

WPŁYW ENERGETYKI JĄDROWEJ NA ŚRODOWISKO

The Impact of Nuclear Energy on Environment

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono zalecenia dotyczące ochrony środowiska przy projektowaniu i budowie zakładów przemysłu jądrowego oraz zasady unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych.

Abstract: Indications for environment protection rules in nuclear Energy plants planning and construction, including nuclear waste management are discussed.

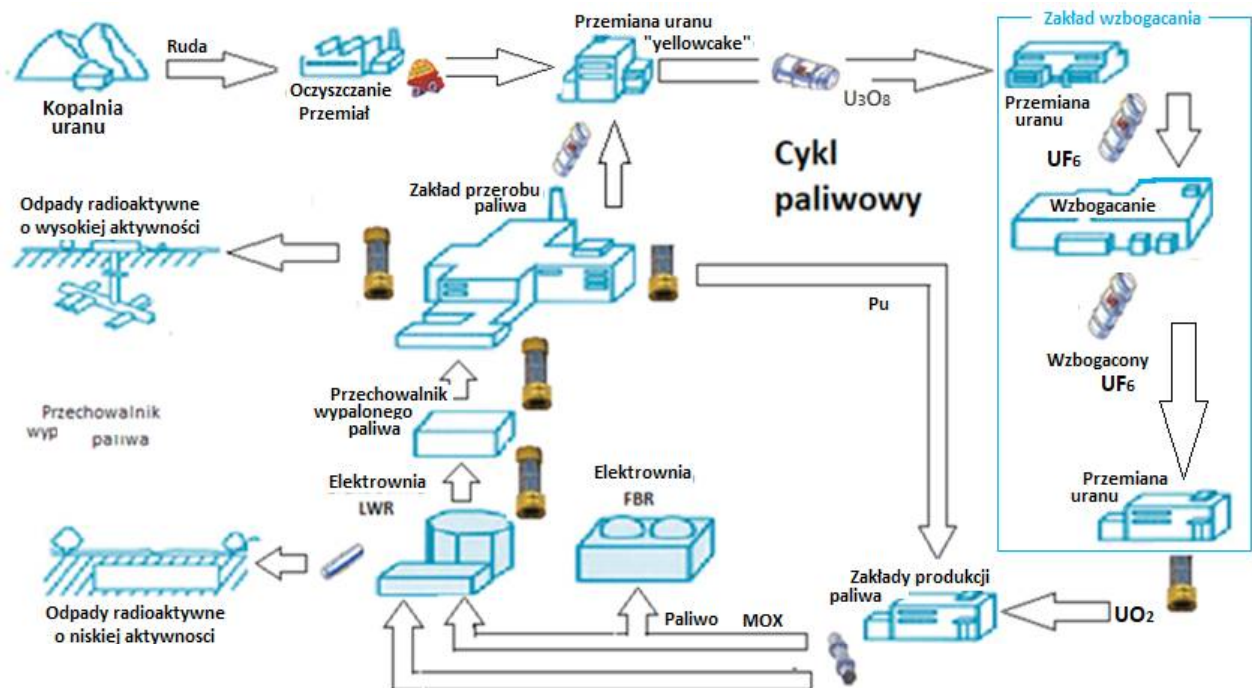
Słowa kluczowe: emisje radioaktywne, tryt, ciepło odpadowe, zanieczyszczenie środowiska, unieszkodliwianie odpadów jądrowych

Keywords: radioactive emission, tritium, waste heat, environment contamination, nuclear waste disposal

Energetyka jądrowa opiera się na możliwie jak najwydajniejszym wykorzystaniu powszechnie występującego w skorupie ziemskiej uranu jako źródła energii.

