do zaworu wysłany. Niestety, w układzie brakło przyrządu kontrolującego zamknięcie zaworu. W tej sytuacji nie można było odbierać ciepła z reaktora po stronie obiegu wtórnego, gdyż w wytwornicach pary nie było wody. Reaktor został pozbawiony możliwości odbioru ciepła powyłłączeniowego, w wyniku czego rdzeń reaktora uległ całkowitemu zniszczeniu: około 1/3 rdzenia stopiło się. Co gorsza, wysokociśnieniowe pompy zadziałały natychmiast i zaczęły dostarczać wodę do stabilizatora ciśnienia, podnosząc w nim poziom wody. Operatorzy reaktora ograniczyli więc dostawę wody, gdyż wskaźnik poziomu wody wskazywał, iż w układzie chłodzenia mieli zbyt wiele wody, a wiedzieli, że dla kontroli ciśnienia w stabilizatorze nie powinno być jej za dużo, gdyż grozi to pęknięciem w układzie chłodzenia. Z drugiej strony, pompowanie wody i pary przez zawór spowodowało drgania pomp w tym układzie. Aby więc zapobiec ich uszkodzeniu zdecydowano o wyłączeniu pomp, a więc przerwano wymuszone dostawy wody do układu. Po odparowaniu wody odsłonił się rdzeń reaktora, pręty paliwowe uległy uszkodzeniu, produkty rozszczepienia przedostały się do obiegu wodnego.

Tymczasem układ sygnalizacji informował operatora, że pojawiło się napięcie na solenoidzie zamykającym zawór nadmiarowy. Wskaźnik poziomu wody w stabilizatorze ciśnienia pokazywał dużą wartość, co było związane z umieszczeniem rdzenia reaktora dość wysoko w stosunku do poziomu stabilizatora ciśnienia.

Wskutek tych okoliczności para generowana w rdzeniu nie płynęła do stabilizatora, lecz gromadziła się pod kopułą zbiornika reaktora. W stabilizatorze poziom wody rósł, ponieważ poduszka parowa wypychała wodę ze zbiornika reaktora do stabilizatora ciśnienia. Operator nie zdawał sobie z tego sprawy i uznał, że zawór nadmiarowy jest zamknięty.

Do tej pory zakłócenie było niewielkie, w reaktorze było dużo wody, a układ awaryjnego chłodzenia rdzenia był gotów do pracy. Mylące wskazania układu sygnalizacyjnego jednak wpoili operatorowi przekonanie, że zawór nadmiarowy jest zamknięty, co było przyczyną doprowadzenia do błędnych działań obsługi i zniszczenia reaktora.

Widząc wysoki poziom wody w stabilizatorze i sądząc, że obieg pierwotny jest szczelnie zamknięty, operator zaczął obawiać się, że wtryskiwanie wody przez pompy wysokociśnieniowego układu awaryjnego chłodzenia rdzenia (UACR) spowoduje wypełnienie obiegu pierwotnego wodą (bez poduszki parowej), co przy niewielkim wzroście temperatury mogłoby doprowadzić do rozerwania obiegu pierwotnego. Widząc, że włączyły się obie pompy UACR operator podjął po 4 min 38 s decyzję o wyłączeniu jednej pompy wysokociśnieniowego UACR i zmniejszeniu wydatku drugiej. Po 6 minutach stabilizator ciśnienia został wypełniony wodą, wkrótce potem membrana bezpieczeństwa na zbiorniku zrzutowym pękła i po 7 min 43 s pompa przestała przetaczać wodę ze studzienki ściekowej obudowy bezpieczeństwa do budynku pomocniczego. Po 8 minutach wytwornice pary zostały osuszone. Otwarcie zaworów towarzyszyły trzaski, absorbujące uwagę operatora.

W tej sytuacji odbiór ciepła z reaktora po stronie obiegu wtórnego nie był możliwy, gdyż w wytwornicach pary nie było wody. Reaktor został pozbawiony możliwości odbioru ciepła powyłączeniowego. Z drugiej strony, pompowanie mieszaniny parowo-wodnej w obiegu pierwotnym spowodowało kawitację na wlocie do pomp, więc przerwano wymuszone dostawy wody do układu. Przez prawie 3 godziny woda uciekała z obiegu pierwotnego przez otwarty zawór nadmiarowy, a operatorzy nie zdawali sobie z tego sprawy i utrzymywali wydatek z UACR na bardzo niskim poziomie. Wystarczyłoby odblokować pompy UACR i reaktor byłby uratowany! Wskaźnik poziomu wody w stabilizatorze ciśnienia pozostawał jednak wciąż się w górnym położeniu, a para wodna zamiast przepłynąć do stabilizatora gromadziła się pod kopułą reaktora i wypychała wodę z rdzenia. Po odparowaniu wody odsłonił się rdzeń reaktora, pręty paliwowe uległy uszkodzeniu, produkty rozszczepienia przedostały się do obiegu wodnego, a przy kolejnych próbach obniżania ciśnienia w obiegu pierwotnym, by ułatwić zalanie go wodą, produkty rozszczepienia przedostawały się z parą wodną do wnętrza obudowy. Zawór nadmiarowy odcięto i zlikwidowano wypływ wody dopiero po 3 godzinach od początku awarii. Było jednak już za późno – paliwo zostało zniszczone.

O godz. 7:50 w dniu 28 marca udało się operatorom przywrócić dostawę wody do układu chłodzenia reaktora i ponownie uruchomić jedną z pomp i spowodować, aby pracowała bez niebezpiecznych drgań. W kolejnych dwóch dniach operatorzy usuwali promieniotwórcze gazy do odpowiedniego zbiornika, jednak kompresory nie były wystarczająco szczelne i część radioaktywności została uwolniona do atmosfery. W wyniku awarii trzech operatorów dostało dawki ok. 35 mSv, a dwunastu dawki nie przekraczające 10 mSv, w żadnym więc z wypadków promieniowanie nie mogło wywołać negatywnych dla zdrowia skutków.

Odkrycie rdzenia reaktora spowodowało także reakcję pomiędzy wodą a koszulkami z Zircalloyu:



w wyniku której zaczął uwalniać się wodór. Reakcja ta zachodzi w temperaturach powyżej 700°C, a jej intensywność rośnie z temperaturą. W temperaturze powyżej 1200°C zachodzi możliwość samorzutnego rozwoju tej egzotermicznej reakcji i grzanie paliwa do coraz wyższych temperatur. Paliwo w reaktorze TMI uległo stopieniu, temperatury zaś wynosiły około 2000°C. Intensywność reakcji była jednakże ograniczona ze względu na brak wody w rdzeniu.

Ciśnienie wodoru w budynku po południu 28 marca było na tyle wysokie, że spowodowało jego zapalenie się. Ciśnienie wodoru również wzrosło w górze zbiornika reaktora, gdzie zgromadziło się ok. 30 m³ tego gazu. Na szczęście w pomieszczeniach było zbyt mało tlenu (ten był intensywnie wykorzystywany w reakcjach z cyrkonem), aby spowodować wybuch. Do 1 kwietnia udało się operatorom pozbyć wodoru. Jednak ostateczne wyłączenie reaktora po przywróceniu naturalnych cyrkulacji chłodziwa i zalaniu rdzenia nastąpiło dopiero 27 kwietnia.

Winą za całość awarii należy obarczyć brak właściwych przyrządów kontrolnych, które mogłyby zasignalizować niesprawność zaworu, a ponadto brak odpowiedniego przeszkolenia obsługi, która nie wiedziała, że może nastąpić podniesienie poziomu wody w stabilizatorze ciśnienia w czasie, gdy trwa ucieczka wody z obiegu pierwotnego.

Usuwanie skutków awarii rozpoczęto na początku sierpnia 1979 r. i zajęło ono niemal 12 lat, a szkody wyniosły około miliarda dolarów. Konieczność uchronienia przed promieniowaniem personelu prowadzącego prace kazała odłożyć demontaż reaktora i usuwanie stopionego rdzenia do czasu, gdy natężenie promieniowania odpowiednio spadnie. Dzięki dobrze przemyślanej logistyce usunięto z rdzenia około 100 ton zniszczonego paliwa bez narażania zdrowia obsługi na niebezpieczeństwo. Warto zwrócić uwagę, że usunięcie zniszczonego paliwa z rdzenia było możliwe dopiero po jego wstępnym, sześcioletnim schłodzeniu w wodzie. Całą operację wyciągania tego paliwa i ładowania go do 342 kanistrów wykonywano oczywiście zdalnie przy pomocy odpowiednich manipulatorów. Dalsze kilka lat trwały szczegółowe analizy stanu reaktora, zmierzające do wyjaśnienia wszystkich zjawisk podczas awarii, w tym przyczyn bardzo małych wydzieleń produktów rozszczepienia poza elektrownię jądrową, pomimo całkowitego zniszczenia rdzenia. Okazało się, że krótkotrwałe wznowienie chłodzenia rdzenia na kilka minut podczas awarii wystarczyło by uchronić zbiornik reaktora przed przetopieniem, a obecność dużych ilości wody spowodowała zatrzymanie jodu (dobrze rozpuszczalnego w wodzie), tak że jego wydzielania poza obudowę nie przekroczyły jednej milionowej zawartości jodu w rdzeniu.

Całość awarii i prac poawaryjnych nie zakłóciła działania pierwszego reaktora TMI, który nie miał żadnego kontaktu ze zniszczoną jednostką. Również nie stwierdzono żadnych szkodliwych skutków tej awarii dla 30-otysięcznej ludności Pensylwanii. Głównym skutkiem awarii był społeczny stres psychologiczny, który na szczęście okazał się stosunkowo krótkotrwały.

Średnia dawka dla ludności żyjącej w odległości ok. 15 km od reaktora wyniosła 0,08 mSv, a nikt nie otrzymał dawki przekraczającej 1 mSv. W sumie przebadano w ciągu 13 lat od awarii około 32 000 osób i w żadnym wypadku nie stwierdzono skutków, jak np. choroba nowotworowa, które można byłoby wiązać z awarią reaktora. Choć niektórzy fataliści,

opierający swoje wnioski na hipotezie liniowej bezprogowej, przewidywali wzrost śmiertelności dzieci w okolicach Harrisburga, a także 4000 – 8000 dodatkowych zgonów na raka w kolejnych dekadach, nic takiego się nie wydarzyło. Niemniej jednak zaufanie do energetyki jądrowej w społeczeństwie USA zostało mocno zachwiane i uniemożliwiło dalszy rozwój tej gałęzi energetyki do końca XX w.

W wyniku awarii w TMI przeanalizowano wszystkie okoliczności, które spowodowały, że niewielkie zakłócenie przerodziło się w poważną awarię ze zniszczeniem reaktora. Zmieniono we wszystkich reaktorach układy sygnalizacji tak, by pokazywały stan rzeczywisty, a nie stan, jaki chce się osiągnąć. Dodano wskaźniki temperatury w rurociągach zrzutowych z zaworu nadmiarowego (gdyby operator w TMI widział wysoką temperaturę w tym rurociągu, zorientowałby się, że płynie w nim para), opracowano analizy wskazujące na właściwe postępowanie w takim typie awarii, a do obudowy bezpieczeństwa wprowadzono zabezpieczenia przed gromadzeniem się wodoru. Co najważniejsze, opracowano procedury postępowania awaryjnego oparte na symptomach awarii widocznych w sterowni, takich jak temperatury i ciśnienia³. Zapewnia to eliminację ponad 90% możliwych błędów ludzkich. Takie procedury, zastępujące poprzednio obowiązujące postępowanie oparte na odgadnięciu przez operatora jaka awaria wystąpiła w reaktorze, wprowadzono we wszystkich krajach OECD i wprowadza się je obecnie przy pomocy organizacji z USA i UE do wszystkich reaktorów w krajach byłego ZSRR.

16.5 Awaria w Czarnobylu (INES 7)⁴

16.5.1 Tło wydarzeń

Różnorakie konsekwencje awarii w Czarnobylu były i są na tyle duże, że jest rzeczą celową opisanie różnych jej aspektów.

Nad ranem 27 kwietnia 1986 r. monitory promieniowania wokół reaktora jądrowego w Forsmark w Szwecji zanotowały nadzwyczajny wzrost poziomu promieniowania, co spowodowało natychmiastowe zatrzymanie pracy reaktora. Sprawdzenie reaktora wykazało, że to nie jego praca była przyczyną wskazań monitorów. 28 kwietnia 1986 r. detektory w Ośrodku Atomistyki w Świerku pod Warszawą zarejestrowały podwyższoną radioaktywność, uruchomiły się systemy alarmowe, a na ekranach spektrometrów, służących do identyfikacji radioizotopów, pojawiły się intensywne linie promieniotwórczych izotopów jodu i cezu, co jednoznacznie świadczyło o zaistnieniu dużej awarii reaktorowej. Natychmiast sprawdzono urządzenia w Świerku i okazało się, że - podobnie jak w Szwecji - skażenie pochodzi z zewnątrz. Przekazanie tej informacji na zewnątrz nie było jednak takie proste: telefony były odcięte. Podobno na polecenie sekretarza POP PZPR.

W tym czasie Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) w Warszawie, opierając się na wskazaniach stacji monitoringu rozrzuconych po kraju, zawiadomiło władze PRL i rozpoczęło przygotowania do wdrożenia procedur przewidzianych na taką okoliczność, w tym akcji podawania ludności płynu Lugola, blokującego swym nie promieniotwórczym jodem tarczycę. Akcja była przeprowadzona wyjątkowo sprawnie, czym polskie służby

³ w ang. *symptom oriented emergency operating procedures*, SO EOP

⁴ Ten paragraf oparty jest głównie na raporcie autorstwa W.Trojanowski, L.Dobrzyński, E.Droste, A.Strupczewski, *20 lat po awarii w Czarnobylu* (2006), który można znaleźć w witrynie internetowej <http://www.ipj.gov.pl/>

zyskały międzynarodowe uznanie. W kraju słyszało się zarzuty, że tu i ówdzie płynu Lugola nie podano przed wystąpieniem opadu promieniotwórczego. Należy jednak pamiętać, że narażenie na jod-131 trwało wiele dni, głównie wskutek skażenia żywności, a blokowanie tarczycy zaczęto już 29 kwietnia i w ciągu pierwszej doby akcji objęto nią 75% ludności skażonych wówczas rejonów północno-wschodniej Polski. Nigdzie na świecie nie ochroniono tak szybko tak dużej części narażonej ludności.

W prasie i telewizji zaroilo się od wywiadów z prawdziwymi i domniemanymi specjalistami od postępowania w przypadku skażeń promieniotwórczych (przy czym, jak to zwykle bywa, najczęściej do powiedzenia miały osoby nie mające o sprawie pojęcia). Grozą powiało po Polsce i Świecie. Przeciwnicy energii nuklearnej mieli powody do radości i jeszcze głośniej zaczęli protestować przeciwko wszystkiemu, co ma przymiotnik „jądrowy” w nazwie. Niemiecki „Ośrodek Badań Jądrowych” w Karlsruhe z obawy przed cofnięciem finansowania przez rząd (notabene „zielonych”) zmienił swoją nazwę na „Ośrodek Badawczy”, a ceniona metoda obrazowania ludzkiego ciała, bazująca na „magnetycznym rezonansie jądrowym” przyjęła nazwę „obrazowania magnetycznym rezonansem”, czyli MRI (od *Magnetic Resonance Imaging*). Niestety bardzo wiele przerażonych kobiet w Europie i ZSRR poddało się aborcji dla uniknięcia urodzenia popromiennego mutantu⁵. W mediach pojawiały się doniesienia o znalezionych w okolicach Czarnobyla kurczakach-mutantach wielkości strusia, a nawet sugerowano możliwość powrotu na Ziemię dinozaurów. Nakręcono też kilka filmów, m. in. „Czarnobyl, autopsja chmury” oraz nieco później „Igor – dziecko Czarnobyla”, które przedstawiały wierutne bzdury na temat skutków awarii (co wytknęły autorom środowiska naukowe). Bzdury te, niestety, trafiały na podatny grunt społeczny. Świat żył w strachu przed wojną jądrową, a obie strony potencjalnego konfliktu pilnie dbały o to, by przeciwnik bał się ich broni.

W rzeczywistości to, co określano „wybuchem reaktora jądrowego” nie miało nic wspólnego z wybuchem jądrowym, mieliśmy bowiem do czynienia z dwoma wybuchami: wpierw pary, a następnie wodoru. Stało się to na skutek wydzielenia dużej ilości ciepła z paliwa jądrowego i zapalenia się grafitowego moderatora w reaktorze, czemu towarzyszyło intensywne wydzielanie się wodoru, który w zetknięciu z tlenem spowodował wybuch. W jego wyniku do atmosfery wydzielila się ogromna ilość materiału promieniotwórczego ($8 \cdot 10^{18}$ Bq, czyli zaledwie 200 razy mniej niż we wszystkich wybuchach jądrowych).

16.5.2 Reaktor

Reaktor w elektrowni jądrowej w Czarnobylu był typu RBMK (patrz rozdz. VII, a także inny rysunek tego reaktora - rys. 16.3), a więc był reaktorem kanałowym, z rdzeniem grafitowym i chłodzeniem wodnym. Przypomnijmy, że cechą odróżniającą reaktory energetyczne RBMK od innych konstrukcji stosowanych w świecie jest brak obudowy bezpieczeństwa, zabezpieczającej przed uwolnieniem skażeń w przypadku awarii. Jakkolwiek energia

⁵ Liczba aborcji na Białorusi i Ukrainie w latach 1986-1987 sięgnęła ok.1/3 wszystkich urodzeń w Europie Wschodniej! Ocenia się, że w sumie, włączając Europę, około 100 000 kobiet poddało się aborcji jedynie ze strachu. Ten strach nie był wynikiem niewiedzy – był wynikiem wiedzy, tyle że nabytej z zupełnie nieodpowiedzialnych w tym względzie mediów, które wbrew oczywistym faktom, jednoznacznie wskazującym, że wśród potomstwa ofiar bombardowań Hiroszimy i Nagasaki, które otrzymały dziesiątki i setki razy wyższe dawki w ok. 10^{15} razy (!) krótszym czasie, nie stwierdzono zmian genetycznych. Również rzetelna wiedza na temat rozwoju nowotworów w wyniku napromienienia bardzo różni się z powszechną opinią, u której podłoża leży radiofobia czyli strach przed jakąkolwiek dawką promieniowania.

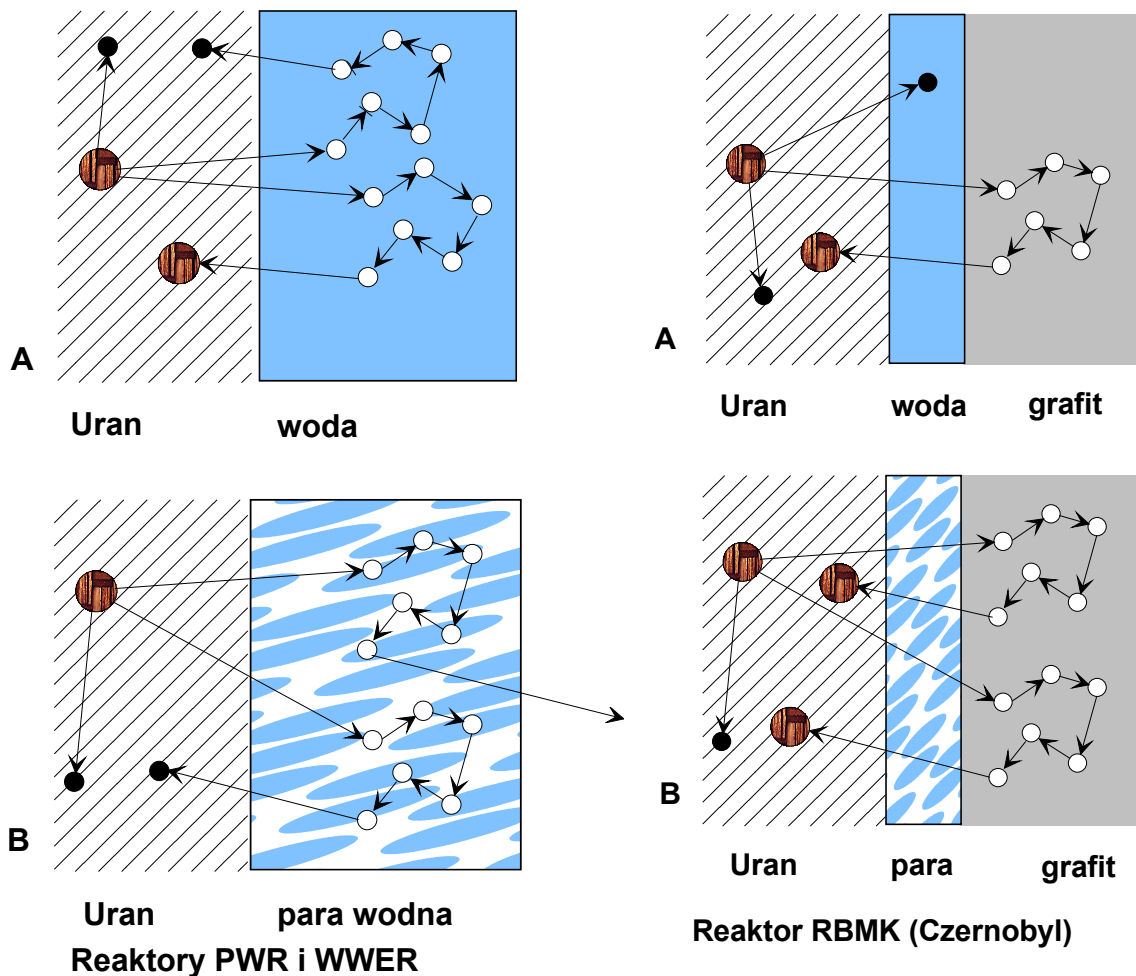
RBMK WYGLĄD REAKTORA

The diagram illustrates the internal structure of a RBMK reactor. Key components labeled include:

- Reaktor**: The central core of the reactor.
- Woda do rdzenia**: Water entering the core from the bottom.
- Rdzeń**: The central core where nuclear fission occurs.
- Pompa**: Pumps that circulate the water.
- Separator pary**: A steam separator that separates steam from the water.
- Para wodna**: Steam produced in the steam generator.
- Woda z turbiny**: Water returning from the turbine to the steam generator.
- Generator**: The electrical generator connected to the turbine.
- Turbina**: The steam turbine that drives the generator.
- Woda z turbiny**: Water returning from the turbine to the steam generator.
- Para wodna**: Steam produced in the steam generator.
- Woda do rdzenia**: Water entering the core from the bottom.
- Woda z turbiny**: Water returning from the turbine to the steam generator.
- Para wodna**: Steam produced in the steam generator.
- Woda z turbiny**: Water returning from the turbine to the steam generator.

