ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: MATEMATYKA-FIZYKA z. 78 GEOCHRONOMETRIA 12 Nr kol. 1316

Irmina KRAWCZYK, Zbigniew LEŚ
I Liceum Ogólnokształcące w Jaworznie

Emisja pierwiastków promieniotwórczych podczas normalnej pracy elektrowni jądrowej. Zagadnienia lokalne i globalne

Streszczenie. Ważnym problemem energetyki jądrowej jest emisja pierwiastków promieniotwórczych podczas pracy reaktorów w elektrowniach jądrowych. W niniejszej pracy przedstawiona jest problematyka szkodliwości tej emisji oraz gospodarki odpadami promieniotwórczymi.

1. Wstęp

Cywilizacja rozwinęła się w znacznym stopniu po odkryciu przez człowieka nowych dróg do zmiany i regulacji środowiska. Od początku rewolucji przemysłowej wpływ człowieka na jego środowisko rósł w przyśpieszonym tempie. Wielkie zmiany w naszym środowisku, które zaszły w ostatnich latach, i zapowiedź jeszcze większych w następstwie wyższego standardu życia i przyrostu ludności świata wymagającego stałego wzrostu szybkości produkcji energii, wywołały potrzebę ściślejszej kontroli tych zmian. Rozsądek nakazuje, aby występowanie szkodliwych zmian w środowisku było tak małe, jak tylko jest to możliwe. W wielu miejscach świata potrzebna jest dodatkowa energia stanowiąca pomoc ludności w osiągnięciu wyższego poziomu żywienia, mieszkania, ubrania, ochrony zdrowia i temu podobnych. W tej sytuacji nie należy oczekiwać decyzji, czy dodatkowa energia powinna być produkowana, lecz jak ją

najlepiej wyprodukować, mając na względzie tak źródła energii, jak i metody ich przetwarzania na elektryczność. Istnieje wiele przesłanek prowadzących do wniosku, że wykorzystanie energii jądrowej będzie wzrastać i że będzie ona w produkcji energii elektrycznej odgrywała w przyszłości rolę zarówno uzupełniającą, jak i konkurencyjną w stosunku do paliw kopalnych. Rozważania ekonomiczne sugerują, że zaopatrzenie podstawowe będzie pokrywane przez elektrownie jądrowe, a szczytowe przez elektrownie opalane paliwem kopalnym. Podjęcie jakiegokolwiek przedsięwzięcia w dużej skali wprowadza zakłócenia do otoczenia. Produkcja energii elektrycznej nie stanowi w tym względzie wyjątku, lecz niektóre z tych zakłóceń nie są wynikiem wykorzystywanego paliwa, następstwem normalnych prac związanych z budową zakładu i innych czynności pomocniczych. Często zdarza się, że zakłócenia środowiska wywołane budową elektrowni jądrowej są mniejsze niż zakłócenia spowodowane budową elektrowni opalanej paliwem kopalnym, ponieważ obszar do budowy elektrowni jądrowej jest znacznie mniejszy. Eksploatacji tak elektrowni konwencjonalnej, jak i jądrowej towarzyszy usuwanie do środowiska energii cieplnej w postaci ciepła odpadowego oraz niewielkich ilości promieniotwórczości, ale w odniesieniu do skażenia atmosfery elektrownie jądrowe stanowią wyraźnie mniejsze zło niż elektrownie konwencjonalne.

Pod koniec 1986 roku w eksploatacji znajdowało się 397 bloków jądrowych rozmieszczonych w 26 krajach. Całkowita moc zainstalowana tych bloków osiągnęła 274 GW. W tym też roku elektrownie jądrowe wyprodukowały 1515 TWh energii elektrycznej, co było równe całkowitej produkcji elektryczności w 1956 roku, wymagającej zużycia 590 milionów ton węgla. Obecnie około 15,6% energii elektrycznej na świecie jest produkowane w elektrowniach jądrowych. W państwach zrzeszonych w Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju elektrownie jądrowe stanowiły 20,4% ogółu elektrowni w 1985 roku, natomiast w europejskich krajach należących do RWPG wynosił on wtedy około 10% - jednak tam programy budowy nowych elektrownii jądrowych zakładały zwiększenie tego udziału w znaczny sposób. Warto wspomnieć, że nawet po katastrofie w Czarnobylu władze radzieckie oznajmiły, że awaria ta nie będzie miała wpływu na plany rozwojowe tamtejszej energetyki jądrowej. Również w maju 1986 roku głowy państw i szefowie rządów Kanady, Francji, Republiki Federalnej Niemiec, Włoch, Japonii, Wielkiej Brytanii i Stanów Zjednoczonych wyrazili przekonanie, że energia jądrowa odpowiednio oswojona jest i będzie coraz

powszechniej używanym źródłem energii. Niemniej w krajach rozwijających się wprowadzenie energetyki jądrowej przebiega wolniej niż pierwotnie przewidywano.

2. Elektrownie jądrowe

2. 1. Źródła promieniotwórczości

Zarówno elektrownie jądrowe, jak i konwencjonalne wykorzystują wiele tych samych rodzajów urządzeń do przemiany energii cieplnej w elektryczną oraz połączenia jej z siecią elektryczną. Odmienność elektrowni jądrowej polega na wykorzystywanym paliwie, a dokładniej na wyposażeniu niezbędnym do ścisłej kontroli materiałów promieniotwórczych powstałych w reakcji rozszczepienia, będącej źródłem ciepła.

2. 2. Produkty rozszczepienia

Produkty rozszczepienia stanowią główne materiały promieniotwórcze w elektrowni jądrowej. Ilości tych produktów w jednostkach wagowych są małe; na przykład w wielkiej elektrowni jądrowej ilości te wyrażają się kilkoma kilogramami na dzień. W reaktorze jądrowym produkty rozszczepienia rozpadają się, podczas gdy inne powstają, a aktywność całkowita osiąga w zasadzie stałą wartość na skutek stałego rozpadu promieniotwórczego oraz powstawania krótkożyjących nuklidów promieniotwórczych. Ze względu na znaczny udział krótkożyjących nuklidów promieniotwórczych w nagromadzonej aktywności, wyrażonej w kiurach, aktywność paliwa po paru tygodniach eksploatacji reaktora z moderatorem lekkowodnym i paliwem słabo wzbogaconym w 235U może osiągnąć 40% aktywności, która powstanie po dwóch latach eksploatacji. Ważniejszy jest fakt, że wszystkie produkty rozszczepienia z wyjątkiem bardzo małej ich części pozostają wewnątrz elementów paliwowych, tj. w miejscu ich powstania. Ilość produktów rozszczepienia wewnątrz reaktora jest zależna od:

- średniego poziomu eksploatowanej mocy reaktora,
- okresu pozostawania paliwa w rdzeniu,
- upływu czasu ze względu na rozpad promieniotwórczy.

2. 3. Produkty aktywacji

Materiały konstrukcyjne stosowane w reaktorze i w jego elementach składowych, służących do odprowadzania ciepła z rdzenia, z upływem czasu korodują i erodują, co prawda w małym stopniu, lecz dostatecznie dużym, aby powstały drobne cząstki znane pod mianem "produkty korozji". Produkty korozji, razem z innymi zanieczyszczeniami w chłodziwie, podlegają działaniu neutronów podczas przepływu przez rdzeń reaktora, co sprawia, że stają się one promieniotwórcze. Ilość materiału promieniotwórczego powstającego w ten sposób i składającego się zwykle z izotopów promieniotwórczych takich pierwiastków, jak żelazo, kobalt i mangan, jest zwykle mała w porównaniu do ilości wytwarzanych produktów rozszczepienia. W niektórych reaktorach stosuje się bor w rdzeniu i chłodziwie w celu regulacji procesu rozszczepienia. Bor pochłaniając neutrony tworzy tryt, promieniotwórczy izotop wodoru. Tryt może powstać także w reaktorach, w których chłodziwem rdzenia jest woda, w wyniku konwersji deuteru - naturalnego izotopu wodoru znajdującego się w wodzie. W reaktorach chłodzonych gazem, gdzie chłodziwem jest dwutlenek węgla, produkty aktywacji zawierają ^{41}Ar i ^{14}C.

2. 4. Typy reaktorów

W przemysłowej eksploatacji znajduje się 5 podstawowych typów reaktorów jądrowych:

- RBMK (chłodzone lekką wodą i moderowane grafitem),
- LWR (ciśnieniowe i wrzące),
- PWR (wodnociśnieniowe),
- BWR (wrzącowodne),
- HWR (ciężkowodne),
- GCR (chłodzone gazem).

2. 5. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi z reaktorów typu BWR.

