

Krzysztof Rzymkowski

Ochrona środowiska i energetyka jądrowa



Ochrona środowiska i energetyka jądrowa

Autor: dr inż. Krzysztof Rzymkowski

Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN



Wydanie: pierwsze

Skład i łamanie: Łukasz Koszuk

Wydawca: Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN

Miejsce wydania: Warszawa

Rok wydania: 2026

© Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN. Wszelkie prawa zastrzeżone.
Wykorzystanie całości lub fragmentów bez zgody wydawcy zabronione.

Spis treści

1	Wprowadzenie	1
2	Energetyka Jądrowa	2
3	Ochrona środowiska – zalecenia	4
3.1	Źródła spodziewanych zagrożeń	6
3.2	Promieniowanie jądrowe	6
3.3	Emisje radioaktywne i ich kontrola	7
3.4	Ciepło odpadowe	9
3.5	Unieszkodliwianie wypalonego paliwa	11
3.6	Energetyka jądrowa i źródła odnawialne	13
3.7	Inżynieria środowiska	14
3.8	Systemowa ochrona środowiska	15
4	Zasada wyboru lokalizacji obiektów jądrowych	17
4.1	Bezpieczeństwo wyboru lokalizacji	17
4.2	Kryteria wyboru lokalizacji obiektu jądrowego	18
4.3	Wybór lokalizacji	20
5	Oczyszczanie odpadów ciekłych w elektrowniach jądrowych	23
5.1	Zanieczyszczenia wody	23
5.2	Klasyfikacja odpadów promieniotwórczych	24
5.3	Unieszkodliwianie odpadów ciekłych	24
5.4	Odpady	26
5.5	Składowanie odpadów	28
5.6	Wykorzystanie wody w elektrowniach jądrowych	28
5.6.1	Woda chłodząca	29
5.6.2	Mokre przechowalniki wypalonego paliwa (Baseny wypalonego paliwa) .	30
	Bibliografia	32
	O autorze	33

Rozdział 1

Wprowadzenie

Rosnące światowe zapotrzebowanie na energię, zaobserwowane zmiany klimatyczne i związana z tym konieczność ochrony środowiska powodują poszukiwanie wydajnych, czystych źródeł energii, prowadząc do wyraźnego zainteresowania energetyką jądrową. Źródłem energii wykorzystywanym obecnie w energetyce jądrowej jest uran, powszechnie występujący w skorupie ziemskiej. Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, przy jednoczesnym dążeniu do jak najwydajniejszego wykorzystania naturalnych surowców i ochrony środowiska przy jej wytwarzaniu, wymaga poszukiwania najlepszych rozwiązań. Konieczność oszczędzania naturalnych zasobów materiałów używanych w energetyce – głównie węgla, gazu i ropy – zainicjowała próby wykorzystania do wytwarzania energii elektrycznej energii słonecznej, wiatru, a nawet pływów morskich.

Jednym z najmniej szkodzących środowisku i najekonomiczniejszych sposobów wytwarzania energii elektrycznej jest energetyka jądrowa. Rozwój energetyki jądrowej jest utrudniony, ponieważ każda działalność dotycząca techniki jądrowej wywołuje negatywne emocje i jest kojarzona zwykle z tragicznymi skutkami użycia broni jądrowej oraz wyolbrzymianymi skutkami awarii jądrowych. Dodatkowym powodem lęków jest również promieniowanie związane z techniką jądrową – dominują tu obawy związane z transportem paliwa, składowaniem odpadów oraz, nierzadko, z samą obecnością obiektu jądrowego na danym terenie.

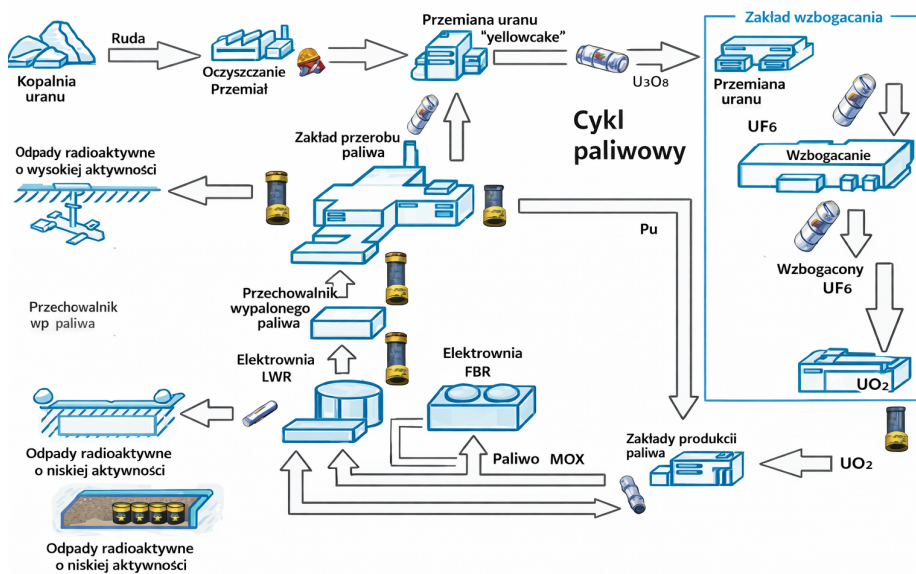
Szeroka współpraca międzynarodowa w zakresie energetyki jądrowej i wykorzystanie materiałów promieniotwórczych w różnych dziedzinach, medycynie, przemyśle, rolnictwie i badaniach naukowych wymaga, w celu zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i środowiska rozbudowanego, znormalizowanego systemu zasad postępowania z materiałami jądrowymi. Zintegrowany i spójny zestaw wymogów bezpieczeństwa powinien zapewnić ochronę ludzi i środowiska, zarówno teraz, jak i w przyszłości.

Rozdział 2

Energetyka Jądrowa

Przemysł jądrowy, szczególnie jego część związana z energetyką jądrową, rozwinął się w latach pięćdziesiątych XX wieku.

Charakterystyczną cechą energetyki jądrowej jest **cykl paliwowy**. Cyklem paliwowym nazywamy ciąg operacji i procesów technologicznych, których zadaniem jest wytworzenie paliwa do reaktorów jądrowych, wypalenie go w reaktorze, a następnie przerób paliwa wypalonego. Są dwa rodzaje cyklu paliwowego: **cykl zamknięty** i **otwarty**. Różnica między zamkniętym a otwartym cyklem paliwowym polega na sposobie wykorzystania paliwa po jego użyciu w reaktorze. W cyklu otwartym wypalone paliwo traktuje się jako odpad. W cyklu zamkniętym paliwo jest poddawane recyklingowi (przerobowi).



Rysunek 2.1. Cykl paliwowy (K. Rzymkowski)

W zamkniętym obiegu paliwo uranowe jest przetwarzane w szeregu zakładów stanowiących niezależne obiekty przemysłowe. Jądrowe zakłady przemysłowe powiązane z cyklem paliwowym tworzą rozbudowany system obejmujący kopalnie uranu, zakłady wzbogacania paliwa, wytwórnie paliwa, elektrownie, przechowalniki wypalonego paliwa, zakłady przetwarzania wypalonego paliwa, składowiska odpadów radioaktywnych (nisko- i wysokoaktywnych), w tym składowiska wypalonego paliwa przy otwartym cyklu paliwowym. Wymaga to indywidualnego określenia ich wpływu na środowisko. Wpływ ten rozpoczyna się w chwili

rozpoczęcia budowy obiektu przemysłu jądrowego i jest pod wieloma względami identyczny, jak w przypadku budowy wszystkich innych nowo powstających zakładów przemysłowych. Mimo specjalnych wymogów budowy i bezpieczeństwa, dotyczących przede wszystkim zjawiska promieniowania, wpływ zakładów przemysłu jądrowego na środowisko w czasie normalnej ich eksploatacji jest praktycznie pomijalny. Pomiary tego promieniowania w ich pobliżu nie wykazują istotnej zmiany w stosunku do naturalnego promieniowania tła.

Rozdział 3

Ochrona środowiska – zalecenia

Ocena oddziaływania przemysłu jądrowego na środowisko obejmuje nie tylko zagadnienia związane z promieniowaniem. Przy rozważaniach wpływu energetyki jądrowej na środowisko należy również uwzględnić wszystkie problemy związane z infrastrukturą przemysłową, ze szczególnym zwróceniem uwagi na specyfikę przemysłu jądrowego. Współczesne zalecenia ochrony środowiska dotyczą przede wszystkim zagadnień ochrony czystości powietrza, wody i gleby, ograniczenia emisji różnych substancji i promieniowania, ograniczenia wibracji i hałasów, zachowania krajobrazu, ochrony zabytków i ekosystemów, ograniczenia wpływu na zmianę klimatu oraz zapewnienia bezpieczeństwa ludności z uwzględnieniem zagrożeń naturalnych. Wszystkie te elementy nie powinny wpływać niekorzystnie na rozwój gospodarczy. Zalecenia ochrony środowiska, tzw. strategiczna ocena oddziaływania na środowisko (strategic environmental assessment – SEA), są właściwie zbiorem wskazówek i porad, na jakie problemy należy zwrócić szczególną uwagę przy budowie i eksploatacji zakładów przemysłowych. Są one opracowywane przez różne organizacje międzynarodowe. Zalecenia dotyczące energetyki jądrowej opracowuje Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej.

Ocena wpływu zakładów energetyki jądrowej na środowisko, tj. na **powietrze, wodę i glebę**, musi uwzględniać przede wszystkim narażenie ludzi, fauny i flory. Jest to bardzo złożony problem. Najważniejszym zadaniem jest zachowanie czystości powietrza na każdym etapie powstawania, eksploatacji i likwidacji zakładów jądrowych. Drugim istotnym zagadnieniem jest wykorzystanie i czystość wody oraz związane z tym umieszkodliwianie ścieków. Należy również zwrócić uwagę na gospodarkę wodną w rejonie zakładów, uwzględniając zmianę poziomu wód gruntowych, nawadnianie obszarów rolniczych, dostarczanie wody do gospodarstw domowych, a nawet ewentualne problemy nawigacyjne żeglugi śródlądowej. Z gospodarką wodną związany jest również problem jej wykorzystania do chłodzenia urządzeń w zakładach cyklu paliwowego i odprowadzania ciepła odpadowego wpływającego na zmianę mikroklimatu. Czystość gleby jest silnie powiązana z emisją różnych substancji do atmosfery i odprowadzaniem ścieków.

Emisja nieradioaktywnych substancji chemicznych w przemyśle jest na ogół powiązana z procesem spalania węgla kamiennego, brunatnego lub gazu. Jedynymi zakładami chemicznymi w cyklu paliwowym są zakłady przerobu paliwa, w których procesy chemiczne nie wymagają używania lotnych substancji i są przeprowadzane w hermetycznie szczelnych pomieszczeniach. Wymiana powietrza jest w nich przeprowadzana przez systemy filtrujące wychwytyjące aerozole. Innym źródłem ewentualnej emisji substancji chemicznych są kopalnie uranu. Promieniowanie pochodzące z materiałów jądrowych jest kontrolowane w każdym pomieszczeniu, gdzie są one używane, i wszelkie działania są tak zaprojektowane, by emisja promieniowania była utrzymana na najniższym osiągalnym poziomie.

Ważnym elementem ochrony środowiska jest ograniczenie **hałasu i wibracji**. Mogą one wpływać na ludzi i zwierzęta. W przemyśle jądrowym te zjawiska występują sporadycznie, na ogół przy budowie nowych zakładów, ich remoncie czy likwidacji. Szczególnie uciążliwe mogą być hałas i wibracje w czasie transportu materiałów budowlanych lub gruzu, jak i praca w odkrywkowych kopalniach uranu. W czasie normalnej eksploatacji, przy zwykłych warunkach pogodowych, wibracje i hałasy są znikome. Wibracje powstające przy pracy turbin w elektrowniach są szybko tłumione. Przy projektowaniu zakładów przemysłu jądrowego zaleca się uwzględnienie hałasu i wibracji pochodzących z innych, koniecznych, towarzyszących konstrukcji: dróg, kolei, instalacji wodnych lub sieci elektrycznej.

Lokalizacja zakładów przemysłu jądrowego może mieć istotny wpływ na ochronę środowiska. O ile niektóre zakłady cyklu paliwowego ze względów ekonomicznych są budowane blisko siebie, np. kopalnia uranu, zakłady przemiału i zakłady produkcji „yellow cake” (mieszaniny tlenków uranu), to przy wyborze miejsca budowy innych zakładów, szczególnie elektrowni jądrowych, należy – oprócz ekonomii – kierować się dodatkowymi wymaganiami ochrony środowiska.