Najważniejszą jednak cechą reaktorów typu RBMK jest dodatni współczynnik termiczny reaktywności. W reaktorze RBMK woda służy wyłącznie jako chłodziwo, a moderatorem jest grafit. W reaktorach PWR, w których rdzeń zanurzony jest w wysokociśnieniowym zbiorniku z wodą częściowe odparowanie wody powoduje niedostateczne spowalnianie neutronów i moc reaktora PWR samoczynnie maleje. Natomiast reaktor RBMK w przypadku utraty wody chłodzącej zaczyna pracować niestabilnie i zwiększa swoją moc, ponieważ mniej jest wtedy wody pochłaniającej pewną część neutronów podtrzymujących reakcję rozszczepienia, a spowolnienie neutronów i tak zachodzi skutecznie na graficie. Sytuację tę ilustruje rys. 16.4.

11



Rys. 16.4 Zasadnicza różnica między reaktorami PWR a RBMK. Po odparowaniu części wody reaktywność a w ślad za nią moc reaktora PWR maleje, a RBMK – rośnie.

To, że pomimo wspomnianych wad reaktor RBMK pracujący w Czarnobylu był w ogóle dopuszczony do eksploatacji wynikało z faktu, że miał on także zalety polegające na możliwości rozbudowy reaktora oraz łatwości przeładunku paliwa w trakcie pracy. Były to cechy szczególnie atrakcyjne z militarnego punktu widzenia.

16.5.3 Awaria

Na 6 lat przed opisywaną awarią także w Kurskiej elektrowni jądrowej doszło do niebezpiecznej sytuacji – wyłączono zewnętrzne zasilanie pomp i układów sterujących reaktorem. Ta nienormalna dla reaktora sytuacja daje się opanować ponieważ pręty regulacyjne można opuścić do rdzenia także przy odłączonych silnikach. Jednak do osiągnięcia pełnej mocy generatorów awaryjnego zasilania pomp potrzeba około 1 minuty i taki czas wystarcza do przegrzania prętów paliwowych. Postawiono więc tak zmodyfikować konstrukcję turbogeneratorów aby podczas ich bezwładnościowego biegu (po nagłym zaniku zasilania) generowały niezbędną ilość energii do czasu osiągnięcia pełnej mocy przez generatory awaryjne.

Okazją do wykonania modernizacji i testów zmodernizowanych turbogeneratorów było wyłączenie w kwietniu 1986 r. reaktora Czarnobylskiej elektrowni jądrowej w celu remontu czwartego bloku elektrowni. Stworzono program doświadczenia, który jednak nie został właściwie przygotowany. Wymagania bezpieczeństwa zostały potraktowane czysto formalnie. Nie przewidziano żadnych specjalnych środków zabezpieczających, a nawet przewidziano odstępstwa od obowiązujących normalnych zasad bezpieczeństwa po uzyskaniu zgody kierownika zmiany elektrowni. Eksperyment zakładał między innymi wyłączenie awaryjnego systemu chłodzenia reaktora, wobec czego reaktor przez ponad 4 godziny miał pracować ze znacznie obniżonym poziomem bezpieczeństwa.

Chronologia zdarzeń przedstawia się następująco⁶:

25 kwietnia 1986 r.

01:00 – przystąpiono do obniżania mocy reaktora⁷;

03:47 – moc reaktora została obniżona do 1600 MW (połowa wartości znamionowej);

13:05 – zredukowano moc do poziomu wyznaczonego przez potrzeby własne reaktora;

14:00 – wszystko było gotowe do rozpoczęcia doświadczenia: wyłączono system awaryjnego chłodzenia reaktora. Na żądanie dyspozytora Kijowskiego Okręgu Energetycznego (KOE) wstrzymano jednak wyłączenie reaktora do 23.00. Przez ten czas reaktor pracował przy 50% mocy znamionowej z wyłączonym systemem awaryjnego chłodzenia;

23:00 – dyspozytor z KOE zezwolił na odłączenie bloku od sieci; rozpoczęto obniżanie mocy reaktora do 700 MW, przy której miało być przeprowadzone doświadczenie;

24:00 – podjęła pracę kolejna zmiana - nie przygotowana do przeprowadzenia opóźnionego eksperymentu.

26 kwietnia 1986 r.

00:28 – Moc reaktora osiągnęła 500 MW(t). W celu uzyskania lepszych warunków sterowania przełączono automatyczny system sterowania ze strefowego (dotyczącego poszczególnych części reaktora) na ogólny. Procedura taka jest dopuszczalna przy pracy reaktora z małą mocą. Wskutek trudności ze sterowaniem oraz niestabilnej pracy reaktora przy niskich mocach, moc cieplna reaktora spadła do 30 MW, gdyż nastąpiło prawie zupełne "zatrucie" ksenonem. Na tym etapie należało przerwać doświadczenie, jednak postanowiono je kontynuować, aby nie dopuścić do jeszcze większego opóźnienia w realizacji eksperymentu. Dla zwiększenia mocy reaktora usunięto pręty regulacyjne, pozostawiając ich o wiele mniej od dopuszczalnego minimum (18 zamiast 30);

01:00 – Udało się w ten sposób zwiększyć moc do 200 MW, ustabilizować reaktor i usprawnić chłodzenie. Dodatkowe obciążenie i wzrost natężenia przepływu wody chłodzącej mogły jednak doprowadzić do uszkodzenia systemu chłodzenia, a zmniejszenie temperatury wody mogło doprowadzić do zmniejszenia produkcji i ciśnienia pary w separatorach, czego wynikiem mogło być automatyczne wyłączenie reaktora. Wahania ciśnienia i temperatury były duże i w każdej chwili mogły spowodować wyłączenie reaktora. Aby temu zapobiec

⁶ Mould R.F.: *Chernobyl Record. The Definitive History of the Chernobyl Catastrophe*, IOP Publishing (2000)

⁷ operacja taka jest długotrwała ze względu na omawiane wcześniej „zatrucie” się reaktora, tj. wydzielanie się promieniotwórczego ksenonu Xe-135 o okresie połowicznego zaniku około 10 godzin, który silnie wychwytuje neutrony, co może doprowadzić do niekontrolowanego wygaśnięcia reakcji, zatrzymania Xe-135 w elementach paliwowych i spowodowania trudności z późniejszym ponownym uruchomieniem reaktora

personel zablokował systemy zabezpieczające. Wszystkie te okoliczności spowodowały drastyczny spadek reaktywności reaktora, co zanotowano o godzinie 01:22. Mimo to reaktora natychmiast nie wyłączono i postanowiono kontynuować doświadczenie;

01:23 – Zamknięto zawory turbin – test się rozpoczął. Moc reaktora zaczęła rosnąć w sposób niekontrolowany. Próbowano opuścić wszystkie pręty regulacyjne i bezpieczeństwa, te jednak (uniesione ze względu na niski wcześniej poziom reaktywności) znajdowały się górnych położeniach i zakleszczyły się na pewnej wysokości nie osiągając położenia dolnych. Wskutek braku zasilania pomp (wyłączenia obu turbozespołów) nastąpił gwałtowny spadek cyrkulacji wody w kanałach chłodzenia, wzrost wytwarzania pary i doszło do tzw. *kryzysu wrzenia*⁸. Kryzys wrzenia powodował wydzielenie dużych ilości pary, zahamowanie przepływu chłodziwa, co spowodowało dalsze wzrost ilości pary i osuszenie rdzenia. Każde zmniejszenie ilości wody powodowało zwiększenie reaktywności reaktora i wzrost mocy zgodnie z rys. 16.4. Operator próbował wyłączyć reaktor wprowadzając wszystkie pręty pochłaniające do rdzenia na raz. Ale w prętach tych materiał pochłaniający znajdował się w chwili awarii nad rdzeniem, a w samym rdzeniu były wypełniacze grafitowe. Przy wprowadzaniu prętów do rdzenia malała moc górnej części rdzenia, (do której wprowadzano pochłaniacz) a przejściowo rosła moc dolejszej części rdzenia, do której wsuwał się grafit zmniejszając frakcję wody. Niestety w chwili awarii zasadniczą częścią rdzenia wytwarzającą moc była część dolna. Wprowadzenie prętów spowodowało dodatkowy wzrost mocy reaktora. Było to skutkiem błędu koncepcyjnego projektantów, którzy nie docenili groźby samotnego wzrostu mocy wskutek zmniejszania frakcji wody w rdzeniu. Operatorzy nie zdawali sobie sprawy z tego zagrożenia.

Wskutek gwałtownego wzrostu mocy reaktora (do 530 MW w ciągu 3 s, a krótko później moc około 100-krotnie przekroczyła wartość projektowaną) oraz braku chłodzenia przy wyłączonych systemach awaryjnych nastąpiło przegrzanie paliwa, rozerwanie otaczających je koszulek cyrkonowych oraz wyciek stopionego paliwa. Gwałtowne odparowanie wody i wzrost ciśnienia spowodowały zablokowanie zaworów zwrotnych za pompami cyrkulacyjnymi. Wzrost ciśnienia w kanałach technologicznych oraz wysoka temperatura spowodowały rozerwanie kanałów ciśnieniowych. Woda zaczęła wlewać się do rdzenia i bloków grafitowych wchodząc w reakcję egzotermiczną z cyrkonem. Wystąpiły także inne reakcje egzotermiczne.

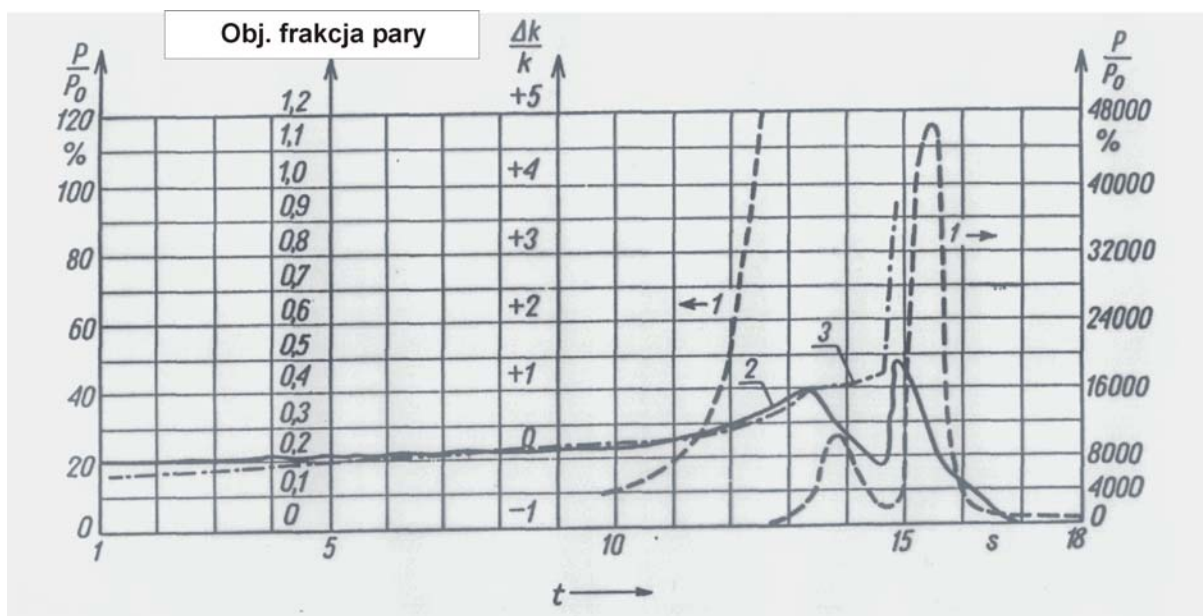
Przebieg zdarzenia ilustruje rys. 16.5, który pokazuje w jaki sposób zmieniały się parametry pracy reaktora, w szczególności moc neutronowa, która ostatecznie wzrosła 48 000% (!) mocy nominalnej⁹. Szybkość przyrostu mocy podczas awarii dochodziła do¹⁰ 1000 MW/s. Na podstawie doświadczeń w USA i Japonii (na reaktorze NSRR – Nuclear Safety Research Reactor) nad zachowaniem się elementów paliwowych z UO_2 wiadomo, że gdy energia generowana w paliwie (entalpia) osiąga ok. 220 cal/g UO_2 - rozpoczyna się destrukcja elementu paliwowego. Po przekroczeniu wartości 285 cal/g UO_2 - występuje pękanie, a

⁸ Po przekroczeniu pewnej temperatury następuje w wodzie wrzenie pęcherzykowe - na ściankach prętów paliwowych pojawiają się pęcherzyki powietrza, które odrywają się od koszulek prętów i ulegają kondensacji. Po przekroczeniu temperatury nasycenia pęcherzyki mają tendencję do łączenia się i wytwarzają warstwę parową przy ściankach prętów paliwowych. Przekazywanie ciepła znacząco maleje, temperatura więc wzrasta, a w wyniku tego procesu następuje ostatecznie przegrzanie koszulek ochronnych prętów paliwowych i ich przepalenie.

⁹ Scenariusz wydarzeń podawany przez Moulda nie jest jedynym. Istnieje opracowanie MAEA (INSAG-7), które nie wskazuje na tak ewidentne błędy obsługi reaktora (dziękuję dr. J.Kubowskiemu za zwrócenie mi uwagi na ten problem)

¹⁰ Informacja od dr. J.Kubowskiego

powyżej 320 cal/g UO_2 pastylki paliwa ulegają topnieniu i fragmentacji, i to niezależnie od stopnia wypalenia paliwa. W Czarnobylu średnia entalpia osiągała 300 cal/g UO_2 . Po uwzględnieniu nierównomiernego przestrzennego rozkładu gęstości mocy, w niektórych miejscach maksymalna wartość wynosiła ponad 450 cal/g UO_2 . Krytyczna wartość entalpii wystąpiła w 5. do 40. kasetach paliwowych. To pokazuje, że niektóre pastylki uległy destrukcji „na sposób jądrowy”.



Rys. 16.5 Wzrost zawartości pary, reaktywności i moc neutronowej reaktora RBMK w ostatniej fazie awarii w Czarnobylu.

1- moc neutronowa, na lewej skali od 0 do 120 %, na prawej skali od 0 do 48 000% mocy nominalnej, 2- reaktywność $\Delta k/k = -1\%$ do $+5\%$, 3 – objętościowa frakcja pary 0-1.2.

01:24 – Nastąpiły dwa wybuchy: eksplozja pary wodnej oraz uwolnionego wodoru. W bardzo wysokich ciśnieniach i temperaturach woda rozkłada się na wodór i tlenek wodoru, tworząc w kontakcie z powietrzem silnie wybuchową mieszaninę. Nastąpiło zniszczenie reaktora i części konstrukcji budynku. W wyniku eksplozji przesunięta została 2000-tonowa płyta pokrywająca reaktor, który został częściowo odsłonięty i powietrze zyskało dostęp do miejsca pożaru. Powietrze reagowało z grafitowymi blokami moderatora tworząc tlenek węgla będący palnym gazem. Na zewnątrz zostały wyrzucone fragmenty grafitowego rdzenia oraz stopionego paliwa reaktorowego, które wywołały ok. 30 ognisk pożaru. Do atmosfery dostały się duże ilości radioizotopów. Około 8 ze 140 ton paliwa zawierającego pluton i inne wysoce promieniotwórcze produkty rozszczepienia wydostały się z reaktora razem z resztkami moderatora i zostały rozproszone w okolicy. Pary cezu i jodu przedostały się do atmosfery podczas wybuchu i późniejszego pożaru. Obudowy bezpieczeństwa, która mogłaby zatrzymać te uwolnienia, jak wspominaliśmy, nie było.

05:00 – opanowano pożar, który zagrażał pozostałym blokom elektrowni. Paliły się jedynie resztki reaktora wewnątrz zgliszcz budynku.

Kolejnym zadaniem było ograniczenie emisji substancji promieniotwórczych do atmosfery. W pierwszej fazie zrealizowano to poprzez "bombardowanie" reaktora piaskiem z mieszaniną

baru, dolomitu i ołowiu. Do 30 kwietnia zrzucono ponad 1000 ton materiałów. Później jednak zaprzestano tej operacji ze względu na ograniczenie wymiany powietrza i wzrost temperatury pozostałości rdzenia i paliwa, co w połączeniu z wodą zalewającą reaktor mogło spowodować kolejne eksplozje. Aby uniknąć tego niebezpieczeństwa przeprowadzono trudną operację odpompowania wody z kanałów reaktora oraz zbiornika pod nim (rozgrzane pręty paliwowe mogły przetopić betonową podstawę reaktora i opaść do zbiornika rozbryzgowego). Powstała konieczność ochłodzenia reaktora. Zrealizowano pomysł wtłoczenia do zniszczonej hali azotu, co miało stłumić pożar i reakcję łańcuchową. Do tego celu ściągnięto azot nawet z odległych zakładów przemysłowych. Niestety operacja nie przyniosła spodziewanych rezultatów. Emisja radioizotopów samoczynnie gwałtownie spadła 6 maja i sytuacja została opanowana.

W Tabeli 16.1 podajemy uwolnienia różnych izotopów promieniotwórczych. Dla porównania warto zauważyć, że naturalna emisja alfa-promieniotwórczego radonu-222 do atmosfery wynosi $33 \cdot 10^{18}$ Bq rocznie, a więc o rząd wielkości więcej niż sumaryczna emisja w wyniku awarii reaktora w Czarnobylu.

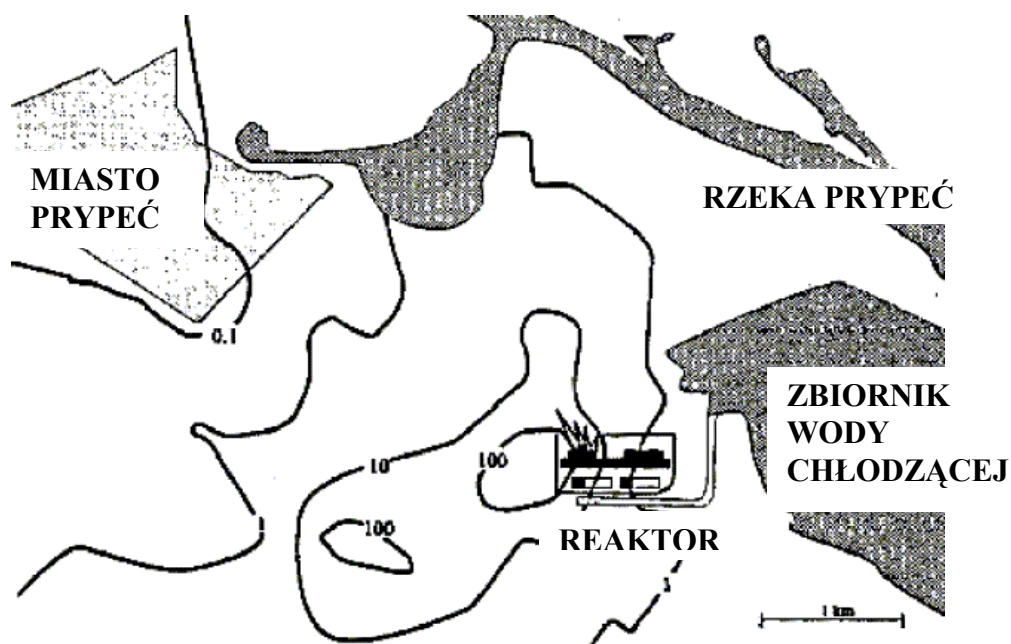
Tab. 16.1 Emisja do atmosfery różnych izotopów promieniotwórczych w wyniku awarii

Izotop	Okres połowicznego zaniku	Ilość [10^{15} Bq]
Cs-134	2,06 lat	19
Cs-137	30 lat	38
I-131	8,04 dni	260
Xe-133	5,3 dni	1700
Mo-99	2,8 dni	110
Zr-95	64 dni	140
Ru-103	39 dni	120
Ru-106	368 dni	60
Ba-140	12,7 dni	160
Ce-141	32,5 dnia	100
Ce-144	284 dni	90
Sr-89	50,5 dni	80
Sr-90	29,2 lat	8

Celem odizolowania zniszczonego reaktora od środowiska zamknięto go wewnątrz wielkiego żelbetowego sarkofagu i w takim stanie znajduje się on do dziś.

