

dr inż. Krzysztof Rzymkowski<sup>1)</sup>

Stowarzyszenie Ekologów na Rzecz Energii Nuklearnej

## Ochrona środowiska i przemysł jądrowy

### Environmental protection and nuclear industry

Opisano problemy ochrony środowiska związane z budową i eksploatacją zakładów przemysłu jądrowego dla zamkniętego i otwartego cyklu paliwowego. Przedstawiono następujące zagadnienia: ochrona środowiska – zalecenia, paliwo jądrowe – wydobywanie, wzbogacanie, produkcja, dostarczenie do elektrowni, lokalizacja zakładów przemysłu jądrowego, emisje radioaktywne i ich kontrola, zanieczyszczenia wody, ciepło odpadowe, odpady promieniotwórcze.

**Słowa kluczowe:** przemysł jądrowy, ochrona środowiska, budowa i eksploatacja zakładów przemysłu jądrowego

Described are environmental protection problems connected with construction and exploitation of nuclear industry plants with closed and open fuel cycles. Presented are the following issues: environmental protection – recommendations, nuclear fuel – mining, enrichment and fuel fabrication, delivery to nuclear power plants, location of nuclear industry plants, radioactive emissions and their control, water pollution, waste heat, radioactive wastes.

**Keywords:** nuclear industry, environmental protection, construction and exploitation of nuclear industry plants

#### Ochrona środowiska

Najważniejszym elementem ochrony środowiska jest prognoza szybkości zachodzących w nim zmian (lokalnych lub rozprzestrzeniających się), ich ewentualny wpływ na ludność, zwierzęta, rośliny, ekosystemy, a nawet wpływ na zmiany krajobrazu i konstrukcji wzniesionych przez ludzi. Obserwacje powinny określać źródło zmian np. emisji, jej rodzaj (substancje chemiczne, promieniowanie, hałas, ciepło), szybkość ich rozprzestrzeniania się oraz wskazywać przekroczenie poziomów alarmowych. W razie przekroczenia tych poziomów w systemie powinny być przewidziane procedury umożliwiającej szybkie działanie prewencyjne.

W celu prowadzenia badań nad zmianami zachodzącymi w środowisku naturalnym oraz kontroli wypełniania zobowiązań dobrowolnych i wynikających z licznych przepisów prawnych, w poszczególnych krajach powoływane są państwowe inspektoraty ochrony środowiska. Ze względu na różnorodność możliwych zagrożeń, zadaniem inspektoratów jest utworzenie systemu monitoringu, składającego się z różnych jednostek badawczych, posiadających własną sieć zbierania danych określających stan zanieczyszczenia środowiska, ocenę stanu zagrożeń oraz przygotowanie prognoz rozwoju zagrożeń i sposobów ich neutralizacji. Systemy obserwacji i zbierania danych powinny być stale unowocześniane i rozbudowywane, wykorzystując nawet satelitarne metody pomiaru, wykrywające z ogromną precyzją zanieczyszczenia np. zbiorników wodnych substancjami organicznymi (oleje, pestycydy, zmiany temperatury), monitorując jednocześnie cały skażony obszar, z określeniem szybkości rozprzestrzenienia zagrożenia, co ułatwia akcje prewencyjne.

<sup>1)</sup> K.Rzymkowski@hotmail.com, K.F.Rzymkowski@gmail.com

Instalacje jądrowe powinny spełniać wszystkie wymagania stosowane do oceny działania instalacji przemysłowych określonych w tzw. koncepcji BAT (*Best Available Technology*), sformułowanej i zaleconej do stosowania w Unii Europejskiej. Kryteria BAT określają m.in. Dyrektywa Rady 96/61/UE z 24 września 1996 r. dotycząca zintegrowanej kontroli i zapobiegania zanieczyszczeń oraz OJ L 257 z 10 października 1996 r. (*Integrated Pollution Prevention and Control Directive – IPPC Directive*), określającej „zintegrowane pozwolenie” na wykorzystanie środowiska do celów gospodarczych. Zapisy te obowiązują w Polsce od 2001 roku. W Polsce system monitoringu środowiska jest organizowany przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.