Część gruntów, na których powstaje zakład przemysłu jądrowego, będzie wyłączona z innego użytkowania na okres około 100 lat (zakładając czas pracy np. elektrowni na około 80 lat). Powierzchnia zajmowana przez reaktor energetyczny wynosi ok. 20 ha, a przez elektrownię – ok. 2 km². Zakłada się, że po likwidacji elektrowni teren powróci do stanu początkowego, ale powinna również zostać zlikwidowana powiązana z nią infrastruktura: drogi, trakcje elektryczne itp. Może to mieć istotny wpływ na dalsze użytkowanie gruntów i krajobraz. Najtrudniej jest zniwelować wpływ na środowisko w kopalniach uranu i składowiskach. Ponieważ budowa zakładów przemysłu jądrowego wyłącza te tereny z użytkowania na długi okres, muszą być one sprawdzone pod wieloma względami, np. czy nie naruszają pamiątek historycznych, czy nie niszczą krajobrazu, wpływając na turystykę, czy nie ograniczają dostępu do innych atrakcyjnych obszarów i czy nie wpływają na regionalne tradycje ludności, niszcząc lokalne dziedzictwo kulturowe itd.

Jednym z najważniejszych celów ochrony środowiska jest ochrona **ekosystemów**. Ekosystemy powstają przez wzajemne, długotrwałe oddziaływanie fauny i flory w pewnym rejonie, tworząc równowagę biologiczną. Dlatego należy bezwzględnie zadbać, by wszelkie wyznaczone tereny istotne dla ochrony i rozwoju fauny i flory na lądzie i morzu pozostały nienaruszone, ze szczególnym uwzględnieniem naturalnych siedlisk. Ekosystemy są również źródłem żywności i wody oraz regulatorem klimatu. Zakłady przemysłu jądrowego powinny być usytuowane tak, by ich wpływ radiologiczny i inny nie dewastował różnorodności biologicznej ekosystemu. Dotyczy to również towarzyszącej im infrastruktury.

Ogólnością jest zauważalna **zmiana klimatu**. Energia jądrowa jest energetyką niskoemisyjną, co może pomóc w ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych. Spośród zakładów cyklu paliwowego elektrownia jądrowa wytwarza minimalną ilość gazów cieplarnianych i nie emituje dwutlenku węgla; kopalnie uranu, transport materiałów (w tym materiałów jądrowych), a także budowa infrastruktury są natomiast źródłami emisji różnych substancji. Uwzględniając zachodzące zmiany klimatu, zakłady przemysłu jądrowego powinny być odporne na anomalie pogodowe, np. bardzo wysokie lub bardzo

niskie temperatury, gwałtowne powodzie, huragany, fale tsunami i trzęsienia ziemi, by ich uszkodzenie nie przyczyniło się do degradacji środowiska.

Zalecenia ochrony środowiska, tzw. strategiczna ocena oddziaływania na środowisko (strategic environmental assessment – SEA), zwracają uwagę na **zdrowie publiczne**, mające wtórny wpływ na środowisko i wymuszające stosowanie odpowiednich norm bezpieczeństwa. Dotyczy to bardzo wielu działań, począwszy od zaleceń bezpieczeństwa radiologicznego w różnych warunkach zagrożenia (w czasie działań rutynowych, działań w sytuacjach awaryjnych i wypadkach), przez zalecenia dotyczące dopuszczalnych poziomów wibracji i hałasu oraz poziomu emisji nieradiologicznych, po zasady bezpieczeństwa i higieny pracy w różnych typach zakładów przemysłu jądrowego na etapach od budowy do likwidacji. Zalecane jest prowadzenie badań epidemiologicznych pozwalających śledzić zdrowie fizyczne i psychiczne lokalnych populacji. Obawa ludzi przed energią jądrową może prowadzić do znacznych komplikacji zdrowotnych i społecznych, dlatego zalecane są również badania psychologiczne.

Ograniczenie wpływu energetyki jądrowej na środowisko, w czasie rutynowej pracy zakładów przemysłu jądrowego, polega na kontroli emisji radioaktywnych w powietrzu, wodzie i glebie, zagospodarowaniu ciepła odpadowego oraz unieszkodliwianiu odpadów promieniotwórczych.

3.1 Źródła spodziewanych zagrożeń

Wykorzystanie broni jądrowej w końcowej fazie II wojny światowej wzbudziło wielką nieufność do energetyki jądrowej. Nieufność ta pogłębiła się za sprawą trzech katastrof elektrowni jądrowych – Three Mile Island, Czarnobyla, a ostatnio Fukushima. Powszechnie są skojarzenia każdej działalności w zakresie techniki jądrowej z wybuchami i skutkami promieniowania związanymi z jego oddziaływaniem biologicznym. Podłożem lęków jest promieniowanie paliwa atomowego – tu dominują obawy związane z transportem, składowaniem odpadów oraz, nierzadko, z samą obecnością zakładu energetycznego na danym terenie.

3.2 Promieniowanie jądrowe

Problemem związanym bezpośrednio z energetyką jądrową jest promieniowanie jądrowe, którego wpływ na środowisko jest całkowicie pomijalny przy zachowaniu wszystkich zaleceń ochrony radiologicznej. Z badań wynika, że w normalnych warunkach eksploatacji pracownicy elektrowni są znacznie mniej narażeni na promieniowanie w porównaniu do górników w kopalniach węgla kamiennego.

Promieniowanie jądrowe w pobliżu obiektów jądrowych, a nawet na ich terenie, nie przekracza promieniowania tła, które nawet w granicach jednego województwa może się znacznie różnić i nie ma widocznego wpływu na środowisko. W Polsce średnie tło wynosi 0,2 $\mu\text{Sv/h}$, przy czym np. w Sudetach 0,5 $\mu\text{Sv/h}$; w Finlandii wynosi ono średnio 1 $\mu\text{Sv/h}$, w Kerali w Indiach aż 15 $\mu\text{Sv/h}$, a rekordowo w Ramsarze w Iranie 100 $\mu\text{Sv/h}$. Toczy się zażarta dyskusja o szkodliwości lub dobroczynnym działaniu małych dawek na organizm

ludzki, jednak na podstawie dostępnych obecnie danych doświadczalnych można jedynie stwierdzić brak istotnego wpływu dawek mieszczących się w granicach tła na człowieka i jego środowisko. Zauważalne są natomiast efekty długotrwałego i systematycznego narażenia na promieniowanie, natomiast nawet silne, lecz pojedyncze i krótkotrwałe narażenie nie zawsze wywołuje efekty chorobowe lub zejścia śmiertelne.

Na naturalne promieniowanie tła jesteśmy narażeni zawsze, a wpływ elektrowni jądrowych czy nawet całego przemysłu jądrowego na środowisko jest w warunkach normalnej pracy pomijalny. Przy obecnej technologii oraz systemie kontroli problem promieniowania dotyczy w zasadzie wyłącznie sytuacji awaryjnych. W tym miejscu należy podkreślić, że nawet awaria systemu zabezpieczeń w tym przemyśle nie może być porównywana do wybuchów jądrowych, których podstawowym celem jest niszczenie życia i infrastruktury.

3.3 Emisje radioaktywne i ich kontrola

W czasie normalnej pracy zmiana poziomu promieniowania wokół zakładów przemysłu jądrowego nie może przekraczać 0,1 mSv/rok w odniesieniu do naturalnego promieniowania tła. W Polsce średnie promieniowanie tła wynosi 2,6 mSv/rok. Jest to podstawą do określania granicznych dopuszczalnych wielkości emisji substancji promieniotwórczych. Dopuszczalne wielkości emisji są ustalane indywidualnie dla każdego zakładu przemysłu jądrowego. Głównymi źródłami emisji są elektrownie jądrowe i zakłady przerobu paliwa. Gazowe, jak i ciekłe substancje radioaktywne, powstające w wyniku procesów technologicznych, są przesyłane do systemu oczyszczalni odpadów. Odpady gazowe po wysuszeniu i filtracji są uwalniane przez system wentylacyjny do atmosfery. Komin, przez który są one uwalniane, powinien być dostatecznie wysoki, by uzyskać znaczne rozproszenie gazów. Kontrola substancji gazowych jest przeprowadzana po każdym etapie technologicznym oczyszczania. Dodatkowo, dla celów międzynarodowego systemu zabezpieczeń (safeguards), gazy uwolnione przez komin do atmosfery są sprawdzane w celu potwierdzenia, że prowadzona w zakładzie działalność jest zgodna z deklaracją i nie jest powiązana z zastosowaniami militarnymi.

Odpady gazowe powstają w trakcie pracy reaktora w wyniku reakcji jądrowych i aktywacji materiałów. Pręty paliwowe dla elektrowni jądrowych, w postaci rurek cyrkonowych, zawierają pastylki dwutlenku uranu (UO_2). Powstające wewnątrz prętów produkty rozszczepienia są w większości zatrzymywane wewnątrz prętów aż do ich otwarcia w zakładach przerobu. Zaobserwowano, że wydostają się one częściowo na zewnątrz w wyniku dyfuzji i mikronieszczelności do układu chłodzenia, gdzie mogą reagować z substancjami znajdującymi się w chłodziwie. Powstałe w układzie odpady chłodzenia są usuwane przez systemy przetwarzania odpadów ciekłych i gazowych. Poziomy promieniowania uwalnianych substancji są kontrolowane tak, by nie przekraczały dopuszczalnych granic.

Poziom emisji substancji radioaktywnych zależy od typu reaktora oraz od właściwości systemów oczyszczania. Uwalnianymi do atmosfery substancjami są głównie gazy szlachetne ($Xe-133$, $Ar-41$), $N-16$, $C-14$, $S-35$, pary trytu i cząstki stałe. Ilość niektórych z nich, np. $C-14$, jest bardzo mała, ale ze względu na długi okres półrozpadu może mieć wpływ na skumulowany poziom promieniowania na powierzchni gleby. Podobnie uwalnianie trytu wymaga okresowej oceny jego wpływu na środowisko.

Tryt powstaje w elektrowni jądrowej przede wszystkim w wyniku rozpadu jądra uranu w pręcie paliwowym, wychwytu neutronów przez jądra zanieczyszczeń i dodatków do chłodziwa (boru, litu, amoniaku), a także aktywacji deuteru i wychwytu neutronów przez substancje stosowane w prętach regulacyjnych. Tylko niewielka część trytu powstałego w wyniku reakcji jądrowych w paliwie wydostaje się do atmosfery. Uranowe pastylki są zamknięte w prętach paliwowych. Prowadzone badania wskazują, że mogą zachodzić reakcje chemiczne pomiędzy materiałem, z którego wykonana jest koszulka (obudowa prętu paliwowego), czyli stopami cyrkonu, a produktami rozszczepienia, między innymi z trytem. Możliwe jest również bezpośrednie przenikanie jąder trytu, jednak znaczenie tego mechanizmu jest pomijalne. Bardziej znaczący jest przepływ trytu przez mikrootwory i drobne uszkodzenia struktury obudowy. Dlatego bardzo istotny jest dobór materiału obudowy prętu, związany z systemem chłodzenia zależnym głównie od typu reaktora. Całkowita emisja produktów gazowych z elektrowni jest bardzo niska i musi być utrzymywana na takim poziomie, by wraz z innymi uwolnieniami – opadami ciekłymi – nie przekraczała dopuszczalnego poziomu promieniowania.

Odpady ciekłe o potencjalnych właściwościach promieniotwórczych, które powstają w elektrowniach jądrowych, pochodzą przede wszystkim z dekontaminacji i prania odzieży, dekontaminacji pomieszczeń, narzędzi używanych np. w basenach wypalonego paliwa, transporterów paliwa, plastikowych plandek ochronnych itp. Ponadto odpady ciekłe mogą pochodzić np. z zużytych płynów technicznych, chłodziw, olejów używanych w elektrowni, upustów i przecieków (dopuszczalnych) z obiegu chłodzenia rdzenia reaktora lub basenów wypalonego paliwa. Wszystkie te płyny zawierają drobiny substancji nieorganicznych, ciał stałych, np. piasku i metali, jak i drobin farb czy proszków czyszczących. Po wstępnej selekcji, o której decyduje pochodzenie ścieków, są one kierowane do wyspecjalizowanych ciągów (kaskad) instalacji oczyszczających. Unieszkodliwianie radioaktywnych odpadów ciekłych w obiektach jądrowych jest wielostopniowe, z wykorzystaniem filtracji, wytrącania, sorpcji, wymiany jonowej, parowania i separacji membranowej. Procesy oczyszczania mają na celu zmniejszenie objętości odpadów poprzez dalsze stężanie i odzyskanie wody. Odpady ciekłe w elektrowniach jądrowych zawierają materiały radioaktywne: tryt, Cs-137, Cs-134, I-131, I-133, Co-58 oraz powstałe materiały aktywowane zawierające np. Cr-51 i Mn-51. Znaczna część stężonych odpadów promieniotwórczych jest składowana na terenie elektrowni. Należy podkreślić, że każde przekroczenie obowiązujących standardów bezpieczeństwa lub procedur spowoduje uruchomienie wielu urządzeń zabezpieczających, które automatycznie wyłączą reaktor w przypadku poważnego zagrożenia.