Ponad 99% promieniotwórczych wypływów gazowych z reaktorów wrzących usuwa się stale za pomocą powietrznego ejektora kondensatora wraz ze stosunkowo dużymi masami powietrza. Emisję gazów powiększają nieszczelności kondensatora, powietrze z obudowy bezpieczeństwa, gazy z laboratoriów radiochemicznych elektrowni, z oddziałów obróbki

odpadów promieniotwórczych, z pralni, z operacji odkażania i odpowietrzania różnych zbiorników. Gazowe odpady promieniotwórcze zawierają przede wszystkim produkty aktywacji 13N, produkty rozszczepienia - izotopy gazów szlachetnych kryptonu, ksenonu oraz tryt. Około 90% gazu 13N przechodzi w izotop niepromieniotwórczy w wyniku rozpadu promieniotwórczego podczas jego przepływu z odpadami gazowymi do komina i od komina do granic obiektu. Tym samym jest on przedmiotem minimalnej troski na zewnątrz obiektu. Izotopowy skład kryptonu i ksenonu ze względu na stosunkowo krótki czas półrozpadu wielu z tych izotopów zależy od przebiegu procesu napromienienia paliwa w reaktorze i czasu schładzania mieszaniny gazów do momentu ich usunięcia. W odpadach gazowych występuje także trochę stałych makrocząsteczek promieniotwórczych w wyniku ich porwania oraz rozpadu izotopów macierzystych gazów szlachetnych; izotopy niektórych bardziej lotnych pierwiastków, na przykład jodu, są unoszone w postaci par. W projekcie BWR może być postawiony warunek znacznego zmniejszenia ilości usuwanych krótkożyjących promieniotwórczych gazów szlachetnych. Może to być osiągnięte przez wykorzystanie złóż węgla aktywnego, służących do opóźnienia w usuwaniu gazów szlachetnych przez okres potrzebny na dodatkowy rozpad promieniotwórczy. Ten sposób postępowania miałby nieznaczny wpływ na ilość wyzwalanego 85Kr z reaktora ze względu na okres półrozpadu tego nuklidu promieniotwórczego, wynoszący około dziesięciu lat, jednakże wkład 85Kr do dawek promieniowania w pobliżu zakładu jest bez znaczenia. Podobnie jak wszystkie inne produkty rozszczepienia praktycznie cała ilość powstałego 85Kr jest zatrzymywana w elementach paliwowych, aż do ich przerobu w celu odzysku plutonu i niewypalonego uranu. Główne źródło stałych odpadow promieniotwórczych z BWR stanowią szlamy gromadzące się na filtrach oraz żywice demineralizatorów. Odpady te po odwirowaniu nadmiaru wody są cementowane w stalowych beczkach o pojemności 0,2 m^3. Beczki te przechowuje się przeciętnie przez trzy do sześciu miesięcy w zakładzie, następnie ekspediuje się je do składowania docelowego. Z typowej instalacji reaktora BWR wysyła się rocznie około 100-175 beczek.

2. 6. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi z reaktorów typu PWR

Na skutek braku wrzenia w chłodziwie obiegu pierwotnego większość gazów powstałych w tym obiegu znajduje się wewnątrz chłodziwa. Gazy wyzwalające się z obiegu pierwotnego

są zbierane i kierowane do zbiorników opóźniających. Ogólny skład odpadów gazowych wytwarzanych w reaktorze PWR trochę sę różni od odpadów gazowych z reaktora BWR. Ponieważ gazy z reaktora PWR pozostają w zakładzie dłużej zanim zostaną usunięte, to izotopy o krótszym okresie półrozpadu występują w mniejszej ilości w gazowych odpadach z PWR niż z BWR. Czasami chłodziwo obiegu pierwotnego przenika do obiegu wtórnego przez uszkodzone rurki wytwornicy pary. W takim przypadku krótkżyjące gazowe odpady promieniotwórcze mogą się wyzwolić przez ejektor kondensatora turbiny. Stałe odpady promieniotwórcze z reaktorów PWR mogą być przerabiane w różnorodny sposób w zależności od źródła, aktywności i doboru metody przez eksploatatora elektrowni. Koncentraty z wyparki są zestalane w mieszanine z cementu i wermikulitu w beczkach stalowych o pojemności 0,2 m^3. W PWR używa się filtrów z wykładziną papierową lub włóknistą w obudowie stalowej. Zwykle wymienia się tylko wykładzinę, lecz niekiedy cały element filtrujący musi być zastąpiony nowym. W każdym z tych przypadków usunięte części filtru są umieszczane wewnątrz beczek stalowych, wyłożonych warstwą cementu dla osłony. Następnie do beczek dodaje się jeszcze cementu do całkowitego przykrycia usuniętych części filtru. Wszystkie zestalone odpady promieniotwórcze przechowuje się na terenie zakładu, a następnie przesyła do docelowego miejsca ich składowania. Rocznie przesyła się 100-175 beczek.

2. 7. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi reaktorów chłodzonych gazem

Wyniki doświadczeń angielskich i francuskich wskazują, że zaprojektowane dla elektrowni jądrowych systemy postępowania z odpadami promieniotwórczymi są wystarczające dla utrzymania zrzutów do środowiska w granicach, nakazanych przez uprawnione do tego organizacje państwowe oraz pozostają w zgodności z warunkami przez nie ustalonymi. Odpady gazowe pochodzą głównie z planowego usuwania gazu chłodzącego reaktor, zrzutu powietza chłodzącego osłonę betonową w reaktorach ze stalowym zbiornikiem ciśnieniowym oraz powietrza z wentylacji budynków reaktora i urządzeń pomocniczych. Gazy promieniotwórcze składają się głównie z ^{41}argonu znajdującego się w powietrzu chłodzącym osłonę oraz CO_2 stanowiącego chłodziwo rdzenia reaktora. W odpadach makrocząsteczkowych unoszonych powietrzem mogą znajdować się produkty rozszczepienia. Ciekłe odpady wodne, wytwarzane w reaktorze z betonowym zbiornikiem ciśnieniowym, pochodzą ze wzbudzonej aktywności w wodzie chłodzącej beton. Odpady stanowi też woda

trytowa powstająca w parze wodnej istniejącej w obiegu ciśnieniowym oraz tryt, wytwarzany głównie przez działanie promieniowania neutronowego na zanieczyszczenia litem grafitu, znajdującego się w rdzeniu reaktora. Woda trytowa jest zbierana w osuszaczach stosowanych w obiegu ciśnieniowym do ograniczania poziomu wilgotności. Odpady powstają także w pomieszczeniach do wymiany odzieży, pralniach odzieży skażonej, urządzeniach do dekontaminacji i tak dalej, jednak ich wkład do całkowitej aktywności ciekłych odpadów z elektrowni jest zwykle niewielki. Największy wkład do całkowitej aktywności ciekłych wypływów, daje przechowywanie paliwa wypalonego w basenach schładzających.W basenach paliwo jest przechowywane przez okres potrzebny do spadku aktywności do poziomu umożliwiającego jego przesyłanie do zakładów przeróbczych. Woda z tych basenów jest oczyszczana za pomocą wymiany jonowej, a roztwory regeneracyjne z instalacji po neutralizacji są przerabiane z innymi odpadami ciekłymi. Zwykle w przypadku obróbki odpadów ciekłych wymagana jest tylko filtracja. Po ich przejściu przez filtry i kontrolę radiometryczną są one usuwane do dużych mas wód powierzchniowych.

Odpady stałe są zwykle gromadzone w zakładzie, w którym powstały. Ożebrowania elementów paliwowych są usuwane z paliwa wypalonego przed jego wysłaniem do przerobu. Usunięte ożebrownie stanowi istotną część stałych odpadów wytwarzanych w zakładzie. Na odpady niepalne składają się filtry ze zwrotnego oczyszczania kolumn, żywice jonowymienne z wodnych basenów i zakładów obróbki odpadów ciekłych, łącznie z rozmaitymi resztkami z zakładu i wyposażenia, które zostały skażone lub zaaktywowane w użyciu. W elektrowni są wytwarzane także znaczne ilości palnych odpadów stałych promieniotwórczych, składające się z aktywnych odpadów z pomieszczeń wymiany odzieży, opakowań sisalowych i folii polietylenowych, używanych w trakcie przeprowadzania niektórych operacji w elektrowni jądrowej przy zapobieganiu rozszerzenia się skażenia. Zmniejszenie objętości odpadów przed ich składowaniem jest pożądane, jeśli to jest, oczywiście, tylko możliwe. Stosuje się tu spopielanie odpadów palnych. Przed zamknięciem pojemników popiół może być jeszcze dodatkowo sprasowany. Pojemniki przechowywane są w podziemiach. Odpady niepalne są także składowane w podziemiach.

2. 8. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi z reaktorów ciężkowodnych

Z wyjątkiem nieco większych ilości wody trytowej (około 1 Ci/kg w obiegu pierwotnym w stanie równowagi) reaktory ciężkowodne są podobne do ciśnieniowych reaktorów wodnych pod względem potencjalnego wyzwalania materiałów promieniotwórczych do środowiska. Promieniotwórczość w odpadach pochodzi z produktów rozszczepienia wydobywających się z uszkodzonych elementów paliwowych lub jest wynikiem aktywacji neutronowej zanieczyszczeń czy też produtów korozji krążących z chłodziwem w obiegu. Rozpuszczalne nuklidy promieniotwórcze, jak na przykład izotopy cezu, pozostają w roztworze w chłodziwie i uchodzą z reaktora wraz z przeciekami wody lub podczas wymiany paliwa. Mniej rozpuszczalne nuklidy promieniotwórcze, takie jak np. kobalt, wykazują tendencję do odkładania się na powierzchni rurociągów i nie uchodzą z reaktora wraz z chłodziwem. Te odkładające się nuklidy są usuwane w czasie odkażania urządzeń "in situ", jak na przykład gazy szlachetne i jod, które są unoszone przez powietrze przy przecieku chłodziwa zawierającego te gazy. Ilość produktów aktywacji zależy od zawartości atomów macierzystych pozostających w kontakcie z chłodziwem. 60Co pochodzi częściowo ze stopów zawierających kobalt w miejscach narażonych na silne zużycie, a także z korozji elementów składowych zawierających, co prawda, małe ilości kobaltu, jednak stykających się z chłodziwem na dużych powierzchniach. ^{65}Zn pochodzi z korozji uszczelek zaworów mogących zawierać aż 50% cynku. Ilość i skład wyzwalanego materiału promieniotwórczego może się rożnić nawet między reaktorami tego samego typu. Szczególne znaczenie dla reaktorów ciężkowodnych ma bodziec ekonomiczny, nakazujący zmniejszanie przecieków wody ciężkiej do minimum. Dzięki przeznaczonym do tego celu urządzeniom, pary wody trytowej usuwane są w takim stopniu, że ilości tego nuklidu promieniotwórczego wyzwalane do atmosfery stają się wielokrotnie mniejsze. Wychwytywane są też nuklidy jodu i cezu. Także wszystkie przecieki wody ciężkiej z układów niskociśnieniowych są zbierane w miarę możliwości w zbiornikach służących do odzysku wody ciężkiej. Jednocześnie są także gromadzone rozpuszczone nuklidy promieniotwórcze, co ułatwia dokładniejszą kontrolę przy następnej fazie obróbki odpadów. Zamknięty obieg wentylacji do odzysku wody ciężkiej zapewnia opóźnienie wpływu nuklidów promieniotwórczych. To opóźnienie powoduje, że poprzez rozpad promieniotwórczy zmniejsza się w sposób istotny ilość krótkożyjących nuklidów usuwanych do atmosfery. Stosowanie opóźnień w układach odpadów ciekłych umożliwia rozpad promieniotwórczy

znacznej części krótkożyjących nuklidów przed ich usunięciem do środowiska. Ogólnie rzecz biorąc, ilość nuklidów promieniotwórczych o okresie półrozpadu poniżej 10 dni zostaje tym sposobem zmniejszona do nieznaczącego poziomu.