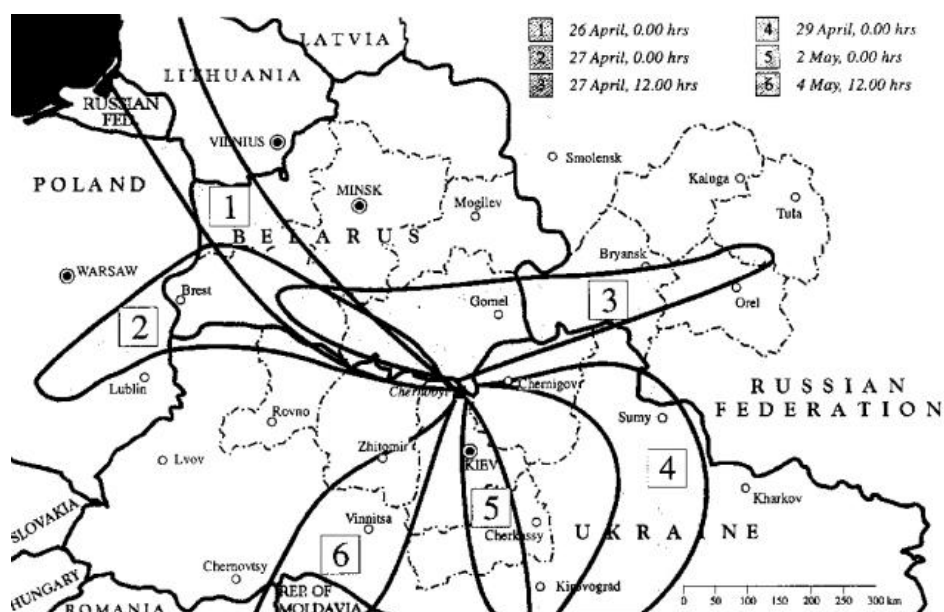
Mimo wciąż dużego zagrożenia, w wyniku odgórných nacisków nie podjęto decyzji o natychmiastowym wyłączeniu pozostałych bloków energetycznych. Jedynie operator reaktora w bloku trzecim (bezpośrednio sąsiadującym ze zniszczonym blokiem czwartym), wbrew rozkazom przełożonych, wyłączył reaktor. Z decyzją o wyłączeniu pozostałych dwóch zwlekano kilka dni.

Ograniczenia spożycia mleka i innych skażonych produktów wprowadzono dopiero 23 maja, a jod stabilny zaczęto podawać ludności około 25 maja, a więc miesiąc po awarii (!). Z powodu trudności organizacyjnych akcją tą objęto tylko ok. 1,6 mln dzieci.



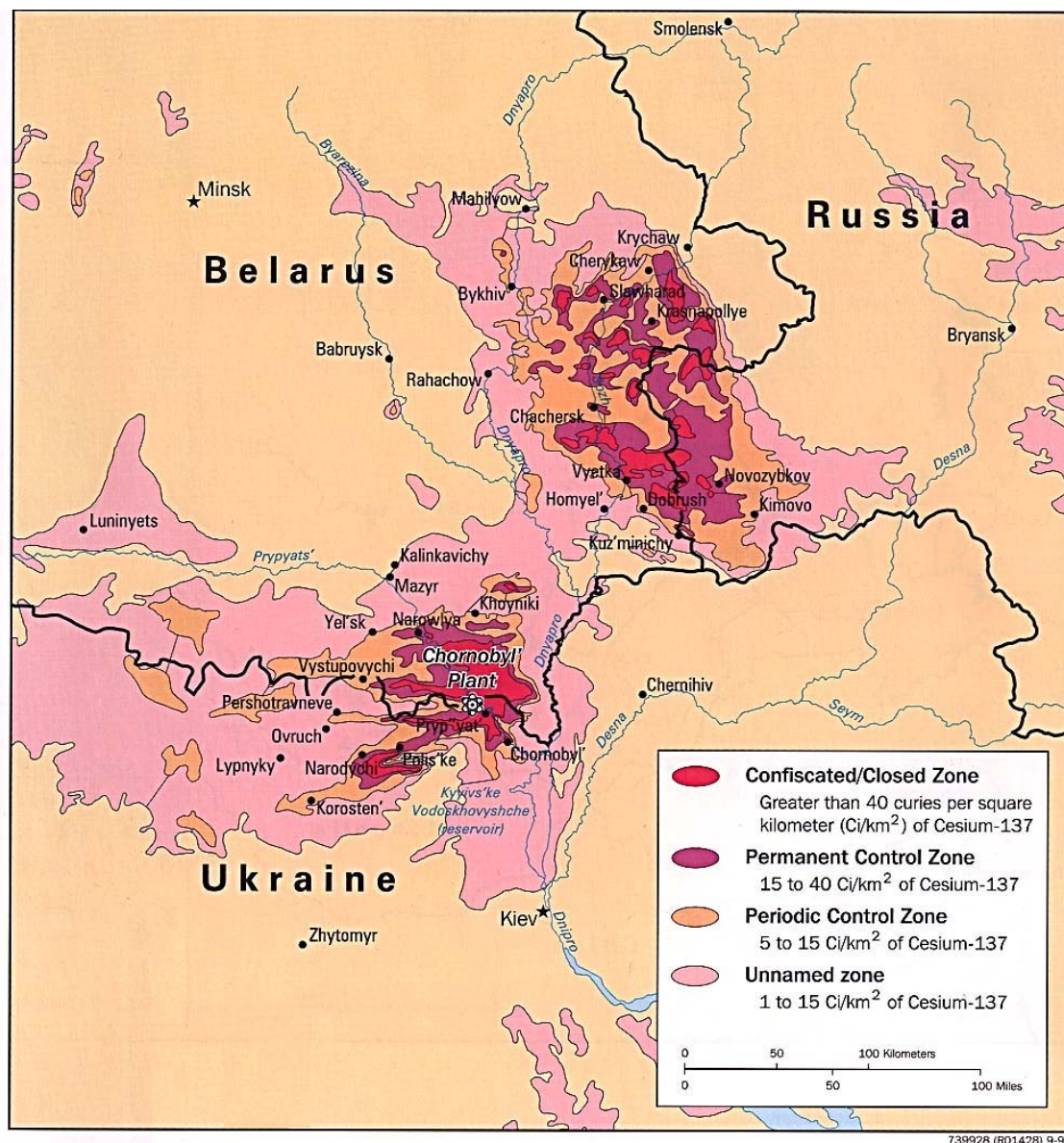
Rys. 16.6 Moce dawek [w R/h, tj. 0,01 Gy/godz] wokół elektrowni w Czarnobylu zmierzone 26 kwietnia 1986 r.

Na rys. 16.6 przedstawiono zmierzone moce dawek w powietrzu 26 kwietnia 1986 r., a na rys. 16.7 rozprzestrzenianie się obłoku promieniotwórczego w ciągu kolejnych dni.



Rys. 16.7 Rozprzestrzenianie się obłoku promieniotwórczego w dniach 26 kwietnia – 4 maja

Mapę skażeń wokoło Czarnobyla pokazano na rys. 16.8. Warto z nią się zapoznać, bo stanowi ona podstawę do obliczania dawek jakie mieszkańcy mogą otrzymać w ciągu całego życia i oceny słuszności decyzji o ewakuacji podjętych przez władze dawnego ZSRR.



Rys. 16.8 Mapa skażeń terenu po awarii w Czarnobylu

Kolejnymi kolorami (od góry) w legendzie na rysunku oznaczono: strefę ściśle zamkniętą, skażenia Cs-137 większe niż $40 \text{ Ci}/\text{km}^2$, b) strefę trwale kontrolowaną, skażenia Cs-137 od 15 do $40 \text{ Ci}/\text{km}^2$, strefę okresowo kontrolowaną, $5\text{--}15 \text{ Ci}/\text{km}^2$ i strefę o skażeniach od 1 do $15 \text{ Ci}/\text{km}^2$

Przeliczenie skażeń gruntu na dawki w ciągu całego życia z uwzględnieniem rozpadu radioaktywnego podano w UNSCEAR 1988¹¹. Współczynnik przeliczeniowy wyniósł 76

¹¹ UNSCEAR 1988, Annex D, Exposures from the Chernobyl Accident, p. 31 (1988)

$\mu\text{Sv/kBq}$. W raporcie UNSCEAR 2000¹² podano dokładniejsze współczynniki, uwzględniające różnice w procesach naturalnych usuwania radionuklidów w mieście i na wsi. Ostatecznie współczynnik przeliczeniowy wyniósł dla miasta - $61 \mu\text{Sv/kBq}$, a dla wsi - $88 \mu\text{Sv/kBq}$. Oznacza to że skażenie 40 Ci/km^2 odpowiada dawce przez całe życie równej 110 mSv na wsi, a 76 mSv w mieście. Na tym tle należy rozważać celowość przesiedleń ludności, wprowadzonych przez władze radzieckie po awarii w Czarnobylu. Przypomnijmy, że typowa dawka pochodząca od promieniowania naturalnego wynosi ok. 3 mSv/rok , a więc w ciągu 70. letniego życia człowiek dostaje przeciętnie 210 mSv od samej natury.

16.5.4 Przesiedlenia

Wokół Czarnobyla wyznaczono strefę bezpieczeństwa o promieniu 30 km, z której wysiedlono całą ludność. Podjęta akcja przesiedleńcza została przeprowadzona bardzo sprawnie, choć w wielu przypadkach nie miała ona głębszego uzasadnienia. W dniach 27 kwietnia - 7 maja 1986 r. wysiedlono ok. 116 000 osób. (Już wtedy uczeni radzieccy doradzali, aby większość ludności pozostawić w spokoju.) W późniejszych latach w trzech najbardziej poszkodowanych republikach radzieckich przesiedlono jeszcze 220 tys. osób.

Pierwsza ewakuacja 49 360 osób z miasta Prypeć wybudowanego dla pracowników ok. 4 km od elektrowni jądrowej w Czarnobylu oraz 254 osób z pobliskiego Janowa przeprowadzona 27 kwietnia miała uzasadnienie, gdyż w tym dniu istniała możliwość przebicia się stopionego rdzenia do dolnych pomieszczeń, w których mogła znajdować się woda. W takim wypadku wybuch pary wodnej mógł spowodować znaczące skażenie miasta, co stanowiłoby zagrożenie dla ludności. Natomiast wysiedlenie ok. 170 000 osób z innych miejscowości, którym wspomniane niebezpieczeństwo nie zagrażało, było błędem, który wyraźnie odbił się na późniejszym zdrowiu przesiedleńców.

Akcja opierała się na słabo uzasadnionym zaleceniu władz aby ewakuować ludność z terenów skażonych cezem-137 na poziomie powyżej 37 kBq/m^2 , które to skażenie generuje dawkę promieniowania $0,2 \text{ mSv/rok}$ czyli ponad dziesięciokrotnie mniejszą od średniej dawki pochodzącej od naturalnych źródeł promieniowania.

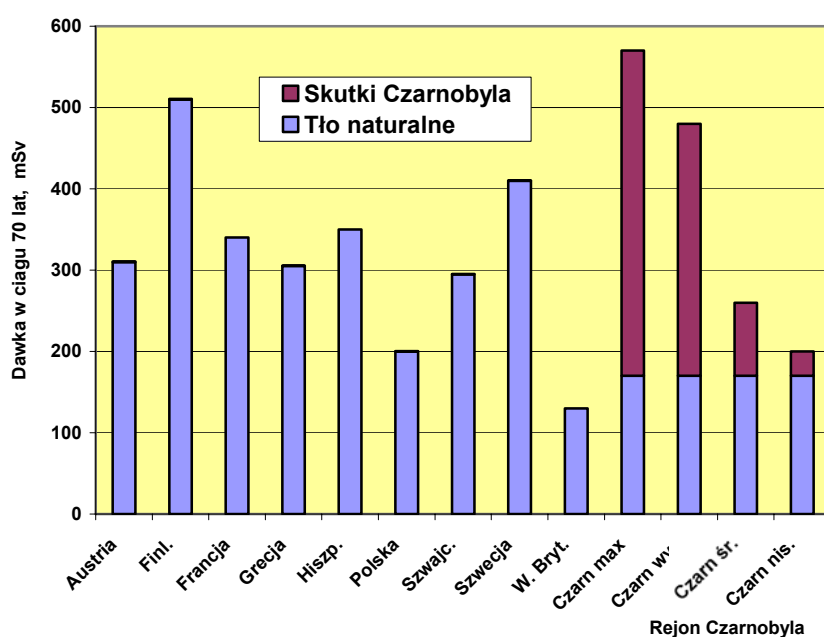
Dalsze decyzje o ewakuacji i przesiedleniach (czasem na tereny bardziej skażone niż te wysiedlane) były podejmowane – często wbrew opiniom specjalistów – przez czynniki polityczno-administracyjne jeszcze do roku 1992. W oparciu o nieracjonalne przepisy wysiedlano ludzi z terenów o poziomie promieniowania niższym niż naturalne tło w Norwegii. Czasem przesiedleńcy w miejscu docelowym otrzymywali większe dawki promieniowania od radonu z podłoża, niż otrzymywaliby ze skażeń pozostawszy w domu. Z Prypeci wysiedlono ludzi do miejscowości Pleskoje, gdzie dawki na tarczycę od jodu-131 były 5 razy większe niż w opuszczanym miejscu.

Porównanie dawek jakie mogliby otrzymać przez całe życie mieszkańcy rejonu Czarnobyla z dawkami otrzymywanymi w ciągu 70 lat życia w różnych krajach Europy pokazano na rys. 16.9. Zgodnie z oceną UNSCEAR'u skażenie ^{137}Cs 1 kBq/m^2 może wnieść dodatkową dawkę życiową $0,16 \text{ mSv}$. Oznacza to, że przy skażeniu rzędu 185 kBq/m^2 (5 Ci/km^2) w ciągu 50 lat można otrzymać dodatkową dawkę rzędu 30 mSv . Przy skażeniach około 30 Ci/km^2

¹² UNSCEAR 2000, Annex J Exposures and effects of Chernobyl accident, p. 531

dodatkowa dawka równoważna w ciągu 50 lat jest równoważna dawce pochodzącej od promieniowania naturalnego.

Jak widać, dawki od tła naturalnego np. w Finlandii są większe niż dawki w okolicy Czarnobyla o niskim (do 5 Ci/km²), średnim (do 15 Ci/km²), a nawet wysokim stopniu skażenia (50 Ci/km²). Dopiero przy najwyższych skażeniach występujących na bardzo małym terenie wokół Czarnobyla dawki w ciągu życia nieco przekraczają średnie dawki w Finlandii, ale pozostają nadal mniejsze niż dawki lokalne w wielu rejonach Finlandii, Szwecji, Francji i Hiszpanii. A przecież nikt nie zamierza ewakuować Finlandii, lub usuwać milionów Francuzów z rejonu Masywu Centralnego!



Rys. 16.9 Porównanie dawek, które mogliby otrzymać w ciągu 70 lat życia mieszkańcy rejonu Czarnobyla z dawkami otrzymywanymi w różnych krajach Europy. Poziomy wysoki, średni i niski odpowiadają skażeniom o aktywności 50, 15 i 5 Ci/km²

Tymczasem na miejscu podejmowano kontrowersyjne decyzje. Np. cztery dni po pierwszym wybuchu Komisja Rządowa odrzuciła amerykańską ofertę dostarczenia tabletek jodowych dla ochrony ludności. W czasie akcji ratowniczej i dalszych działań zmarnowano wielkie pieniądze, które zainwestowane w poprawę jakości życia przyniosłyby pozytywny skutek bez jakichkolwiek przesiedleń.

Błędne decyzje podejmowano jednak nie tylko w b. ZSRR. Rząd Szwecji działając w panicznym strachu nakazał ekstynkcję i zagrzebanie tysięcy reniferów, które były lekko radioaktywne. W rezultacie pozbawiono Eskimosów i jedzenia i dochodu ze sprzedaży mięsa. Decyzja była wynikiem uznawania poziomu promieniowania 300 Bq/kg, a więc poziomu równoważnego 3000 Bq/rok przy konsumpcji 10 kg mięsa, jako już groźnego, co jest jawnym absurdem. W Niemczech wydano 300 milionów USD na dekontaminację dozowników żywności dla bydła, choć 50.-letnia ekspozycja wiązała się z zaledwie 1% poziomu naturalnego promieniowania. Nawozy potasowe stosowane na świecie wnoszą dawkę kilka

razy większą niż skażenia poczynobyłskie. Książę Karol zauważył kiedyś, że w ciągu ostatnich stu lat kwaśne deszcze spowodowały tysiące razy większe szkody w środowisku niż pojedynczy wypadek w Czarnobylu¹³.

16.5.5 Sytuacja zdrowotna na Ukrainie i Białorusi

Jednym z najświeższych opracowań opisujących zdrowotne, środowiskowe i społeczno-ekonomiczne skutki awarii czarnobyłskiej jest raport „Forum Czarnobyłskiego” ogłoszony w Wiedniu 5 września 2005 roku. Forum tworzą Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA), Światowa Organizacja Zdrowia (WHO), Agencje ONZ (FAO, UNDP, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR) oraz rządy Białorusi, Rosji i Ukrainy. Zdaniem autorów raportu, z powodu awarii Czarnobyłskiej EJ śmierć poniosło 50 osób, a może umrzeć jeszcze 4 tysiące. Niestety, dane i niektóre interpretacje przedstawione w tym Raporcie – choć znacznie bardziej wyważone niż wiele wcześniejszych doniesień – stoją w istotnej sprzeczności z precyzyjnymi danymi UNSCEAR (Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego), a także z interpretacjami przyczyn rejestracji zwiększonej liczby zachorowań na terenie Białorusi, Rosji i Ukrainy. Według Raportu, owe 50 ofiar śmiertelnych to dwaj pracownicy elektrowni, około 40 likwidatorów skutków awarii i osoby, które zmarły na raka tarczycy o udokumentowanym związku z awarią. Tymczasem dane UNSCEAR’u mówią o 28 ofiarach ostrej choroby popromiennej, zmarłych w ciągu 4 miesięcy od awarii oraz 3 ofiarach zmarłych z innych przyczyn. Choć prawdą jest, że do roku 2004 z pozostałej grupy 106 osób zmarło 19, jednak liczba ta w ciągu niemal 20 lat jest normalną umieralnością w populacji nie narażonej radiacyjnie. Przyznaje to zresztą raport Czarnobyłski, ale by „być po bezpiecznej stronie” wlicza wszystkie te zgony do ofiar Czarnobyła.

Według Raportu, owe 50 ofiar śmiertelnych to dwaj pracownicy elektrowni, około 40 likwidatorów skutków awarii i osoby, które zmarły na raka tarczycy o udokumentowanym związku z awarią. Tymczasem dane UNSCEAR’u mówią o 28 ofiarach ostrej choroby popromiennej, zmarłych w ciągu 4 miesięcy od awarii oraz 3 ofiarach zmarłych z innych przyczyn. Choć prawdą jest, że do roku 2004 z pozostałej grupy 106 osób zmarło 19, jednak liczba ta w ciągu niemal 20 lat jest normalną umieralnością w populacji nie narażonej radiacyjnie. Przyznaje to zresztą raport Czarnobyłski, ale by „być po bezpiecznej stronie” wlicza wszystkie te zgony do ofiar Czarnobyła.