Wypalone paliwo z reaktorów jądrowych jest najsilniejszym źródłem promieniowania w cyklu paliwowym i dlatego też standardy bezpieczeństwa i ochrony radiologicznej są w zakładach jego przerobu najbardziej restrykcyjne. Podstawowym zagrożeniem jest poziom promieniowania gamma emitowanego przez radioaktywne produkty rozszczepienia. W procesie przerobu paliwa odzyskiwane są przede wszystkim dwa pierwiastki – uran i pluton. Zakłady przerobu są dużymi zakładami chemicznymi, w których wszystkie procesy są zautomatyzowane i bardzo ściśle monitorowane (w tym przez zespoły międzynarodowe). Monitorowanie ma na celu nie tylko kontrolę techniczną, ale ma również zabezpieczać przed nieuprawnionymi działaniami dążącymi do pozyskiwania plutonu i uranu do zastosowań militarnych.

W procesie przerobu paliwa powstają odpady ciekłe, gazowe oraz stałe, wysoko-, średnio- bądź niskoaktywne. Odpady wysokoaktywne po odpowiednim przetworzeniu są składowane w specjalnie wyznaczonych i przystosowanych do tego magazynach centralnych dla całego kraju.

W procesie przerobu wyodrębniane są użyteczne pierwiastki, np. metale ziem rzadkich (niektóre otrzymywane praktycznie tylko tą drogą). Wyodrębnione Cs-137, Te-99, Sr-147 są zagęszczane i magazynowane.

Unieszkodliwianie gazowych produktów rozszczepienia (Kr-85, I-129), lotnych związków ^{14}C i trytu może być przeprowadzane różnymi metodami. Po oczyszczeniu mogą być one uwalniane do atmosfery, ale tak, by zachować obowiązujący dopuszczalny poziom promieniowania na zewnątrz zakładu, lub mogą być zagęszczane i składowane z odpadami wysokoaktywnymi. Tryt może być odprowadzany do wód gruntowych lub otwartych zbiorników wodnych. Spośród wszystkich zakładów przemysłu jądowego największa koncentracja trytu występuje wokół zakładów przerobu paliwa.

Podstawowym radioaktywnym składnikiem ścieków jest woda trytowa T_2O ($^3\text{H}_2\text{O}$). Całkowite usunięcie jonów trytu przy zastosowaniu konwencjonalnych metod zagęszczania nie jest możliwe i są one podstawowym źródłem promieniowania w ściekach. Czas połowicznego rozpadu trytu wynosi 12,33 roku. Dlatego prowadzona jest obserwacja jego obecności i rozprzestrzeniania się w środowisku przy różnych metodach unieszkodliwiania odpadów ciekłych.

Odprowadzenie ścieków do wód gruntowych zawierających materiały promieniotwórcze (tryt) poprzez specjalne studnie lub baseny należy do bardzo rzadkich metod pozbywania się odpadów. Jest to metoda wymagająca znacznego zaangażowania środków na badania hydrologiczne i geologiczne w celu ustalenia kierunków przepływu wód podziemnych i kosztownej okresowej kontroli skażeń ze szczególnym uwzględnieniem obszarów poboru wody pitnej.

Możliwe jest również odprowadzanie ścieków zawierających głównie tryt do wód powierzchniowych, ale wymaga to ich znacznego rozcieńczenia i jest wykorzystywane wówczas, gdy zakłady znajdują się w pobliżu dużych rzek, jezior lub morza. Ścieki radioaktywne są transportowane z obszaru procesu technologicznego do oczyszczalni ścieków, gdzie są oczyszczane, tak aby ich poziom aktywności spadł znacznie poniżej dopuszczalnych limitów emisji, przed ich uwolnieniem do systemu wodnego. Oczywiście konieczna jest również okresowa kontrola poziomu promieniowania ze względu na możliwą kumulację materiałów radioaktywnych.

W zależności od stosowanej technologii przerobu paliwa oraz jego ilości bardziej ekonomiczną metodą unieszkodliwiania odpadów zawierających tryt jest składowanie go w przechowalnikach odpadów wysokoaktywnych.

3.4 Ciepło odpadowe

Bardzo ważnym elementem ochrony środowiska jest zagadnienie odprowadzania niewykorzystanego do produkcji energii elektrycznej ciepła traktowanego jako odpad i nazywanego

cieplem odpadowym. W elektrowniach wykorzystujących paliwa kopalne znaczna ilość tego ciepła jest uwalniana przez komin wraz z produktami spalania. W elektrowniach jądrowych ciepło jest odprowadzane do zbiorników wodnych.

Jedynymi zakładami przemysłu jądrowego wytwarzającymi duże ilości ciepła odpadowego są elektrownie. Systemy chłodzenia elektrowni wykorzystują duże objętości wody. Ciepło generowane przez elektrownię jądrową pochodzi z reakcji rdzenia oraz basenów wypalonych paliwa. Obecnie stosowane są trzy metody usuwania ciepła z elektrowni jądrowych. Są one częściowo podobne do stosowanych w elektrowniach konwencjonalnych.

Pierwsza metoda to jednokrotny przepływ wody chłodzącej – obieg otwarty. Druga metoda opiera się na zamkniętym obiegu chłodzenia. Trzecia metoda to połączenie obu tych cykli w tzw. systemie zmiennym.

Chłodzenie w obiegu otwartym polega na jednokrotnym przepływie przez chłodnice wody chłodzącej pobieranej z rzeki, jeziora, sztucznego zbiornika wodnego, morza. Elektrownie jądrowe pracujące w tym systemie chłodzenia są lokalizowane w pobliżu wielkich zbiorników wodnych. W celu uzyskania dobrej wydajności chłodzenia w tym systemie konieczne jest przepompowywanie przez układ wymienników ciepła ogromnych ilości wody. Woda ta nie ulega skażeniu w procesie wytwarzania energii elektrycznej, gdyż nie ma kontaktu z elementami radioaktywnymi.

Chłodzenie w obiegu zamkniętym wykorzystuje ciągle schładzanie wody w wieżach chłodniczych lub basenach. Woda schłodzona w wieżach chłodniczych powraca do obiegu chłodzącego. Jej ubytki są kompensowane przez pobór wody ze zbiorników wodnych: jezior lub rzek. Woda ta nie opuszcza elektrowni i w związku z tym nie ma potrzeby poddawania jej procesom oczyszczania. Nie ma ona kontaktu ze środowiskiem. Elektrownie, w których wykorzystywany jest ten system, są lokalizowane w rejonach z niedoborami wody.

System zmienny stanowi kombinację obu powyższych systemów. Należy podkreślić, że systemy usuwania ciepła stanowią wtórny obieg wodny nie mający kontaktu z substancjami promieniotwórczymi.

Woda przed wprowadzeniem jej do systemu chłodzenia jest filtrowana. Po przejściu przez chłodnicę jest ona odprowadzana, w systemie otwartym, do środowiska, przy czym jej temperatura jest wyższa o 10–12 °C. W morzu i rzece cieplejsza woda zostaje rozproszona, powodując ewentualnie drobne zakłócenia w środowisku w pobliżu kanału wylotowego. Natomiast w sztucznych, zamkniętych zbiornikach wodnych i jeziorach może spowodować podniesienie temperatury, wpływając w dłuższym czasie w istotny sposób na ekosystem całego obszaru, a nawet na mikroklimat. Podwyższenie temperatury wody w zbiornikach wodnych ma istotny wpływ na zawartość tlenu decydującego o rozwoju fauny i flory. Prowadzone są próby ograniczenia ilości ciepła odpadowego przez zwiększenie sprawności elektrowni jądrowej i wprowadzanie nowych konstrukcji reaktorów. Pewną metodą ochrony zbiorników wodnych przed przegrzaniem są próby wydajniejszego chłodzenia wody w wieżach chłodniczych, basenach rozbryzgowych i chłodnicach powietrznych. W elektrowniach usytuowanych nad brzegami oceanów rozważana jest koncepcja poboru zimnej wody z dużych głębokości. Jednak wywołane w ten sposób sztuczne prądy mogą mieć niszczący wpływ na środowisko w pobliżu elektrowni. Należy podkreślić, że wykorzystanie wody

do celów chłodniczych w elektrowniach ma również istotny wpływ na gospodarkę wodną dużych obszarów kraju i czynione są różne starania mające na celu zmniejszenie jej zużycia.

Nasuującym się rozwiązaniem ochrony środowiska przed przegrzaniem jest wykorzystanie ciepła odpadowego w ciepłownictwie komunalnym lub zastosowaniach przemysłowych. Pierwsze próby przeprowadzono w Szwecji i Szwajcarii. Jednak szersze wykorzystanie ciepła odpadowego w ogrzewaniu komunalnym w elektrowniach jądrowych jest utrudnione ze względu na ich oddalenie od dużych aglomeracji wynikające z przepisów bezpieczeństwa. W pewnych okolicach próbowano wykorzystywać ciepłą wodę w gospodarstwach rolnych wydłużając okres wegetacyjny i zmniejszając skutki mrozów. Jest to jednak wykorzystanie sezonowe nie rozwiązujące istoty problemu.

Dodatkowym problemem w pozbywaniu się ciepła odpadowego są zmiany klimatyczne powodujące wyjątkowo niebezpieczne zjawiska pogodowe, takie jak fale upałów, susze, obniżone lub silne i gwałtowne opady, huragany itd., co ma wpływ na pracę systemów chłodzących wykorzystujących wieże chłodnicze.

3.5 Unieszkodliwianie wypalonego paliwa

W zamkniętym cyklu paliwowym około 97% wypalonego paliwa wraca do elektrowni, a tylko 3% stanowi odpady wysokoaktywne.

Odpady promieniotwórcze powstają w każdym zakładzie cyklu paliwowego: w kopalniach rud uranu, zakładach ich przerobu, zakładach produkcji paliwa jądrowego i przerobu wypalonego paliwa, reaktorach energetycznych oraz w innej działalności związanej z techniką jądrową, takiej jak eksploatacja reaktorów badawczych, likwidacja urządzeń jądrowych czy wykorzystywanie izotopów promieniotwórczych w przemyśle, medycynie i badaniach naukowych, jak również likwidacja skutków wypadków jądrowych. Tak wielka różnorodność powstałych odpadów wymaga wprowadzenia ich klasyfikacji. Najczęściej stosowanym kryterium jest postać fizyczna i aktywność promieniotwórcza. Odpady mogą być w stanie stałym, ciekłym i gazowym, o aktywności niskiej, średniej i wysokiej. Oczywiście różnią się one również właściwościami fizycznymi, przede wszystkim rodzajem promieniowania i czasem półrozpadu.

Odpady promieniotwórcze są w zakładach unieszkodliwiania odpadów sortowane i przetwarzane do postaci umożliwiającej ich długotrwałe przechowywanie. Wszystkie odpady selekcyjonowane są według aktywności. Wypalone paliwo jest odpadem wysokoaktywnym, wymagającym szczególnie długiego procesu przygotowawczego do składowania. Wynika to przede wszystkim z konieczności „schłodzenia” wyjętego z reaktora paliwa. Jest ono przechowywane około 10 lat w basenie; w tym czasie spada jego aktywność i temperatura. Woda w basenie działa jako osłona przed promieniowaniem i chłodzi paliwo. Następnie, przed ostatecznym przetransportowaniem do zakładów, może być jeszcze magazynowane w suchym przechowalniku.

Podstawowym celem unieszkodliwiania odpadów jest utworzenie szczelnego systemu barier izolującego odpady radioaktywne od biosfery.

System barier izolujących jest dopasowywany do rodzaju odpadów, ich postaci fizycznej, aktywności, czasu półrozpadu, przewidywanego zagrożenia dla ludzi i środowiska, z uwzględnieniem potencjalnej toksyczności. Najwięcej barier wymagają odpady wysokoaktywne. Dla odpadów niskoaktywnych wymagania są znacznie łagodniejsze. Poziom promieniowania na zewnątrz przechowalników odpadów, podobnie jak dla wszystkich zakładów przemysłu jądrowego zlokalizowanych na ogół pod ziemią, nie może przekraczać 0,1 mSv/rok.

Izolacja odpadów radioaktywnych polega głównie na uniemożliwieniu rozpraszania się materiałów promieniotwórczych i odseparowaniu ich od działania wody (wymywania, powstawania reakcji chemicznych). Dla łatwiejszego osiągnięcia tych celów i zaoszczędzenia powierzchni składowania koncentracja odpadów powinna być jak największa przy jak najmniejszej ich objętości. System barier zabezpieczających odpady przed kontaktem z biosferą jest kilkustopniowy. Zanim odpady zostaną zapakowane do pojemników do przechowywania, ich objętość zostaje zmniejszona za pomocą różnych metod, np. cięcia mechanicznego lub termicznego oraz ściskania.

Tak przygotowane odpady są zatapiane w trudno rozpuszczalnych związkach chemicznych, co zapobiega rozsypaniu, rozproszeniu, rozpyleniu i wymywaniu substancji promieniotwórczych. Najczęściej używaną substancją jest szkło. Proces witrażacji – zatapiania w szkle – tworzy bardzo trwałe, odporne na wymywanie i chemikalia, łatwe do składowania bloki, zwykle cylindryczne. Jest to metoda stosowana przede wszystkim do składowania odpadów wysokoaktywnych. Innym spoiwem może być beton spełniający jednocześnie rolę osłony biologicznej, asfalt, polimery lub ceramika.