Energetyka jądrowa stanowi rozbudowany rodzaj przemysłu, którego charakterystyczną cechą jest cykl paliwowy, polegający na zamkniętym obiegu paliwa uranowego, przetwarzanego w szeregu zakładach stanowiących niezależne obiekty przemysłowe. Wymaga

to indywidualnego określenia ich wpływu na środowisko. Wpływ ten rozpoczyna się w chwili rozpoczęcia budowy i pod wieloma względami jest identyczny jak w przypadku wszystkich innych nowo powstających zakładów przemysłowych. Natomiast wpływ zakładów przemysłu jądrowego na środowisko w czasie normalnej ich eksploatacji jest praktycznie pomijalny.



Rys. 1. Cykl paliwowy (fot. Krzysztof Rzymkowski)

Fig. 1. Nuclear fuel cycle (fot. Krzysztof Rzymkowski)

Ochrona środowiska – zalecenia

Ocena oddziaływania przemysłu jądowego na środowisko obejmuje nie tylko zagadnienia związane z promieniowaniem. Przy rozważaniach wpływu energetyki jądowej na środowisko należy również uwzględnić wszystkie problemy związane z infrastrukturą przemysłową ze szczególnym zwróceniem uwagi na specyfikę przemysłu jądowego. Współczesne zalecenia ochrony środowiska dotyczą przede wszystkim zagadnień ochrony czystości powietrza, wody, gleby, ograniczenia emisji różnych substancji i promieniowania, ograniczenia wibracji i hałasów, zachowania krajobrazu, ochrony zabytków i ekosystemów, ograniczenie wpływu na zmianę klimatu oraz zapewnienie 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, porad, na jakie problemy należy zwrócić szczególną uwagę przy budowie i eksploatacji zakładów przemysłowych. Są one opracowywane przez różne organizacje międzynarodowe. Zalecenia dotyczące energetyki jądowej opracowuje Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej.

Ocena wpływu zakładów energetyki jądowej na środowisko tj. 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 jądowych. Drugim istotnym zagadnieniem jest wykorzystanie i czystość wody oraz związane z tym zagadnienie unieszkodliwiania 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 areozole. Innym źródłem ewentualnej emisji substancji chemicznych są kopalnie uranu. Promieniowanie pochodzące z materiałów jądowych 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 jądowym te zjawiska występują sporadycznie na ogół przy budowie nowych zakładów lub ich remoncie, czy przy likwidacji. Szczególnie uciążliwy może 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 jądowego zaleca się uwzględnienie hałasu i wibracji pochodzące z innych koniecznych towarzyszących konstrukcji dróg, kolei, instalacji wodnych lub sieci elektrycznej.

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

Część gruntów, na których powstaje zakład przemysłu jądowego, będzie wyłączona z innego użytkowania na okres ok. 100 lat (zakładając czas pracy np. elektrowni na ok. 80 lat). Powierzchnia zajmowana przez reaktor energetyczny wynosi ok. 20 ha, a przez elektrownię wynosi ok. 2 km². Zakłada się, że po likwidacji elektrowni teren powróci do stanu początkowego, ale powinna również być 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 jądowego 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, 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, 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, wody, regulatorem klimatu. Zakłady przemysłu jądowego powinny być usytuowane, tak by ich wpływ radiologiczny i inny nie dewastował różnorodności biologicznej ekosystemu. Dotyczy to również towarzyszącej im infrastruktury.

Ogólnościowym problemem 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 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, trzęsienia ziemi by ich uszkodzenie nie przyczyniło się do degradacji środowiska.

W tekście zaleceń ochrony środowiska tzw. strategiczna ocena oddziaływania na środowisko (*strategic environmental assessment – SEA*) zwraca się uwagę na zdrowie publiczne mające wtórny wpływ na środowisko, wymuszając 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, wypadkach), zaleceń dotyczących dopuszczalnych poziomów wibracji i hałasu, poziomu emisji nieradiologicznych, zasad bezpieczeństwa i higieny pracy w różnych typach zakładów przemysłu jądrowego na różnych 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, unieszkodliwianiu odpadów promieniotwórczych.

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 techno-

logicznym oczyszczania. Co więcej, 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 (^{133}Xe , ^{41}Ar), ^{16}N , ^{14}C , ^{35}S , pary trytu, cząstki stałe. Ilość niektórych z nich np. ^{14}C 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 wpływu jego na środowisko.