#### Ochrona środowiska – zalecenia

Przy ocenie oddziaływania przemysłu jądrowego na środowisko należy uwzględnić wszystkie problemy związane z infrastrukturą przemysłową, ze szczególnym zwróceniem uwagi na specyfikę przemysłu jądrowego. Podstawowe zalecenia ochrony środowiska dotyczą przede wszystkim ochrony czystości powietrza, wody, gleby, ograniczenia emisji różnych substancji, promieniowania, ograniczenia wibracji i hałasów, zachowania krajobrazu, ochrony zabytków i ekosystemów. Ograniczenia mają na celu zapewnienie bezpieczeństwa ludności i wpływu przemysłu na zmianę klimatu. Powinny one również uwzględniać zagrożenia naturalne (powodzie, huragany, wyładowania atmosferyczne, fale tsunami). 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. Zalecenia są opracowywane przez specjalizowane organizacje międzynarodowe. Zalecenia dotyczące energetyki jądrowej opracowuje Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej.

Ocena wpływu zakładów energetyki jądrowej na środowisko, tj. **powietrze, wodę i glebę** jest bardzo złożonym problemem, ponieważ musi uwzględniać narażenie ludzi, fauny i flory. Zachowanie czystości powietrza na każdym etapie powstawania, eksploatacji i likwidacji zakładów jądrowych jest zadaniem priorytetowym. Drugim ważnym zagadnieniem jest oczyszczanie wody i związane z tym unieszkodliwianie ścieków przy zachowaniu naturalnej gospodarki wodnej w rejonie zakładów, uwzględniającej 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.

## Energetyka jądrowa

Energetyka jądrowa jest rozbudowaną gałęzią przemysłu wiążącą różne zakłady przemysłowe tworząc rozbudowany system wynikający z obiegu paliwa w tzw. cyklu paliwowym. Obieg paliwa wynika z możliwości powtórnego wykorzystania, po przetworzeniu, elementów zużytego paliwa do wytwarzania energii. Cykl paliwowy obejmuje: 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. W otwartym cyklu paliwowym zużyte paliwo nie jest przetwarzane. Pełny cykl paliwowy został uruchomiony w kilku krajach posiadających zarówno złoża uranu, jak i rozbudowany system elektrowni jądrowych.

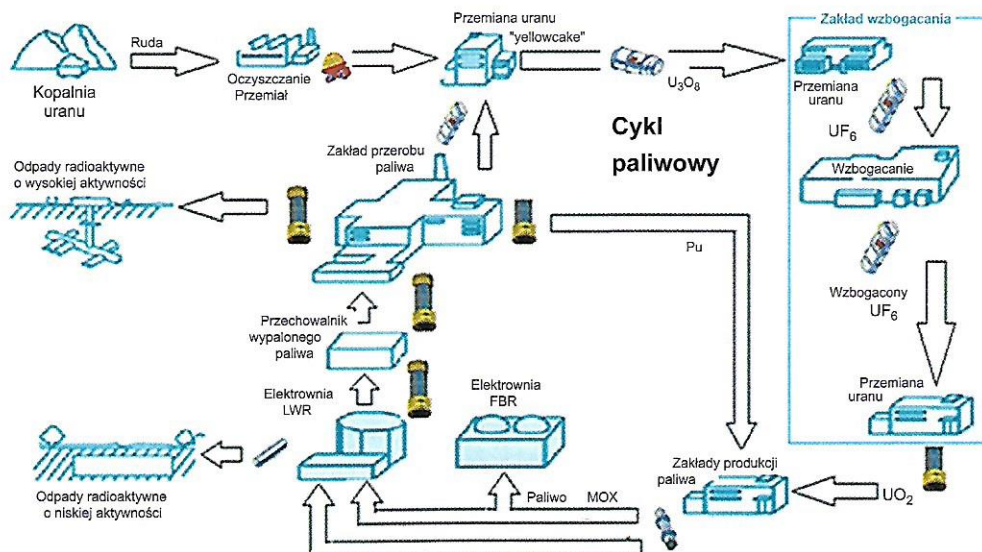
## Paliwo jądrowe – wydobycie, wzbogacanie, produkcja, dostarczenie do elektrowni

Podstawowym materiałem wykorzystywanym w przemyśle jądrowym jest uran występujący w skorupie ziemskiej w bardzo różnorodnych postaciach, przede wszystkim w minerałach: blenda uranowa, uraninit (tlenki uranu), kamotył (związki potasu wanadu), a także w skałach granitowych, wodzie morskiej, węglach, glebie, roślinach, tępkach czarnych. Średnie stężenie uranu w skorupie ziemskiej wynosi 2-4 g ppm.