Jeszcze bardziej niewiarygodna jest prognoza 4 tysięcy zgonów (którą nie wiadomo jak potwierdzić). Niewątpliwie wynika ona z hipotezy liniowej bezprogowej skutków promieniowania (LNT) przyjmowanej dla potrzeb oceny narażenia osób zawodowo stykających się z promieniowaniem. Hipoteza ta zdecydowanie zawodzi w zakresie małych dawek porównywalnych z dawkami od tła naturalnego i jej usilne lansowanie w radiobiologii nie jest uprawnione jako sprzeczne z wynikami badań epidemiologicznych i wiedzą przyrodniczą (toksykologia, fizjologia, onkologia)¹⁴.

Mineło już dostatecznie wiele lat, aby prognozowane nowotwory mogły się rozwinąć i zmanifestować. Tymczasem jak wynika z raportu Forum, wśród ratowników rosyjskich stwierdzono około 30% mniejszą umieralność na raki niż średnio w Rosji, a wśród ludności

¹³ Podaję za P.E.Hodgson, *Nuclear Power, Energy and the Environment*, Imperial College Press (1999)

¹⁴ większość dyskusji na ten temat znajdujemy w rozdz. XIV tego wykładu

tzw. terenów silnie skażonych epidemiolodzy nie zauważyli żadnego wzrostu zachorowań na nowotwory (inne niż tarczycy – patrz niżej).

Nie stwierdza się też (co wcale nie dziwi specjalistów) wad genetycznych u potomstwa osób napromieniowanych. Stwierdzono natomiast (i to już w pierwszym roku!) znaczny wzrost tzw. niemych raków tarczycy, szczególnie u dzieci. Pogląd, że wzrost ten miał za swą przyczynę zwiększony poziom promieniowania w wyniku awarii był od początku kwestionowany, gdyż z wielu danych wiadomo, że raki tarczycy rozwijają się przez wiele lat zanim się ujawnią. Ponadto z danych epidemiologicznych osób poddanych leczeniu promieniotwórczym jodem wiadomo, że wystąpił u nich nie wzrost, lecz przeciwnie, deficyt raków tarczycy. Dawki zaabsorbowane przez ludność wokół Czarnobyla (patrz Tab. 16.2) były dziesiątki razy niższe, tak więc nawet blokowanie tarczycy stabilnym jodem zapewne niewiele zmieniło i tak nikły stopień narażenia.

Tab. 16.2 Średnie dawki efektywne otrzymane w latach 1986-95 na terenie skażonym po awarii w Czarnobylu¹⁵

Kraj	Średnia dawka efektywna [mSv]			
	Ze źródeł wewnętrznych	Ze źródeł zewnętrznych	Łącznie w ciągu 9 lat	Rocznie
Białoruś	5,1	2,9	8,0	0,9
Federacja Rosyjska	4,3	2,5	6,8	0,8
Ukraina	4,7	6,1	10,8	1,2

Sprawą zajmował się przez długie lata Komitet UNSCEAR, który w końcowych wnioskach swojego „Raportu 2000” nt. skutków zdrowotnych wypadku w Czarnobylu stwierdził¹¹, że: *(...)liczba raków tarczycy (około 1800) u osób napromieniowanych w dzieciństwie, zwłaszcza w silnie skażonych rejonach trzech krajów (Białorusi, Ukrainy i Rosji), jest znacznie większa niż oczekiwano na podstawie wcześniejszej wiedzy. Wysoki stopień zachorowalności i krótki okres ujawniania się tych raków są nietypowe. Przyczyną ich powstawania mogą być czynniki inne niż promieniowanie.*

Jednym z tych czynników są tzw. „nieme” raki tarczycy, nie dające łatwo dostrzegalnych objawów klinicznych, które masowo występują wszędzie na świecie. Tak np. w Kanadzie częstość niemych raków tarczycy wynosi 6 na 100 000 osób, w Polsce 9, w USA 13, a w Finlandii 35. Największy wzrost rejestracji raków tarczycy wystąpił w rejonie Homla na Białorusi: 18 raków na 100 000 mieszkańców. Zatem potencjał dla wykrycia „dodatkowych” raków w wyniku udoskonalenia i zwiększenia częstości badań tarczycy jest ogromny. Na szczęście wyleczalność raków tarczycy jest bardzo wysoka, w dobrych ośrodkach sięga powyżej 90%. Dotąd z powodu raka tarczycy zmarła na skażonych terenach jedna dziewczynka (wg innych źródeł – troje do dziesięciorga dzieci).

Przedstawione w Tab. 16.2 dawki są mniejsze od średnich dawek otrzymywanych ze źródeł naturalnych. Z całej populacji 5 159 887 osób napromieniowanych w wyżej wymienionych trzech krajach tylko 1123 osoby otrzymały w ciągu 9 lat dawkę powyżej 200 mSv (wyłączając dawki na tarczycę)¹⁶.

¹⁵ UNSCEAR Report 2000, Vol. 2, str. 541

¹⁶ UNSCEAR Report 2000, Vol. 2, str. 542

Jak wynika z raportu UNSCEAR 2000, poza rejestrowanym wzrostem zapadalności na raka tarczycy nie zaobserwowano wzrostu zachorowań i zgonów na nowotwory złośliwe, które mogłyby być spowodowane promieniowaniem jonizującym. Ryzyko zachorowania na białaczkę, będące jednym z większych zagrożeń (białaczka jest pierwszym nowotworem, który pojawia się po napromieniowaniu ze względu na krótki okres utajenia 2-10 lat), nie uległo podwyższeniu, nawet wśród członków ekip ratowniczych. Nie ma również dowodów wzrostu zachorowań na wywołane promieniowaniem choroby nie nowotworowe. Natomiast na szeroką skalę wystąpiły reakcje psychologiczne związane z awarią i spowodowane głównie strachem przed promieniowaniem, działaniem władz i mediów, a nie działaniem promieniowania.

Dominującym czynnikiem jest stres będący następstwem przymusowych przesiedleń i zerwaniem więzi społecznych. Sytuację komplikuje rozprzestrzenianie się fałszywych informacji na temat konsekwencji awarii np. o dziesiątkach lub setkach tysięcy ofiar wymienianych zarówno przez różne oficjalne czynniki, jak i proroków apokalipsy o rozmaitym rodowodzie. Sensacje zmyślane i powielane przez dziennikarzy oraz hasła „ekowojowników” (osób chętnych do walki z czymkolwiek) trafiały na podatny grunt powszechnej ignorancji, tym łatwiej, że uzasadniane były wynikami ekspertyz przedstawianych przez rządy poszkodowanych krajów, którym zależało na uzyskaniu zachodniej pomocy. Dodatkowo występują jeszcze efekty psychospołeczne uwarunkowane politycznymi, ekonomicznymi i społecznymi zmianami ostatnich lat. Nie da się ich odróżnić od psychosomatycznych konsekwencji awarii w Czarnobylu.

Trzeba na koniec przypomnieć (zwłaszcza tym, którzy uważają, że awaria w Czarnobylu była największą katastrofą XX wieku), że spowodowany katastrofą opad promieniotwórczy trwał stosunkowo krótko i był mniejszy niż ten, który spadał na nas rok w rok na przełomie lat 50- i 60-tych wskutek próbnych wybuchów broni jądrowej dokonywanych przez mocarstwa nuklearne. Przeprowadzono wówczas 2419 wybuchów (łącznie 1073 Mt TNT), w czym 543 o łącznej mocy 440 Mt dokonano w atmosferze. Dla porównania, wybuchy w Hiroszynie i Nagasaki miały łączną moc ok. 0,035 Mt TNT. Rekord mocy należy do bomby wodorowej o mocy około 50 Mt odpalonej przez ZSRR na Nowej Ziemi 30 X 1961 r. (dane za raportem UNSCEAR). O tym, że awaria reaktora w Czarnobylu dalece nie była największą katastrofą przemysłową piszemy w oddzielnym rozdziale niniejszego wykładu.

16.5.6 Działania podjęte w Polsce

Nim przejdziemy do opisu wydarzeń w Polsce warto zaznaczyć, że w interesującym nas okresie historii od 1964 r. Polska dysponowała sprawną Służbą Pomiarów Skażeń Promieniotwórczych (SPSP) koordynowaną przez Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej (CLOR) w Warszawie. W skład SPSP wchodziło 140 punktów pomiarowych rozmieszczonych na terenie całej Polski plus 2 stacje pomiarowe w CLOR. Ponadto CLOR miało możliwość mierzenia skażeń w przestrzeni powietrznej aż do wysokości stratosferycznych. CLOR był również dobrze przygotowany do podjęcia wyzwań, które stwarzałyby ewentualna wojna jądrowa. Dzięki temu z chwilą zdobycia informacji o skali awarii i skutków jakie może ona wywołać w Polsce CLOR stał się jedynym rzetelnym źródłem informacji i organem, które mógł w kompetentny sposób sugerować rządowi podejmowanie odpowiednich działań chroniących ludność przed konsekwencjami katastrofy.

27 kwietnia ani w Polsce ani innych krajach nie spodziewano się awarii jądrowej. Plany obrony cywilnej na wypadek wojny jądrowej przystawały tylko częściowo do potrzeb sytuacji wynikłej z awarii reaktora jądrowego znajdującego się w okolicy Polski. Jednak wojskowy system wykrywania skażeń promieniotwórczych był dostosowany do znacznie wyższych poziomów promieniowania występujących po ataku jądrowym. Polacy nie otrzymali z ZSRR żadnych informacji o katastrofie (mimo ustaleń obowiązujących w krajach RWPG od 1984 roku), co opóźniło nasze przygotowania ochronne o około półtora dnia.

28 kwietnia ranniem placówka SPSP w Mikołajkach (a potem kolejno inne) zgłosiła CLOR kilkakrotny wzrost mocy dawki promieniowania w powietrzu. W całej służbie SPSP wprowadzono alarmowy system pracy. Jak wspomina¹⁷ prof. Zbigniew Jaworowski z CLOR o godzinie 9. został poinformowany, że stwierdzona w Mikołajkach radioaktywność w powietrzu była 550 000 razy wyższa niż poprzedniego dnia. Podobny wzrost aktywności został też zaobserwowany w samym CLOR w Warszawie. Oczywiście obawiano się przede wszystkim, że podwyższony poziom promieniowania może pochodzić z wybuchu jądrowego. Na szczęście wkrótce okazało się, że skład izotopowy chmury radioaktywnej wskazuje na awarię reaktora jądrowego. Dalsze raporty otrzymywane ze 140 stacji monitoringu wskazywały na przesuwanie się chmury na zachód i na ZSRR jako miejsce awarii reaktora.

Informacja o powstawaniu skażeń promieniotwórczych w wyniku poważnej awarii reaktora była szokiem dla specjalistów: poziom promieniowania w powietrzu w momencie przechodzenia chmury radioaktywnej był setki i tysiące razy wyższy od tego, który rejestrowano w latach sześćdziesiątych kiedy to opad promieniotwórczy był skutkiem prób jądrowych.

Chmura radioaktywnego powietrza przesunęła się nad północno-wschodnią Polską. W południe w Warszawie stężenie izotopu ^{137}Cs w powietrzu było ponad 80 000 razy większe niż średnio rok wcześniej, stężenie izotopu jodu ^{131}I wyniosło około 100 Bq/m³ (przed awarią był niewykrywalny), zaś moc dawki promieniowania gamma była około 3 razy większa niż przeciętna. Pomimo tego globalna wielkość mocy dawki w ciągu pierwszego roku po katastrofie wzrosła w Polsce średnio o 0,3 mSv, a więc niewiele w porównaniu z roczną dawką naturalnego promieniowania (około 2,4 mSv). Dlatego – gdyby w owym czasie można było zachować zimną krew – podejmowanie szczególnych akcji ochronnych nie było konieczne. Problemem był jednak brak informacji o możliwym dalszym przebiegu katastrofy. Istniała obawa, że sytuacja radiacyjna Polski może się znacznie pogorszyć, zarówno poprzez zwiększenie emisji ze zniszczonego reaktora, jak i wskutek niekorzystnej sytuacji meteorologicznej. Należało jak najszybciej poinformować rząd i podjąć działania chroniące ludność przed skutkami awarii

Około godziny 11. CLOR przedstawiło sytuację Prezesowi Państwowej Agencji Atomistyki. Wkrótce potem na filtrze w CLOR zebrano pył promieniotwórczy z około 500 m³ powietrza i stwierdzono, że jego skład izotopowy był typowy dla procesów reaktorowych, a nie wybuchu jądrowego. O godzinie 17. informację o zagrożeniu radiacyjnym kraju CLOR przekazało Sekretarzowi Naukowemu PAN, który zobowiązał się zawiadomić premiera.

W CLOR przygotowano zalecenia ochronne. Niektóre meldunki zawierały omyłkowo zawyżone wyniki i zastraszające informacje trafiły do publicznej wiadomości. Większość pomiarów mocy dawki wskazywała jednak, że nie ma zagrożenia zdrowia od zewnętrznego

¹⁷ Z.Jaworowski, Australian Radiation Protection Society Newsletter, 2004

promieniowania gamma. Natomiast promieniotwórcze izotopy jodu wchłonięte do organizmu mogą ulec koncentracji w tarczycy. Z pobieżnych ocen wynikało, że dawka promieniowania od promieniotwórczego jodu w tarczycy dzieci może przekroczyć 50 mSv, powyżej którego Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) zalecała blokowanie tarczycy jodem nie radioaktywnym.

Dopiero o godzinie 18. radio BBC podało informację o awarii reaktora w Czarnobylu. Połączenia z Czarnobyliem były wówczas odcięte przez KGB. Agencja TASS podała mocno okrojoną informację dopiero późnym wieczorem.

O godzinie 18.30 CLOR zwrócił się do Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych z prośbą o codzienne pobieranie prób powietrza z siedmiu wysokości w troposferze i stratosferze wzdłuż północno-wschodniej granicy. W następnych dniach wykonano 60 lotów, a zdobyte w ten sposób informacje wykorzystano do prognozowania skażeń. W godzinach popołudniowych nawiązano kontakt ze specjalistami z innych krajów (Anglii, Francji, Finlandii, Szwecji) wymieniając informacje o skażeniach oraz planowanych przedsięwzięciach.

29 kwietnia o godzinie 4.00 w KC PZPR rozpoczęło się posiedzenie kilku członków Biura Politycznego, członków rządu i Komitetu Obrony Kraju. Wzięli w nim udział dwaj eksperci z CLOR oraz Wojskowego Instytutu Higieny i Epidemiologii. Przyjęto główne kierunki ochrony ludności i uzgodniono, że o sytuacji należy poinformować społeczeństwo w porannych audycjach radiowych, a następnie w prasie i w telewizji.

O godzinie 6:00 generał Wojciech Jaruzelski przybył na to posiedzenie i powołał specjalną Komisję Rządową pod przewodnictwem wicepremiera Zbigniewa Szalajdy. Komunikatów dla społeczeństwa nie ogłoszono. W raporcie Komisji Rządowej nie ma wzmianki o nocnym posiedzeniu w KC podczas którego podjęto najważniejsze decyzje. Pierwsze zebranie komisji Rządowej rozpoczęło się o godzinie 8:00. Około godziny 11:00 podjęto formalną decyzję o wprowadzeniu profilaktyki jodowej.

W Ministerstwie Zdrowia ustalono (pierwsza taka decyzja w historii), że formą masowej profilaktyki jodowej będzie podanie nie tabletek z jodkiem potasu (KI), lecz tzw. płynu Lugola. Akcje rozpoczęto wieczorem i kontynuowano nocą w województwach północno-wschodnich. Akcja przebiegała bardzo sprawnie. Podawanie płynu Lugola zorganizowano we wszystkich przedszkolach, szkołach, ośrodkach zdrowia i aptekach. Około 75% populacji dzieci Polsce w tych województwach przyjęło stabilny jod w ciągu pierwszych 24 godzin akcji. W innych rejonach kraju, odpowiednio do zmieniającej się sytuacji radiacyjnej, akcja ciągnęła się jeszcze do 5 maja. Jod otrzymało 18,5 miliona osób, w tym 10,5 miliona dzieci. W świetle danych o wpływie promieniotwórczego jodu na tarczycę, jakimi dziś dysponujemy, była to nadmierna ostrożność, jednak wtedy, w warunkach ograniczonej wiedzy oraz niepewności co do rozwoju sytuacji radiacyjnej, decyzja ta była słuszna. Stała się ona przykładem umiejętności szybkiego podejmowania decyzji i przeciwdziałania potencjalnym skutkom katastrofy. Obecnie jest powszechnie na świecie uznawana za wzorową. Dla porównania: po wypadku w Three Mile Island w USA tabletki jodowe dostarczono w rejon awarii dopiero po 8 dniach, a w ZSRR profilaktykę jodową rozpoczęto 25 maja 2006 r., a więc w miesiąc po awarii.

30 kwietnia skażenia dotknęły już cały kraj. Jeszcze przed południem rejestrowano w Warszawie wysokie skażenie powietrza, które jednak po południu i w nocy szybko spadło.

Ze względu na skażenia żywności i konieczność ochrony zdrowia dzieci, na żądanie Komisji w pierwszych dniach maja sprowadzono z zagranicy 2000 ton mleka w proszku. Holandia, główny eksporter tego mleka, odmówiła Polsce dostawy. Interwencja ambasadora USA w Warszawie Johna Davisa spowodowała natychmiastową wysyłkę amerykańskiego mleka w proszku do Holandii drogą morską. Wtedy Holandia zdecydowała się wysłać samolotami mleko potrzebne polskim niemowlętom. Holenderskie mleko pojawiło się w sklepach następnego dnia.

W ciągu maja CLOR i Instytut Energii Atomowej w Świerku prowadziły pomiary zawartości izotopów promieniotwórczych w ciałach osób z rejonu Warszawy i dalszych okolic. Pomiary jodu promieniotwórczego w tarczycy prowadzono w CLOR, Zakładzie Ochrony Radiologicznej IEA w Świerku, Zakładzie Medycyny Nuklearnej Centralnego Szpitala Klinicznego WAM w Warszawie, a także w innych placówkach wojskowych zakładów leczniczych. Stacje SPSP prowadziły masowe pomiary skażeń mleka, roślin i gleby na terenie całego kraju. W połowie maja zaprzestano¹⁸ wykonanie pomiarów izotopu jodu ^{131}I w tarczycy dzieci i dorosłych wschodnich rejonów Polski.

31 maja na polecenie prezesa PAA wstrzymano wszystkie pomiary ^{131}I w tarczycy wykonywane przez CLOR.

Komisja Rządowa pracowała do 18 czerwca. W swoim raporcie końcowym stwierdziła – zgodnie z danymi CLOR - że „ze względu na krótki okres występowania podwyższonych wartości mocy dawki, sumaryczna dawka roczna będzie leżała znacznie poniżej wartości dopuszczalnej wynoszącej 5 mSv/rok”. Pomiary zawartości izotopów gamma-promieniotwórczych w organizmach ludzi dorosłych (przebadano ponad 1000 osób) kontynuowano do końca 1986 roku, a na mniejszych grupach ludności, głównie z okolic Warszawy, także w latach późniejszych. Nie stwierdzono aby wchłonięte dawki były groźne dla badanych osób.

W r. 1988 Komitet UNSCEAR opublikował raport o Czarnobylu, w którym ocenił, że w ciągu pierwszego roku po katastrofie ludność Polski otrzymała średnio dawkę 0,3 mSv, a w ciągu następnych 70 lat otrzyma łączną dawkę promieniowania 0,9 mSv.

16.5.7 Skutki zdrowotne w Polsce

Jeszcze do tej pory w środkach masowego przekazu pojawiają się doniesienia o katastrofalnych dla Polaków skutkach awarii w Czarnobylu. Jest wiele osób, które straciły kogoś z bliskich, u kogo stwierdzono po roku 1986 chorobę nowotworową i którym lekarz powiedział, że przyczyną było skażenie promieniotwórcze. Są rodzice dzieci obciążonych wadami wrodzonymi, którzy odpowiedzialnością za to obarczają owo feralne wydarzenie. Nikomu zaś nie przychodzi do głowy uzalać się na regularnie otrzymywaną, niemal 10-krotnie wyższą dawkę promieniowania naturalnego, czy na 1,5 razy wyższą dawkę promieniowania związaną z rentgenowską diagnostyką medyczną.

Minęło już ponad 20 lat od skażenia promieniotwórczego spowodowanego opisywaną awarią. Czas ten wykorzystano na weryfikację różnych hipotez dotyczących skutków i na rzetelne analizy zdrowotności na terenach Polski. Nie ma żadnych wiarygodnych doniesień

¹⁸ jak się wydaje wskutek decyzji Prezesa PAA

o zauważalnych zdrowotnych następstwach awarii czarnobylskiej. Dotyczy to zarówno skutków wczesnych i bezpośrednich, jak też odległych, takich jak wady wrodzone lub nowotwory.