3. Kontrola gospodarki odpadami

3. 1. Odpady gazowe

Zasadnicza część pierwotnego obiegu sodowego znajduje się na głównym zbiorniku reaktora. Na podstawie doświadczeń przyjmuje się, że 0,1% stałych produktów rozszczepienia i związków jodu (NaJ) wyzwolonych do sodu w wyniku uszkodzeń koszulek, dotrze do argonu; 90% tych składników, wyzwolonych z sodu w postaci aerozoli, odłoży się na zimnych częściach obiegu pierwotnego (część zbiornika reaktora powyżej zwierciadła sodu, układy oczyszczania obiegów pierwotnych itd.). Kompleksowym zadaniem obiegu argonowego jest zapewnienie atmosfery obojętnej dla wszystkich zbiorników z sodem, regulowanie ciśnienia poduszki argonowej oraz umożliwienie recyrkulacji, przemywania, oczyszczania i usuwania części argonu. Obieg argonowy jest wyposażony w urządzenia pozwalające na oczyszczanie ciekłego sodu z aerozoli i stałych produktów - pochodnych gazów szlachetnych. W tych urządzeniach umiejscawia się przeto główne źródła promieniotwórczości. Gazy szlachetne nie są zatrzymywane przez sód w jakimś istotnym stopniu, przeto uważa się powszechnie za pożyteczne opóźnianie ich usuwania oraz ich wypłukiwanie, przepuszczając gaz recyrkulukący przez zbiorniki opóźniające. Wyzwalane gazy stanowią normalnie główne źródło możliwego skażenia środowiska i dlatego są one objęte specjalną kontrolą radiometryczną. Obróbka tych gazów w elektrowni jest prowadzona w ten sposób, aby w razie konieczności ich wyzwalanie można było znacznie zmniejszyć. Po schłodzeniu gazów w zbiornikach przeznaczonych do tego celu, pozostają tylko długożyjące izotopy gazowe; są one wychwytywane przed usunięciem do środowiska, na węglu aktywnym w niskiej temperaturze. Jakiekolwiek makrocząstki, które mogłyby jeszcze znaleźć się w gazach, są oddzielane na filtrach o dużej wydajności, zainstalowanych w układach wentylacyjnych budynku reaktora. Po desorbcji węgla aktywnego z zakładu oczyszczania gazy są przechowywane aż do zaniku aktywności 123Xe; 85Kr jest wtedy jedynym pozostałym izotopem o dużym znaczeniu. Alternatywne

sposoby postępowania z tymi odpadami przewidują albo pozbywanie się ich przez wyzwalanie, rozkładając je odpowiednio w czasie i dobierając dogodne warunki, albo przez przechowywanie zdesorbowanego gazu w butlach (ten sposób wymaga długiego okresu przechowywania). Kontrola radiometryczna odpadów polega na pomiarach aktywności gazów w kilku punktach obiegu argonowego, a mianowicie:

- na wylocie urządzeń do filtracji aerozoli sodu,
- na wylocie zbiorników schładzających,
- na wylocie płuczki gazowej.

Końcowe dane dotyczące charakterystyki odpadów gazowych uzyskuje się na podstawie kontroli radiometrycznej wykonywanej za pomocą zwykłego detektora, umieszczonego w układzie wentylacyjnym. Ostatecznie gazy zostają w zasadniczym stopniu rozcieńczone w kominie.

3. 2. Odpady ciekłe

Odpady ciekłe pochodzą z operacji dekontaminacji wnętrza obiegu pierwotnego, wyposażenia, z umywalni, z pryszniców i przebieralni, z komór gorących i z warsztatów oraz z ewentualnych pozostałości występujących po spaleniu sodu (jeśliby wybuchł pożar chłodziwa sodowego w obiegu pierwotnym), jak również z sodu obiegu pierwotnego w przypadku konieczności jego usunięcia. Kontrola radiometryczna odpadów ciekłych jest prowadzona na każdym etapie przez sprawdzanie pobieranych próbek:

- przed zgromadzeniem odpadów,
- przed transportem do zakładu obróbki odpadów,
- przed obróbką (analizy radiochemiczne) lub przed usunięciem.

Rozcieńczenie wypływów ciekłych jest możliwe zaraz po ich zgromadzeniu do przechowania. Po zgromadzeniu i przechowaniu wypływy ciekłe przechodzą przez szczelny układ drenażu lub są transportowane zbiornikami samochodowymi do zakładu obróbki odpadów, który może służyć kilku elektrowniom. W razie awarii można rezerwować istniejące zbiorniki dla wypływów o wysokiej i średniej aktywności oraz wykorzystać dodatkowo zbiorniki dla wypływów o małej aktywności. Sposób obróbki ciekłych odpadów zależy od poziomu aktywności i ich składu chemicznego. Specjalny problem nasuwają tylko duże ilości wypływów ciekłych zawierających węglan sodowy. Wypływy o małej aktywności są usuwane

poza elektrownię po przeprowadzeniu zwykłej kontroli i jeśli potrzeba - neutralizacji. Średnio i wysokoaktywne wypływy ciekłe są filtrowane w celu usunięcia zawiesin, a przesącz jest przerabiany, w zależności od potrzeby, za pomocą wymiany jonowej, zagęszczania lub koagulacji. Po kontroli radiometrycznej niskoaktywne ciecze usuwane są do rzeki, a koncentraty - przerabiane jako odpady stałe. Zarówno całkowita aktywność, jak i poziom aktywności usuwanych odpadów są utrzymywane w granicach uwarunkowanych zasadą minimalnie koniecznego rozcieńczania (uwzględniając wszystkie inne materiały promieniotwórcze usuwane powyżej i poniżej miejsca zrzutu), aby zapewnić nieprzekroczenie dopuszczalnego stężenia (MPC) dla wody pitnej (poniżej 10^{-7} Ci/m^3 dla niezidentyfikowanej mieszaniny nuklidów promieniotwórczych nie zawierającej ani ^{226}Ra, ani ^{228}Ra). Nadzór środowiska biologicznego prowadzi się za pomocą okresowego pobierania próbek wody poniżej punktu zrzutu oraz analizy flory i fauny.

3. 3. Odpady stałe

Na wysokoaktywne odpady stałe składają się obudowy zestawów paliwowych (gdy są one demontowane na miejscu w zakładzie), komponenty nie nadające się do powtórnego wykorzystania, takie jak pompy, wymienniki ciepła, pręty i napędy prętów, urządzenia do oczyszczania oraz koncentraty z zakładu obróbki wypływów. Po zabiezpieczeniu zwykłymi metodami przed możliwością skażenia i napromienienia nimi, odpady te są składowane na miejscu w zakładzie lub lepiej w miejscach specjalnie przeznaczonych na składowanie opadów. Niskoaktywne odpady stałe różnią się objętością i rodzajem. Są one zwykle sprasowywane, cięte i pakowane w beczki po uprzednim zaspawaniu w workach winylowych. Napełnione beczki mogą być trzymane w specjalnych miejscach przeznaczonych na magazynowanie odpadów. Niskoaktywne odpady palne są spopielane w miarę możliwości. Różne koncentraty, filtry, żywice i inne stałe odpady z zakładu obróbki wypływów są bitumowane i przechowywane w specjalnych miejscach przeznaczonych do magazynowania odpadów. Kontrolę radiometryczną prowadzi się zwykłymi metodami, włączając w nią sprawdzanie promieniowania za pomocą przenośnych lub stałych monitorów oraz sprawdzenie skażeń monitorami lub za pomocą wymazów.

4. Reaktory

4. 1. Lokalizacja

Do wyboru lokalizacji elektrowni jądrowej potrzebne są takie same dane wyjściowe, jak i przy projektowaniu innych typów elektrowni: odległość od centrów obciążenia, trasy przesyłania energii, dostępność, możliwość usunięcia ciepła odpadowego oraz wielu innych czynników ekonomicznych. Specyfikę elektrowni jądrowej stanowi obecność produktów rozszczepienia w rdzeniu reaktora, mających znaczenie radiologiczne. Dotychczasowe dane z eksploatacji elektrowni jądrowych dowodzą, iż w większości przypadków poziom aktywności w wypływach z niej jest bardzo mały w porównaniu z poziomem tła naturalnego, jeśli w ogóle jest do zmierzenia w większym oddaleniu od siłowni. Względy narażenia na napromieniowanie osób pojedynczych w sąsiedztwie elektrowni są uwzględniane w projektowaniu oraz eksploatacji, lecz zwykle nie wpływają w istotny sposób na lokalizację zakładów. Wypływa stąd wniosek, że ludność może żyć w większym bezpieczeństwie bezpośrednio w granicy normalnie działającej elektrowni jądrowej niż w pobliżu wielu konwencjonalnych kompleksów przemysłowych. Reaktory są usuwane z bezpośredniego sąsiedztwa dużych grup ludności i ma to związek z perspektywistyczną możliwością większej awarii reaktora, w której zabezpieczenie przed wypływem nuklidów promieniotwórczych mogłoby zostać uszkodzone. Należy zauważyć, że nie ma powszechnie przyjętych czy ustalonych odległości obiektów jądrowych od obszarów, na których żyje ludność. Odległość miejsca budowy obiektu od skupisk ludności różni się znacznie nie tylko w zależności od kraju, ale nawet w zależności od elektrowni w danym kraju. Te różnice są wynikiem współdziałania charakterystyki miejsca lokalizacji zarówno z właściwymi cechami bezpieczeństwa poszczególnych projektów, jak i z cechami bezpieczeństwa wbudowanych urządzeń w dużym zakresie możliwych nieprawidłowości.