Rudy uranowe są wydobywane w kopalniach odkrywkowych jak i podziemnych, a w szczególnych przypadkach można wydobywać uran metodą wmywania. Zawartość uranu w wydobywanych obecnie rudach wynosi od 0,035 do 3%. Uran naturalny składa się głównie z izotopu  $U^{238}$  oraz stosowanego w energetyce jądrowej  $U^{235}$ . Stosunek izotopu  $U^{235}$  do  $U^{238}$  określa stopień wzbogacenia uranu. W zastosowaniach pokojowych wykorzystywany jest uran niskowzbożony od 4% do 20%. Dla celów doświadczalnych lub wojskowych może wynosić 40% – 90%. Aby uzyskać odpowiednią ilość uranu potrzebnego do uruchomienia jądrowego reaktora energetycznego konieczny jest przerób ogromnej ilości metrów sześciennych urobku. Podczas likwidacji kopalni uranu pozbawiony uranu urobek jest wykorzystywany do rekultywacji terenu.

Ze względu na to, że rudy uranu naturalnego nie należą do silnie radioaktywnych wymagania dotyczące ochrony środowiska przy projektowaniu, budowie i eksploatacji kopalni uranu są identyczne jak dla innych gałęzi przemysłu górnictwa. Ostrzejsze wymagania dotyczą usuwania i pomiaru stężenia radonu w kopalniach podziemnych i zakładach wzbogacania rudy oraz przy usuwaniu i neutralizacji pyłów.

Zakłady przerobu rudy uranowej są zakładami chemicznymi, w których uzyskuje się od 85% do 95% zawartości uranu w urobku. Proces wzbogacania rudy wymaga oprócz obróbki mechanicznej (zgniatania, mielenia) złożonych procesów chemicznych (wytrawiania, wmywania, wytrącania) wykorzystujących różne substancje toksyczne. Powstające odpady wymagają unieszkodliwiania. Hałdy odpadów stałych mogą zawierać



Rys. 1.  
Pełny cykl paliwowy  
(K. Rzymkowski)

pierwiastki promieniotwórcze. W celu zapobiegania pyleniu lub wyciekaniu czy wymywaniu izotopów są zraszane wodą lub oblewane np. asfaltem. Odpadowe substancje ciekłe są zbierane w specjalnych odstożnikach i unieszkodliwiane. Niski poziom promieniowania, zbliżony do tła naturalnego, wymaga jedynie monitorowania. Toksyczne działanie tlenków uranu jest podobne do oddziaływania tlenków ołowiu i wymaga analogicznych zabezpieczeń.

Kolejnym etapem cyklu paliwowego jest wzbogacenie uranu, czyli przetworzenie go do postaci dogodnej do produkcji paliwa. Uzyskiwany w zakładach przerobu rudy uranu, tlenek uranu  $U_3O_8$  dostarczany jest do zakładów wzbogacania. Zakłady wzbogacania, podobnie jak i zakłady produkcji paliwa, są zakładami chemicznymi. Ich lokalizacja nie jest ograniczona żadnymi specjalnymi wymaganiami i zalecane jest stosownie kryteriów bezpieczeństwa podobnych do zaleceń dla zakładów azotowych lub rafinerii. Zagrożenie stanowi tu toksyczność ulatniających się w czasie ewentualnej awarii substancji.