Zestalone odpady wysokoaktywne są zabezpieczane przed uszkodzeniami mechanicznymi, działaniem czynników atmosferycznych i kontaktem z wodą przez cylindryczne, hermetyczne opakowanie metalowe wykonane z miedzi lub ze stali nierdzewnej. W niektórych składowiskach (Finlandia) bardzo odporna na działanie substancji w wodach podziemnych miedź jest, ze względu na zwiększenie odporności mechanicznej, wzmocniana obudową stalową. Miedziane pojemniki z odpadami mają być otoczone gliną bentonitową i osadzone w otworach wywierconych głęboko w skale. Gлина bentonitowa ma dodatkowe działania ochronne, pełniąc rolę amortyzatora w przypadku drgań lub pęknięć skały, jak również stanowi ochronę przed wodą. Obudowy metalowe są cylindryczne (beczki) i mają znormalizowane wymiary.

Beczki z odpadami wysokoaktywnymi są umieszczane w betonowych silosach obudowanych stalą nierdzewną. Betonowa konstrukcja składowiska stanowi dodatkowe zabezpieczenie przed czynnikami atmosferycznymi, korozją i wyciekami substancji promieniotwórczych.

Przed zamknięciem składowiska wykonywana jest dodatkowa, wodoszczelna pokrywa wielowarstwowa, w celu ograniczenia dostępu wody, spowolnienia korozji opakowań i wymywania substancji promieniotwórczych. Jest to szczególnie istotne dla płytkich składowisk. Nieco inne są wymagania dla składowisk głębokich (500–900 m pod ziemią), w których przechowywane są odpady wysokoaktywne. Tutaj zagrożeniem nie są opady, ale podziemne ciekły wypływające na powierzchnię, szczególnie do miejsc poboru wody do celów spożywczych. Dlatego dla składowiska tego typu odpadów wybór lokalizacji musi być szczególnie dokładnie przebadany, z uwzględnieniem nawet niewielkich możliwych wstrząsów sejsmicznych.

Lokalizacja składowiska dla każdego rodzaju odpadów musi spełniać wszystkie wymagania ochrony środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem warunków geologicznych i hydrologicznych.

Aktualnie w Polsce projektuje się wybudowanie dwóch elektrowni jądrowych, do których paliwo będzie dostarczane z zagranicy, a po wypaleniu odsyłane do producenta w celu przerobu (tj. odzyskania plutonu i niewypalonego uranu). Pozostałe odpady z przerobu miałyby być składowane w Polsce. Pierwsze wypalone paliwo, które mogłoby być odesłane do producenta, dostępne będzie po około 20–30 latach od chwili uruchomienia elektrowni. Dlatego też istnieje znaczny zapas czasu potrzebny do podjęcia ostatecznych decyzji, takich jak np. budowa własnych zakładów przerobu paliwa, wybór lokalizacji składowiska odpadów i jego konstrukcja czy technologia składowania. Budowa własnego zakładu przerobu powinna być rozważana przede wszystkim pod kątem opłacalności ekonomicznej. Obecnie stosowane technologie są bowiem bardzo wydajne i przy małej liczbie czynnych reaktorów zakład taki miałby duże przestoje. Na chwilę obecną można więc przyjąć, że w naszym kraju, z punktu widzenia ochrony środowiska, najważniejszym zagadnieniem jest budowa elektrowni oraz centralnego składowiska odpadów promieniotwórczych.

3.6 Energetyka jądrowa i źródła odnawialne

Obawa o wyczerpywanie się źródeł konwencjonalnych oraz ich szkodliwy wpływ na środowisko sprawia, że trwają intensywne poszukiwania nowych źródeł energii. Należą do nich energia słoneczna, wiatrowa, pływów i fal morskich, ciepła oceanów, gorących skał, geotermiczna.

Wielką zaletą tych źródeł energii jest ich znikomy wpływ na destabilizację środowiska naturalnego, natomiast istotnymi wadami są koszty budowy oraz trudność ich wykorzystywania w procesach produkcyjnych wymagających ciągłości dostawy energii. Dlatego w dostarczaniu energii elektrycznej, w ramach zrównoważonego rozwoju, szczególne miejsce zajmuje energetyka jądrowa. Wynika to z jej ogromnej wydajności, tzn. ilości uzyskiwanej energii w stosunku do ilości zużytego materiału (jedno rozszczepienie U-235 dostarcza 200 MeV energii, spalanie jednego atomu węgla dostarcza 4,5 eV, zużycie 1 kg paliwa jądrowego odpowiada ok. 2 500 tonom węgla). Przy obecnej rocznej produkcji energii elektrycznej wynoszącej w przybliżeniu 15 GW, uzyskiwanej np. przy spalaniu 60 mln ton węgla kamiennego (przy założeniu sprawności silników cieplnych na poziomie około 37%), ilość zużytego uranu (przy założeniu wykorzystywania wyłącznie czystego uranu U-235) wynosiłaby 24 000 kg, czyli 24 tony. Ponadto istnieją nadzieje na wykorzystywanie zużytego paliwa w przyszłości.

Innym elementem przemawiającym za energetyką jądrową, z punktu widzenia ochrony środowiska, jest również powierzchnia zajmowana przez elektrownie. Blok jądrowy (elektrownia) o mocy 1 000 MW zajmuje powierzchnię około 2 km² (obecnie moc tych reaktorów jest powiększana do 1 300 MW bez zmiany powierzchni). Elektrownia słoneczna o podobnej mocy wymaga 30 km² terenu, a jej wydajność zależy nie tylko od sprawności przetworników fotoelektrycznych, ale i od tzw. stałej słonecznej, tj. średniej ilości energii docierającej ze słońca w miejscu instalacji. Elektrownia wiatrakowa wymaga z kolei około 100 km², na których muszą się pomieścić niezliczone ilości konstrukcji wiatrakowych (obecnie

wymiar jednego skrzydła nowoczesnego wiatraka energetycznego wynosi około 40–60 m i powinien się znaleźć na wysokości około 80–120 m). Zajęcie tak dużej powierzchni, de facto przynajmniej w części wyłączające ją z użycia dla innej działalności ze względów bezpieczeństwa, obniża również np. walory krajobrazowe danej okolicy. Argumenty te skłaniają do opowiedzenia się za energetyką jądrową w ramach zrównoważonego rozwoju.

3.7 Inżynieria środowiska

Techniczna dziedzina łącząca ochronę przyrody z nowoczesnymi technologiami, zapewniająca równowagę środowiskową i zarządzanie zasobami wodnymi, nazywana jest inżynierią środowiska.

W początkowym, niezwykle dynamicznym okresie rozwoju produkcji przemysłowej i unowocześniania rolnictwa nie przywiązywano szczególnej uwagi do naturalnych zasobów przyrody, wykorzystując je bez ograniczeń, z przekonaniem, że powstające w trakcie procesu industrializacji rozmaite odpady będą wchłaniane przez środowisko bez widocznej dla niego szkody. Koncentrowano się przede wszystkim na rozwiązaniach technicznych do masowej produkcji dóbr konsumpcyjnych, co prowadziło do wzrostu zapotrzebowania na energię. Przy rozproszonym i względnie niewielkim zaludnieniu nie miało to widocznego wpływu na samooczyszczanie się środowiska naturalnego, jednak efektem tego podejścia było rabunkowe wykorzystanie zbiorników wodnych, lasów i powietrza, za czym postępowała dewastacja krajobrazu i powierzchni uprawnych. Z czasem stawało się coraz bardziej oczywiste, że zdolność środowiska naturalnego do wchłaniania odpadów gazowych, ciekłych i stałych oraz ciepła odpadowego, promieniowania czy nawet hałasu jest ograniczona. Zaistniała więc konieczność dokładniejszego zbadania i opisanie tych zjawisk, co doprowadziło do powstania tzw. inżynierii środowiska. Metody stosowane przez tę gałąź nauki można wykorzystać do określenia wpływu energetyki jądrowej na środowisko oraz populację ludzką.

Problem ochrony środowiska powinien być rozwiązywany kompleksowo w skali globalnej, uwzględniając różne czynniki, tak by rozwój gospodarczy był ściśle powiązany z wykorzystaniem zasobów naturalnych w sposób zrównoważony. W związku z tym zdefiniowano tzw. strategię zrównoważonego rozwoju, której pełną definicję zawarto w 27 zasadach Zrównoważonego Rozwoju powstałych podczas tzw. Szczytu Ziemi – „Deklaracja z RIO” z 14 czerwca 1992 roku. W skrócie za rozwój zrównoważony uważa się taki rozwój, który zaspokaja potrzeby współczesnych społeczeństw, bez pozbawiania przyszłych pokoleń możliwości zaspokajania także ich potrzeb.

Począwszy od raportu Sekretarza Generalnego ONZ U Thanta z 1969 roku, idea zrównoważonego rozwoju pojawiała się w kolejnych inicjatywach: Deklaracji Sztokholmskiej, programie „Troska i Odpowiedzialność” (którego założenia zaczęto realizować w Polsce od 1993 r.), raporcie ONZ „Nasza wspólna przyszłość” z 1987 roku, Karcie Biznesu na rzecz ekorozwoju z 1991 r., Deklaracji z Rio de Janeiro z 1992 roku oraz Deklaracji z Johannesburga „Rio+10” z 2002 roku. W wielu krajach podejmowano również indywidualne akcje wymuszające na koncernach przemysłowych konkretne działania na rzecz środowiska, a także tworzone nowe organizacje kontrolujące jego stan. Jedną z ważniejszych inicjatyw na rzecz ochrony środowiska, przyczyniającą się pośrednio do rozszerzania idei

zrównoważonego rozwoju, była Ramowa Konwencja w sprawie Zmian Klimatycznych, szerzej znana jako „Protokół z Kioto”, z 1997 roku. Wprowadzała ona ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Unia Europejska potwierdziła ustalenia z Rio de Janeiro na konferencji w Amsterdamie w 1997 roku, rozpoczynając tym samym wprowadzanie na terytorium Unii zaczątków wspólnej polityki ekologicznej.

3.8 Systemowa ochrona środowiska

W poszczególnych krajach powoływane są państwowe inspektoraty ochrony środowiska, których zadaniem jest:

- prowadzenie badań nad zmianami zachodzącymi w środowisku naturalnym,
- utworzenie systemu monitoringu środowiska (określenie stopnia zagrożeń i poziomów alarmowych),
- kontrola wypełniania międzynarodowych zobowiązań. Ze względu na różnorodność przewidywanych, możliwych zmian system powinien tworzyć zestaw wyspecjalizowanych jednostek badawczych dysponujących własną siecią zbierania danych. Ich zadaniem jest określenie stanu zanieczyszczenia środowiska, ocena możliwych zagrożeń i prognozowanie ich rozwoju oraz przygotowanie sposobów neutralizacji. Najważniejszym elementem prognozy jest określenie szybkości zachodzących zmian (lokalnych lub rozprzestrzeniających się), ich ewentualnego wpływu na ludność, zwierzęta, rośliny i ekosystemy, a nawet wpływu na krajobraz oraz konstrukcje wzniesione przez ludzi. Badania powinny określać źródło zagrożeń (substancje chemiczne, promieniowanie, hałas, ciepło), szybkość rozprzestrzeniania się oraz wskazywać przekroczenie poziomów alarmowych. W razie ich przekroczenia powinny być uruchamiane procedury szybkich działań prewencyjnych. Obecnie używane sieci pomiarowe (zbierania danych) są modernizowane i łączone w sieci międzynarodowe, posiadające możliwość zbierania danych przy użyciu satelitów. W Polsce system monitoringu środowiska jest organizowany przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.

Instalacje jądrowe powinny spełniać wszystkie wymagania stosowane do oceny działania instalacji przemysłowych, określone w tzw. koncepcji BAT (Best Available Technology), sformułowanej i zaleconej do stosowania w Unii Europejskiej. Kryteria BAT określa m.in. Dyrektywa Rady 96/61/UE z 24 września 1996 r., dotycząca zintegrowanej kontroli i zapobiegania zanieczyszczeniom, oraz OJ L 257 z 10 października 1996 r. (Integrated Pollution Prevention and Control Directive – IPPC Directive), określająca tzw. „zintegrowane pozwolenie” na wykorzystanie środowiska do celów gospodarczych. Zapisy te obowiązują w Polsce od 2001 roku. Uzyskanie pozwolenia na działalność przemysłową powinno zawierać:

- opis instalacji (lokalizacja, rodzaj produkcji, stan prawny i organizacyjny, technologia, warunki poboru wody, emisje) oraz wpływu na środowisko (opis środowiska wokół lokalizacji z określeniem flory i fauny),

- źródła emisji (wpływ na czystość powietrza, wód powierzchniowych i podziemnych, promieniowanie elektromagnetyczne lub jądrowe, fale akustyczne, przewidywane awarie, sposoby ograniczenia emisji: ochrona powietrza, gleby, wody, gospodarka odpadami),
- zakończenie eksploatacji (monitoring, analizy zgodności funkcjonowania instalacji z koncepcją BAT).