Średnia dawka na całe ciało jaką w ciągu 70 lat otrzymamy w Polsce w wyniku awarii czarnobylskiej wynosi 0,9 mSv, czyli będzie znacząco mniejsza od 70-letniej dawki promieniowania naturalnego, sięgającej około 170 mSv. Ryzyko wystąpienia zmian dziedzicznych na tle mutacji popromiennych jest w Polsce znikomo małe. Jak wynika z badań UNSCEAR, ryzyko to jest poniżej 10^{-5} /mSv, czyli wielokrotnie mniejsze niż ryzyko wywołania nowotworu złośliwego.

Należy jeszcze raz podkreślić, że oceny przedstawiane przez różne organizacje (w tym także wspomniane już Forum Czarnobylskie, 2005) opierają się na bardzo pesymistycznych i naukowo nieuzasadnionych założeniach. To, że w Polsce nie mamy się czego obawiać można wnosić na podstawie danych zamieszczanych w najnowszych raportach WHO i UNSCEAR¹⁹. Z kolei, na internetowej stronie Państwowej Agencji Atomistyki <http://www.paa.gov.pl> czytamy: *Nie ma dotąd żadnych pewnych doniesień o zauważalnych zdrowotnych następstwach awarii czarnobylskiej w Polsce. Dawki, jakie otrzymali Polacy były tak małe, że nie mogą prowadzić do żadnych uchwytynych klinicznie skutków. Dotyczy to również możliwości zachorowań na raka tarczycy u dzieci polskich, dodatkowo ograniczonej nieco opóźnionym, ale jednak skutecznym podaniem profilaktycznych preparatów jodowych (płyn Lugola); ewentualność ta nie może być stwierdzona w żadnych badaniach epidemiologicznych. W sumie rozpowszechniane wielokrotnie, głównie w środkach masowego przekazu opinie o katastrofalnych następstwach zdrowotnych awarii czarnobylskiej w Polsce nie znajdują żadnego uzasadnienia w obiektywnych faktach. Na pewno spowodowały one powszechny lęk, obawy przed przyszłością i liczne inne szkody psychologiczne i nie tylko (np. aborcje). Może to być przyczynek do oceny poczucia odpowiedzialności dziennikarzy i innych osób, rozpowszechniających w naszym kraju nie sprawdzone i bałamutne informacje dla taniej sensacji.*

W świetle przedstawionych wcześniej danych trudno zgodzić się z oceną o "nieco opóźnionej" akcji podania płynu Lugola, gdyż nawet dzisiaj zapewne akcja nie przebiegałaby sprawniej. Także z punktu widzenia rozprzestrzeniania informacji warto zwrócić uwagę, że pomimo początkowej chęci władz wprowadzania społeczeństwa w błąd, ostatecznie polska rzetelna informacja była wyjątkowa w prasie światowej, a przez ekspertów amerykańskiej *Food and Drug Administration* została potem uznana za najbardziej przejrzystą i pożyteczną. Prasa zachodnioniemiecka wyraziła podobną opinię: *Polskie media zwróciły od początku na siebie uwagę obszerną i rzeczową informacją* (Tages Anzeiger 2.05.86); *Polacy w sposób najbardziej otwarty poinformowali własną opinię publiczną i zagranicę o skutkach awarii* (Volksblatt Berlin 3.05.86). Wiele cennych i barwnych wspomnień z tego gorącego okresu można znaleźć w artykule prof. Jaworowskiego pt. „Demony Czarnobyla” opublikowanym w kwietniowym numerze Świata Nauki z 2006 r.

¹⁹ Jest to także główny wniosek opublikowanej jeszcze w roku 1999 pracy zbiorowej Dariusza Grabowskiego, Edwarda T. Józefowicza i Juliana Linieckiego: *Awaria czarnobylska – skutki zdrowotne w Polsce*, Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Warszawa (1999). Nota bene, w cytowanym opracowaniu do ocen skutków zastosowano hipotezę LNT, której zasadność jest bardzo wątpliwa, a prognozy na niej oparte jak dotąd się nigdy nie sprawdziły.

16.5.8. Koszty sprzątania

Katastrofa w Czarnobylu jest globalnym zjawiskiem ekologicznym niespotykanego dotąd typu. Towarzyszy jej przede wszystkim ogólnoświatowa radiofobia, która nie ogranicza się do hałaśliwych akcji przeciwników energetyki jądrowej, lecz przynosi wymierne straty zdrowotne (stres), społeczne (aborcje, przesiedlenia) i ekonomiczne (kierowanie sił i środków na niepotrzebne działania). Awarii towarzyszy dramat tysięcy uchodźców z okolic Czarnobyla wysiedlonych często bez potrzeby i w miejsca bardziej skażone. To wreszcie długotrwałe skażenie ziemi i wody na szczście na ograniczonym obszarze.

Źródłem strat są różnego rodzaju ograniczenia wprowadzone aby zmniejszyć narażenie na promieniowanie, które utrudniają normalną pracę przemysłu i rolnictwa. Prowadzi to do zubożenia ludzi i kolejnych stresów wpływających na zdrowie. Zamknięcie elektrowni pozbawiło pracy bardzo wielu ludzi. Unia Europejska i Stany Zjednoczone mają pomóc w tworzeniu specjalnego programu, który ma złagodzić społeczne skutki katastrofy.

Poważnym i kosztownym problemem pozostaje tzw. sarkofag wokół zniszczonego reaktora (rys. 16.10), w którym znajduje się około 200 ton zużytego i świeżego paliwa, materiały promieniotwórcze oraz skażone urządzenia i przedmioty zakopane na terenach zamkniętych, które mogą – bez odpowiedniego dozoru – stanowić znaczne ryzyko skażenia wód gruntowych. W 1994 roku francuskie konsorcjum Alliance wygrało konkurs na projekt budowy *supersarkofagu* wokół już istniejącego sarkofagu. W przedsięwzięciu tym mają uczestniczyć liczne firmy europejskie. Rozpoczęto już wspólne prace. Jeśli projekt wejdzie w życie, materiały konstrukcyjne będą kosztować 20-30 mln USD, zaś planowane na 5 lat prace budowlane ponad 300 mln USD. Przewiduje się, że ostateczne zebranie radioaktywnych pozostałości po katastrofie zajmie ok. 30 lat.



Rys. 16.10 Sarkofag wokół zniszczonego reaktora

Ustalono mechanizmy finansowania przez zagranicę wydatków na modernizację pracujących reaktorów jądrowych. Ostatni działający blok EJ Czarnobyl został zamknięty 15 grudnia 2000 r. Amerykanie dali 78 mln USD na konserwację sarkofagu nad IV blokiem elektrowni i 2 mln USD na poprawę bezpieczeństwa w innych elektrowniach. Tymczasem zamknięcie Czarnobyla, konserwacja sarkofagu i utworzenie nowych miejsc pracy dla pracowników elektrowni ma kosztować w sumie prawie 1500 mln USD. W budżecie na rok 2000 rząd ukraiński przeznaczył na zamknięcie Czarnobyla zaledwie 20 mln USD. Amerykanie proponują, by przedsięwzięcie sfinansował Europejski Bank Odbudowy i Rozwoju. Sprzeciwiają się temu Niemcy, którzy nie zgadzają się na rozbudowę energetyki jądrowej na Ukrainie.

16.5.9 Wyciągnięte wnioski

Bezpośrednią konsekwencją katastrofy było zwiększenie bezpieczeństwa reaktorów używanych w Związku Radzieckim – modernizacja już istniejących reaktorów i uważniejsze podejście do spraw bezpieczeństwa w fazie projektowania nowych. Wprowadzono modyfikacje we wszystkich nadal czynnych reaktorach typu RBMK: w prętach kontrolnych dodano pochłaniacze neutronów i zwiększono wzbogacenie paliwa, dzięki czemu reaktory te przy małej mocy stały się znacznie bardziej stabilne. Automatyczne mechanizmy wyłączające działają obecnie szybciej, a inne mechanizmy bezpieczeństwa zostały udoskonalone. Duże znaczenie miała tu wymiana myśli naukowo-technicznej z krajami zachodu, które dodatkowo dały pomoc finansową. Pewne rozwiązania opracowane w związku z awarią mogły znaleźć zastosowanie także w zachodnich elektrowniach jądrowych. Po roku 1989 ustanowiono ponad 50 „związków bliźniaczych” między elektrowniami jądrowymi na Wschodzie i na Zachodzie. Większości z nich patronuje Światowe Stowarzyszenie Użytkowników Elektrowni Jądrowych (WANO – od ang. *World Association of Nuclear Operators*) utworzone w roku 1989 i zrzeszające 130 użytkowników elektrowni jądrowych.

Wobec tego, że energetyka jądrowa jest niezbędna zarówno dla Ukrainy jak i dla Federacji Rosyjskiej, oba te państwa zaplanowały budowę nowych elektrowni jądrowych. Ukraina uruchomiła bloki z reaktorami WWER o mocy 1000 MWe w elektrowni w Rovno i w elektrowni Chmielnicki, a Rosja planuje intensywną rozbudowę energetyki jądrowej opartą - podobnie jak na Ukrainie - na reaktorach WWER 1000, spełniających współczesne wymagania bezpieczeństwa jądrowego.

Według informacji PAA opracowanej na podstawie danych z *Nuclear Safety Assistance Coordination Centre* (Centrum Koordynacji Pomocy w Zakresie Bezpieczeństwa Jądrowego), pomoc udzielona przez Zachód, to w sumie prawie 1 mld USD na ponad 700 projektów związanych z bezpieczeństwem reaktorów w państwach dawnego Bloku Wschodniego. W roku 1998 w ramach umowy z USA postanowiono, że w strefie wyłączonej powstanie międzynarodowe laboratorium radiologiczno-ekologiczne.

Paradoksalnie awaria w Czarnobylu wykazała, że energetyka jądrowa jest energetyką bezpieczną. Autorzy porównujący awarię czarnobylską do wybuchu jądrowego obnażają swoją głęboką niewiedzę o bombach. W Czarnobylu śmiertelne zagrożenie wystąpiło w strefie o promieniu 2 km od reaktora (patrz rys. 16.2), natomiast śmiertelne skażenia po wybuchu bomby jądrowej o sile 1 Mt TNT rozciągają się w strefie o promieniu kilkuset kilometrów. O skutkach długofalowych nawet nie ma co wspominać.

Korzyścią dla państw najbardziej poszkodowanych i dla całej społeczności międzynarodowej jest opracowanie zaleceń i programów działań dotyczących sfer ekologicznej, zdrowotnej i społeczno-ekonomicznej. Przypomniano znaną z ochrony radiologicznej zasadę ALARA (napromieniowanie powinno być tak małe, jak to rozsądnie osiągalne)²⁰, nakazującą dostosować działania do skali zagrożenia. Tak więc środki pomocowe powinny być adresowane do osób rzeczywiście poszkodowanych, programy medyczne powinny obejmować osoby faktycznie zagrożone, a osadnictwo, przemysł i rolnictwo powinny wrócić na tereny nadające się do eksploatacji (porzucone często bez potrzeby). Część zaleceń pozostanie zapewne w sferze pobożnych życzeń, ale już samo sformułowanie ich ma swoją wartość.

Przykłady takich zbiorów zaleceń można znaleźć w raportach:

- raport UNDP, UNICEF, UN-OCHA i WHO z 2002 r. *The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident: A Strategy and Recovery*
- The Chernobyl Forum: *Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine*, IAEA 2005

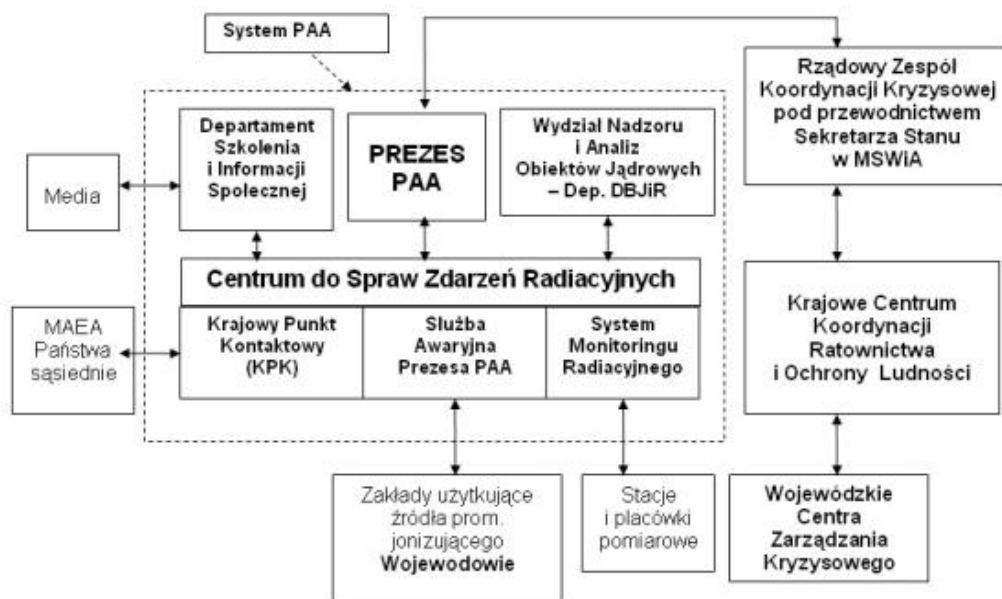
Pytaniem, które można by zadać dzisiaj jest, czy w wypadku podobnej awarii którejś z licznych elektrowni jądrowych w pobliżu naszego kraju władze Polski reagowałyby szybciej, informowały sprawniej, a całość akcji byłaby koordynowana lepiej niż w roku 1986? Na pewno przypadek Czarnobyla wiele nas nauczył, ale odpowiedź na postawione pytanie nie jest wcale jednoznaczna, gdyż doświadczenie pokazuje, że często w obliczu realnej sytuacji misternie skonstruowane plany mogą zawieść.

Obecnie w strukturze Państwowej Agencji Atomistyki działa Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych (CEZAR), które jest podstawową komórką systemu bezpieczeństwa radiacyjnego kraju. W Centrum zainstalowane są bazy danych i systemy informatyczne wspomagania decyzji, które stanowią podstawowe narzędzia do oceny sytuacji radiacyjnej. Centrum systematycznie zbiera informacje o poziomie promieniowania ze stacji monitoringu rozmieszczonych na terenie całego kraju oraz dysponuje ruchomym laboratorium do pomiaru skażeń, wyposażonym w szereg niezbędnych instrumentów pomiarowych. Ma ono stały system wczesnego powiadamiania i łączności z odpowiednimi systemami utrzymywanymi w Unii Europejskiej. Przy Prezesie PAA działa Służba Awaryjna współdziałająca ze służbami wojewody właściwego dla miejsca zdarzenia. Całodobowo działa też Krajowy Punkt Kontaktowy (KPK) służący wczesnemu powiadamianiu o awarii jądrowej, jak tego wymaga Konwencja MAEA z 1986 roku. KPK zapewnia szybkie uzyskanie informacji o zagrożeniach radiacyjnych mających swe źródło poza granicami Polski, pozwalającej na niezwłoczne podjęcie działań przez Centrum. Funkcje KPK uzupełnia działający w sposób ciągły punkt ostrzegawczy (*warning point*), którego głównym zadaniem jest przyjmowanie powiadomień o awariach z zagranicy i wysyłanie powiadomień za granicę w razie zaistnienia awarii w kraju. Wreszcie, w Departamencie Bezpieczeństwa Jądrowego i Radiacyjnego PAA działa Wydział Nadzoru i Analiz Obiektów Jądrowych, grupujący specjalistów kompetentnych w zakresie technologii obiektów jądrowych zlokalizowanych w pobliżu granic Polski. Pracownicy Wydziału na bieżąco śledzą stan ich bezpieczeństwa na podstawie dostępnych informacji oraz obserwacji własnych poczynionych podczas wizyt technicznych w tych obiektach. Ich wiedza pozwala na uzyskanie szybkiej, wstępnej oceny sytuacji w pierwszej fazie awarii przy małej liczbie danych i w warunkach niepewności.

²⁰ Zasada ta, podobnie jak hipoteza LNT, powinna być stosowana w bardzo krytyczny sposób

Organizację obecnego systemu bezpieczeństwa przedstawiono na poniższym schemacie (rys. 16.11). Można mieć zatem nadzieję, że Polska jest obecnie znacznie lepiej przygotowana na wypadek awarii typu czarnobylskiej niż było to w roku 1986.

Umiejscowienie Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych CEZAR w strukturze PAA w powiązaniu z instytucjami zewnętrznymi



Rys. 16.11 Schemat działania Centrum CEZAR

Kończąc ten paragraf warto zauważyć, że odwiedzający dziś skażone tereny wokół Czarnobyla nie mogą się nadziwić bujnej roślinności, wspaniałemu drzewostanowi i obfitości zwierzyny w lasach, rzekom i jeziorom pełnym ryb²¹. Opuszczone miasto Prypeć stało się sanktuarium dla ponad trzydziestu gatunków ptaków. Zamknięta strefa wokół Czarnobyla stała się wręcz oazą dzikiej przyrody, a niewątpliwie stosunkowo duża zawartość radionuklidów w organizmach przynajmniej niektórych zwierząt żyjących zdrowo w lasach potwierdza nieszkodliwość małych dawek promieniowania. Rośliny i zwierzęta najwyraźniej sobie dobrze radzą z takimi dawkami, czemu więc człowiek ma być gorszy?

²¹ Polecamy tu szczególnie artykuł: R.K.Chesser, R.J.Baker, *Growing Up with Chernobyl*, American Scientist 94 (2006) 542-549

16.6 Czy możliwe są jeszcze inne awarie²²?

16.6.1 Awarie projektowe i hipotetyczne lub „poza projektowe”

Choć wobec nowoczesnych zabezpieczeń, które omówiliśmy w rozdziale VIII, nie grozi nam awaria taka jak w Czarnobylu, są jednak możliwe inne awarie, których prawdopodobieństwo jest tak małe, że w projekcie reaktora nie są one objęte mianem „projektowych”, lecz klasyfikuje się je jak jako „hipotetyczne” lub „poza projektowe”.

W przypadku awarii projektowej, w elektrowni muszą istnieć układy bezpieczeństwa wystarczające do tego, by opanować skutki takiej awarii przy założeniu, że jednocześnie z wydarzeniem inicjującym awarię, jak np. rozerwanie rurociągu w pierwotnym układzie chłodzenia reaktora, wystąpi jednocześnie zanik zasilania elektrowni energią elektryczną z sieci zewnętrznej, awaria jednego z układów bezpieczeństwa mających przeciwdziałać awarii, np. nie da się uruchomić awaryjny generator Diesla i utracimy przez to wszystkie napędzane nim pompy i zawory, a ponadto inny z układów bezpieczeństwa będzie utracony wskutek zaistniałej awarii, np. układ wtrysku wody chłodzącej będzie wtryskiwał wodę właśnie do miejsca rozerwania obiegu – a więc woda ta będzie praktycznie stracona.

W analizach bezpieczeństwa, których całość stanowi raport bezpieczeństwa szczegółowo analizowany i zatwierdzany przez Dozór Jądrowy, należy udowodnić, że przy takich pesymistycznych założeniach będą jeszcze istniały duże zapasy bezpieczeństwa, pozwalające uchronić paliwo reaktora przed zniszczeniem i nie dopuścić do dużych uwolnień radioaktywności poza obudowę bezpieczeństwa. Dawki promieniowania w okolicy elektrowni jądrowych po awariach projektowych muszą pozostać w granicach określonych w przepisach Dozoru Jądrowego jako dopuszczalne, tak aby nie było potrzeby ewakuacji ludności ani ograniczania produkcji rolnej.

W przypadku awarii poza projektowych rozważamy scenariusze, w których poza pierwotną awarią dochodzi do utraty nie tylko jednego, ale wszystkich podukładów bezpieczeństwa, np. wszystkich awaryjnych generatorów Diesla, choć są one niezależne od siebie, umieszczone w osobnych pomieszczeniach, chronione przed pożarem, przed powodzią, wybuchami z zewnątrz, mają niezależne zasilanie itd. Taki scenariusz prowadzi z definicji do pełnej utraty wszelkiego zasilania elektrycznego prądem zmiennym, a więc do utraty możliwości uruchomienia pomp i związanych z nimi układów awaryjnego chłodzenia rdzenia, co prędzej czy później musi doprowadzić do przegrzania paliwa i stopienia rdzenia, a potem do spłynięcia rozżarzonego stopionego paliwa na dno ciśnieniowego zbiornika reaktora. Stwarza to groźbę przetopienia zbiornika reaktora, wypłynięcia stopionego rdzenia do wnętrza obudowy bezpieczeństwa, zniszczenia obudowy i uwolnienia dużych ilości radioaktywności poza teren elektrowni jądrowej. W projektach dawniej budowanych elektrowni jądrowych nie rozważano takich hipotetycznych awarii, choć w elektrowniach były układy i cechy bezpieczeństwa pozwalające w dużej mierze przeciwdziałać zagrożeniu. Projektanci wykazywali, że prawdopodobieństwo awarii hipotetycznych jest tak małe – np. raz na milion lat - że można nie zajmować się ich skutkami. Obecnie sytuacja zmieniła się – opracowano procedury działań i wprowadzono środki techniczne pozwalające do ograniczenia skutków nawet awarii hipotetycznych z całkowitym stopieniem rdzenia. Zanim jednak przejdziemy do ich omówienia, zapoznajmy się z odpornością elektrowni jądrowych na awarie projektowe.