Opracowano kilka technologii wzbogacania. Najwydajniejsza jest metoda wykorzystująca związki lotne uranu. W trzech powszechnie obecnie stosowanych metodach wzbogacania (wirówkowej, dyfuzyjnej, dyszowej) wykorzystywany jest sześćiofluorek uranu  $UF_6$ , którego zaletą jest właściwość sublimacji w niskiej temperaturze (około  $60^{\circ}C$ ) oraz fakt, że fluor nie posiada izotopów (umożliwia to rozróżnienie  $U^{238}F_6$  od  $U^{235}F_6$ ). Istotną wadą jest toksyczność i aktywność chemiczna (właściwości żrące) oraz konieczność prowadzenia procesów wzbogacania w wysokiej próżni. Wszystkie procesy produkcyjne w zakładach wzbogacania są przeprowadzane w hermetyzowanych pomieszczeniach, w których wymiana powietrza dokonywana jest przez zespoły urządzeń filtrujących. Wszystkie pomieszczenia w zakładach przemysłu jądrowego są wzajemnie izolowane i monitorowane przez systemy czujników gazowych, detektorów promieniowania, ciśnienia, temperatury oraz cały system obserwacyjny rejestrujący (kamery), kontrolujący nie tylko procesy technologiczne, ale i pracowników.

Po wzbogacaniu uranu, w postaci sproszkowanego tlenku uranu  $UO_2$ , przetransportowywany jest do zakładów produkcji paliwa, w których wytwarzane są tzw. pastylki umieszczane w cyrkonowych rurkach (koszulkach). Stanowią one pręty paliwowe będące elementami zestawów paliwowych. Cały proces produkcyjny jest całkowicie zautomatyzowany i przeprowadzany w zamkniętych komorach. Ze względu na możliwość wystąpienia stanu krytycznego unika się zagęszczenia składowanych elementów uranowych w celu ograniczenia gromadzonej masy i zachowania odległości pomiędzy elementami. Wyprodukowane świeże paliwo jest dostarczane do elektrowni w specjalnych opancerzonych pojemnikach odpornych na udary, wytrzymujące niespodziewane ciężkie warunki wypadkowe, bez naruszenia jego integralności i bez wzrostu poziomu promieniowania na powierzchni zewnętrznej. Są one wykorzystywane również do transportu paliwa wypalonego.

Wypalone paliwo zawiera wiele cennych pierwiastków – przede wszystkim uran  $U^{235}$  – w stężeniu uniemożliwiającym już dalsze używanie zestawu paliwowego w reaktorze, ale przewyższającym stężenie w uranie naturalnym. Po wstępnym przygotowaniu, „schłodzeniu” paliwa w przechowalnikach na terenie elektrowni jest ono przetransportowywane do zakładów przerobu (w tzw. cyklu zamkniętym). Zakłady przerobu są dużymi

zakładami chemicznymi, w których wszystkie procesy są zautomatyzowane i bardzo ściśle monitorowane (w tym przez zespoły międzynarodowe).

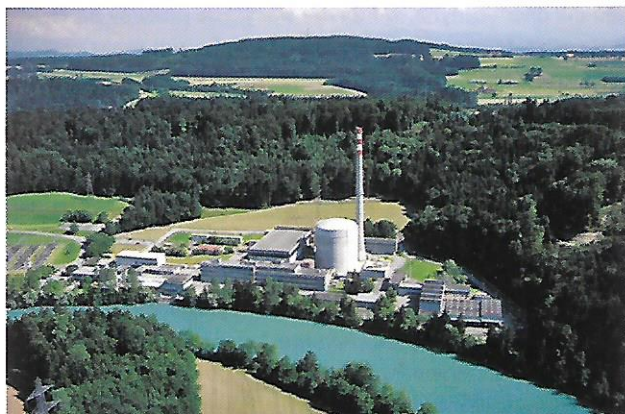
W procesie przerobu paliwa odzyskiwane są przede wszystkim dwa pierwiastki – uran i pluton – które mogą być następnie użyte do produkcji nowego paliwa. W takim wypadku około 97% wypalonego paliwa wraca do elektrowni, a tylko 3% stanowi odpady wysokoaktywne. Proces przerobu umożliwia również wyodrębnienie innych użytecznych pierwiastków, np. metali ziem rzadkich,  $Cs^{137}$ ,  $Te^{99}$  (otrzymywany praktycznie tylko tą drogą),  $Sr^{147}$ . Przerób paliwa przeprowadzany jest metodą PUREX (*PLutonium and Uranium Recovery by Extraction*). Z tlenków uranu i plutonu wytwarza się nowe paliwo – tzw. MOX (*Mixed Oxides*), stosowane w nowszych rozwiązaniach reaktorów energetycznych.