Proces budowy bardziej złożonych obiektów przemysłowych wymaga niezwykle rozbudowanych i długotrwałych procedur popartych rozległymi badaniami środowiska. Zwykle przeprowadzany jest tzw. bilans materiałowy, polegający na oszacowaniu ilości zasobów środowiska użytych do wytworzenia finalnego produktu zakładu przemysłowego i ilości zasobów zwróconych środowisku w stanie pierwotnym i ilości zasobów przetworzonych traktowanych jako nieszkodliwe odpady.

Ograniczenie destrukcyjnego wpływu budowy obiektów przemysłowych na środowisko stanowi jedno z ważniejszych zadań współpracy międzynarodowej.

Wzrastające zapotrzebowanie na tanią energię elektryczną będzie wymuszało dalszy rozwój energetyki jądrowej, która jest przyjazna dla środowiska naturalnego, ponieważ jest praktycznie energetyką bezemisyjną. Jedynym trudnym do usunięcia odpadem, mającym lokalny, niewielki wpływ na środowisko, jest ciepło odpadowe. Należy podkreślić, że przemysł jądrowy jest gałęzią przemysłu nieszkodliwiającą i magazynującą swoje odpady.

Rozdział 4

Zasada wyboru lokalizacji obiektów jądrowych

Najwięcej emocji i dyskusji w początkowej fazie budowy energetyki jądrowej wywołuje kwestia lokalizacji obiektów jądrowych. Obiektami jądrowymi są zabudowania i urządzenia, w których materiał jądrowy jest produkowany, przetwarzany, przerabiany, przechowywany lub magazynowany i których budowa wymaga specjalnych zezwoleń. Materiałami jądrowymi nazywa się materiały, które mogą być użyte do budowy jądrowych środków wybuchowych.

W Międzynarodowym Systemie Zabezpieczeń (Safeguards) materiałem jądrowym jest każdy materiał zawierający izotopy Pu-239, U-233, U-235 lub ich mieszaninę, jak i wszelki materiał wyjściowy: uran naturalny, uran wypalony oraz tor w każdej postaci. System Zabezpieczeń (Safeguards) został powołany w celu prowadzenia kontroli wypełnienia warunków Traktatu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej NPT (Non-Proliferation Treaty) przez państwa sygnatariusze.

Obecnie wybór lokalizacji staje się szczególnie ważny ze względu na przewidywane wykorzystanie SMR-ów w przemyśle. Ich rozproszona lokalizacja wymusza konieczność przeprowadzenia rzetelnej oceny lokalizacji obiektów jądrowych zgodnej z wymaganiami międzynarodowymi i może budzić uzasadnione obawy nie tylko przed rozprzestrzenieniem materiałów jądrowych, ale także o bezpieczeństwo energetyki jądrowej dla sąsiednich zurbanizowanych obszarów. Można się również spodziewać bardzo silnego oporu społeczności lokalnych. Dlatego wybór lokalizacji powinien być przeprowadzony niezwykle starannie.

4.1 Bezpieczeństwo wyboru lokalizacji

Przy wyborze lokalizacji zakładów przemysłu jądrowego – obiektów jądrowych – szczególnie ważna jest ocena rozprzestrzenienia się radioaktywności i wykonalności planów bezpieczeństwa. Podstawowym celem opracowania wymagań dotyczących lokalizacji obiektów jądrowych jest ochrona pracowników tych obiektów, ludności i środowiska przed szkodliwym działaniem promieniowania jonizującego. Współczesne zalecenia ochrony środowiska dotyczą przede wszystkim zagadnień ochrony czystości powietrza, wody i gleby, ograniczenia emisji różnych substancji i promieniowania, ograniczenia wibracji i hałasów, zachowania krajobrazu, ochrony zabytków i ekosystemów, ograniczenia wpływu na zmianę klimatu oraz zapewnienia bezpieczeństwa ludności z uwzględnieniem zagrożeń naturalnych. Należy podkreślić, że aby realizować ten cel, wymagania bezpieczeństwa muszą być unowocześniane wraz z postępem technologicznym i rozwojem wiedzy naukowej.

Proces wyboru lokalizacji budowy obiektu jądrowego wymaga zdefiniowania kryteriów wyboru obszaru lokalizacji i ustalenia priorytetów działań kryzysowych. Proces wyboru rozpoczyna się szerokim przeglądem wszelkich możliwych lokalizacji, pozwalającym wyse-

lekcjonować jedną lub kilka najbardziej odpowiednich, z których – po szczegółowej analizie różnych wariantów zapewnienia bezpieczeństwa – można zacząć ubiegać się o uzyskanie pozwolenia na realizację projektu obiektu jądrowego.

Przy analizie cech regionu należy zwrócić uwagę na zagrożenia naturalne i wywołane działalnością człowieka, mogące mieć wpływ na bezpieczeństwo obiektu jądrowego w czasie jego eksploatacji, a szczególnie w chwili awarii wymagającej działań specjalnych. Wymagania oceny lokalizacji obiektu jądrowego dotyczą wszystkich rodzajów obiektów tworzących cykl paliwowy: elektrowni jądrowych, reaktorów badawczych (i doświadczalnych zestawów krytycznych), zakładów produkcji radioizotopów, przechowalników wypalonego paliwa, zakładów wzbogacania uranu, zakładów produkcji paliwa jądrowego, zakładów przerobu paliwa, przechowalników odpadów wysoko- i niskoaktywnych oraz laboratoriów badawczo-rozwojowych związanych z cyklem paliwowym. Proces oceny lokalizacji rozpoczyna się w chwili jej wyselekcjonowania i trwa przez cały okres eksploatacji obiektu jądrowego.

W rejonie lokalizacji obiektu jądrowego wyróżnia się wokół niego kilka stref:

- Strefa pierwsza – **zamknięta** – to obszar, w którym znajduje się obiekt jądrowy. Promień strefy zamkniętej zależy od rodzaju obiektu i zwykle nie przekracza 2 km.
- Druga strefa – **ochronna**, zewnętrzna, czasem nazywana sąsiedztwem obiektu – to obszar bezpośrednio otaczający proponowany obszar obiektu. Użytkowanie terenu wokół strefy zamkniętej, zwykle o promieniu ok. 5 km, jest ograniczone; nie mogą tam znajdować się np. zakłady przemysłowe, rafinerie, lotniska czy szpitale.
- Trzecia strefa – **region** – jest to obszar otaczający obiekt, obejmujący również strefę zewnętrzną. Jego rozmiar jest określony dla każdego konkretnego zagrożenia. Zwykle rozciąga się od 16 do 20 km w kierunku rozprzestrzeniania się zagrożenia.

Strefy bezpieczeństwa są obowiązkowe dla wszystkich obiektów jądrowych i mają istotny wpływ na wybór ich lokalizacji.

Część gruntów, na których powstaje obiekt jądrowy, będzie wyłączona z innego użytkowania na okres około 100 lat (np. zakładając czas pracy elektrowni na około 80 lat). Zakłada się, że po likwidacji obiektu teren powróci do stanu początkowego i powinna również zostać zlikwidowana powiązana z nim infrastruktura: drogi, trakcje elektryczne itp. Może to mieć istotny wpływ na dalsze użytkowanie gruntów i krajobraz.

4.2 Kryteria wyboru lokalizacji obiektu jądrowego

Przy wyborze lokalizacji dla obiektów jądrowych, wg zaleceń MAEA, należy zwrócić przede wszystkim uwagę na bezpieczeństwo ludności i środowiska, uwzględniając w szczególności czynniki mające bezpośredni wpływ na pracę obiektu, tzn. **zjawiska naturalne, działalność człowieka i zjawiska trudno przewidywalne**. Pośrednio na bezpieczną pracę obiektu wpływają czynniki ekonomiczne i techniczne. Szczegółowe wyliczenie i scharakteryzowanie wszystkich spodziewanych zjawisk mających wpływ na lokalizację obiektów jądrowych przedstawiono w dokumentach MAEA. Wszystkie zjawiska muszą przed przystąpieniem do selekcji obszaru lokalizacji obiektu jądrowego zostać dokładnie przebadane, łącznie z historią rejonu pozwalającą ocenić częstość ich występowania.

Zjawiska naturalne. Najważniejszym zagadnieniem jest ocena geologiczna rejonu i zagrożeń wywołanych ruchami gruntu, takich jak: trzęsienia ziemi, wibracje gruntu, zmiany strukturalne podłoża powodujące przemieszczenie się obiektu, aktywność uskoków tektonicznych i ich wzajemne oddziaływanie, zjawiska geotechniczne (niestabilność zbocza, osuwiska, osiadanie, wypiętrzanie, upadki skał, upłynnianie gleby, erozja, wieczna zmarzlina), zjawiska wulkaniczne (wypływ lawy, pyły wulkaniczne).

Inne zjawiska naturalne, np. powódzie, zmiany poziomu wód gruntowych, zalewanie wybrzeża (fale morskie, tsunami, huragany), zagrożenia hydrologiczne (powódzie, awarie tam i grobli, susze, blokowanie kanałów dopływowych przez osady, wodorosty, lód, wycieki przemysłowe), zjawiska meteorologiczne (ulewy, opady gradu, opady śniegu, burze, silne wiatry, huragany, sztormy, tornada), zjawiska lokalne (burze piaskowe, pożary) i połączenie kilku zjawisk są brane pod uwagę w rejonach, w których prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest wysokie.

Ocena innych zagrożeń naturalnych polega na zbadaniu specyficznych dla danego regionu zjawisk, które mogłyby mieć wpływ na bezpieczeństwo obiektu jądrowego. Proponowane nowe miejsce lokalizacji uznaje się za nieodpowiednie, gdy wiarygodne badania wskazują na istnienie potencjalnych nieusuwalnych zagrożeń.

Działalność człowieka może być przypadkowa lub zamierzona. **Zamierzona działalność człowieka**, mająca wpływ na wybór lokalizacji obiektów jądrowych, jest powiązana z działalnością przemysłową.

Niezamierzona działalność człowieka jest związana z trudno przewidywalnymi zdarzeniami wywołanymi wpływem uwolnionych w wyniku awarii materiałów radioaktywnych na ludzi i środowisko.

Ważnym elementem dotyczącym lokalizacji obiektu, niezwiązanym bezpośrednio z bezpieczeństwem, jest określenie **możliwości realizacji planu bezpieczeństwa** obiektu jądrowego, np. lokalizacja obiektu na wyspie, infrastruktura transportowa, sieć komunikacyjna, względy humanitarne (ludzie starsi, osoby z niepełnosprawnościami, pacjenci szpitali, więźniowie), instalacje przemysłowe.

Ocena okresowa

Wszystkie wymienione zjawiska i działania są podstawą oceny lokalizacji obiektu jądrowego. Przy wyborze lokalizacji należy pamiętać, że ocena będzie trwała przez cały okres eksploatacji obiektu. Dlatego w zaleceniach MAEA powinna być również zawarta sugestia, jakie zjawisko należy uznać w danym rejonie za najbardziej niebezpieczne i jak je monitorować.

Przeglądy powinny być przeprowadzane w regularnych odstępach czasu (zwykle nie rzadziej niż raz na dziesięć lat) lub w przypadku aktualizacji wymogów bezpieczeństwa, wykrytych wad projektu, zmian technicznych lub konstrukcyjnych.

Odrębnym zagadnieniem jest zapewnienie bezpieczeństwa materiału jądrowego przed kradzieżą i sabotażem.

4.3 Wybór lokalizacji

Przedstawione powyżej wymagania MAEA dotyczą głównie problemów lokalizacji związanych z bezpieczeństwem jądrowym obiektu. Nie zawierają wskazań związanych z jego eksploatacją i wymagań lokalizacyjnych zapewniających pracę obiektu. W przypadku elektrowni jądrowych powinno się szukać takiej lokalizacji, by zapewnić dostępność wystarczającej ilości wody do chłodzenia reaktorów jądrowych i innych potrzeb technicznych oraz ocenić związany z tym wpływ obiektu na lokalny ekosystem. Dlatego przy wyborze lokalizacji należy również zwrócić uwagę na gospodarkę wodną w rejonie obiektów jądrowych, uwzględniając zmianę poziomu wód gruntowych, nawadnianie obszarów rolniczych, dostarczanie wody do gospodarstw domowych, a nawet ewentualne problemy nawigacyjne żeglugi śródlądowej. Z gospodarką wodną związany jest również problem odprowadzania ciepła odpadowego wpływającego na zmianę mikroklimatu oraz odprowadzania ścieków. Nie ma też wskazań dotyczących dostępu do obiektu, transportu i usytuowania obiektu w sieci energetycznej. Te zalecenia powinny być zawarte w przepisach krajowych i brane pod uwagę w całym procesie oceny lokalizacji.