²² Ostatni paragraf niniejszego rozdziału stanowi zmodyfikowany tekst artykułu A.Strupczewskiego, *Czy awaria taka jak w Czarnobylu może powtórzyć się w polskiej elektrowni jądrowej?*, Biuletyn PSE, 5 (2006), str. 3

16.6.2 Odporność elektrowni jądrowych na awarie projektowe

Od początku rozwoju energetyki jądrowej budowane w krajach zachodnich elektrownie jądrowe były projektowane wg zasady, że układy bezpieczeństwa muszą wystarczyć do opanowania awarii w dowolnym elemencie elektrowni, nawet jeśli awaria ta wystąpi w najbardziej niewygodnym dla operatora elemencie i najbardziej niesprzyjającym momencie pracy. Z założenia towarzyszące awarii pojedyncze uszkodzenie może wystąpić w dowolnym systemie elektrowni, również takim, który przeznaczony jest do opanowania tej właśnie awarii. Projektant elektrowni musiał opracować scenariusz przebiegu takiej awarii, przyjmując najbardziej niekorzystne założenia, np. że wskutek awarii nastąpi utrata zasilania elektrycznego z sieci zewnętrznej (niezależnie od dodatkowego pojedynczego uszkodzenia postulowanego w dowolnym układzie elektrowni jądrowej) i udowodnić, że istniejące układy bezpieczeństwa wystarczą, by zapewnić wyłączenie elektrowni, jej wychłodzenie i powstrzymanie uwolnień substancji promieniotwórczych. A dowód taki nie był wcale łatwy, bo przeciw projektantowi występowali specjaliści Dozoru Jądrowego, których głównym zadaniem i powodem do chwały było znalezienie słabych punktów w rozumowaniu projektanta i zmuszenie go do dodatkowych środków ostrożności. Taka procedura poprzedzająca wydanie licencji na budowę elektrowni jądrowej trwała zwykle 3-4 lata i wymagała intensywnej pracy wielu specjalistów. Specjaliści dozoru wymagali wiele od projektanta. Według np. przepisów amerykańskich musieli oni w chwili akceptacji projektu podpisać oświadczenie, w którym wyraźnie stwierdzali, że sprawdzili wszystkie cechy bezpieczeństwa projektu (specjalnie omówione w wymaganiach dozoru), i że są w pełni przekonani, że przedstawiony projekt spełnia wszystkie postawione przez dozór wymagania. Poza specjalistami dozoru, bezpieczeństwo elektrowni kwestionowali też eksperci wynajmowani przez organizacje antynuklearne, które korzystając z dotacji państwowych na ten cel prowadziły długie procesy sądowe przeciw budowie elektrowni jądrowych. Pełna jawność projektu i subwencje rządu dla „prostych obywateli” walczących z „potężnymi organizacjami przemysłu nuklearnego” ułatwiały krytykę rozwiązań przyjmowanych w projekcie i często opóźniały budowę elektrowni, ale też służyły jako środki kontroli projektantów, stale wystawionych na możliwą krytykę społeczną.

Chociaż budowa elektrowni jądrowej jest skomplikowana, podstawowy warunek bezpieczeństwa jest bardzo prosty: dopóki paliwo jądrowe pozostaje dobrze chłodzone wodą, wszelkie zakłócenia w pracy elektrowni powodują znikome skutki dla środowiska i człowieka. Dzieje się tak dlatego, że ogromna większość produktów rozszczepienia znajduje się w pastylkach paliwowych i tylko przegrzanie paliwa i przetopienie jego koszulki może spowodować ich znaczące uwolnienie poza elementy paliwowe. Ucieczka chłodziwa z reaktora, choć powoduje spektakularny wypływ pary, nie stwarza jeszcze poważnego zagrożenia, jeśli paliwo pozostaje dobrze chłodzone i pokryte wodą. Dlatego w przypadku awarii trzeba zrealizować trzy podstawowe zalecenia:

- Wyłączyć reaktor (by zmniejszyć intensywność grzania paliwa)
- Utrzymać paliwo pod wodą (do tego służą układy awaryjnego zalewania rdzenia)
- Uchronić obudowę bezpieczeństwa przed utratą szczelności (by nie dopuścić do ucieczki produktów rozszczepienia).

Trudność polega na tym, że te stosunkowo proste wymagania muszą być spełnione we wszystkich warunkach awaryjnych, nawet bardzo mało prawdopodobnych.

Jak pamiętamy, reaktory PWR samoczynnie zmniejszają moc przy zaburzeniach chłodzenia, a do wyłączenia reaktora wykorzystujemy siłę ciężkości, tak że pręty bezpieczeństwa zawieszone nad rdzeniem zawsze spadają w dół. Zapewnia to niezawodne wyłączanie reaktora w razie awarii. Dlatego za najtrudniejsze zadanie układów bezpieczeństwa uważa się utrzymanie rdzenia reaktora pod wodą. Głównym zagrożeniem jest rozerwanie obiegu pierwotnego, po którym woda pod ciśnieniem wypływa gwałtownie z reaktora. Powoduje to spadek ciśnienia w obiegu i przemianę wody w parę. Wobec tego, że para odbiera ciepło od paliwa znacznie gorzej niż woda, temperatura paliwa rośnie i jeśli do rdzenia nie dostarczymy wody, może nastąpić przegrzanie paliwa i wydzielenie zeń produktów rozszczepienia. Obieg pierwotny chłodzenia reaktora projektowany jest więc z dużym zapasem bezpieczeństwa, tak by nie groziło mu uszkodzenie ani w przypadku gwałtownych zmian temperatury chłodziwa, ani wskutek wstrząsów sejsmicznych i innych możliwych obciążeń. Wszystkie możliwe stany pracy analizuje się starannie i dobiera się wytrzymałość rurociągów, zaworów i innych elementów zgodnie z najwyższymi wymaganiami stawianymi przez odpowiednie przepisy. Ponadto, jeśli operator wykryje dostatecznie wcześniej przeciek powstały w wyniku pęknięcia rurociągu w obiegu pierwotnym, to może wyłączyć reaktor, obniżyć ciśnienie w tym obiegu, a po wystudzeniu reaktora dokonać potrzebnych napraw. Zapobiega to niebezpieczeństwu awarii i pozbawienia reaktora chłodziwa w czasie, gdy jeszcze generuje on duże ilości ciepła. Dlatego we współczesnej praktyce energetyki jądrowej wprowadzono koncepcję „przecieku przed rozerwaniem”, (ang. *Leak before Break – LBB*), która wymaga wprawdzie zainstalowania i utrzymywania w pracy dwóch lub trzech czułych i dokładnych układów wykrywania przecieków, ale znakomicie obniża potencjalną częstość rozerwania rurociągów.

Dane statystyczne zbierane w elektrowniach jądrowych wskazują, że małe przecieki o powierzchni wypływu wody rzędu kilku milimetrów mogą zdarzać się dość często, około raz na 10 lat pracy reaktora. Nie stanowią one zagrożenia, bo układ napełniania obiegu pierwotnego może bez trudu uzupełniać stan wody w obiegu, ale dają wskazówkę, że należy podjąć działania zaradcze. Większe przecieki są rzadsze, np. przecieki przez uszczelnienia pomp obiegu pierwotnego występują raz na 20-200 lat, rozerwanie rurki wymiany ciepła w wytwornicy pary raz na 100-1000 lat, a małe przecieki, których już nie może pokryć układ uzupełniania obiegu pierwotnego występują około raz na 1000 lat. Duże rozerwanie rurociągu może zdarzyć się raz na około 1000-10 000 lat, ale jeśli w reaktorze wprowadzone są układy wykrywania przecieku przed rozerwaniem, to częstość dużych rozerwania obiegu pierwotnego spada około 100 razy, do raz na milion lat (!) pracy reaktora.

Elektrownie jądrowe budowane w krajach OECD były projektowane tak, by nie było znaczących zagrożeń zdrowotnych ani potrzeby ewakuacji ludności dla wszystkich awarii, które mogły zdarzyć się częściej niż raz na 10 000 lat. Dotychczasowe doświadczenie, które obejmuje ponad 10 000 reaktorów-lat pracy reaktorów energetycznych typu PWR, BWR i im podobnych pokazuje, że cel postawiony przed energetyką jądrową²³ został już osiągnięty przez obecnie pracujące reaktory. Jedyna awaria z uszkodzeniem rdzenia w elektrowni jądrowej w TMI tylko potwierdza ten fakt. Co więcej, nie każda awaria ze stopieniem rdzenia powoduje duże uwolnienia produktów radioaktywnych poza elektrownię. Przeciwnie, obudowa bezpieczeństwa zapewnia że uwolnienia te mogą wystąpić dużo rzadziej, raz na sto tysięcy lub raz na milion lat.

²³ INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP: *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*, Safety Series No 75-INSAG-3, IAEA, Vienna (1988).

16.6.3 Skutki awarii projektowych

W energetyce jądrowej wprowadzono zasadę, że w przypadku normalnej eksploatacji i zdarzeń oczekiwanych przy normalnej eksploatacji, dawki promieniowania, otrzymane przez człowieka mieszkającego na granicy elektrowni, muszą być bardzo małe, przy awariach zdarzających się rzadko mogą być wyższe, a przy awariach bardzo rzadkich mogą sięgać granic uznanych za dopuszczalne i określonych w przepisach. Całą gamę takich różnych awarii analizuje się w projekcie i określa się je jako awarie projektowe, to jest takie dla których projekt reaktora zapewnia wymagany stopień bezpieczeństwa. W tabeli 16.3 pokazano nie tylko oczekiwaną częstość różnych kategorii awarii, ale i wielkość granicznych dawek promieniowania uznanych za dopuszczalne przy tych awariach. Jak widać, istnieje gradacja skutków dopuszczalnych, o wielkości uzależnionej od częstości awarii.

Tablica 16.3 Kryteria akceptowalności uwolnień radioaktywnych z elektrowni jądrowej²⁴

Kategoria projektowa	Definicja	Częstość zdarzeń początkowych	Kryteria akceptowalności i dawki dla osób z grupy krytycznej ludności np. w Belgii	
			Parametry elektrowni jądrowej	Dawka mSv
1	Normalna eksploatacja		W granicach normalnej eksploatacji zgodnie ze specyfikacją techniczną	0,13
2	Zakłócenia	1 na rok do 1 na sto lat	Parametry procesu w granicach odpowiednich kryteriów akceptowalności	0,5
3	Awarie, mała częstość	1 na sto do 10000 lat	Ograniczone uszkodzenia paliwa. Może być konieczne wyłączenie elektrowni dla inspekcji	5
4	Awarie, b. mała częstość	Poniżej 1 na 10 000 lat	Utrzymanie geometrii rdzenia pozwalającej na skuteczne chłodzenie, Ponowne uruchomienie elektrowni może być niemożliwe.	20
-	Awarie poza projektowe	Poniżej 1 na 100 000 lat	Dawniej pomijane w analizach. Obecnie wymaga się ograniczenia ich częstości i skutków radiologicznych, przepisy różne w różnych krajach.	

16.6.4 Skutki awarii poza projektowych

Typową awarią poza projektową była opisana wcześniej awaria w Three Mile Island. Choć w następstwie awarii rdzeń i reaktor zostały uszkodzone tak, że naprawa elektrowni nie była później możliwa, to jednak zbiornik ciśnieniowy reaktora pozostał szczelny, a obudowa bezpieczeństwa zatrzymała produkty rozszczepienia tak skutecznie, że dawki promieniowania poza elektrownią były pomijalnie małe. Nikt nie stracił życia, ani zdrowia wskutek awarii w TMI. Pokazało to, że nawet dawniej zbudowane elektrownie posiadają rezerwy bezpieczeństwa pozwalające im na ograniczenie skutków awarii poza projektowych ze

²⁴ Kingdom of Belgium, Third Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety, National Report, Sept. 2004

stopieniem rdzenia. Jednocześnie awaria w TMI pokazała, że błędy ludzkie są możliwe, a w warunkach awaryjnych szybkie zrozumienie zachodzących procesów awaryjnych może być trudne i prowadzić do fatalnych błędów. Rozpoczęto więc analizy by sprawdzić, czy możliwe jest stworzenie procedur postępowania chroniących operatora przed popełnianiem błędów. Jednocześnie do projektowanych, a także do istniejących reaktorów wprowadzono dodatkowe zabezpieczenia by utrzymać uwolnienia radioaktywności pod kontrolą nawet przy najcięższych możliwych awariach hipotetycznych.

Prace te trwały przez wiele lat i odporność elektrowni jądrowych na awarie poza projektowe stopniowo rosła. W końcu XX wieku w praktyce krajów Unii Europejskiej przyjęto, że cechy i układy bezpieczeństwa powinny wystarczać nie tylko do opanowania awarii projektowych, ale także poza projektowych, by uniknąć dużych uwolnień materiałów radioaktywnych poza obudowę bezpieczeństwa. Obecnie, po ponad 25 latach od chwili awarii w TMI, istnieją już opracowane w UE i w USA projekty nowoczesnych reaktorów (zwanymi reaktorami III generacji), które zapewniają bezpieczeństwo okolicznej ludności nawet w razie ciężkich awarii ze stopieniem rdzenia.

Przepisy określające wymagania bezpieczeństwa na wypadek awarii poza projektowych są różne w różnych krajach. W Finlandii, budującej obecnie dużą elektrownię jądrową EPR o mocy 1500 MWe, Decyzja Rady Państwa stanowi, że wielkością graniczną dla uwolnień substancji promieniotwórczych w przypadku poważnej awarii jest uwolnienie, które nie spowoduje ani ostrych szkód zdrowotnych wśród osób z ogółu ludności w sąsiedztwie elektrowni, ani długotrwałych ograniczeń w wykorzystaniu dużych obszarów gleby i wody. Dla zaspokojenia wymagania dotyczącego skutków długotrwałych, wielkością graniczną dla uwolnień substancji promieniotwórczych jest w przypadku cezu-137 wielkość 100 TBq. Łączny opad promieniotwórczy złożony z substancji innych niż ^{137}Cs nie może spowodować długoterminowo – po upływie 3 miesięcy od chwili awarii - zagrożenia większego niż wynikałoby z uwolnienia cezu odpowiadającego wymienionej powyżej wielkości granicznej. Możliwość nie wypełnienia tego wymagania w przypadku poważnej awarii musi być krańcowo mała. Zgodnie z wytycznymi dozoru jądrowego Finlandii oznacza to, że prawdopodobieństwo poważnej awarii, powodującej zagrożenie większe niż określone powyżej, musi być mniejsze niż 1 na 2 miliony lat eksploatacji reaktora²⁵.

W Wielkiej Brytanii jako ciężką awarię przyjmuje się awarię ze stopieniem rdzenia powodującą uwolnienie poza obudowę bezpieczeństwa 200 TBq cezu ^{137}Cs , co odpowiada dawce 100 mSv dla osoby najbardziej narażonej. W innych krajach Unii Europejskiej wymagania są podobne, ale określone w różny sposób, głównie poprzez definiowanie dopuszczalnych uwolnień radioaktywności i ich częstości. Dla ujednolicenia tych wymagań Organizacja Techniczna Dozoru Jądrowego w UE oraz Towarzystwa Energetyczne UE ustaliły²⁶ wartości progowe uwolnień tak, by osiągnąć następujące cele:

- W odległości ponad 800 m od reaktora wczesne uwolnienia z obudowy bezpieczeństwa wymagają tylko minimalnych działań interwencyjnych
- Nie potrzeba długotrwałych działań interwencyjnych, takich jak tymczasowa ewakuacja ludności, w żadnym momencie po awarii w odległości większej niż 3 km od reaktora
- Nie potrzeba działań długoterminowych obejmujących długotrwałe (ponad rok) przesiedlenie ludności w odległości większej niż 800 m od reaktora.

²⁵ *Decision of the Council of State on the general regulations for the safety of nuclear power plants*, Radiation and Nuclear Safety Authority Publications, Legislation and Decrees, 14 Feb. 1991/395

²⁶ *European Utility Requirements For LWR Nuclear Power Plants*, Revision C, April 2001

Czwarty cel wiąże się z ograniczeniem potencjalnych skutków ekonomicznych poważnej awarii. Ograniczenie spożycia żywności i zbiorów powinno być ograniczone co do skali czasowej i terytorialnej. Jest to kryterium związane ze skutkami ekonomicznymi i z akceptacją społeczną energetyki jądrowej, natomiast nie związane z bezpieczeństwem ludzi, bo dla uchronienia ich przed zagrożeniem na drodze pokarmowej wystarcza wdrożenie przepisów państwowych i międzynarodowych oraz norm określających dopuszczalne skażenie produktów żywnościowych.

Wg wymagań energetyki jądrowej, elektrownia jądrowa winna spełnić następujące kryteria probabilistyczne:

- Łączna częstość uszkodzeń rdzenia poniżej jednego na sto tysięcy lat;
- Łączna częstość przekroczenia kryteriów ograniczonego oddziaływania raz na milion lat;
- Znacznie mniejsza łączna częstość wcześniejszych lub większych uwolnień awaryjnych.

Tabela 16.4 Działania interwencyjne i wartości dawek, które mogą być otrzymane w wyniku zaniechania tych działań

Wielkość dawki, która może być otrzymana przy zaniechaniu działań interwencyjnych			Rodzaj działań interwencyjnych
Wartość	Rodzaj dawki	W czasie	
100 mSv*	efektywna	7 kolejnych dni	Ewakuacja
10 mSv*	efektywna	2 kolejne dni	Pozostanie w pomieszczeniach zamkniętych
100 mGy	Na tarczycę	-	Podanie jodu stabilnego
30 mSv*	Efektywna	30 dni	Czasowe przesiedlenie
10 mSv*	efektywna	30 dni po 2 latach od wypadku	Stałe przesiedlenie ludności
1000 mSv*	efektywna	Całe życie**	Stałe przesiedlenie ludności
Gdy poziom zawartości substancji promieniotwórczych w żywności przekracza wartości podane w załączniku 1 do rozporządzenia ²²			Zakaz spożywania skażonej żywności
Gdy poziom zawartości cezu w paszy lub wodzie przekracza wartości podane w załączniku 2 do rozporządzenia ²²			Zakaz żywienia i pojenia zwierząt skażoną żywnością i wodą oraz wypasu bydła na terenie skażonym

*Z wyłączeniem dawki otrzymywanej drogą pokarmową

**Dla dorosłych - 50 lat, dla dzieci – 70 lat.

W uzupełnieniu można dodać, że w Polsce obowiązują wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych²⁷ na wypadek ciężkich awarii podane w tablicy 16.4 i zgodne z obecnymi zaleceń MAEA²⁸.

Warto zwrócić uwagę, że wielkości dawek uzasadniających trwałe przesiedlenie ludności ustalono jako równe 1 Sv w ciągu życia, a więc na poziomie znacznie wyższym niż stosowany przez władze radzieckie po awarii w Czarnobylu. Zapewnia to uniknięcie błędnych decyzji, takich jak przesiedlenie ludności z terenów wokół Czarnobyla, na których moce

²⁷ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 kwietnia 2004 r. w sprawie wartości poziomów interwencyjnych dla poszczególnych rodzajów działań interwencyjnych

²⁸ IAEA. (1994). Safety Series No. 109, *Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency*. STI/PUB/900. IAEA, Vienna. pp. 117.

dawki były niższe niż w Finlandii, w masywie centralnym Francji i w wielu rejonach świata. Wielkości te zgadzają się z wielkościami dawek podanymi w wytycznych bezpieczeństwa MAEA uzgodnionych przez takie organizacje międzynarodowe, jak FAO, ILO, NEA, PAHO i WHO. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, że mieszkańcy Ramsar w Iranie otrzymują dawki około 1 Sv już w czasie 5 lat, a przez całe życie – odpowiednio wyższe. Wynika z tego, że i tu przyjęto dość restrykcyjną granicę dla podjęcia decyzji o przesiedleniu.

16.6.5 Jak zabezpiecza się EJ przed uwolnieniami radioaktywności przy ciężkich awariach?

Przy rozpatrywaniu ciężkiej awarii przyjmuje się jako założenie, że wskutek nieprzewidzianych uszkodzeń układów bezpieczeństwa (gdybyśmy mogli je przewidzieć, to byśmy się przed nimi zabezpieczyli!) oraz błędów ludzkich doszło do uszkodzenia i stopienia rdzenia. Dalszy scenariusz zależy od rodzaju awarii, a przy rozpatrywaniu przewidywanego scenariusza uwzględnia się cechy bezpieczeństwa reaktora i rzeczywiste rozwiązania jego układów bezpieczeństwa, a także możliwe działania i błędy operatora. Zasadniczym celem jest ograniczenie rozprzestrzeniania produktów rozszczepienia, po pierwsze przez obronę zbiornika reaktora przed przetopieniem, a po drugie - przez obronę szczelności obudowy bezpieczeństwa.