## Lokalizacja zakładów przemysłu jądrowego

Lokalizacja zakładów przemysłu jądrowego ma istotny wpływ na ochronę środowiska, dlatego przy wyborze lokalizacji należy uwzględniać wiele czynników, takich jak istniejąca infrastruktura, dostęp do wody, dostępna sieć energetyczna, ewentualne narażenie ludności na promieniowanie, gęstość zaludnienia, warunki meteorologiczne, sejsmiczne, geologiczne oraz drogi ewakuacyjne. Jednym z najważniejszych celów ochrony środowiska jest ochrona ekosystemów. Ekosystemy powstają w pewnym rejonie przez wzajemne długotrwałe oddziaływanie fauny, flory, tworząc równowagę biologiczną. Dlatego należy bezwzględnie zadbać, aby wszelkie wyznaczone tereny istotne dla ochrony i rozwoju fauny i flory na lądzie i morzu pozostały nienaruszone, ze szczególnym uwzględnieniem ich naturalnych siedlisk.

Ekosystemy są również źródłem żywności, wody, 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. Budowa nowego obiektu wymaga przygotowania obszaru o znacznej powierzchni około, włączając w to powstanie nowych dróg, budynków, przystosowanie zbiorników wodnych, tam, ujęć wodnych. Powoduje to zwiększenie natężenia ruchu na istniejących już drogach, hałas, wycinkę drzew, migrację zwierząt itp. Dodatkowym utrudnieniem może być konieczność prowadzenia archeologicznych i innych prac pomocniczych. Grunty, na których ma powstać zakład przemysłu jądrowego będą wyłączone dla innego przeznaczenia na okres dłuższy niż 100 lat (przy założeniu, że obiekt będzie wykorzystywany nawet po zakończeniu pracy elektrowni, których użytkowanie jest przewidywane na około 60-80 lat, bez uwzględniania czasu jej budowy). Powierzchnia zajmowana przez reaktor energetyczny wynosi ok. 20 ha, a przez elektrownię wynosi ok. 2 km<sup>2</sup>. Zakłada się, że po likwidacji elektrowni teren powróci do stanu początkowego, ale powinna również zostać zlikwidowana powiązana z nimi infrastruktura, drogi dojazdowe, trakcje elektryczne itp. Może to mieć istotny wpływ na dalsze użytkowanie gruntów i krajobraz.

Wybór lokalizacji niektórych zakładów cyklu paliwowego jest narzucony względami geologicznymi – kopalni uranu, a ze względów ekonomicznych w ich pobliżu budowane są zakłady



Elektrownia Jądrowa Mühleberg w Szwajcarii  
(licencja Creative Commons, BKW FMB Energie AG)



Budowa Elektrowni Jądrowej Hinkley Point C w Wielkiej Brytanii (fot. EDF)

przemiału i zakłady produkcji celów „yellow cake” (mieszanka tlenków uranu). W tych zakładach zniwelowanie wpływu ich działalności na środowisko jest najtrudniejsze. Budowa zakładów przemysłu jądrowego wyłącza te tereny z użytkowania na długi okres i rekultywacja zajmowanych obszarów musi być wydłużona. Dlatego muszą być one dodatkowo 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. 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.

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 cyklu paliwowym głównymi źródłami emisji są elektrownie jądrowe i zakłady przerobu paliwa. Zmiana poziomu promieniowania wokół zakładów przemysłu jądrowego w czasie ich normalnej pracy nie może przekraczać 0,1 mSv/rok w odniesieniu do naturalnego promieniowania tła. Średnie promieniowanie tła, w Polsce, wynosi 2,6 mSv/rok. Średnie promieniowanie tła jest podstawą do określania granicznych dopuszczalnych wartości emisji substancji promieniotwórczych. Dopuszczalne wartości emisji są ustalane indywidualnie dla każdego zakładu przemysłu jądrowego. Gazowe jak i ciekłe substancje radioaktywne powstające w wyniku procesów technologicznych są przesyłane do zakładowego 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.