Wybór lokalizacji obiektu jądrowego jest procesem bardzo złożonym i długofalowym, wymagającym zebrania ogromnej ilości danych, na podstawie których opracowywana jest analiza bezpieczeństwa. Obejmuje ona również ocenę rozwiązań konstrukcyjnych (materiałów, stosowanych technologii i standardów inżynierskich) pod kątem bezpieczeństwa. Analiza bezpieczeństwa powinna opisywać projekt uwzględniający zasady konstrukcji, używane materiały, harmonogram budowy, okres eksploatacji i likwidację. Powinna też zawierać opis wszelkich przewidywanych usterek, sposobów ich uniknięcia lub usunięcia oraz przedstawiać granice możliwości konstrukcji i reakcje na nieprzewidziane błędy ludzkie, z uwzględnieniem oceny rozprzestrzeniania się radioaktywności i wykonalności planów bezpieczeństwa. W analizie bezpieczeństwa muszą być uwzględnione wszystkie przedstawione powyżej zalecenia dotyczące lokalizacji. Przetworzenie ogromnej ilości zebranych danych, na podstawie których ma zostać wybrana lokalizacja obiektu, wymaga opracowania nowych matematycznych metod analizy uwzględniających przewidywany okres funkcjonowania obiektu.

Sytuację komplikuje obecnie rosnące zapotrzebowanie na energię wynikające ze wzrostu populacji, urbanizacji, postępu technologicznego i konieczności ochrony środowiska. Powoduje to intensywne poszukiwania nowych bezemisyjnych źródeł energii. W ostatnich latach, przy uznaniu energetyki jądrowej za jedno z najlepszych dostępnych rozwiązań, pojawiło się wiele propozycji. Wśród nich dominują małe reaktory modułowe (Small Modular Reactor, SMR). W projektach wykorzystano dotychczasowe doświadczenia budowy reaktorów energetycznych, jak i opracowano zupełnie nowe konstrukcje. Ich początkowym przeznaczeniem było dostarczanie energii elektrycznej i ciepła jednostkom wojskowym stacjonującym w trudno dostępnym terenie. Obecnie przewiduje się wykorzystanie SMR do wspomagania przemysłowych procesów technologicznych, a powstająca przy okazji energia elektryczna może być wykorzystywana lokalnie. Projektuje się również wykorzystanie SMR-ów w energetyce. Przewidywane szerokie zastosowanie małych modułowych reaktorów jądrowych w różnych dziedzinach wynika z ich podstawowych zalet, a przede wszystkim z obniżenia kosztów i skrócenia czasu budowy. Reaktor i cały zestaw urządzeń będą produkowane w warunkach

fabrycznych, a następnie transportowane do przygotowanego miejsca pracy reaktora. Modułowa konstrukcja umożliwia zwiększenie mocy zestawu reaktorowego. Prowadzi to do utworzenia rozproszonej sieci małych źródeł energii, wytwarzających energię elektryczną blisko centralnej sieci dystrybucyjnej, co może odegrać kluczową rolę w nowoczesnych systemach energetycznych. Zgodnie z klasyfikacją przyjętą przez MAEA małe reaktory to reaktory o mocy elektrycznej mniejszej niż 300 MW(e), a reaktory średniej wielkości – o mocy elektrycznej 300–700 MW(e). Konstrukcje reaktorów SMR są bardzo różnorodne.

Elektrownia jądrowa oparta o technikę SMR (niezależnie od jej mocy) jest obiektem jądrowym, w którym obowiązują wszystkie zalecenia dotyczące bezpieczeństwa. Obiekty wykorzystujące reaktory modułowe powinny posiadać własną infrastrukturę socjalną i administracyjną oraz system ochrony fizycznej i bezpieczeństwa dostosowany do wymagań bezpieczeństwa jądrowego.

Reaktory SMR są na wczesnym etapie opracowania i budowy rozwiązań modelowych. Konieczna jest pełna analiza możliwości realizacji proponowanych rozwiązań i ich wdrożenia. Obecnie obowiązujące kryteria bezpieczeństwa mogą znacznie utrudniać praktyczne wykorzystanie rozwiązań modułowych. Pewną przeszkodą może być wybór lokalizacji, który jest z definicji procesem wielozadaniowym i dla którego jasno ustalono kryteria. Problem wynika między innymi z rozproszenia obiektów i przewidywanego ich wykorzystania w zakładach przemysłowych znajdujących się w wysoko zurbanizowanych obszarach, gdzie wprowadzenie zalecanych stref bezpieczeństwa może być utrudnione lub niemożliwe. Poza tym, zgodnie z zaleceniami wyboru lokalizacji, nie we wszystkich zakładach można wprowadzać technikę jądrową. Natomiast zaletą rozproszonej struktury energetycznej jest jej samowystarczalność. Większość projektów SMR zakłada kilkuletnią pracę reaktora bez uzupełniania paliwa, więc można je instalować w odległych regionach lub regionach bez zasobów naturalnych. Inną zaletą jest łatwe połączenie z istniejącymi sieciami energetycznymi, co jest ważne dla krajów z niedoborem gruntów.

W ogromnej ilości danych potrzebnych do określania lokalizacji muszą się znaleźć informacje o przydatności budowy modułowej sieci elektrowni jądrowych w danym rejonie. Wymaga to zebrania danych geograficznych i danych dotyczących zapotrzebowania regionu na energię. Do przeprowadzenia analizy zebranych informacji i selekcji pozwalającej na przybliżony wybór lokalizacji wykorzystywane są metody:

- wielokryterialna metoda oceny ważonego zagregowanego produktu sumarycznego WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment – WASPAS), która pozwala na ocenę i porównanie różnych rozwiązań w oparciu o wiele kryteriów. Jest to metoda, która łączy w sobie dwa modele: model sumy ważonej (Weighted Sum Model – WSM) i model produktu ważonego (Weighted Product Model – WPM).
- wielokryterialna metoda podejmowania decyzji (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis – SWARA), która pozwala ocenić i ustalić priorytety różnych opcji na podstawie ich atrybutów. Jest używana do określania wag kryteriów wyboru, bez konieczności przeprowadzania pełnej oceny wariantów. Metoda SWARA pomaga określić, jak bardzo poszczególne kryteria wpływają na decyzję, działa krok po kroku, oceniając i modyfikując wagi kryteriów aż do uzyskania optymalnego rezultatu. Główną zaletą SWARA jest brak konieczności przeprowadzania pełnej oceny w celu ustalenia priorytetów wag kryteriów. Istnieją również rozszerzenia metody SWARA,

takie jak Fuzzy SWARA, które pozwalają na uwzględnienie niepewności w ocenie i podejmowaniu decyzji.

Nowe zalecenia dotyczące zasad bezpieczeństwa i licencjonowania SMR powstają przy współpracy ekspertów w powołanym przez MAEA, w marcu 2015 roku, Międzynarodowym Forum Regulatorów. Forum skupia specjalistów opracowujących krajowe normy regulujące zasady wykorzystania nowej klasy reaktorów o mocy nieprzekraczającej 300 MW(e). Budowa modułowa i zwartość konstrukcji są istotą SMR i mają zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo. Modułowość budowy pozwala na rozbudowę obiektu poprzez dołączanie nowych jednostek reaktorowych w tej samej lokalizacji lub tej samej infrastrukturze przy zapewnieniu połączeń między modułami. Problemy związane z bezpieczeństwem jednego z modułów nie powinny wpływać na pracę obiektu.

Zwartość konstrukcji reaktora wprowadza nowe wymagania bezpieczeństwa w czasie projektowania, budowy, uruchamiania, eksploatacji i likwidacji. Przegląd obecnych przepisów bezpieczeństwa sugeruje, że nie ma potrzeby tworzenia całkowicie nowych standardów. MAEA uważa jednak za konieczne opracowanie elastycznych ram regulacyjnych dla innowacyjnych projektów, aby dostosować je do obowiązujących norm bezpieczeństwa.

W Polsce pojawiło się wielu potencjalnych inwestorów chcących zaangażować się w rozwój energetyki jądrowej opartej o SMR. Na razie jest to ruch spontaniczny, proponujący bardzo różne rozwiązania techniczne SMR, z chaotycznymi propozycjami lokalizacyjnymi. Państwowy program wprowadzenia energetyki jądrowej koncentruje się na energetyce wielkoskalowej.

Rozdział 5

Oczyszczanie odpadów ciekłych w elektrowniach jądrowych

Dobrym przykładem dbania o środowisko naturalne jest gospodarka wodna w elektrowni jądrowej. Woda jest tam wykorzystywana przede wszystkim w procesach technologicznych, do chłodzenia reaktora, magazynowania wypalonego paliwa w przechowalniku mokrym, w dekontaminacji oraz w działaniach zwykłych, codziennych (łazienki, kuchnie, pralnie). Woda używana do celów technologicznych jest wykorzystywana w obiegu zamkniętym, a do środowiska po oczyszczeniu odprowadzany jest jej nadmiar.

Z wykorzystaniem wody w obiektach jądrowych i jej zanieczyszczeniem elementami radioaktywnymi wiąże się wiele nieporozumień. Istnieją obawy, że ciekłe wodne mogą wymywać elementy radioaktywne z przechowalników paliwa, jak również obawy dotyczące skażenia wody używanej do chłodzenia reaktorów.

5.1 Zanieczyszczenia wody

Zanieczyszczenia wody mają różną postać fizyczną i chemiczną. Źródłem zanieczyszczeń są odpady:

- komunalne, związane głównie z zagrożeniem bakteriologicznym; jeżeli ich koncentracja nie przekracza pewnej granicy, ulegają naturalnej filtracji przez środowisko i nie wpływają znacząco na jego stan.
- rolnicze, związane ze związkami organicznymi pochodzącymi ze szczątków obumarłych roślin, środków owadobójczych i grzybobójczych, niszczących mikrofaunę i mikroflorę.
- przemysłowe, najgroźniejsze dla środowiska oraz zdrowia człowieka; należą do nich metale ciężkie oraz szkodliwe, trudno rozkładające się substancje organiczne i mineralne, nierozpuszczalne związki chemiczne dostające się do wód powierzchniowych oraz tzw. kwaśne deszcze.
- radioaktywne, budzące najwięcej emocji, które prezentują się stosunkowo niegroźnie. Występują w niewielkich ilościach i małej koncentracji (aktywności). Duże obiekty jądrowe (zakłady wzbogacania lub przerobu paliwa, elektrownie) pracują w wodnym obiegu zamkniętym. Istotny wpływ na środowisko może mieć natomiast lokalne podniesienie temperatury w zbiornikach wodnych używanych w systemach usuwania tzw. ciepła odpadowego, powstającego podczas pracy elektrowni.

5.2 Klasyfikacja odpadów promieniotwórczych

Woda zwracana do środowiska nie powinna podnosić tła okolicy, w której pracuje elektrownia, więcej niż o 0,01 mSv/rok. Zasada ta obejmuje również przypadki uwalniania tzw. odpadów wyłączonych spod kontroli (tzw. exempt waste, EW), które nie podlegają oczyszczaniu, ponieważ nie są uważane za odpady radioaktywne (mimo że zawierają śladowe ilości materiałów promieniotwórczych).

W celu kontroli gospodarki odpadami wprowadzono klasyfikację. Podstawą klasyfikacji jest aktywność promieniotwórcza. Wyróżnia się trzy klasy odpadów:

- **niskoaktywne (low level wastes, LLW)** – niewymagające osłon w czasie przeróbki i transportu,
- **średnioaktywne (low and intermediate-level wastes, LILW)** – wymagające osłon przed promieniowaniem w czasie przerobu i transportu, a czasem także dodatkowych osłon przed promieniowaniem cieplnym. Ilość ciepła jest dość znaczna – do 2 kW/m³. Dodatkowo wyróżnia się odpady średnioaktywne krótkożyciowe (LILW-SL) i długożyciowe (LILW-LL),
- **wysokoaktywne (high level wastes, HLW)** – pochodzące z wypalonego paliwa i wymagające specjalnych zabezpieczeń. Odpady tego typu na ogół nie należą do odpadów ciekłych.

Przyjmuje się według norm krajowych, że aktywność ciekłych odpadów niskoaktywnych nie przekracza 10⁷ Bq/m³, a dla odpadów średnioaktywnych 10¹⁰ Bq/m³. Tego rodzaju odpady są wstępnie gromadzone w specjalnych pojemnikach, a następnie przechowywane w magazynach zlokalizowanych na terenie elektrowni. Uważa się, że odpady niskoaktywne nie wymagają w czasie przerobu i transportu dodatkowych zabezpieczeń przed promieniowaniem. Zabezpieczenia są stosowane dla odpadów średnioaktywnych.

Dla zobrazowania aktywności odpadów niskoaktywnych można ją porównać z przeciętną całkowitą aktywnością promieniotwórczą ciała człowieka, która wynosi ok. 100 Bq/kg, co przy przeciętnej masie 80 kg odpowiada 8000 Bq. Różnica pomiędzy tą aktywnością a aktywnością odpadów niskoaktywnych sięga około 4 rzędów wielkości.