Tryt powstaje w elektrowni jądrowej przede wszystkim w wyniku rozpadu jądra uranu w pręcie paliwowym, wychwyty neutronów przez jądra zanieczyszczeń i dodatków do chłodziwa boru, litu, amoniaku oraz aktywacji deuteru i wychwyty 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 – stopy cyrkonu a produktami rozszczepienia między innymi z trytem. Możliwe jest również bezpośrednie przenikanie jąder trytu, jednakże 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 wypalnego

paliwa, transporterów paliwa, plastikowych plandek ochronnych itp. Ponadto odpady ciekłe mogą pochodzić np. z zużytych płynów technicznych, chłodziw, olejów używanych w elektrowni, upustów, przecieków (dopuszczalnych) z obiegu chłodzenia rdzenia reaktora lub basenów wypalonego paliwa. Wszystkie te płyny zawierają drobiny substancji nieorganicznych, ciał stałych, np. piasku, metali, jak i drobin farb, proszków czyszczących itp. 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, 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, ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{58}Co i powstałe materiały aktywowane zawierające np. ^{51}Cr , ^{51}Mn . 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 nisko-aktywne. 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 ^{137}Cs , ^{99}Te , ^{147}Sr , są zagęszczane i magazynowane.

Unieszkodliwianie gazowych produktów rozszczepienia (^{85}Kr , ^{129}I), 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 zagęsz-

czane i składowane z odpadami wysokoaktywnymi. Tryt może być odprowadzany do wód gruntowych lub otwartych zbiorników wodnych. Spośród wszystkich zakładów przemysłu jądrowego 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 lat. Dlatego prowadzona jest obserwacja jego obecności 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.

Ciepło odpadowe

Bardzo ważnym elementem ochrony środowiska jest zagadnienie odprowadzania niewykorzystanego do produkcji energii elektrycznej ciepła traktowanego jako odpad i nazywanego ciepłem 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 jądrowe. Systemy chłodzenia elektrowni wykorzystują duże objętości wody. Ciepło generowane przez elektrownię jądrową pochodzi z reakcji rdzenia oraz z basenów wypalonego 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 cyklów 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 ciągłe 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 poddawaniu 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 wody chłodzącej 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 zostanie rozproszona, powodując ewentualnie drobne zakłócenia w środowisku w pobliżu kanału wylotowego. Natomiast w sztucznych zamkniętych zbiornikach wodnych i jeziorach może spowodować podniesienie ich temperatury, wpływając w dłuższym czasie, w istotny sposób na ekosystem całego obszaru i nawet na mikroklimat. Podwyższenie temperatury wody w zbiornikach wodnych ma istotny wpływ na zawartość w niej tlenu decydującego o rozwoju fauny i flory. Prowadzone są próby ograniczenia ilości ciepła odpadowego przez zwiększenie sprawności elektrowni jądrowej, wprowadzenie nowych konstrukcji reaktorów. Pewną metodą ochrony zbiorników wodnych przed przegrzaniem są próby wydajniejszego chłodzenia wody w wieżach chłodniczych, basenach rozbryzgowych, chłodnicach powietrznych. W elektrowniach usytuowanych nad brzegami oceanów rozważana jest koncepcja poboru zimnej wody z dużych głębokości. Jednakże wywołane w ten sposób sztuczne prądy mogą mieć niszczący wpływ na środowisko w pobliżu elektrowni jądrowych. 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 jak fale upałów, susze, obniżone lub silne i gwałtowne opady, huragany itd. co ma wpływ na pracę systemów chłodzących wykorzystujących wieże chłodnicze.