W trakcie pracy reaktora odpady gazowe powstają w wyniku reakcji jądrowych i aktywacji materiałów wewnątrz prętów paliwowych i są w większości zatrzymywane wewnątrz prętów aż do ich otwarcia w zakładach przerobu. Zaobserwowano, że wydostają się one częściowo 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. Poziom promieniowania uwalnianych substancji jest kontrolowany i nie przekracza dopuszczalnych norm.

Poziom emisji substancji radioaktywnych zależy od typu reaktora oraz od właściwości systemów oczyszczania. Uwalnianymi do atmosfery substancjami są głównie gazy szlachetne ( $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ),  $^{16}\text{N}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$ , pary trytu, cząstki stałe. Ilość niektórych z nich, np.  $^{14}\text{C}$  jest bardzo mała, ale ze względu na długi czas 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. W niektórych typach reaktorów (np. CANDU) jest on wychwytywany do specjalnych zbiorników i łączony z tytanem, tworząc granulaty wykorzystywane w przemyśle chemicznym. Całkowita emisja produktów gazowych z elektrowni jest bardzo niska i musi być utrzymywana na takim poziomie, aby wraz z innymi uwolnieniami – opadami ciekłymi, nie przekraczała dopuszczalnego poziomu promieniowania.

Wpływ promieniowania jądrowego związanego z energetyką jądrową na środowisko jest całkowicie pomijalny przy zachowaniu wszystkich zaleceń ochrony radiologicznej. Z badań wynika, że w normalnych warunkach pracy elektrowni bardziej narażeni na promieniowanie są górnicy w kopalniach węgla kamiennego. Promieniowanie jądrowe w pobliżu obiektów jądrowych, a nawet na ich terenie nie przekracza promieniowania tła. 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.

Zalecenia ochrony środowiska mające wpływ na **zdrowie publiczne** wymuszają 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.

## Zanieczyszczenia wody

Zanieczyszczenie wody spowodowane działalnością człowieka stało się problemem ogólnoswiatowym i dotyczącym wszystkich zbiorników wodnych, mórz, oceanów oraz wód śródlądowych. Zanieczyszczenia komunalne, rolnicze i przemysłowe mają różną postać fizyczną i chemiczną. Jeżeli koncentracja zanieczyszczeń komunalnych, powodujących głównie zagrożenie bakteriologiczne, nie przekracza pewnej granicy, ulegają naturalnej filtracji przez środowisko i nie wpływają znacząco na jego stan. Groźniejsze są zanieczyszczenia związane z rolnictwem, np. związki organiczne pochodzące ze szczątków obumarłych roślin, środki owadobójcze i grzybobójcze niszczące mikrofaunę i mikroflorę. Najgroźniejsze dla środowiska oraz zdrowia człowieka są zanieczyszczenia przemysłowe zawierające m.in. metale ciężkie oraz szkodliwe, trudno rozkładające się substancje organiczne i mineralne, nierozpuszczalne związki chemiczne dostające się do wód powierzchniowych oraz tzw. kwaśne deszcze.

Na tym tle zanieczyszczenia radioaktywne prezentują się stosunkowo niegroźnie. Z reguły występują w niewielkich ilościach i małej koncentracji (aktywności), choć istotnie mogą być przenoszone przez ciekłe wodne. Duże obiekty jądrowe (zakłady wzbogacania lub przerobu paliwa, elektrownie) pracują w wodnym obiegu zamkniętym. Woda używana do celów technologicznych nie jest odprowadzana do środowiska, lecz powtórnie wykorzystywana w ciągu technologicznym.

Oczyszczanie ciekłych odpadów radioaktywnych jest przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowych. Różnorodność odpadów wymusza dostosowanie instalacji oczyszczających indywidualnie do procesów technologicznych, z których odbierane są ścieki. Utylizacja radioaktywnych odpadów ciekłych w obiektach jądrowych jest wielostopniowa z wykorzystaniem filtracji, wytrącania, sorpcji, wymiany jonowej, parowania, separacji membranowej. Efektywność procesu oczyszczania jest określana 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  $DF = 1000$ , niedostateczne, gdy  $DF < 100$ . Odpady uważa się za nieszkodliwe wtedy, kiedy ich promieniotwórczość będzie na poziomie tła naturalnego, do tego czasu muszą być odpowiednio składowane.