5.3 Unieszkodliwianie odpadów ciekłych

Podstawowym celem oczyszczania odpadów ciekłych jest możliwość tak bezpiecznego odprowadzenia wody na zewnątrz obiektu, w którym była używana, by nie stanowiła zagrożenia dla ludzi i środowiska. Odpady uważa się za unieszkodliwione wtedy, gdy ich promieniotwórczość osiągnie poziom tła naturalnego; do tego czasu muszą być składowane. W elektrowniach jądrowych wykorzystywane są ogromne ilości wody w systemie chłodzenia reaktora, w mokrym przechowalniku (basenie) wypalonego paliwa, w dekontaminacji urządzeń i narzędzi oraz w codziennych działaniach (kuchnia, łazienka, pralnia). W systemie chłodzenia reaktora wykorzystywane jest w obiegu zamkniętym ok. 250 ton wody płynącej z szybkością 20 t/s. Baseny wypalonego paliwa w elektrowniach mają rozmiary zbliżone do rozmiarów basenów olimpijskich. Głębokość basenu wynosi jednak około 12 m, co jest

związane z długością zestawu paliwowego (około 5 m), konieczną warstwą wody (około 6 m) nad paliwem zapewniającą ochronę przed promieniowaniem oraz przestrzenią (ok. 0,3 m) pod zestawami paliwowymi umożliwiającą swobodny przepływ wody.

Różnorodność rodzajów (organiczne i nieorganiczne) i źródeł pochodzenia odpadów ciekłych, ich właściwości chemicznych, fizycznych i radiologicznych, stopnia stężenia oraz zagrożeń biologicznych wymusza dostosowanie instalacji oczyszczających indywidualnie do procesów technologicznych, z których odbierane są ścieki. Dlatego na terenie elektrowni powinno znajdować się wyspecjalizowane laboratorium umożliwiające kontrolę czystości wody, jej składu chemicznego, rodzaju zanieczyszczeń, regenerację filtrów itp. Unieszkodliwianie radioaktywnych odpadów ciekłych w obiektach jądrowych jest wielostopniowe, z wykorzystaniem filtracji, wytrącania, sorpcji, wymiany jonowej, parowania i separacji membranowej. Celem tych operacji jest uzyskanie wysokiej koncentracji jednorodnych odpadów, zmniejszenie ich objętości, co umożliwia lepsze wykorzystanie składowiska, zwiększenie bezpieczeństwa oraz obniżenie całkowitych kosztów unieszkodliwiania. Laboratorium powinno mieć możliwość stosowania i kontroli różnych metod oczyszczania (separacji i zagęszczania substancji toksycznych i radioaktywnych). Najczęściej są to:

1. **Wytrącanie**, polegające na wytworzeniu nierozpuszczalnych osadów pierwiastków promieniotwórczych w reakcjach chemicznych.
2. Wymiana jonowa – polega na wymianie wolnych (radioaktywnych) jonów jednej substancji na inne (nieradioaktywne) jony o tym samym znaku, pochodzące z substancji filtrowanej. Proces zachodzi w wymienniczu jonowym (jonicie) na powierzchni porowatej substancji lub żelu, których cząsteczki chemiczne ulegają dysocjacji elektrolitycznej pod wpływem rozpuszczalnika, którym może być np. woda. Jonitami mogą być substancje organiczne i nieorganiczne. Ze względów technologicznych wygodniej jest niekiedy stosować materiały syntetyczne z uwagi na możliwość dokładniejszego dostosowania substancji do potrzeb procesu oczyszczania. Wymiana jonowa może być przeprowadzana w filtrach kolumnowych. Filtry wymagają okresowej regeneracji. Powstają wówczas ścieki wtórne, również wymagające przerobu. By tego uniknąć, stosowane są bardziej złożone systemy filtracji. Systemy wymiany jonowej są często wspomagane przez systemy filtrów membranowych, tworząc bardziej rozbudowane instalacje oczyszczające wykorzystujące zjawisko tzw. odwróconej osmozy. Jest to proces polegający na oddzieleniu cząsteczek wody od rozpuszczonych w niej substancji.
3. **Odparowywanie** (metody wyparne) – polega na odparowywaniu cieczy i uzyskaniu osadu o wysokim stopniu stężenia, dającym się szybko przystosować do ostatecznego składowania.
4. **Ekstrakcja**, polegająca na wyodrębnieniu poszczególnych pierwiastków i składników z ich mieszanin drogą dyfuzji, najczęściej w cieczach.
5. **Procesy biologiczne** polegają na wykorzystaniu organizmów żywych lub martwych, ewentualnie substancji produkowanych przez organizmy, przede wszystkim do zagęszczania lub rozkładu substancji toksycznych (promieniotwórczych) w odpadach ciekłych. Podstawowymi procesami stosowanymi w tej metodzie są: biosorpcja, polegająca na wykorzystaniu komórek martwych organizmów do pochłaniania radionuklidów, bioakumulacja, wykorzystująca żywe organizmy do zbierania i zagęszczania metali, oraz biodegradacja, wykorzystująca bakterie do rozkładu związków organicznych. Metody

te, w celu zmniejszenia objętości powstałej biomasy, są powiązane z dodatkowymi działaniami, tj. ultrafiltracją, flotacją lub odwirowywaniem. Zastosowanie tych metod w elektrowniach jądrowych jest ograniczone; są one bardziej użyteczne np. w kopalniach uranu.

6. **Procesy elektrochemiczne** polegają na wykorzystaniu elektrolizy, elektroflotacji, elektroflokulacji (elektrokoagulacji), elektroosmozy i elektrodializy do segregacji (separacji) metali promieniotwórczych z odpadów ciekłych trudnych do wyodrębnienia przy użyciu innych metod. Procesy elektrochemiczne należą do bardzo precyzyjnych metod i są ściśle powiązane z technikami membranowymi. Zadaniem laboratorium jest również ocena skuteczności oczyszczania. Efektywność procesu oczyszczania określa się za pomocą tzw. współczynnika dekontaminacji DF (Decontamination Factor), definiowanego jako stosunek całkowitej aktywności promieniotwórczej materiału (odpadu – ścieku) przed procesem oczyszczania do aktywności materiału (odpadu – ścieku) po oczyszczeniu. Przyjęto, że oczyszczenie jest bardzo dobre, gdy $DF = 1000$, a za niedostateczne uznaje się, gdy $DF < 10$.

DF dla metody strącania wynosi $10 < DF < 100$

DF dla wymiany jonowej (jonity organiczne) wynosi $10 < DF < 10^3$

DF dla wymiany jonowej (jonity nieorganiczne) wynosi $10 < DF < 10^4$

DF dla metody wyparnej wynosi $10^4 < DF < 10^6$

DF dla procesów biologicznych absorpcja wynosi $DF < 10^3$

DF dla procesów biologicznych biokumulacja wynosi $DF > 10^3$

5.4 Odpady

Odpady ciekłe o potencjalnych właściwościach promieniotwórczych, które powstają w elektrowniach jądrowych, pochodzą przede wszystkim z dekontaminacji i prania odzieży, dekontaminacji pomieszczeń, narzędzi używanych np. w basenach wypalonego paliwa, transporterów paliwa, plastikowych plandek ochronnych itp. Ponadto odpady ciekłe mogą pochodzić np. z zużytych płynów technicznych, chłodziw, olejów używanych w elektrowni, upustów i przecieków (dopuszczalnych) z obiegu chłodzenia rdzenia reaktora lub basenów wypalonego paliwa. Wszystkie te płyny zawierają drobiny substancji nieorganicznych i ciał stałych, np. piasku i metali, jak i drobin farb czy proszków czyszczących. Po wstępnej selekcji, o której decyduje pochodzenie ścieków, są one kierowane do wyspecjalizowanych ciągów (kaskad) instalacji oczyszczających. Wstępna obróbka polega na oddzieleniu składników organicznych i nieorganicznych. Następnie odpady są kierowane do zbiorników odpadów. W systemie zbiorników przeprowadzane jest usuwanie zawieszin i szlamów, wytrącanie chemiczne substancji oraz zatężanie (zagęszczanie). Dalsze procesy mają na celu zmniejszenie objętości odpadów poprzez dalsze stężanie i odzyskanie wody.

Innym źródłem zanieczyszczeń są uranowe pastylki paliwowe zamknięte w cyrkonowych prętach paliwowych. Gdy zachodzi reakcja rozszczepienia, powstaje migracja produktów rozszczepienia do wody chłodzącej. Do pierwotnego obiegu dostaje się około 0,001% wszystkich produktów rozszczepienia. Kolejnym źródłem tego typu zanieczyszczeń mogą być wady lub korozja ścianek prętu paliwowego. Dodatkowym źródłem „zanieczyszczeń” jest radioliza wody, wytwarzająca wodór, którego nadmiar może być niebezpieczny. Dlatego

skład chemiczny wody w obiegu pierwotnym jest stale monitorowany i przed ponownym wprowadzeniem do obiegu chłodzącego jest ona filtrowana.

Rodzaj i zakres oddziaływania różnych substancji na materiały zanurzone w wodzie zależy między innymi od jej składu, temperatury, ciśnienia i czasu. Długotrwałe reakcje mogą prowadzić do degradacji (korozji) oraz utraty integralności strukturalnej zanurzonych elementów. Woda zawiera zwykle szereg rozpuszczonych i nierozpuszczonych substancji w różnych stężeniach: jony metali, koloidy, gazy, pyły i substancje organiczne. W zwykłej wodzie (H_2O) na każde 6500 atomów H znajduje się jeden atom deuteru. Źródłem zanieczyszczeń i korozji elementów paliwowych w basenach wypalonego paliwa, stojaków, układu chłodzenia i systemów pomocniczych są zanieczyszczenia pochodzące z rurociągu, kurzu, powietrza pozostającego w kontakcie z wodą na powierzchni basenu, aerozole i detergenty. Zanieczyszczeniami dominującymi są jony K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , NO_2^- , HSO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} oraz Cl^- . Utrzymanie odpowiedniego składu chemicznego wody w basenie wypalonego paliwa i w reaktorze wymaga ciągłego sprawdzania podstawowych parametrów wody. Umożliwia to określenie jej właściwości destrukcyjnych.

Obecnie w elektrowniach jądrowych wprowadzane są nowoczesne, złożone, kilkustopniowe systemy oczyszczania odpadów. Konstruktorzy systemów dążą przede wszystkim do obniżenia ogólnych kosztów oczyszczania. Zaletą nowszych konstrukcji jest również zwiększenie bezpieczeństwa i zmniejszenie narażenia personelu na promieniowanie. W Nuclear Environment Technology Institute w Korei Południowej zaproponowano dla energetyki jądrowej rozwiązanie hybrydowe, wykorzystujące zestaw technologii składający się z filtrów włóknowych usuwających wstępnie zanieczyszczenia organiczne i stałe przed procesem ultrafiltracji i odwróconej osmozy, ukierunkowanej na usuwanie nuklidów, oraz membranowej metody separacji boru i cezu. Współczynnik dekontaminacji DF dla tej metody wynosi 5×10^3 .

Doskonalenie metod oczyszczania dotyczy oczywiście wszystkich ścieków powstających na terenie elektrowni. Przykładowo ścieki powstające w pralni podczas prania odzieży ochronnej i w łaźniach, zawierające oprócz znacznej ilości detergentów również zanieczyszczenia radioaktywne, które mimo niewielkiej koncentracji nie powinny być uwalniane do środowiska, są poddawane skomplikowanym procesom oczyszczającym z użyciem m.in. promieniowania UV i filtracji membranowej, uzyskując dla radionuklidów zawartych w tych ściekach współczynnik dekontaminacji na poziomie 5×10^3 .

W systemie oczyszczania odpadów ciekłych w elektrowni jądrowej można wydzielić trzy niezależne ciągi technologiczne:

- Woda używana w działaniach zwykłych (pralnia, kuchnia, łazienki) jest filtrowana i po kontroli aktywności odprowadzana do środowiska.
- Woda używana w ciągu technologicznym przepływa przez szereg filtrów (np. elektromagnetycznych, membranowych i wymiany jonowej) i po kontroli czystości powraca do ponownego wykorzystania.
- Woda używana w różnych działaniach (technicznych, mechanicznych, dekontaminacyjnych) jest początkowo zagęszczana i odsączana, a następnie przepływa przez wysokowydajne filtry. Po kontroli aktywności odseparowane odpady stałe są zatapiane

w masie bitumicznej, umieszczane w specjalnych pojemnikach i składowane na terenie elektrowni.

5.5 Składowanie odpadów

Często wyrażane są obawy, że zagrożeniem może być zanieczyszczenie wody wymywającej substancje radioaktywne ze składowisk odpadów radioaktywnych. Stosowany obecnie sposób przechowywania i przygotowania odpadów do składowania uniemożliwia taki proces, a proponowane nowocześniejsze rozwiązania dają jeszcze wyższą gwarancję.

W większości obecnie funkcjonujących elektrowni dąży się do wyekstrahowania wody z odpadów, oczyszczenia jej i zwrócenia do środowiska naturalnego lub do ponownego użycia w elektrowni. Dużą wagę przywiązuje się zarówno do szczelności pojemników i obudowy miejsca składowania, jak i do odpowiedniej lokalizacji (na dużej głębokości, w miejscach wolnych od ryzyka kataklizmów i dużych cieków wodnych). Przenikanie substancji radioaktywnych przechowywanych na dużych głębokościach (ok. 500 m), nawet po uszkodzeniu wszystkich elementów zabezpieczających, do wód gruntowych jest mało prawdopodobne i jest to proces mogący trwać tysiące lat.