Wymagania przy wyborze lokalizacji:

- kompleksowe rozważenie charakterystyk danego miejsca i cech bezpieczeństwa danego zakładu,
- zakłady projektuje się i eksploatuje zgodnie z zaleceniami ochrony przed promieniowaniem, które, jak wiadomo zalecają odpowiedzialnym czynnikom utrzymanie dawek promieniowania

na poziomie tak małym jak to tylko możliwe, a w każdym razie poniżej ustalonych krajowych górnych granic,

- zakłady projektuje się tak, aby awaria prowadząca do stopienia i rozpuszczenia paliwa była wysoce nieprawdopodobna.

4. 2. Normalna eksploatacja

Jak to wynika z doświadczeń eksploatacyjnych, możliwe jest wytwarzanie energii jądrowej z jednoczesnym ograniczeniem zewnętrznych skutków wypływów promieniotwórczych z elektrowni do bardzo małego wzrostu poziomu tła naturalnego promieniowania w sąsiedztwie zakładu. Na te małe ilości nuklidów promieniotwórczych usuwanych do środowiska składają się tryt, izotopy jodu, krypton, ksenon i czasami węgiel. Większość trytu i gazowych produktów rozszczepienia jest zatrzymywana wewnątrz elementów paliwowych aż do czasu ich przerobu. Promieniotwórczy węgiel ^{14}C może jednak być wytwarzany i wyzwalany z reaktora. ^{14}C powstaje głównie w wyniku absorbcji neutronu przez ^{14}N, który może być stosowany w reaktorze do zraszania. Jak wiadomo, węgiel wchodzi w skład wszystkich połączeń organicznych i odgrywa istotną rolę we wszystkich formach życia. Okres półrozpadu ^{14}C jest duży (ponad 5500 lat), a więc jego przedostanie się do środowiska powoduje włączenie go do obiegu węglowego w przyrodzie i w wyniku przeniknięcia - do każdego organizmu żywego. Próbne wybuchy jądrowe spowodowały podwojenie ilości ^{14}C w atmosferze w latach 1962-1963. Według aktualnych przewidywań ilości ^{14}C, przenikające z elektrowni jądrowych do atmosfery, będą stale rosły w okresie następnych kilku dziesięcioleci. Przyrost poziomu promieniowania w środowisku, będący efektem wyzwalania do niego ^{14}C i innych nuklidów promieniotwórczych, nie daje się zwykle odróżnić od tła naturalnego promieniowania. Narażenie grup ludności na napromienienie z reaktorów jest dużo mniejsze niż narażanie tych grup wynikające na przykład z diagnostyki lekarskiej.

4. 3. Pojęcia i jednostki

Natychmiastowe efekty napromieniowania pojawiają się wtedy, gdy zostanie przekroczona dawka progowa, a czas otrzymywania tej dawki będzie stosunkowo krótki. W wypadku efektów opóźnionych przyjmuje się, że nie istnieje dawka progowa. Dawka promieniowania

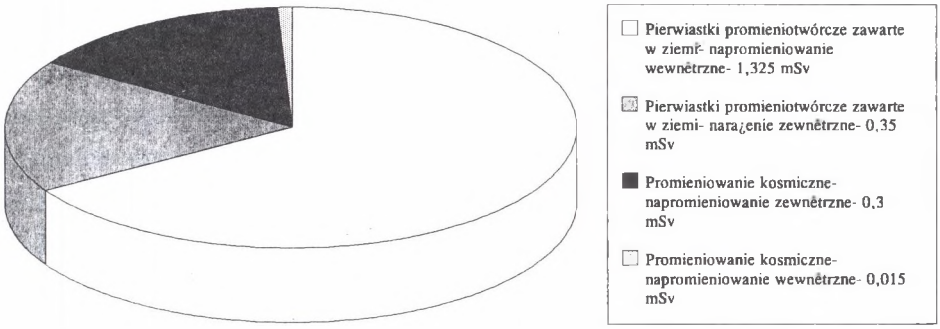
jest głownym pojęciem stosowanym w ochronie radiologicznej. Istnieją jednak różne jednostki parametrów promieniowania:

- dawka pochłonięta (jednostka Gy; 1 grej [Gy] odpowiada energii 1 dżula dostarczonej w wyniku napromieniowania 1 kilogramowi substancji),
- równiważnik dawki (jednostka Sv) - jest to dawka pochłonięta przemnożona przez współczynnik szkodliwości danego rodzaju promieniowania,
- efektywny równoważnik dawki (jednostka Sv) - jest to równoważnik dawki zwielokrotniony o współczynnik względnej wrażliwości danego rodzaju substancji czy organizmu,
- kolektywny efektywny równoważnik dawki (jednostka osobo Sv) - jest efektywny równoważnik dawki otrzymany wspólnie przez rozpatrywaną grupę orgnaizmów żywych od jednego źródła promieniowania.

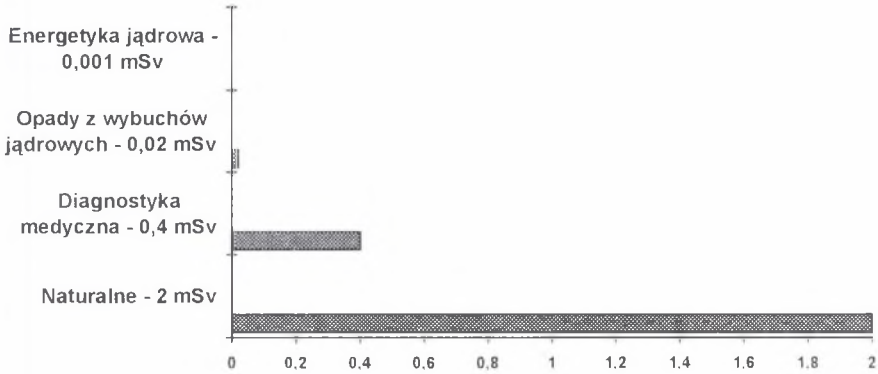
Aktywność nuklidu promieniotwórczego jest określona przez tempo spontanicznych przemian promieniotwórczych zachodzących w nim. Jednostką aktywności nuklidu promieniotwórczego jest bekerel (Bq). 1 Bq oznacza, że zachodzi jeden rozpad na sekundę.

4. 4. Naturalne i sztuczne źródła promieniowania

Większa część promieniowania otrzymywanogo przez ludność na świecie pochodzi ze źródeł naturalnych. Napromieniowanie większości z tych ludzi jest nieuniknione, bowiem substancje radioaktywne znajdują się w otoczeniu ciała ludzkiego, napromieniowując je zewnętrznie, jak i też mogą zostać pochłonięte wraz z powietrzem, wodą i żywnością i działać na organizm ludzki od wewnątrz. Dawki otrzymywane na niektórych terenach, gdzie skały czy gleba zawierają substancje promieniotwórcze, mogą być znacznie większe niż przeciętne, w innych zaś miejscach znacznie mniejsze. Wielkość otrzymanej dawki może także zależeć od stylu życia społeczności. Przeciętna roczna dawka pochodząca od naturalnych źródeł promieniowania wynosi około 2 mSv, ale w niektórych wypadkach może osiągnąć nawet kilkaset mSv.



Rys. 1. Przeciętny roczny efektywny równoważnik dawki napromieniowania pochodzącego ze źródeł naturalnych



Rys. 2. Przeciętny roczny efektywny równoważnik dawki napromieniowania pochodzącego ze źródeł sztucznych i naturalnych

4. 5. Warunki bezpiecznej pracy reaktora

Wybuch jądrowy reaktora nie jest możliwy - zapewnia to konstrukcja rdzenia i różnego rodzaju zabezpieczenia, a przede wszystkim samoograniczające właściwości reaktora wodnego dzięki tak zwanemu ujemnemu temperaturowemu współczynnikowi reaktywności. Ujemna jego wartość oznacza, że wraz ze wzrostem temperatury w rdzeniu reaktora samorzutnie maleje wytwarzana w nim moc, co z kolei prowadzi do obniżenia temperatury. Mechanizm zjawiska jest następujący. Ponieważ liczba rozszczepień atomów uranu szybko rośnie wraz ze