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, 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. Wstępna obróbka polega na oddzieleniu składników organicznych i nieorganicznych. Następnie odpady są kierowane do zbiorników odpadów. W systemie zbiorników przeprowadzane jest usuwanie zawieszin, szlamów, wytrącanie chemiczne substancji i zatężanie (zagęszczanie). Dalsze procesy mają na celu zmniejszenie objętości odpadów poprzez dalsze stężanie i odzyskanie wody.

Doskonalenie metod oczyszczania dotyczy oczywiście wszystkich ścieków powstających na terenie elektrowni i np. ścieki powstałe w pralni przy praniu odzieży ochronnej, w której, zawierające oprócz znacznej ilości detergentów, również zanieczyszczenia radioaktywne, które mimo ich niewielkiej koncentracji nie powinny być uwalniane do środowiska, są poddawane skomplikowanym procesom oczyszczającym z użyciem nawet promieniowania UF, filtracji membranowej uzyskując dla radionuklidów zawartych w tych ściekach współczynnik dekontaminacji na poziomie  $5 \times 10^3$ .

## Ciepło odpadowe

Najpoważniejszym odpadem mającym bezpośredni wpływ na środowisko w pobliżu elektrowni jądrowej jest ciepło odpadowe. Są to jedyne zakłady przemysłu jądrowego wytwarzające ciepło. Wydajność współczesnych elektrowni jądrowych wynosi od 30% do 40%. Ilość ciepła przekazywanego do otoczenia elektrowni konwencjonalnej (węglowej) i elektrowni jądrowej o tej samej mocy jest podobna, co wynika ze sprawności wykorzystania ciepła w systemie turbin (silnik cieplny jest sprawniejszy przy większej różnicy temperatur ośrodka, w którym pracuje i nośnika energii cieplnej). Odprowadzenie ciepła odpadowego w systemie chłodzenia jest niezależne od źródła ciepła i zależy od kosztów jego usuwania. Stosowane są obecnie trzy metody usuwania ciepła z elektrowni jądrowych, przy czym niektóre ich elementy stosowane są 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.



Widok ogólny Elektrowni Jądrowej Beaver Valley w Stanach Zjednoczonych (fot. domena publiczna)

W elektrowniach wykorzystujących paliwa kopalne znaczna ilość tego ciepła jest uwalniana przez komin wraz z produktami spalania.

Chłodzenie w obiegu otwartym polega na jednokrotnym przepływie przez chłodnice wody chłodzącej pobieranej z rzeki, jeziora, sztucznego zbiornika wodnego, morza.

Chłodzenie w obiegu zamkniętym wykorzystuje ciągłe schładzanie wody w wieżach chłodniczych lub basenach. Woda schłodzona w wieżach chłodniczych powraca do obiegu chłodzącego. Woda ta nie opuszcza elektrowni i w związku z tym nie ma potrzeby poddawaniu jej procesom oczyszczania.

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

W systemie otwartym woda przed wprowadzeniem do systemu chłodzenia jest filtrowana, a po przejściu przez chłodnicę, odprowadzana do zbiornika (do środowiska). Jej temperatura jest wyższa o 10-12 °C od wody w zbiorniku. 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 tempe-

ratury wody w zbiornikach wodnych ma istotny wpływ na zawartość w niej tlenu decydującego o rozwoju fauny i flory. 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. 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.

Nasuającym 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. 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.