Unieszkodliwianie wypalonego paliwa

W zamkniętym cyklu paliwowym ok. 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 innej działalności związanej z techniką jądrową eksploatacją reaktorów badawczych, likwidacją urządzeń jądrowych, wykorzystywaniem izotopów promieniotwórczych w przemyśle, medycynie, badaniach naukowych i innych dziedzinach, jak również likwidacji skutków wypadków jądrowych. Tak wielka różnorodność powstałych opadów wymaga wprowadzenia ich klasyfikacji. Najczęściej stosowanym kryterium jest postać fizyczna odpadów i ich 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 itd.

Opady promieniotwórcze są w zakładach unieszkodliwiania odpadów sortowane i przetwarzane do postaci umożliwiającej ich długotrwałe przechowywanie. Wszystkie odpady selekcjonowane 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 ok. 10 lat w basenie, w tym czasie spada jego aktywność i ciepło. 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, odseparowania ich od działania wody (wymywania, powstawania reakcji chemicznych). Dla łatwiejszego osiągnięcia tych celów i zaoszczędzenia powierzchni składowania, koncentracja odpadów powinna być jak największa w jak najmniejszej objętości odpadów. System barier zabezpieczających odpady przed kontaktem z biosferą jest kilku stopniowy. Zanim odpady zostaną zapakowane do pojemników do przechowywania, ich objętość zostanie zmniejszona za pomocą różnych metod, np. cięcie mechaniczne lub termiczne, ściskanie.

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

wywane 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, hydrologicznych.

Przy wzrastającej produkcji energii elektrycznej ograniczenie jej wpływu na środowisko stanowi jedno z ważniejszych zadań współpracy międzynarodowej. Państwa nie są odizolowane od siebie i działania jednego kraju mogą doprowadzić do szkód środowiskowych w sąsiednim. Dlatego bardzo ważne jest stosownie przyjaznych dla środowiska metod pozyskiwania energii elektrycznej.

Wzrastające zapotrzebowanie na tanią energię elektryczną będzie wymuszało dalszy rozwój energetyki jądrowej, która jest przyjazna dla środowiska naturalnego. Energetyka jądrowa jest praktycznie energetyką bezemisyjną. Jedynym trudnym do usunięcia odpadem mającym lokalny niewielki wpływ na środowisko jest ciepło odpadowe. Jeśli ciepło odpadowe zostanie wykorzystane ograniczy ten wpływ jeszcze bardziej. Należy podkreślić, że przemysł jądrowy jest jednym z bardzo niewielu gałęzi przemysłu unieszkodliwiającym i magazynującym swoje odpady.

Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa

Literatura:

- [1] IAEA, *Regulatory Control of Radioactive Discharges*, Safety Standards, No. GSG-9
- [2] IAEA, *Strategic Environmental Assessment For Nuclear Power Programmes*, No. NTG-3.17, <http://www.iaea.org/Publications/index.html>
- [3] Strupczewski Andrzej, *Nie bójmy się energetyki jądrowej* COSiW SEP, SEREN 2010 Warszawa
- [4] El-Hnnawi Essam E, *Review of the Environmental Impact of Nuclear Energy*, IAEA Bulletin-Vol.20, No.2
- [5] Peterson H.T., *Environmental Tritium Contamination from Increasing Utilization of Nuclear Energy*, Kongres Joint Committee on Atomic Energy 28 X – 7 XI Paris 1969
- [6] Korhonen Janne M., Partenen Rauli, *Klimatyczn Rulletka*, Wydawnictwo IZE 2018
- [7] Dobrzańska B., Dobrzański G., Kielczewski D., *Ochrona środowiska przyrodniczego*, PWN Warszawa 2009
- [8] Włodarski Janusz, *Unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych – perspektywy dla energetyki jądrowej*, http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/za12/CD_II_SZKOLA/II.%20CYKL_PALIWOWY/6
- [9] Rzymkowski Krzysztof, *Energetyka jądrowa i środowisko*, PTJ Nr 3 Vol. 53 Z3 2010
- [10] Rzymkowski Krzysztof, *Postępowanie ze skażoną wodą w elektrowniach jądrowych* PTJ Nr 3 Vol. 54 Z.3 2011 Warszawa