zmniejszeniem energii neutronów wywołujących rozszczepienia, więc neutrony prędkie emitowane w procesie rozszczepienia muszą zostać spowolnione. Następuje to podczas zderzeń z atomami moderatora, w tym przypadku wody. Podwyższenie temperatury powoduje zmniejszenie gęstości wody, wywołane częściowym jej odparowaniem. Ogranicza to liczbę zderzeń spowalniających, a zatem i liczbę rozszczepień - w efekcie zmniejsza się wytwarzanie energii. Ponieważ jednak w czasie pracy reaktora gromadzą się w jego rdzeniu duże ilości promieniotwórczych produktów rozszczepień, realnym zagrożeniem może być awaria polegająca na przedostaniu się części tych materiałów do otoczenia. W jaki sposób mołgłoby dojść do uwolnienia materiałów promieniotwórczych z rdzenia reaktora? Dwutlenek uranu UO2 , używany jako paliwo w reaktorach wodnych, jest materiałem ceramicznym o temperaturze topnienia około 2800^0C. Dopóki temperatura paliwa nie jest zbyt wysoka, wytworzone produkty rozszczepienia pozostają uwięzione wewnątrz szczelnej koszulki paliwowej. Przy przegrzaniu paliwa może nastąpić rozszczelnienie koszulki i przedostanie się aktywnych produktów rozszczepienia do wody chłodzącej. Tak silne przegrzanie paliwa w czasie pracy reaktora jest mało prawdopodobne zarówno ze względu na intensywne chłodzenie strumieniem przepływającej wody, jak i na ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności zmniejszający samorzutnie wytwarzanie ciepła przy wzroście tempreatury. Po wyłączeniu reaktora, czyli po wstrzymaniu reakcji rozszczepień, nadal występuje niebezpieczeństwo uszkodzenia prętów paliwowych wskutek przegrzania. Po wyłączniu reaktora silnym źródłem ciepła jest nadal promieniowanie krótkożyciowych produktów rozszczepienia nagromadzonych w rdzeniu - jest to tzw. ciepło powyłączeniowe. Wytwarzanie tego ciepła z czasem maleje, ale rdzeń musi być chłodzony przez długi czas po wyłaczeniu reaktora. Bezpośrednio po wyłączeniu moc powyłączeniowa wynosi około 7 % nominalnej mocy cieplnej reaktora. W typowym reaktorze o mocy elektrycznej 1000 MW, to jest około 3000 MW mocy cieplnej, moc powyłączeniowa wynosi zatem około 200 MW. Bardzo szybko jednak się zmniejsza - po 10 sekundach spada do około 10 procent, po godzinie zaś do około jednego procenta nominalnej mocy cieplnej reaktora. Do awarii może dojść, gdy ciepło powyłączeniowe z jakichkolwiek powodów nie zostanie odprowadzone przez wodę chłodzącą. Najcięższym przypadkiem awarii reaktora byłaby tak zwana awaria typu LOCA (Loss of Coolant Accident) polegająca na pęknięciu rurociągu obiegu chłodzenia, wylaniu wody chłodzącej na zewnątrz obiegu i osuszeniu rdzenia. Rdzeń reaktora pozbawiony

chłodzenia bardzo szybko się rozgrzewa (nawet po wyłączeniu reaktora), pręty paliwowe rozszczelniają się, produkty rozszczepienia wydobywają się na zewnątrz; w skrajnym przypadku może nawet nastąpić stopienie rdzenia. Tak więc podstawowym zadaniem systemu bezpieczeństwa jest niedopuszczenie w żadnych okolicznościach do przegrzania rdzenia. Aby to osiągnąć, musi być spełniony podstawowy warunek: rdzeń reaktora musi być zawsze zanurzony w wodzie.

4. 6. Naturalnie bezpieczne reaktory

Pierwsze koncepcje "bezpiecznego" reaktora jądrowego powstały w końcu lat siedemdziesiątych w Szwecji. Określenie "reaktor bezpieczny" wprowadza w błąd o tyle, że pracujące dzisiaj reaktory wodne, jak wykazuje wieloletnie doświadczenie, są również bezpieczne. Dla odróżnienia jednak reaktorów z nowymi rozwiązaniami systemów bezpieczeństwa od tradycyjnych nazywa się je często reaktorami z "wewnętrznym" (lub "wbudowanym") bezpieczeństwem. Ich angielską nazwę - inherently safe reactors -można przetłumaczyć chyba trafniej jako reaktory naturalnie bezpieczne. Zasadniczą różnicą między obecną generacją reaktorów a reaktorami naturalnie bezpiecznymi jest inna rola elementów aktywnych i pasywnych w ich systemach bezpieczeństwa. W systemach bezpieczeństwa eksploatowanych dzisiaj reaktorów główna rola przypada elementom aktywnym, chociaż wykorzystywane są również pasywne właściwości systemu, jak na przykład ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności. Aktywne elementy systemu bezpieczeństwa to takie, które uruchamiane są za pomocą odpowiednich czujników, na przykład zawory, elektromagnesy, napędy, pompy itd. Ponieważ istnieje zawsze określone prawdopodobieństwo ich nieprawidłowego działania, więc stosuje się z reguły podwójne, potrójne, a nieraz poczwórne zabezpieczenia. W odróżnieniu od nich pasywne elementy bezpieczeństwa nie wymagają żadnej ingerencji człowieka ani uruchamiania jakichkolwiek urządzeń bezpieczeństwa. Oparty na nich system bezpieczeństwa spełnia swoje podstawowe zadania (czyli niezawodne wyłączenia reaktora przy poważnych zakłóceniach oraz niezawodne chłodzenie rdzenia po wyłączeniu) samoczynnie, jedynie na zasadzie działania praw fizyki. W reaktorach naturalnie bezpiecznych system bezpieczeństwa opiera się w zasadzie na wykorzystaniu pasywnych elementów bezpieczeństwa (elementy aktywne mogą mieć znaczenie pomocnicze). Zbiór zasad bezpieczeństwa tego reaktora w ich wzajemnych

uwarunkowaniach nazwano w literaturze anglosaskiej filizofią bezpieczeństwa PIUS (Process Inherenet Ultimate Safety).

4. 7. Uwolnienia substancji promieniotwórczych

Ilość różnego rodzaju substancji promieniotwórczych uwalnianych z reaktorów jądrowych zmienia się w dużym zakresie - nie tylko zależnie od typu reaktora, nie tylko zależnie od danego rozwiązania w ramach określonego typu, ale nawet w ramach poszczególnych egzemplarzy seryjnych. Wielkość uwolnień może ulegać zmianie w ciągu kolejnych lat eksploatacji konkretnego reaktora, głównie na skutek tego, że zakres prac remontowych różni się z roku na rok. Prace te zwykle wywołują wzrost uwolnień eksploatacyjnych. Z czasem można zaobserwować tendencję do zmniejszania się wielkości uwolnień substancji promieniotwórczych z siłowni jądrowych pomimo wzrostu mocy elektrycznych tych elektrowni. Częściowo jest to zasługą wprowadzania tam udoskonalonych technologii, a częściowo coraz ostrzejszych środków ochrony przed promieniowaniem.

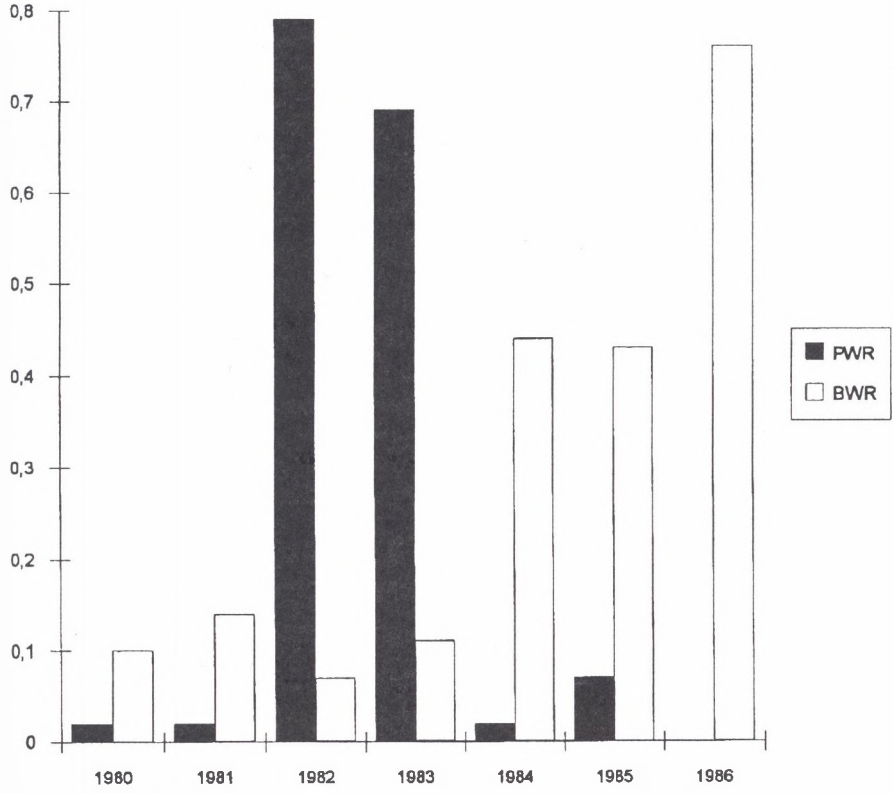
Tabela 1

Uwolnienia substancji promieniotwórczych (w TBq/GWe-rok)
z różnych typów reaktorów jądrowych

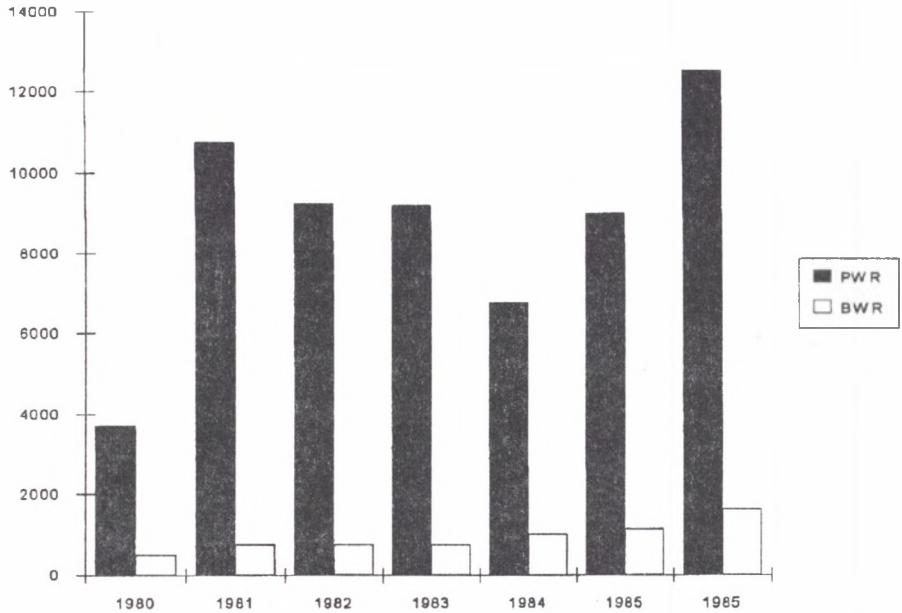
Rodzaj substancji promieniotwórczych	PWR	BWR	HWR	GCR	LWGR
Gazy szlachetne	300	5000	300	3000	6000
Tryt - w powietrzu	7	3	600	5	-
Tryt - w wodzie	30	2	300	50	-
Węgiel C-14	0,3	0.4	7	-	1
Jod	0,003	0.01	0,001	0,001	0,07
Cząstki stałe	0,004	0,04	0,0004	0,001	0,004
Ciekłe substancje promieniotwórcze	0,3	0,2	0,2	5	-