16.6.5.1 Ochrona zbiornika reaktora przed przetopieniem

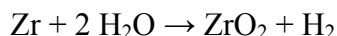
W czasie awarii w TMI rdzeń uległ stopieniu i spłynął na dno zbiornika, ale nie zdołał przetopić dna zbiornika, zbiornik pozostał szczelny i stopiony materiał rdzenia nie wydostał się do obudowy. Zmniejszyło to znacznie zagrożenie po awarii. Analizy po awarii wykazały, że zbiornik został uratowany dzięki temu, że podczas awarii udało się uruchomić na kilka minut pompy obiegu pierwotnego, które wprowadziły do zbiornika kilkanaście metrów sześciennych wody. Chociaż następnie pompy zostały wyłączone, wystarczyło to do uchronienia dna zbiornika przed przetopieniem. Obecnie stosowana strategia obrony w razie poważnej awarii w pierwszym etapie zmierza do jak najszybszego obniżenia ciśnienia wewnątrz zbiornika, by umożliwić dostarczenie doń wody z różnych źródeł, również i tych, w których woda znajduje się pod niskim ciśnieniem. Jeśli się to powiedzie, szczelność zbiornika będzie uratowana.

Gdyby jednak po obniżeniu ciśnienia zbiornik został przetopiony, to przy niskim ciśnieniu energia wypływającego zeń stopionego materiału byłaby znacznie mniejsza, a w ślad za tym zmalałoby niebezpieczeństwo gwałtownego rozproszenia materiału rdzenia w obudowie i nagłego rozerwania obudowy w chwili przetopienia zbiornika. Dlatego w nowo budowanych reaktorach instaluje się układ zaworów bezpieczeństwa o dużej przepustowości, które można otwierać zdalnie i utrzymywać w położeniu otwartym, dopóki ciśnienie w obiegu pierwotnym nie spadnie do wartości bliskich ciśnieniu w obudowie. W reaktorach już zbudowanych trwa proces wymiany zaworów bezpieczeństwa na nowe, pozwalające na realizowanie procesu zasilania obiegu wodą i upuszczania z niego pary wodnej (*feed and bleed*) aż do chwili osiągnięcia pożądanego spadku ciśnienia. Oceny bezpieczeństwa wykazały, że taka strategia pozwala na dziesięciokrotne obniżenie zagrożenia związanego z rozerwaniem obudowy bezpieczeństwa²⁹.

²⁹ GRS 89: "Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B", Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS 72 (Juni 1989).

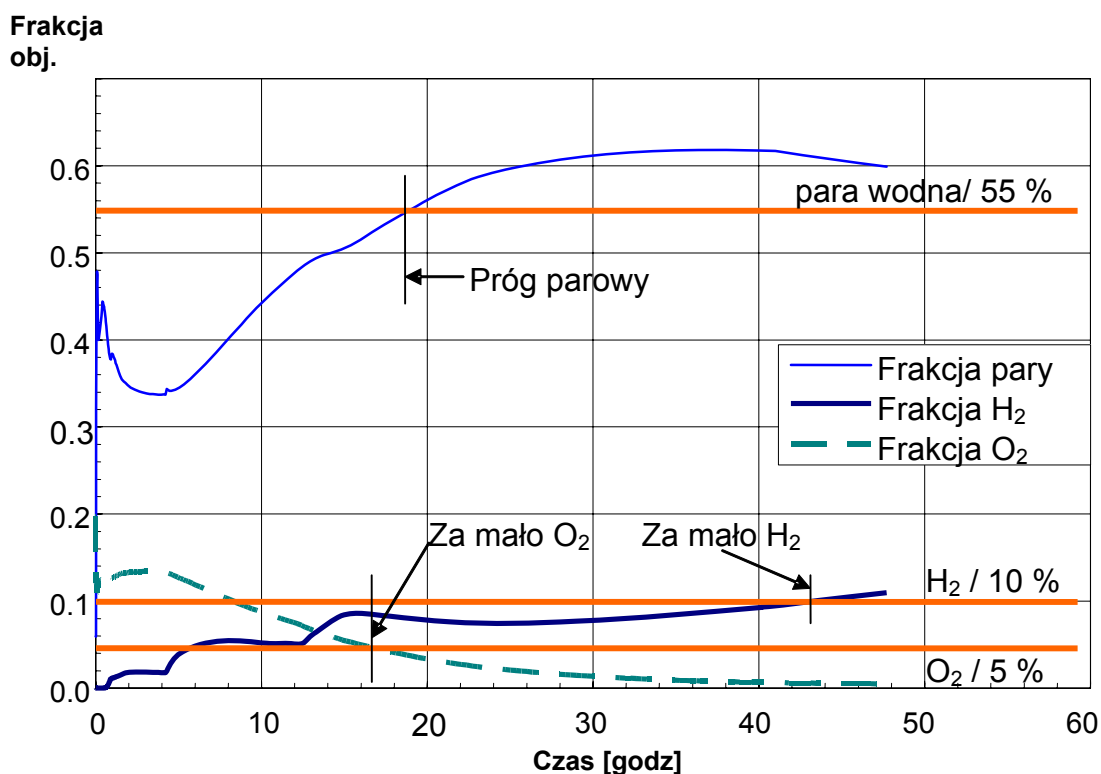
16.6.5.2 Obrona przed wybuchem wodoru.

W elektrowni jądrowej nie ma znaczących ilości wolnego wodoru, ale jest woda. Wobec tego, że rozpatrujemy ciężką awarię, musimy założyć, że temperatura w rdzeniu wzrośnie bardzo wysoko. Wolny wodór H_2 powstaje wskutek reakcji pary wodnej z rozżarzonym cyrkonem w rdzeniu. Intensywność reakcji



wzrasta z temperaturą. W czasie awarii w TMI doprowadziło to do powstania wodoru w ilości wystarczającej do samorzutnego spalania go we wnętrzu obudowy, co zaobserwowano jako skokowy wzrost ciśnienia w obudowie.

Jeśli nastąpi wypływ stopionego rdzenia poza zbiornik reaktora, to wodór uwolni się także wskutek reakcji stopionego rdzenia z betonem. Grozi to wzrostem frakcji wodoru powyżej 4,1%, przy których następuje spalanie, a nawet powyżej 10%, przy których może dojść do wybuchu wskutek gwałtownego łączenia wodoru z tlenem.



Rys. 16.12 Przebieg zmian zawartości pary wodnej, tlenu i wodoru w suchej dużej obudowie bezpieczeństwa po ciężkiej awarii w elektrowni jądrowej, w wyniku której nie ma groźby wybuchu wodoru³⁰

³⁰ Sartmadjiev A.: *Severe Accident Analyses for Temelin NPP*, DTR-ENPR-0259, Sofia, 5.7.2003; LOCA jest skrótem od ang. *Loss of Cooling Accident* – zdarzenie polegające na utracie chłodzenia

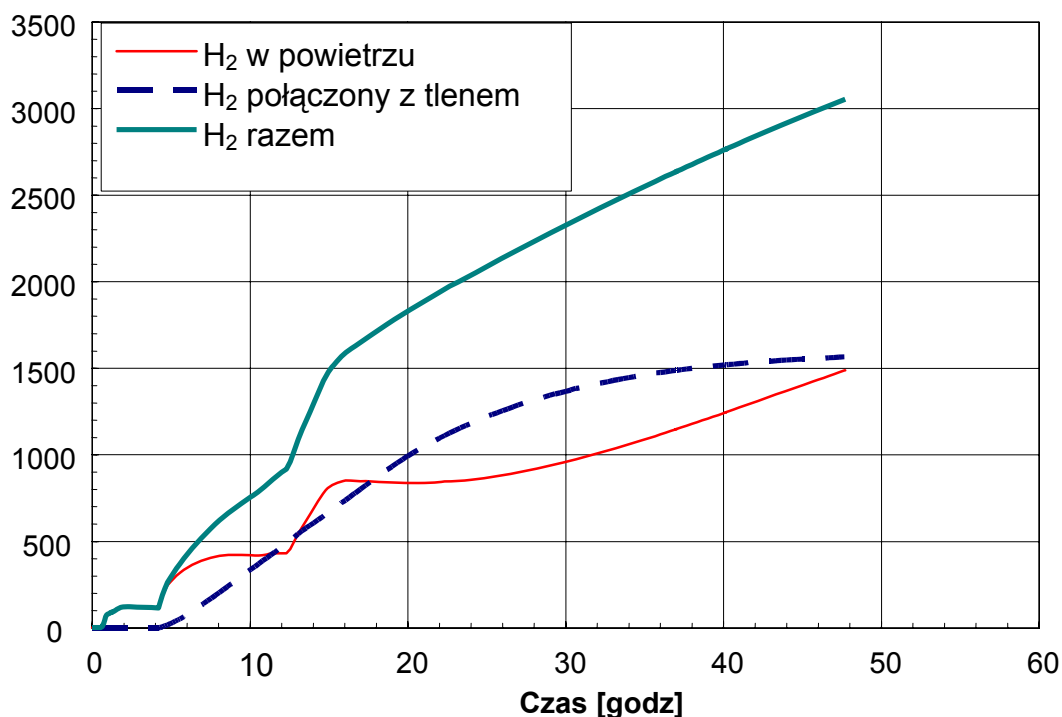
Sama wielkość frakcji wodoru nie decyduje jednak o zagrożeniu. Zdolność do gwałtownego spalania, prowadzącego do wybuchu, zależy też od zawartości pary wodnej i tlenu. Przy wzroście zawartości pary wodnej możliwości spalania wodoru maleją, a powyżej 60% pary wodnej wybuch już nie grozi, niezależnie od tego, ile wodoru jest w tym momencie w atmosferze. Z drugiej strony, jeśli brakuje tlenu, to wodór nie może ulegać spalaniu i przy zawartości tlenu poniżej 5% również wybuch jest niemożliwy. Znajomość tych progów i mierzenie aktualnej zawartości pary wodnej, tlenu i wodoru pozwala operatorowi wybierać strategię działania chroniącą przed wybuchem wodoru. Przykład takiej skutecznej strategii pokazany jest na rys. 16.12. W przypadku przedstawionego na nim scenariusza awarii do wybuchu wodoru nie dochodzi, bo w pierwszej fazie wodoru jest zbyt mało, potem frakcja tlenu spada poniżej wartości progowej, a następnie frakcja pary wodnej rośnie powyżej 60%. Gdy po wielu godzinach stężenie wodoru osiąga próg, przy którym mogłoby dojść do wybuchu, w obudowie nie ma już dość tlenu i jest zbyt dużo pary wodnej.

Jednakże ten stan względnego bezpieczeństwa – gdy frakcja pary wodnej przekracza 60% - nie jest trwały, bo jeśli uruchomimy układ zraszania obudowy bezpieczeństwa dla usunięcia z niej ciepła generowanego przez długi czas po wyłączeniu reaktora, to para ulegnie skropleniu i jej frakcja gwałtownie zmaleje. Odpowiednio wzrośnie też frakcja objętościowa tlenu. Ponadto, prędzej czy później obudowę trzeba będzie rozszczelnić i otworzyć, więc pozostawienie w niej dużych ilości wodoru nie może być traktowane jako rozwiązanie docelowe.

Aby usunąć bezpiecznie wolny wodór, w obudowach bezpieczeństwa instaluje się układy do katalitycznej rekombinacji wodoru z tlenem, które działają w sposób ciągły począwszy od niskich stężeń wodoru (już od około 2%) i zapewniają usunięcie znacznej części wodoru z atmosfery zanim dojdzie do detonacji. Wielką zaletą takich układów jest to, że nie potrzeba zasilać ich energią elektryczną. Gdy mieszanina wodoru i tlenu znajdzie się w kontakcie z katalizatorem, wodór spala się tworząc parę wodną, a wydzielane przy tym ciepło zapewnia dobrą cyrkulację atmosfery w konwekcji naturalnej i wysoką wydajność rekombinacji. Przykład wpływu rekombinacji na zawartość wodoru w obudowie podczas ciężkiej awarii widać na rysunku 16.13. Krzywe na rysunku, poczynając od góry, przedstawiają kolejno całkowitą ilość wodoru wydzieloną do obudowy wskutek utleniania cyrkonu w rdzeniu i wskutek reakcji stopionego rdzenia z betonem, ilość usuniętą z atmosfery w obudowie wskutek działania układów rekombinacji katalitycznej oraz ilość pozostającą w atmosferze w obudowie.

We współczesnych elektrowniach jądrowych w Unii Europejskiej instaluje się z zasady układy rekombinacji wodoru. W nowych typach reaktorów w UE układy rekombinacji wodoru są uważane za niezbędną część wyposażenia elektrowni. Elektrownie jądrowe w krajach dawnego Związku Radzieckiego wyposaża się w takie układy przy pomocy finansowej Unii Europejskiej.

Masa H_2 [kg]



Rys. 16.13 Masa wodoru w dużej suchej obudowie bezpieczeństwa po LOCA²⁹

Warto pamiętać, że trudności w stworzeniu systemu bezpieczeństwa zapewniającego zatrzymanie produktów rozszczepienia wewnątrz obudowy bezpieczeństwa wynikają stąd, że w razie ciężkiej awarii zakładamy z definicji utratę wielu systemów bezpieczeństwa, które przecież są zaprojektowane i zbudowane tak, aby działały w pełni niezawodnie. Ale gdyby były one niezawodne, awaria nie byłaby ciężka – więc autorzy analiz przyjmują, że np. zabraknie energii elektrycznej, mimo zasilania elektrowni z układu potrzeb własnych, z dwóch niezależnych sieci zewnętrznych i z trzech niezależnych awaryjnych generatorów Diesla. Podobnie przyjmuje się, że może zabraknąć wody w obiegu chłodzenia reaktora, mimo wszystkich zabezpieczeń przed rozerwaniem obiegu pierwotnego, podejmowanych zarówno na etapie projektowania jak i na etapie eksploatacji, a także mimo istnienia układu chłodzenia wysoko, średnio i nisko ciśnieniowego z wieloma równoległymi i niezależnymi podukładami. Dlatego np. wprowadzamy układy rekombinacji katalitycznej wodoru, które działają bez zasilania elektrycznego, lub tworzymy układy z konwekcją naturalną, pozwalające na odbiór ciepła od reaktora do atmosfery bez udziału pomp i zaworów, a więc niezależne od dostaw energii z zewnątrz.

Omówienie pełnego zestawu działań i środków technicznych stosowanych w nowoczesnych reaktorach dla ograniczenia skutków hipotetycznie możliwych ciężkich awarii poza projektowych wykracza poza ramy naszego wykładu. Dla zilustrowania stosowanych środków przytoczymy poniżej tylko dwa rozwiązania techniczne: jedno - stosowane w reaktorze EPR³¹ dla ochrony obudowy bezpieczeństwa przed przetopieniem jej dna przez

³¹ od ang. *European Pressurized Reactor* – Europejski reaktor (wysoko)ciśnieniowy

stopiony, rozżarzony rdzeń, oraz drugie – stosowane w reaktorze AP 1000 dla długotrwałej ochrony obudowy bezpieczeństwa.

16.6.5.3 Elektrownia jądrowa z reaktorem EPR

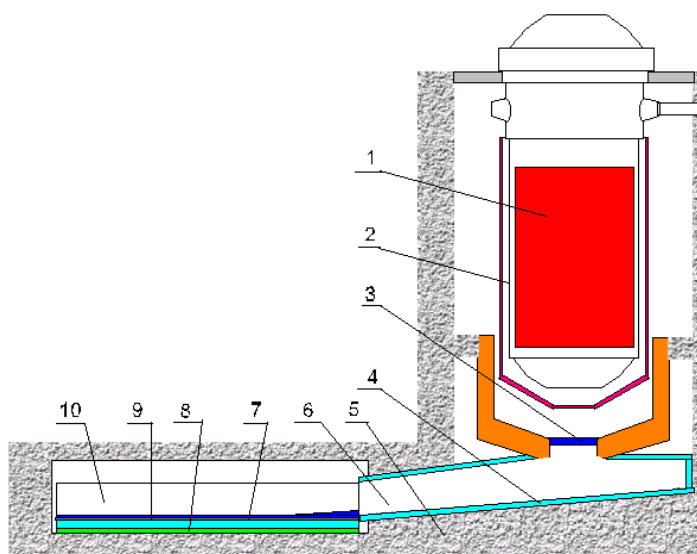
Obudowa bezpieczeństwa w reaktorze EPR jest skonstruowana w taki sposób, aby nie groziło jej rozerwanie wskutek nadmiernego wzrostu ciśnienia gazów we wnętrzu obudowy. Wobec tego, że przy topieniu rdzenia w wysokich temperaturach cyrkon, stanowiący koszulki prętów paliwowych, reaguje z parą wodną powodując uwolnienie wodoru, we wnętrzu obudowy EPR rozmieszcza się układy katalitycznej rekombinacji wodoru o dużej wydajności, chroniące przed nadmiernym wzrostem stężenia wodoru i ewentualnym jego wybuchem.

W razie długotrwałego braku odbioru ciepła generacja mocy powyłłączeniowej powoduje nagrzewanie stopionego rdzenia, a co za tym idzie również nagrzewanie gazów we wnętrzu obudowy bezpieczeństwa i wzrost ich ciśnienia. Mogłoby to spowodować wzrost ciśnienia powyżej wartości dopuszczalnej w obudowie. W reaktorze EPR przewidziano układ kontrolowanego upuszczania nadmiaru gazów do atmosfery, zaopatrzony w zespół filtrów, które usuwają z odpływających gazów produkty rozszczepienia, takie jak jod i cez, chroniąc w ten sposób otoczenie przed zagrożeniem radioaktywnym. Te i inne środki techniczne chronią obudowę przed zniszczeniem wskutek nadmiernego ciśnienia gazów wewnątrz obudowy.

Pozostaje jednak jeszcze bardzo trudny problem uchronienia przed zniszczeniem fundamentu obudowy bezpieczeństwa w przypadku, gdyby stopiony rdzeń wypłynął ze zbiornika i rozlał się na dnie obudowy³². Chociaż oddziaływanie stopionego materiału rdzenia z betonem badano wielokrotnie w małej i średniej skali, trudno było jednak uzyskać pełne rozeznanie, gdyż temperatura stopionego rdzenia wynosi powyżej 2000°C, a modelowanie zjawisk w tak wysokich temperaturach jest bardzo trudne. W reaktorach obecnie już zbudowanych przetopienie dna obudowy traktuje się jako jedną z podstawowych dróg przenikania stopionego rdzenia na zewnątrz, do otoczenia. Na szczęście jest to proces powolny, przepalenie dna obudowy następuje dopiero po kilku dniach od chwili awarii. Ponadto nawet po przetopieniu dna obudowy materiał radioaktywny nie ma bezpośredniego dostępu do atmosfery, bo dno znajduje się kilka metrów pod ziemią, tak że produkty rozszczepienia wypływają wprawdzie z obudowy ale są skutecznie zatrzymywane przez warstwę fundamentową wokoło obudowy bezpieczeństwa. Zmniejsza to znacznie narażenie okolicy reaktora. Tym niemniej, w dotychczas budowanych elektrowniach jądrowych niebezpieczeństwo przetopienia fundamentu obudowy bezpieczeństwa istniało. W reaktorze EPR projektanci postanowili dołożyć starań by ochronić dno obudowy przed przetopieniem i zatrzymać stopiony rdzeń w obudowie.

W reaktorze EPR, nawet w bardzo mało prawdopodobnym przypadku stopienia rdzenia i przebicia przezeń zbiornika reaktora, w którym się rdzeń znajduje, stopione materiały pozostaną zamknięte. Schemat pomieszczeń i układów służących do ukierunkowania przepływu stopionego rdzenia i jego wychłodzenia pokazano na rys. 16.14.

³² jakby początek tzw. *Syndromu Chińskiego*, kiedy to rdzeń przetapia się przez podstawę, a następnie przez kulę ziemską. Taki efekt w filmie z gatunku science fiction, powstałym wkrótce po awarii w TMI, przyczynił się znacznie do paniki ludności po tej awarii i zahamowania rozwoju reaktorów w USA po tej awarii



Rys. 16.14 Układ chwytnika stopionego rdzenia w EJ z EPR.

1) rdzeń reaktora, 2) zbiornik ciśnieniowy reaktora, 3) pokrywa przetwarzana przez rdzeń, 4) dno tunelu przelewowego, 5) beton fundamentów obudowy bezpieczeństwa, 6) tunel przelewowy, 7) materiał ogniotrwały ZrO_2 , 8) chłodzenie wodne chwytnika, 9) warstwa powierzchniowa przeznaczona na wytopienie, 10) chwytnik rdzenia - basen dla stopionego rdzenia.