W otwartym cyklu paliwowym (stosowanym głównie w Stanach Zjednoczonych), w którym paliwo nie jest przerabiane, lecz po wychłodzeniu przechowywane w docelowych składowiskach w postaci takiej jak było używane w elektrowni, zabezpieczenie polega na składowaniu go w głębokich sztolniach (naturalnych głębokich jaskiniach lub wyrobiskach kopalni) bez dodatkowych osłon. Tu elementem bezpieczeństwa jest przede wszystkim głębokość składowania i odpowiednie podłoże (głina, skały, sztolnie solne).

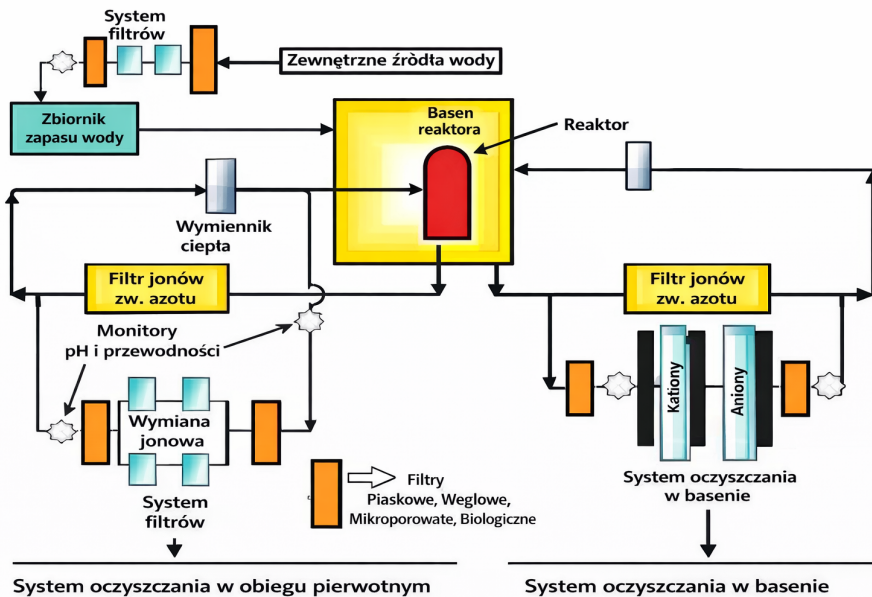
5.6 Wykorzystanie wody w elektrowniach jądrowych

Woda jest substancją pozostającą w stałym kontakcie z elementami paliwowymi przez cały czas wykorzystywania paliwa w elektrowni, a nawet dłużej – w czasie jego transportu do zakładów przerobu. Utrzymanie bardzo wysokiej jakości (tzn. czystości chemicznej) wody jest najważniejszym czynnikiem zapobiegającym degradacji zestawów paliwowych oraz przechowalników.

Jak już wspomniano, w elektrowniach jądrowych wykorzystywane są ogromne ilości wody do chłodzenia w systemie reaktora i do chłodzenia wypalonego paliwa przed jego dalszym przetwarzaniem. Należy podkreślić, że jakość wody w pierwotnym obiegu chłodzącym i w basenie wypalonego paliwa jest taka sama.

W energetyce jądrowej najbardziej rozpowszechnione są reaktory lekkowodne, w których woda pełni rolę moderatora i chłodziwa. Są to reaktory ciśnieniowe – PWR (Pressurized Water Reactor) i reaktory wrzące – BWR (Boiling Water Reactor). W obu typach reaktorów stosowane są dwa izolowane od siebie obiegi wodne. W obiegu pierwotnym reaktora PWR woda przepływa przez wytwornicę pary, a po przejściu przez turbinę, schłodzeniu i skropleniu w chłodnicach tworzących obieg wtórny powraca do wytwornicy pary. W obiegu pierwotnym reaktora BWR woda zaczyna wrzeć bezpośrednio w zbiorniku reaktora

i powstała para napędza turbinę, a następnie po przejściu przez turbinę, schłodzeniu i skropleniu w chłodnicach tworzących obieg wtórny powraca do reaktora. Chłodnicami mogą być chłodnie kominowe, rzeki, jeziora lub morze.



Rysunek 5.1. Oczyszczanie i uzdatnianie wody w elektrowni jądrowej (K. Rzymkowski)

5.6.1 Woda chłodząca

Wykorzystanie dużych objętości wody jest związane z rozbudowanymi systemami chłodzenia. W powszechnie obecnie stosowanych reaktorach typu PWR i BWR niewykorzystane ciepło, tzw. ciepło odpadowe, jest usuwane w wodnych systemach chłodzenia. Ciepło generowane przez elektrownię jądrową pochodzi z reakcji rdzenia oraz basenów wypalonego paliwa.

Obecnie stosowane są trzy metody usuwania ciepła z elektrowni jądrowych. Są one podobne do stosowanych w elektrowniach konwencjonalnych. Pierwsza metoda to jednokrotny przepływ wody chłodzącej (tzw. obieg otwarty). Druga metoda opiera się na zamkniętym obiegu chłodzenia. Trzecia metoda to połączenie obu tych cykli w tzw. systemie zmiennym.

Chłodzenie w obiegu otwartym polega na jednokrotnym przepływie wody chłodzącej przez chłodnice (pobieranej z rzeki, jeziora, sztucznego zbiornika wodnego, morza). Dlatego też elektrownie jądrowe pracujące w tym systemie chłodzenia są lokalizowane w pobliżu wielkich zbiorników wodnych (jeziora, rzeki, morza, oceany). W celu uzyskania dobrej wydajności chłodzenia w tym systemie konieczne jest przepompowywanie przez układ wymienników ciepła ogromnych ilości wody. Woda ta nie ulega skażeniu w procesie wytwarzania energii elektrycznej, gdyż nie ma kontaktu z elementami radioaktywnymi.

Chłodzenie w obiegu zamkniętym (stosowanym w rejonach z niedoborami wody) wykorzystuje ciągle schładzanie wody w wieżach chłodniczych lub basenach. Woda schłodzona

w wieżach chłodniczych powraca do obiegu chłodzącego. Jej ubytki są kompensowane przez pobór wody ze zbiorników wodnych: jezior lub rzek. Woda ta nie opuszcza elektrowni i w związku z tym nie ma potrzeby poddawania jej procesom oczyszczania. Nie ma ona kontaktu ze środowiskiem.

System zmienny stanowi kombinację obu powyższych systemów.

Należy podkreślić, że systemy usuwania ciepła stanowią wtórny obieg wodny nie mający kontaktu z substancjami promieniotwórczymi.

5.6.2 Mokre przechowalniki wypalonego paliwa (Baseny wypalonego paliwa)

Wypalone w reaktorze paliwo jest wysoko radioaktywne i przed dalszym przetwarzaniem w zakładach przerobu paliwa, w cyklu zamkniętym, musi być „schładzane”. Schładzanie polega na wieloletnim przechowywaniu w tymczasowym składowisku, którym początkowo jest basen wypalonego paliwa (tzw. mokry przechowalnik), usytuowany zwykle w pobliżu reaktora.

Czas składowania (schładzania) pozwala na umożliwienie transportu i dalszej obróbki wypalonego paliwa. Odnośnie promieniowania najistotniejszy jest postępujący w sposób naturalny rozpad krótkożyciowych (o krótkim czasie półtrwania) izotopów promieniotwórczych. Odnośnie temperatury, paliwo musi w sensie fizycznym oddać ciepło wytworzone podczas pracy w reaktorze. Paliwo pracujące w reaktorze ulega bardzo bowiem znacznemu rozgrzaniu i wysoką temperaturę może utrzymywać jeszcze przez długi okres czasu. Określa się, że nawet po upływie 10 lat 1 tona wypalonego paliwa nadal wydziela około 1 kW ciepła.

Należy też wspomnieć, że przed okresem wymiany paliwa w rdzeniu, w basenie przechowywane jest czasowo również świeże paliwo.

Dno i wewnętrzne ściany basenu i komory przeładunkowej są wykonane ze stali nierdzewnej o grubości od 6 do 13 mm. Ściany zewnętrzne, dno, komora przeładunkowa są wykonane ze zbrojonego betonu o grubości od 1,2 m do 2,4 m.

Zestawy paliwowe są ustawiane w stojakach w pozycji pionowej. Ich położenie jest precyzyjnie wyznaczone.

Basen wypalonego paliwa

Baseny są dostosowywane do wymagań bloku energetycznego. Wymiary zależą od:

- przewidywanego czasu eksploatacji elektrowni,
- przewidywanej częstotliwości wymiany paliwa (w czasie jednego przeładunku rdzenia wymieniana jest zwykle jedna trzecia paliwa w rdzeniu),
- czasu przechowywania paliwa (czasem nawet 10 lat),
- przewidywanych ilości składowanych zestawów paliwowych,
- wydzielonego miejsca (komory przeładunkowej) do załadowywania pojemników transportowych,
- ilości koniecznych stałych urządzeń pomocniczych, pomiarowych itp.

Systemy pomiarowe wykrywania zanieczyszczeń wymagają stałego unowocześniania, ulepszenia i zwiększania efektywności, co pozwoli na lepszą ochronę środowiska. Od dawna toczy się dyskusja o sposobach ochrony środowiska i rozwoju energetyki jądrowej. W tej dyskusji stale podnoszone są te same argumenty o zagrożeniach spowodowanych użytkowaniem materiałów jądrowych i radioaktywnych oraz straszeniu katastrofami reaktorów energetycznych, co przy jednoczesnym promowaniu SMR-ów wydaje się niespójne. Ponadto jako alternatywę dla energetyki jądrowej promuje się odnawialne źródła energii, o których wspomniano w opracowaniu. Tocząca się dyskusja często pomija wpływ OZE na środowisko.

Bibliografia

- [1] K. Rzymkowski. *Wpływ energetyki jądrowej na środowisko*. PTJ Nr 2 Vol. 62 Z 2, ISSN 551-6846, Warszawa. 2019.
- [2] K. Rzymkowski. *Uwagi na temat SMR*. PTJ Nr 4 Vol. 67 Z 4, ISSN 0551-6846, Warszawa. 2024.
- [3] K. Rzymkowski. *Energetyka jądrowa i środowisko*. PTJ Nr 3 Vol. 53 Z3. 2010.
- [4] K. Rzymkowski. *Postępowanie ze skażoną wodą w elektrowniach jądrowych*. PTJ Nr 3 Vol. 54 Z.3, Warszawa. 2011.
- [5] K. Rzymkowski. *Wpływ energetyki jądrowej na środowisko*. PTJ Nr 2 Vol. 62 Z 2 ISSN 551-6846 Warszawa. 2019.
- [6] *Site survey and site selection for nuclear installations. IAEA safety standards. series No. SSG-35*. IAEA, Wiedeń. 2015.
- [7] *Specific Safety Requirements*. Specific Safety Requirements SSR1, IAEA, Vienna. 2019.
- [8] J. M. J. Fabisiak. *Kryteria wyboru elektrowni jądrowej w Polsce*. www.logistyka.net.pl.
- [9] S. Zieliński. *Elektrownie jądrowe w nowoczesnej gospodarce*. PWN, Warszawa. 2024.
- [10] N. A. Melike Erdogan. *Strategic site selection methodology for small modular reactors: A case study in Türkiye*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [11] *IAEA Safety Quid's Classification of radioactive Waste RADWASS Programme*. 1994.
- [12] V. M. Efremenkov. *Radioactive Waste Management at Nuclear Power Plants*. IAEA Bulletin No. 4. 1989.
- [13] D. Lochbaum. *Got Water Union Concerned Scientists*. Citizens and Scientists for Environmental Solutions, Washington. 2007.
- [14] N. T. Corporation. *Guidelines for Boraflex Use in Spent-Fuel Storage Racks*. EPRI TR-103300 Project 2813-04 Interim Report. 1993.
- [15] *Core Management and Fuel Handling for Nuclear Power Plants*. SAFETY STANDARDS SERIES, No. NS-G-2.5, IAEA Vienna.
- [16] *Good Practices for Water Management in Spent Fuel Storage Facilities*. Technical Reports, NP-T-5.2, IAEA, Vienna.
- [17] *Experience with spent fuel storage at research and test reactors*. IAEA-TECDOC-786, IAEA, Vienna.

O autorze

dr inż. Krzysztof Rzymkowski – ukończył Politechnikę Warszawską w 1968 roku. Od tego czasu był związany z techniką jądrową poprzez pracę w następujących instytucjach: Zakład Doświadczalny Biura Urządzeń Techniki Jądrowej – później POLON, Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych w Dubnej, Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare Centro Ricerche della Casaccia, Instytut Badań Jądrowych Świerk oraz Państwowa Agencja Atomowa. Przez 15 lat był inspektorem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu w rejonie inspekcyjnym Dalekiego Wschodu, w szczególności Japonii, KDRL – Korei Płn. i Indonezji. Aktualnie jest Sekretarzem Generalnym SEREN – Stowarzyszenia Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej i Wiceprzewodniczącym Komitetu Energii Jądrowej Stowarzyszenia Elektryków Polskich.



Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej SEREN

ul. Świętokrzyska 14

00-050 Warszawa

seren.org.pl