Rysunki 3-5 przedstawiają uwolnienia promieniotwórczego trytu, jodu, innych produktów rozszczepienia i aktywacji z fińskich elektrowni jądrowych. Jak można stwierdzić na tych rysunkach, aktualne wielkości uwolnień są bardzo małe w stosunku do ich limitów. Za

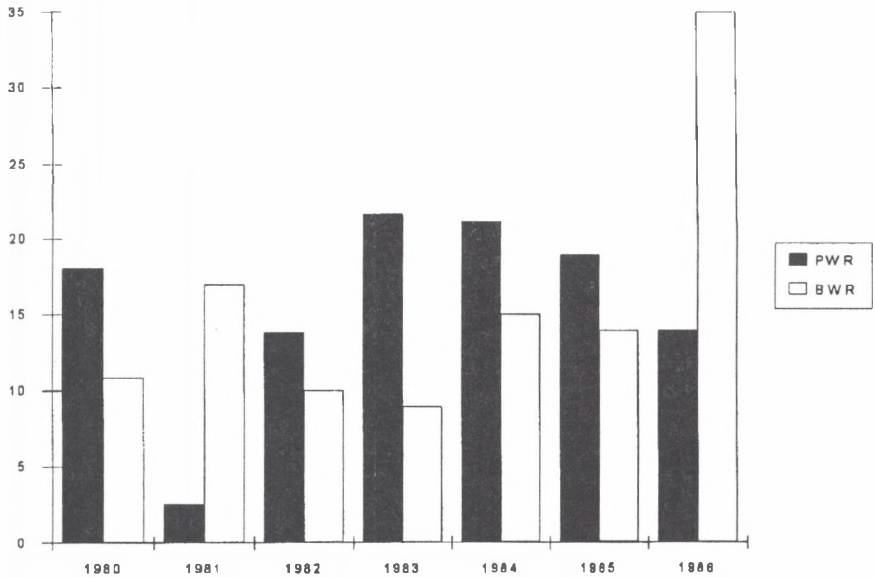
podstawę do obliczenia takiego limitu przyjęto, że dawka otrzymana przez osoby należące do grupy szczególnego ryzyka ma wynosić 0,1 mSv/GWe*rok, a dawka kolektywna dla tej grupy 0,5 osobo-Sv/GWe*rok.



Rys. 3. Atmosferyczne uwolnienia jodu promieniotwórczego spowodowane przez fińskie elektrownie jądrowe w GBq (limit dla reaktorów PWR-220 GBq/rok i dla BWR-120 Gbq/rok)



Rys. 4. Uwolnienia trytu do wody w Finlandii w GBq (limit dla reaktorów: PWR-150000 GBq/rok, BWR-10000 Gbq/rok)

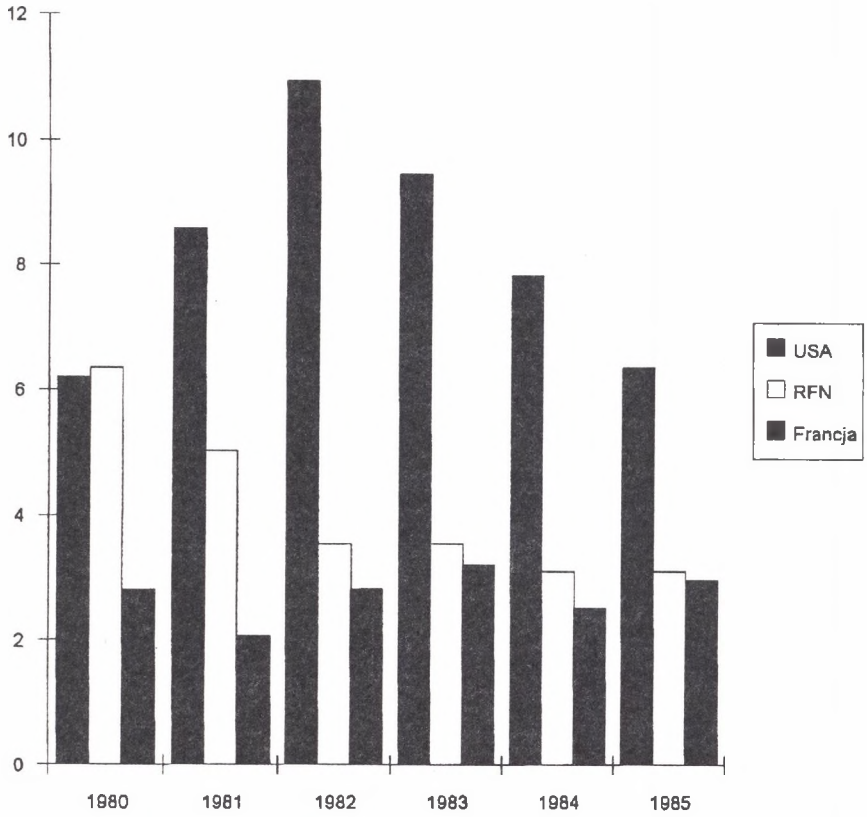


Rys. 5. (poprzednia strona). Inne produkty rozszczepienia i aktywacji uwalniane do wody w Finlandii w GBq (limit dla reaktorów PWR-890 GBq/rok, BWR-300 GBq/rok)

4. 8. Dawki promieniowania otrzymywane w wyniku narażenia zawodowego

Dawki kolektywne, otrzymane przez personel elektrowni jądrowych w przeliczeniu na 1 gigawatorok wyprodukowanej energii elektrycznej w różnych krajach, pokazano na rys. 6.

Istnieją dwa główne źródła napromieniowania we wszystkich siłowniach jądrowych. Pierwszym z nich jest uczestniczenie w rutynowych przeglądach i pracach remontowych, które są niezbędne dla normalnej pracy reaktora i są zaplanowane już na etapie projektowania elektrowni. Drugą przyczyną jest przeprowadzanie nieprzewidzianych remontów poawaryjnych, które często wykonywane są w strefach normalnie niedostępnych dla personelu.



Rys. 6. Dawki kolektywne otrzymywane przez personel elektrowni jądrowych w różnych krajach

4. 9. Dawki napromieniowania otrzymywane przez ludność

Władze państwowe z reguły wymagają istnienia programu obserwacji stanu środowiska w najbliższej okolicy elektrowni jądrowej. Obserwacje te mają być przeprowadzone przez towarzystwo eksploatujące elektrownie lub przez agencję zajmującą się ochroną radiologiczną.

Z reguły skażenie promieniotwórcze jest ledwie wykrywalne tylko w najbliższym otoczeniu elektrowni, dlatego też oszacowanie dawek otrzymywanych przez ludność polega na użyciu modeli transportu izotopów promieniotwórczych w otoczeniu. Typowe dawki kolektywne wyrażone w osobo-mSv/GWe*rok otrzymywane przez ludność w wyniku uwolnień substancji promieniotwórczych przez różne typy reaktorów są przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2

Dawki kolektywne otrzymywane przez ludność

Rodzaj substancji promieniotwórczych	PWR	BWR	HWR	GCR	LWGR
Gazy szlachetne	10	1000	-	-	-
Tryt	10	10	1000	100	1
Węgiel C-14	100	1000	10000	1000	1000
Jod	0,1	10	0,1	1	10
Cząstki stałe	10	100	0,1	1	10
Substancje ciekłe	1	1	-	100	-

5. Awarie

Doświadczenia wielu krajów, dotyczące bezpiecznej eksploatacji dużej liczby różnych typów reaktorów energetycznych, są wielce zachęcające, a nieprawidłowości, które występowały, nie zagroziły bezpieczeństwu ludności. Tym niemniej globalna suma doświadczeń jest jeszcze ciągle niewystarczająca i nie można powiedzieć, że zaistnienie awarii mogącej wywołać poważne skutki poza zakładem jest równe zeru. Przeprowadzono wiele rozważań nad oceną potencjalnych konsekwencji założonych awarii, uwzględniając możliwość przedostania się materiałów promieniotwórczych poza granice zakładu. Reaktory nie mogą wybuchać tak jak bomby atomowe. Nie pozwala na to zarówno skład paliwa jak i jego konfiguracja fizyczna. Wystąpienie znacznych skutków awarii poza zakładem wymagałoby zaistnienia wyjątkowych i niezwykłych przypadków inicjujących, związanych z uszkodzeniem podstawowych i

rezerwowych układów zabiezpieczających, przewidzianych dla ochrony ludności przed tego rodzaju możliwościami. Sądzi się powszechnie, że prawdopodobieństwo powstania awarii powodującej poważne skutki poza zakładem jest bliskie wartości zerowej. Zgodnie z wyrażanymi opiniami, nie znajdującymi jednak ilościowego potwierdzenia, ryzyko szkodliwego narażenia ludności związane z awarią reaktora jest mniejsze niż ryzyko pochodzące od naturalnych zjawisk trzęsienia ziemi, powodzi. Władze wymagają powszechnie przygotowania zawczasu planów awaryjnych w celu poradzenia sobie w sytuacjach takich jak awaria reaktora.