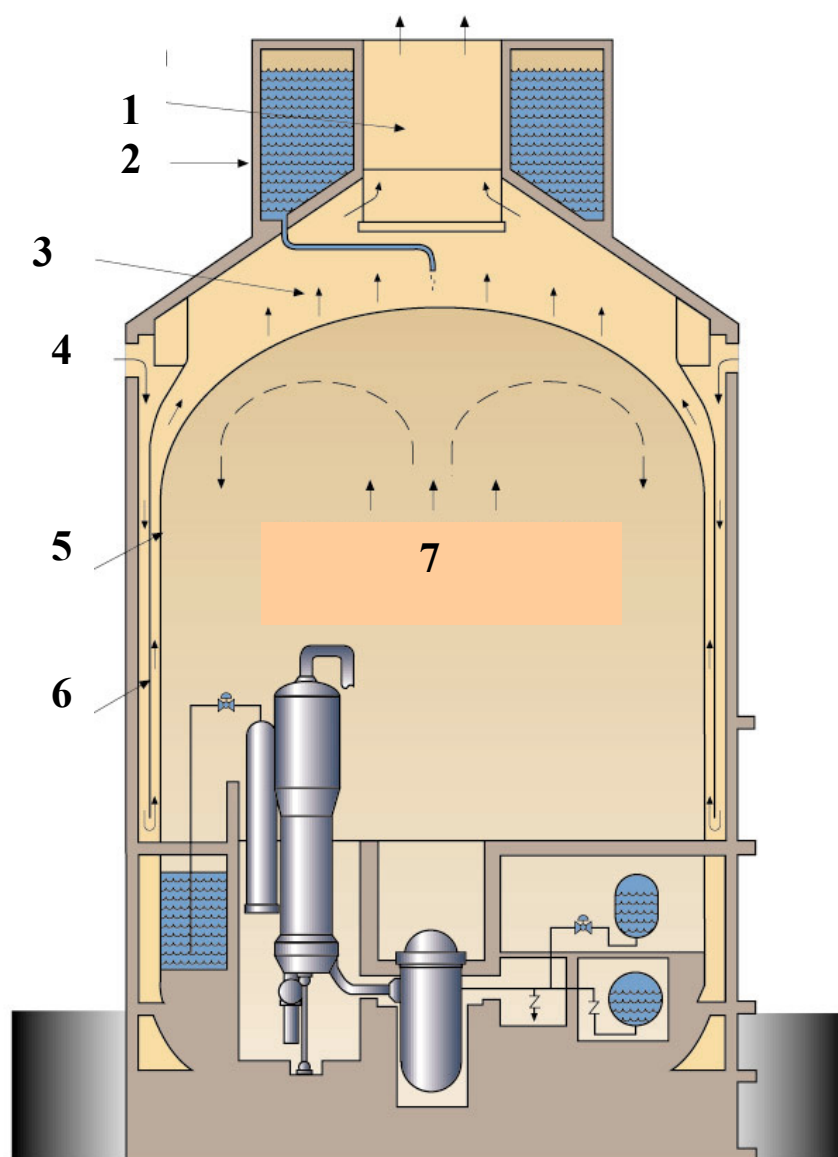
Ostateczne schładzanie stopionego rdzenia odbywa się w specjalnym pomieszczeniu zwanym chwytnikiem rdzenia, umieszczonym w obudowie bezpieczeństwa pod zbiornikiem reaktora. Stopiony rdzeń zbiera się w obszarze retencji na dnie studni reaktora. Pod obszarem retencji znajduje się pokrywa, która w razie jej przetopienia pozwala stopionemu materiałowi rdzeniowemu przepłynąć przez krótki tunel przelewowy do specjalnie zaprojektowanego pomieszczenia znajdującego się na dnie obudowy bezpieczeństwa pod zbiornikiem reaktora. Pomieszczenie to jest wyłożone materiałami ogniotrwałymi i specjalnie chłodzone, by uchronić je przed przegrzaniem i przetopieniem przez rdzeń wydzielający ciepło powyłłączeniowe. Przepływ stopionego materiału rdzeniowego i początek jego chłodzenia zachodzi bez potrzeby uruchamiania jakichkolwiek elementów aktywnych. Dzięki temu rozwiązaniu, nawet awaria ze stopieniem rdzenia nie spowoduje wypływu stopionego materiału poza obudowę bezpieczeństwa. Bezpośrednie otoczenie elektrowni, gleba i wody podskórne są w pełni chronione.

16.6.5.4 Reaktor AP 1000³³

Układy bezpieczeństwa w reaktorze AP1000 działają na zasadzie pasywnej, zapewniając odbiór ciepła od rdzenia i chłodzenie obudowy bezpieczeństwa przez długi czas bez zasilania prądem zmiennym i nie wymagają działania operatora przez 3 doby. Nie ma w nich elementów czynnych (jak pompy, wentylatory lub generatory z silnikami Diesla), a działanie AP1000 nie wymaga systemów pomocniczych zakwalifikowanych do systemów bezpieczeństwa (takich jak zasilanie prądem zmiennym, chłodzenie elementów systemów bezpieczeństwa, wentylacja i klimatyzacja). Dzięki temu wyeliminowano zaliczone do układów bezpieczeństwa awaryjne generatory z silnikami Diesla i cały kompleks potrzebnych dla nich podsystemów, jak sprężone powietrze potrzebne do ich uruchomienia, zbiorniki paliwa i pompy, a także system poboru powietrza i usuwania spalin. Pasywne systemy bezpieczeństwa obejmują układ pasywnego wtrysku chłodziwa do reaktora, pasywny układ odbioru ciepła powyłłączeniowego i pasywny układ chłodzenia obudowy bezpieczeństwa. Ten ostatni układ jest specyficznym rozwiązaniem charakterystycznym dla reaktorów AP600 i

³³ Reaktor amerykański f-my Westinghouse

AP1000 i opisany jest poniżej. Liczba i złożoność działań operatora potrzebnych do kontroli systemów bezpieczeństwa są tu zredukowane do minimum. Ogólna strategia polega raczej na eliminowaniu akcji operatora, a nie na ich automatyzacji³⁴.



Rys. 16.15 Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 z pasywnym układem odbioru ciepła³⁵.

1) komin dla odpływu powietrza w konwekcji naturalnej, 2) zbiornik wody do zwilżania powłoki obudowy bezpieczeństwa przez spływ pod działaniem siły ciężkości, 3) parowanie warstwy wodnej, 4) wlot powietrza chłodzącego z zewnątrz, 5) stalowa powłoka obudowy, 6) pierścieniowa szczelina powietrzna, 7) wewnętrzne skraplanie pary i konwekcja naturalna

³⁴ Markus Nie: *Temporary Melt Retention in the Reactor Pit of the European Pressurized Water Reactor (EPR)*, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart, Februar 2005.

³⁵ Wright R.F. *AP1000 Containment Design and Safety Assessment*, ICONE 9516, Proc. Of ICONE 9, 9th International Conference on Nuclear Engineering, April 8-12, 2001, Nice, France

Ważnym elementem bezpieczeństwa reaktora AP1000 jest *układ automatycznej redukcji ciśnienia* w obiegu pierwotnym, który w przypadku hipotetycznych awarii poza projektowych zapewnia szybkie i niezawodne obniżenie ciśnienia w rdzeniu, aby umożliwić zalanie rdzenia wodą z układów niskociśnieniowych i wykluczyć niebezpieczeństwo rozerwania zbiornika reaktora pod wysokim ciśnieniem. Zalanie rdzenia wodą w reaktorze AP 1000 może nastąpić zawsze, a zapasy wody znajdują się do dyspozycji wewnątrz obudowy bezpieczeństwa. Co więcej, zbiornik reaktora zostaje od zewnątrz zalany wodą, tak że ciepło wydzielane w paliwie odbierane jest przez wodę z całej zewnętrznej powierzchni zbiornika reaktora. Aby mieć pewność, że niezależnie od typu awarii będzie dość wody, by zalać rdzeń i zbiornik reaktora, zbiornik z wodą umieszczony jest bezpośrednio wewnątrz obudowy, powyżej rdzenia, i w razie awarii woda wycieka zeń pod działaniem siły ciężkości. Jest jej dostatecznie dużo, by wypełniła dolną część obudowy, gdzie znajduje się zbiornik. Zabezpiecza to przed przegrzaniem zbiornika i paliwa. Ciepło wydzielane w rdzeniu nie powoduje już przegrzewu paliwa, a tylko wrzenie i odparowanie wody. Ale para wodna wypełnia obudowę bezpieczeństwa, i w miarę upływu czasu musi przejmować ciepło z rdzenia.

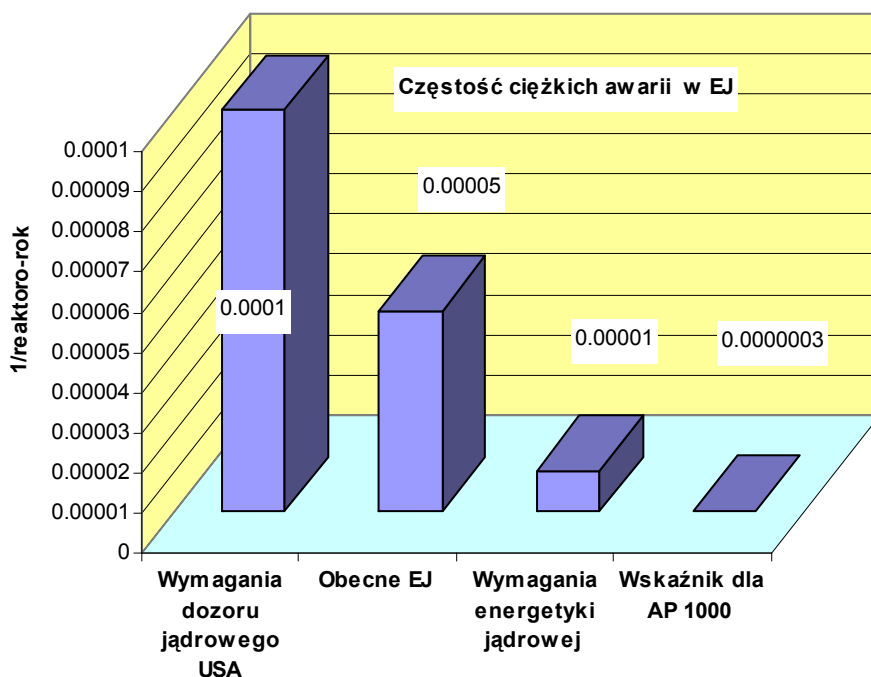
W przypadku awarii uważanych za awarie projektowe w elektrowni jądrowej dysponujemy zasilaniem elektrycznym, zapewnionym przez wiele układów zasilania, zarówno przeznaczonych do normalnej pracy jak i do warunków awaryjnych. Ale w razie ciężkiej awarii przyjmujemy jako założenie, że wszystkie te układy przestają pracować. W wielu elektrowniach jako dodatkowe zabezpieczenie na wypadek ciężkiej awarii stosuje się specjalną linię zasilania łączącą elektrownię jądrową z pobliską hydroelektrownią, wydzieloną poza normalne zasilanie sieciowe. W innych zapewnia się dodatkowe przewoźne generatory Diesla. W AP1000 przyjęto rozwiązanie bardziej eleganckie, niezależniające elektrownię jądrową od jakichkolwiek zewnętrznych źródeł zasilania elektrycznego.

Obudowa bezpieczeństwa reaktora AP1000 pokazana jest na rys. 16.15. Składa się ona z dwóch warstw: wewnętrznej powłoki stalowej zapewniającej szczelność i zewnętrznej grubej powłoki betonowej, zatrzymującej promieniowanie bezpośrednie i chroniącej obudowę przed przebiciem z zewnątrz. Średnica obudowy stalowej wynosi 39,6 m a wysokość 65,6 m. Grubość powłoki stalowej wynosi 4,45 cm, a maksymalne ciśnienie projektowe 5,1 bara. Zasadniczym elementem pasywnego układu chłodzenia obudowy bezpieczeństwa jest zbiornik wody chłodzącej umieszczony na szczycie obudowy bezpieczeństwa. Po sygnale o wystąpieniu wysokiego ciśnienia wewnątrz obudowy zawory pod tym zbiornikiem otwierają się i woda chłodząca zaczyna spływać po zewnętrznej powierzchni stalowej powłoki obudowy bezpieczeństwa. Wystarcza to do odbioru ciepła powyłaczeniowego z reaktora. Para generowana w rdzeniu skrapla się na wewnętrznej powierzchni powłoki stalowej i skropliny powracają do miski ściekowej obudowy bezpieczeństwa, skąd pompowane są ponownie do rdzenia. Ciepło przewodzone przez powłokę stalową odbierane jest przez odparowanie wody spływającej po zewnętrznej powierzchni powłoki, co zapewnia utrzymanie ciśnienia wewnątrz obudowy w przedziale ciśnień projektowych.

Powłoka betonowa otaczająca wolno stojącą powłokę stalową tworzy pierścieniową drogę przepływu powietrza, które napływa przez otwory wentylacyjne w pobliżu szczytu obudowy i spływa ku dołowi wzdłuż przegrody między powłoką betonową a powłoką stalową. W pobliżu podstawy obudowy kierunek przepływu powietrza zmienia się o 180° i powietrze wpływa do mniejszego pierścienia między przegrodą a powłoką stalową. Powietrze płynie ku górze, grzane przez stalową obudowę i wypływa przez komin na szczycie obudowy bezpieczeństwa. Połączenie odparowania ściekającej wody i chłodzenia przez powietrze

płynące w układzie konwekcji naturalnej zapewnia skuteczny odbiór ciepła z zewnętrznej powierzchni powłoki stalowej.

Dzięki tym rozwiązaniom, rdzeń reaktora pozostaje zawsze pod wodą, zbiornik zalany wodą od zewnątrz jest chroniony przed przegrzaniem, a samoczynne chłodzenie obudowy bezpieczeństwa zapewnia, że nawet w sytuacji ciężkiej awarii reaktora AP1000, z długotrwałą utratą zasilania w energię elektryczną ze wszystkich źródeł, nie będzie uwolnień znaczących ilości produktów rozszczepienia i zagrożenia okolicy. Te ulepszenia w dziedzinie bezpieczeństwa dały wyniki w postaci znacznego zmniejszenia prawdopodobieństwa awarii z uszkodzeniem rdzenia. Według wymagań amerykańskich powinno ono być mniejsze od 10^{-4} na rok, obecnie pracujące elektrownie jądrowe osiągają wskaźnik około $5 \cdot 10^{-5}$ /rok, wg wymagań towarzystw energetycznych prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia powinno być niższe niż $1 \cdot 10^{-5}$ /rok, a reaktor AP1000 zapewnia, że nie przekroczy ono $2,5 \cdot 10^{-7}$ /rok, a więc jest ono 400 razy mniejsze od wymagań amerykańskiego NRC (*National Regulatory Committee*). Na rys. 16.16 pokazujemy możliwe częstości ciężkich awarii.



Rys. 16.16 Częstość ciężkich awarii z uszkodzeniem rdzenia w USA i w AP1000²⁶

16.6.5.7 Podsumowanie

Jak widać, w podejściu przemysłu jądrowego do możliwych awarii wiele się zmieniło. Dziś nie ograniczamy się do oświadczenia, że przecież, jeśli ulegnie uszkodzeniu jeden element, to mamy drugi, a nawet i trzeci i czwarty, działający na innej zasadzie i w pełni niezależnie, a więc nie mogący również ulec jednocześnie uszkodzeniu. W analizach ciężkich awarii analizuje się wszystkie, nawet pozornie najbardziej nieprawdopodobne kombinacje uszkodzeń i błędów człowieka, a przede wszystkim możliwości uszkodzeń wielu elementów z powodu wspólnej przyczyny. I w konsekwencji – niezależnie od zapobiegania takim możliwościom

w fazie projektu lub potem w fazie eksploatacji – dochodzimy do scenariuszy ze stopieniem rdzenia i towarzyszącymi mu poważnymi następstwami. Stopienie rdzenia nie oznacza jednak wydzielenia produktów rozszczepienia poza elektrownię. Warto pamiętać, że w przypadku jedynej poważnej awarii, jaka wystąpiła w reaktorach PWR i BWR, a mianowicie awarii w TMI, gdzie rdzeń i reaktor zostały całkowicie zniszczone, dawki poza elektrownią były tak małe, że długi czas sądzono, że awaria musiała być znacznie mniejsza. Tajemnica sukcesu leży w skuteczności obudowy bezpieczeństwa i chroniących ją układów. W przepisach Dozoru Jądrowego przyjmuje się, że częstotliwość dużych uwolnień z obudowy winna być co najmniej 10 razy mniejsza niż częstotliwość ciężkich awarii ze stopieniem rdzenia. Jak widzieliśmy z kilku przytoczonych powyżej rozwiązań technicznych, nowoczesne elektrownie jądrowe dysponują już układami zapewniającymi, że nawet po ciężkiej awarii produkty rozszczepienia pozostaną wewnątrz obudowy. Dlatego przemysł UE może gwarantować, że dla nowych elektrowni jądrowych skutki awarii praktycznie nie wykraczają poza teren samej elektrowni.

Uzupełnienie. Charakterystyka skali INES

Poziom/nazwa	Kryteria	Przykłady
7 Wielka awaria	Powstanie znacznych uwolnień poza obiektem równoważnych dziesiątkom tysięcy TBq ^{131}I , mogących prowadzić do ostrych skutków zdrowotnych, a także efektów późnych na dużym obszarze poza obiektem	Czarnobyl, b. ZSRR (1986)
6 Poważna awaria	Uwolnienia równoważne od tysięcy do dziesiątek tysięcy TBq ^{131}I . Konieczność uruchomienia lokalnych procedur postępowania awaryjnego	(Wojskowe) zakłady przerobu paliwa w Kysztymie b. ZSRR (1957)
5 Awaria z zagrożeniem poza obiektem	Uwolnienia równoważne setkom do tysięcy TBq ^{131}I ; przypuszczalna konieczność uruchomienia lokalnych procedur postępowania awaryjnego. Poważne uszkodzenie obiektu jądrowego i możliwość uwolnienia znacznych ilości substancji promieniotwórczych wewnątrz obiektu	(Wojskowy) reaktor w Windscale, Wielka Brytania (1957) Elektrownia Jądrowa Three Miles Island, USA (1979)
4 Awaria bez istotnego zagrożenia poza obiektem	Uwolnienia promieniotwórcze, ale bez konieczności uruchamiania procedur zaradczych poza ewentualnie kontrolą żywności. Maksymalna dawka dla osoby poza obiektem do kilku mSv. Znaczne, trudne do naprawienia uszkodzenia obiektu jądrowego. Prawdopodobieństwo napromienienia jednego lub kilku pracowników dawką śmiertelną	(Wojskowy) zakład przerobu paliwa w Windscale, Wielka Brytania (1973) Elektrownia jądrowa Saint Laurent, Francja (1980) (Wojskowy) Zestaw krytyczny w Buenos Aires, Argentyna (1983)
3 Poważny incydent	Przekroczone limity uwolnień, ale największa dawka dla człowieka poza obiektem do 1 mSv. Podejmowanie środków zaradczych niepotrzebne. Zdarzenie na terenie obiektu mogące wywołać ostre skutki zdrowotne u pracowników i/lub rozległe skażenie (np. uwolnienie do obudowy bezpieczeństwa substancji promieniotwórczych o aktywności do kilku tysięcy TBq). Zdarzenie, w wyniku którego jakakolwiek dalsza niesprawność systemów zabezpieczeń może doprowadzić do awarii lub sytuacja, w której systemy te nie byłyby w stanie zapobiec awarii, gdyby pojawiły się dodatkowe czynniki inicjujące	Elektrownia jądrowa Vandelloos, Hiszpania (1989)

2 Incydent	Zdarzenie, w wyniku którego zostały znacznie naruszone niektóre bariery bezpieczeństwa, jednak pozostałe elementy bezpieczeństwa („obrona w głąb”) chronią przed dalszymi uszkodzeniami. Zdarzenie, w wyniku którego pracownik otrzyma dawkę przekraczającą roczną dawkę graniczną i/lub zdarzenie prowadzące do znacznego skażenia w miejscach, w których nie powinno się ono pojawić, a co wymaga podjęcia działań naprawczych	
1 Anomalia	Zdarzenie naruszające zatwierdzony reżim eksploatacyjny, ale z zachowaniem znaczącego stopnia sprawności systemów zabezpieczeń.	
0 Poniżej skali	Odstępstwa, które nie wykraczają poza ograniczenia i dopuszczalne parametry eksploatacyjne i są prawidłowo zarządzane zgodnie z odpowiednimi procedurami.	Bez znaczenia dla bezpieczeństwa