Główne środki zaradcze są następujące:

- szybka kontrola w celu uzyskania danych o kierunku i zasięgu obłoku aktywności promieniotwórczej, która się wyzwoliła z elektrowni,
- uprzedzenie i instruktaż ludności,
- ograniczenie ruchu ludności, spożycia mleka, wody i żywności pochodzących ze skażonych obszarów,
- zapobieżenie (jeśli jest to możliwe) rozszerzeniu się awarii,
- nadzór i pomoc lekarska napromieniowanym osobom.

6. Aspekty termiczne

Niezależnie od tego, czy elektrownia jest opalana paliwem kopalnym czy jądrowym, potrzeby chłodzenia kondensatu elektrowni dają w wyniku zrzut ciepła odpadowego do środowiska. Wzrost produkcji energii elektrycznej jest więc mocno zależny od dostępności wody chłodzącej. Na obszarach względnie gęsto zaludnionych może pojawić się konkurencyjne zapotrzebowanie na źródła wody dla elektrowni oraz dla odpoczynku, rybołówstwa, zachowania krajobrazu, nawodnienia i spożycia. Nie wydaje się, aby rosnące zapotrzebowanie przemysłu na energię elektryczną było obecnie nadmiernie ograniczone przez braki w dostępnych źródłach wody, lecz możliwości wyboru lokalizacji elektrowni zawęziły się, a środowisko techniczne znajduje się pod naciskiem potrzeby znalezienia nowych rozwiązań, zmniejszających wpływ wytwarzania energii na wody powierzchniowe. To czy dodanie wody podgrzanej do wód chłodzących nie spowoduje widocznych skutków, zależy od

wielu czynników takich, jak sposób zawracania wody do źródła pobierania, temperatury i ilości wody dosępnej do poboru oraz flora i fauna w niej występująca. Nie ma wątpliwości, że w niektórych przypadkach ciepło odpadowe może być szkodliwe, lecz niekoniecznie tak być musi. Zalety każdego układu muszą być indywidualnie przeanalizowane. W stosunku do systemu chłodzenia "w układzie otwartym" opracowuje się w wielu państwach warianty chłodzenia do wykorzystania w przypadku niewystarczającej ilości wody chłodzącej. W rozwiązaniach tych przewidziano zastosowanie sztucznych zbiorników albo budowę chłodni konwencjonalnych. Mimo że rozwiązania te mogą przedstawiać odciążenie zrzutu dużych ilości ciepła odpadowego do naturalnych zbiorników wody odbierającej, to ich stosowanie jednak wywołuje inne skutki w środowiskach oraz jest niekorzystne ze względów ekonomicznych. Na przykład, każda z metod wyżej wymienionych powoduje większe zużycie wody niż system chłodzenia w układzie otwartym. Chłodnie konwencjonalne oddają duże ilości wody do atmosfery i to może stać się - w pewnych warunkach - przyczyną powstawania mgieł, oblodzenia drzew, dróg i szos lub opadów śniegu. Należy przy tym pamiętać, że do wody chłodzącej oziębianej w chłodniach konwencjonalnych dodaje się środków chemicznych zawierających chlor, cynk, chrom i fosforany, powstrzymujących rozwój w niej organizmów żywych, korozji i osadzanie soli rozpuszczalnych. Te środki chemiczne wynoszone strumieniem powietrza przepływającego przez chłodnie i wyrzucane przez wiatr z okien wlotowych chłodni mogą wywierać szkodliwe wpływy na środowisko. Sztuczne zbiorniki chłodzące mogą złagodzić skutki cieplne w naturalnych wodach powierzchniowych, a jednocześnie mogą być wykorzystane do rekreacji lub innych celów. Ich wykorzystanie jednakże jest możliwe tylko wtedy, gdy istnieje przy tym dostatecznie dużo przydatnego terenu, a nie należy zapominać, że elektrownia jądrowa o mocy elektrycznej 1000 MWh potrzebuje jeziora o powierzchni 80 000-120 000 a. Niezależnie jednak od wyboru metody chłodzenia ciepło odpadowe z elektrowni tak konwencjonalnych, jak i jądrowych musi w końcu być rozproszone w środowisku.

7. Aspekty chemiczne

Normalna eksploatacja elektrowni jądrowej wymaga usuwania stosowanych chemikaliów z układu chłodzenia kondensatora turbiny, z układu gospodarki odpadami promieniotwórczymi, z regeneracji urządzeń do demineralizacji wody, z układów gopodarki odpadami z pralni i odpadów sanitarnych. Skład chemiczny i ilość usuwanych związków z tych układów będą różne dla każdej elektrowni. Na przykład chlor lub niektóre inne biocydy mogą być dodawane do wody chłodzącej w sposób nieciągły w celu zapobiegania odkładaniu się substancji organicznych na zewnątrz kondensatora; związki fosforu i cynku mogą być stosowane jako inhibitory korozji; kwas siarkowy może być stosowany do regulacji alkaliczności obiegowej wody chłodzącej; urządzenia do demineralizacji mogą być regenerowane okresowo za pomocą kwasu siarkowego i roztworu wodorotlenku sodu, które to środki regenerujące są neutralizowane przed usunięciem. Maksymalne stężenia niektórych z tych chemikaliów w kanale odprowadzającym ścieki mogą przekroczyć poziomy, które są już trujące dla życia wodnego. Temperatura, jako główny czynnik przyśpieszający tempo wszystkich przemian metabolicznych, może także wpływać na szybkość, z jaką działają substancje trujące, a w pewnych przypadkach może wpływać na progowe stężenia działania toksycznego. Techniczna ocena potencjalnego wpływu chemicznych i sanitarnych odpadów z elektrowni jądrowych jest częścią składową oceny zagrożenia środowiska, wykonywanej w początkowych fazach projektwania. Jako źródła potencjalnego zagrożenia biologicznego uważa się wilgoć zawartą w oparach chłodni konwencjonalnych i unoszone przez powietrze cząstki wody; chemikalia wynoszone z chłodni konwencjonalnych; chemikalia zawarte w kropelkach wody unoszonej przez powietrze do otaczającej gleby i roślinności; chemikalia takie jak chlor, które mogą być trujące dla życia wodnego.

8. Składowanie odpadów promieniotwórczych

Działania podejmowane w dziedzinie składowania odpadów promieniotwórczych różnią się między sobą zależnie od kraju i są związane ze stopniem rozwoju energetyki jądrowej oraz wybranej strategii dotyczącej cyklu paliwowego. Wiele elektrowni jądrowych jest

wyposażonych we własne miejsca składowania stałych odpadów promieniotwórczych postających w okresie eksploatacji reaktora. Praktykowane jest lokowanie nie przerobionych niskoaktywnych odpadów w hermetycznych beczkach, następnie w rowach i przykrywanie ich warstwą ziemi. Stosuje się także zatapianie w morzach odpadów niskoaktywnych umieszczonych w beczkach. Głównymi barierami, które zapobiegają powrotowi substancji promieniotwórczych zawartych w odpadach z miejsc ich składowania do środowiska człowieka, lub które wpływają na szybkość porcesu tego powrotu, są:

- rodzaj odpadu i chroniącego go pojemnika,
- rodzaj formacji geologicznej, w której odpady te są przechowywane,
- spowalnianie procesu transportu substnacji promieniotwórczych w różnych środowiskach geologicznych,
- rozpraszanie się i rozcieńczanie izotopów promieniotwórczych w biosferze.

Specjalną uwagę należy poświęcić czterem aspektom gospodarki odpadami promieniotwórczymi, będącym przedmiotem usilnych badań i wymagającym nieprzerwanego nadzorowania. Tymi aspektami są:

- usuwanie do środowiska 85Kr (produkt rozszczepienia- gaz szlachetny),
- usuwanie do środowiska 3H (trytu),
- usuwanie do środowiska izotopów jodu,
- przechowywanie wysokoaktywnych odpadów - produktów rozszczepienia.

8. 1. Usuwanie do środowiska ^{85}Kr

Zainteresowanie wywołane zagrożeniem zdrowia przez ten nuklid, którego okres półrozpadu wynosi 10 lat, jest spowodowane przede wszystkim dawką na całe ciało, jaką ogół ludności może otrzymać po jego rozproszeniu w atmosferze w kuli ziemskiej. Mimo że krypton jest ropuszczalny w płynach ustrojowych, nie włącza się on do przemian metabolicznych w ciele i koncentruje się w określonym narządzie. Ilość usuwanego 85kryptonu będzie wzrastać proporcjonalnie do wielkości rozwijanego programu światowego energetyki jądrowej. Ostatnia miarodajna ocena podaje, że dawki promieniowania pochodzące od 85Kr nie będą stanowiły poważnych problemów tak w skali krajowej, jak i ogólnoświatowej. Oszacowano, że w 2000 roku roczna dawka genetyczna od 85Kr będzie bliska 1% wartości dawki pochodzącej od tła naturalnego. W przypadku potrzeby można

będzie usuwać gazy szlachetne z gazów wydzielanych z zakładów przerobu paliwa. Przechowywanie usuniętego z gazów odlotowych kryptonu nie powinno stanowić w przyszłości trudności technicznych. Należy jednak pamiętać, że ten sposób postępowania prowadzi do powiększenia stopnia ryzyka wywołanego możliwością awaryjnego wydostania się dużych ilości 85Kr ze zbiorników ze stężonym gazem, znajdującym się w magazynach odpadów, w porównaniu do ryzyka spowodowanego jego stałym rozcieńczeniem i rozpraszaniem w kilku miejscach usuwania gazów odlotowych do atmosfery.

8. 2. Usuwanie do środowiska trytu

Zainteresowanie wywołane zagrożeniem zdrowia przez tryt, którego okres półrozpadu wynosi 12 lat, jest spowodowany także dawką dla całego ciała. Większość trytu jest usuwana w postaci wody trytowej, którą się szybko rozcieńcza i rozprasza w wodach świata. Ilość usuwanego trytu będzie wzrastać proporcjonalnie do wielkości realizowanego programu energetyki jądrowej. Przeprowadzone szczegółowe oceny wskazują, iż przewidywane obecnie ilości usuwanego trytu nie stanowią zagrożenia dla ludności. Oszacowano, że do 2000 roku ilość trytu będzie wynosiła 700 MCi. Należy mieć na uwadze, że tryt powstaje także w przyrodzie w efekcie bombardowania promieniami kosmicznymi azotu w górnych warstwach atmosfery, w ten sposób tworzą się stałe zasoby trytu naturalnego w atmosferze w ilościach około 70-140 MCi. Około 1700 MCi trytu zostało rozproszone w atmosferze w wyniku prób z bronią termojądrową, prowadzonych na wielką skalę. W przyszłości większość trytu w środowisku będzie pochodziła właśnie z tych prób, a całkowita jego ilość będzie w tym okresie malała. Przeciętną dawkę roczną dla całego ciała, pochodzącą od trytu, szacuje się na 0,001mrem na każde 100 MCi całkowitej ilości tego izotopu w atmosferze.

8. 3. Usuwanie do środowiska izotopów jodu

Promieniotwórcze izotopy jodu wywierają wpływ na zdrowie ludności, albowiem po ich usunięciu do środowiska następuje względnie szybkie ich przeniesienie do człowieka drogą: trawa-krowa-mleko-tarczyca ludzi. 131jod obchodzi nas szczególnie w sytuacjach awaryjnych z powodu swojego zachowania się w środowisku. Paliwo wypalone z cieplnych elektrowni jądrowych jest zwykle schładzane przez około 100 dni przed jego przerobem i w tym okresie 131J (okres półrozpadu-8 dni) w znacznym stopniu ulega rozpadowi, co powoduje iż jego

ilości usuwane do środowiska w fazie odkoszulkowywania elementów paliwowych i ich przerobu są wyjątkowo małe. Większość jodu pojawia się w niskoaktywnych odpadach ciekłych, a mała jego część przechodzi do atmosfery przez konwencjonalny, średnio wydajny system płuczek alkalicznych; w każdym przypadku - z zakładu przerobu - ilości 131J znajdują się poniżej wtórnych granicznych wartości roboczych. Aktualna ocena gazowych i ciekłych odpadów z przerobu paliwa reaktorów termicznych i prędkich wykazała; że ilości wyzwalanego 129J (okres półrozpadu 7 mln lat), będą utrzymane znacznie poniżej wtórnych wartości granicznych.

8. 4. Przechowywanie wysokoaktywnych odpadów z produktów rozszczepienia

Odpady z produktów rozszczepienia, zawierające śladowe ilości plutonu i innych transuranowców, są tak stężone oraz zawierają nuklidy o tak długich okresach półrozpadu, że muszą być przechowywane w ścisłej izolacji od środowiska człowieka przez setki, a nawet tysiące lat. Gospodarka tymi odpadami w zakładzie przerobu paliwa w jakimś sztucznym składowisku musi uwzględnić ich wielki potencjalny wpływ na człowieka i jego środowisko. W związku z powyższym gospodarka odpadami z przerobu paliwa musi być przedmiotem stałej uwagi i doskonalenia. Niezależnie od tego, czy odpady są przechowywane przez cały rok w postaci ciekłej, czy też do składowania są przeprowadzone do postaci stałej, najważniejsze znaczenia dla ochrony ludności ma utrzymanie zbiornika we właściwym stanie. Ten punkt widzenia pozwala wykazać, iż całkowite bezpieczeńswo uzyskuje się łatwiej przez składowanie zestalonych odpadów w głębokich podziemiach naturalnych niż przez składowanie odpadów w postaci ciekłej. Ponadto składowanie zestalonych odpadów pod ziemią pozwala na zmniejszenie uciążliwego nadzoru, a usuwanie odpadów z bezpośredniego sąsiedztwa człowieka do otaczającego go środowiska jest sprawą wielce ponętną. W tych rozważaniach nie należy jednak zapominać, że zestalanie odpadów jest procesem bardzo niebezpiecznym, oraz że we wstępnym okresie składowania odpady muszą być przechowywane w postaci cieczy.

8. 5. Transport

Poszczególne zakłady wchodzące w skład cyklu paliwowego - kopalnie uranu, zakłady wzbogacania, elektrownie i tak dalej - będą w przyszłości rozmieszczone na dużych obszarach geograficznych, z niektórymi instalacjami wspólnie użytkowanymi przez grupy państw. W związku z tym pojawia się problem transportu materiałów jądrowych, krytyczny do utrzymania bezpieczeństwa i dobrej ekonomiki elektrowni jądrowych. Paliwo jądrowe reaktora o mocy elektrycznej 1000 MW wynosi zwykle około 90 ton uranu słabo wzbogaconego. Paliwo występuje w postaci elementów składających się z dziesiątków, a nawet setek prętów paliwowych w koszulkach ze stali nierdzewnej. Aktywność promieniotwórcza świeżego, nienapromienionego paliwa reaktorowego jest mała i wynosi około 3 Ci na tonę. Ta aktywność nie może mieć w zasadzie wpływu na środowisko, a w normalnych warunkach przewozu ma też bardzo niewielki wpływ na poszczególnych pracowników transportu. W warunkach awaryjnych właściwości fizyczne oraz mała aktywność właściwa paliwa ograniczyłaby bardzo znacznie skutki napromienienia. Napromienione elementy paliwowe mają ogromną aktywność promieniotwórczą wytworzoną przez produkty rozszczepienia, które ulegają szybkiemu rozpadowi promieniotwórczemu w ciągu pierwszych kilku dni pozostawania poza reaktorem. Po 150 dniach każdy napromieniony element paliwowy może jeszcze mieć miliony kiurów aktywności, wytwarzając w swoim sąsiedztwie pole silnego promieniowania. W czasie transportu napromienione paliwo znajduje się w kontenerach osłonowych, chłodzonych powietrzem lub wodą o wadze od 23 000 kg do 68 000 kg i wiekszej. W warunkach normalnych niektórzy pracownicy transportu - kierowcy ciężarówek, hamulcowi pociągu itd. - mogą otrzymać znaczne dawki promieniowania, zwłaszcza jeśli obsługują oni wiele przesyłek. Działanie na ludność i środowisko skutków awarii zaistniałej podczas transportu paliwa napromienionego, pociągającej za sobą np. wyciekanie skażonego chłodziwa w konsekwencji poważniejszego uszkodzenia kontenera, uszkodzenie wywołane uderzeniem lub pożarem - może być bardzo poważne w kategoriach dawki populacyjnej.

9. Zakończenie

Prawdą jest, iż zahamowanie szybkości wzrostu rozwoju energetyki jądrowej może zredukować szkodliwe skutki dla środowiska, lecz jest nieprawdopodobne, aby takie kroki zostały podjęte i w większości przypadków byłoby to nieprawdopodobnie niepożądane. Lepszym rozwiązaniem wydaje sie rozwijanie energetyki w ten sposób, aby szkodliwe skutki w środowisku były sprowadzone do dopuszczalnego poziomu. W tym celu oraz dla zagwarantowania ograniczenia całkowitych dawek promieniowania wyrażonych w man-remach:

- energetyczny przemysł jądrowy musi działać w dalszym stopniu w sposób bezpieczny. Jest pożądane opracowanie uzgodnionych w skali międzynarodowej wytycznych i przepisów dotyczących zasad lokalizacji, projektowania, budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych oraz urządzeń pomocniczych. Opracowania te powinny ujmować środki zapobiegawcze umożliwiające wykluczenie zaistnienia awarii lub zmniejszenie jej wielkości tak w zakresie planowania zakładu, jak i wyposażenia niezbędnego dla zmniejszenia skutków awarii i ochrony ludności,
- jest potrzebny rozwój nowych ulepszonych metod gospodarki odpadami promieniotwórczymi z zakładów jądrowych ze szczególnym uwzględnieniem długożyjących nuklidów promieniotwórczych odznaczających się ruchliwością środowiskową, takich jak tryt, 85Kr, 131J,
- jest także potrzebna ocena stopnia działania materiałów promieniotwórczych usuwanych z zakładów jądrowych na człowieka,
- powinny być także kontynuowane badania dotyczące zachowania się w środowisku długożyjących pierwiastków promieniotwórczych uznanych za krytyczne.

Projektowany wzrost energetyki jądrowej i związane z tym ryzyko dla zdrowia ludności, mimo że małe, wymaga kontynuowania prowadzenia starannej kontroli praktykowanej obecnie. Ludność jest całkowicie świadoma ryzyka wynikającego z wykorzystywania energetyki jądrowej i tego, że konieczne jest, aby przemysł jądrowy sprawował staranną kontrolę w celu zmniejszenia ryzyka - jednocześnie maksymalizując wynikające dla ludności korzyści i informując ją o podejmowanych krokach. Akceptacja energii jądrowej przez ludność może mieć tak samo duże znaczenie, jak rozwój samej technologii.

Literatura

1. Czosnowska W., Czosnowski S., Energetyka jądrowa a środowisko, WNT, Warszawa 1975.
2. Energetyka jądrowa, człowiek, środowisko. Praca zbiorowa pod redakcją E. Bidermana, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Poznań 1989.
3. Zieliński Z., Bezpieczne reaktory jądrowe. "Wiedza i życie", 1992, nr 9.