## Odpady promieniotwórcze

Odpady promieniotwórcze powstają we wszystkich zakładach przemysłu jądrowego, 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 i eksploatacją reaktorów badawczych, likwidacją urządzeń jądrowych, wykorzystywaniem izotopów promieniotwórczych w przemyśle, medycynie, badaniach naukowych i innych dziedzinach, jak również przy likwidacji skutków wypadków jądrowych. Taka różnorodność powstawania opadów wymaga wprowadzenia ich klasyfikacji. Najczęściej stosowanym kryterium jest ich 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 itd. Wyróżniane są trzy klasy odpadów:

- niskoaktywne (*low level wastes LLW*) – niewymagające osłon w czasie przeróbki i transportu, o aktywności poniżej  $10^7$  Bq/m<sup>3</sup> (wg norm krajowych);
- średnioaktywne (*low and intermediate-level wastes LILW*) – wymagające osłon przed promieniowaniem w czasie przerobu i transportu i czasem wymagające dodatkowych osłon przed promieniowaniem cieplnym; ilość ciepła jest dość znaczna – do 2 kW/m<sup>3</sup>; dodatkowo wyróżnia się odpady: średnioaktywne krótkożyciowe (*low and intermediate-level wastes short live LILW-SL*) i długożyciowe (*low and intermediate-level wastes long live LILW-IL*) o aktywności poniżej  $10^{10}$  Bq/m<sup>3</sup>;
- wysokoaktywne (*high level wastes HLW*) – pochodzące z wypalonego paliwa i wymagające specjalnych zabezpieczeń aktywności powyżej  $10^{10}$  Bq/m<sup>3</sup>.

Odpady wysokoaktywne pochodzące z pierwszej fazy przerobu mogą zawierać pluton i inne pierwiastki ciężkie, jak i fragmenty koszulek cyrkonowych. Odpady średnio- i niskoaktywne pochodzą z dalszych etapów technologicznych i również mogą zawierać pierwiastki ciężkie. 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.

Izolacja odpadów radioaktywnych polega głównie na uniemożliwieniu rozprzeczania się materiałów promieniotwórczych, odseparowaniu ich od działania wody (wmywania, 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 kilkustopniowy. Zanim odpady zostaną zapakowane do pojemników do przechowywania, ich objętość zostanie zmniejszona za pomocą różnych metod, np. cięcia mechanicznego lub termicznego, ścisania. Następnie odpady są zatapiające w trudno rozpuszczalnych związkach chemicznych, co zapobiega rozsypaniu, rozproszeniu, rozpyleniu i wmywaniu substancji promieniotwórczych. Najczęściej używaną substancją jest szkło.

Proces wityfikowania – zatapiania w szkłe tworzy bardzo trwałe, odporne na wmywanie i chemikalia, łatwe do składowania bloki zwykle cylindryczne – beczki. Są to hermetyczne opakowania metalowe wykonane z miedzi lub ze stali nierdzewnej, odporne na działanie substancji w wodach podziemnych. Miedziane pojemniki z odpadami są otoczone gliną bentonitową pełniącą funkcję amortyzatora w przypadku drgań lub pęknięć podłoża, jak również stanowi ochronę przed wodą. Jest to metoda stosowana przede wszystkim dla składowania odpadów wysokoaktywnych.

Szkło, w którym zatapiane są odpady, może być zastąpione przez beton spełniający jednocześnie funkcję osłony biologicznej, asfalt, polimery lub ceramikę. Beczki z odpadami wysokoaktywnymi są umieszczane w betonowych silosach obudowanych stalą nierdzewną, co stanowi dodatkowe zabezpieczenie przed czynnikami atmosferycznymi, korozją i wyciekami substancji promieniotwórczych. Lokalizacja składowiska dla każdego rodzaju odpadów musi spełniać wszystkie wymagania ochrony środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem warunków geologicznych, hydrologicznych. Odpady wysokoaktywne są magazynowane w składowiskach głębokich 500-900 m pod ziemią. Odpady nisko- i średnioaktywne nie wymagają tak potężnych zabezpieczeń.

Poziom promieniowania na zewnątrz przechowalników odpadów, podobnie jak dla wszystkich zakładów przemysłu jądrowego zlokalizowanych na ogół pod ziemią, nie może przekraczać 0,1 ms /rok.

Energetyka jądrowa jest praktycznie energetyką bezemisyjną. Jedynym trudnym do usunięcia w przyszłości odpadem mającym lokalny niewielki wpływ na środowisko jest ciepło odpadowe. Jego wykorzystanie ograniczy ten wpływ jeszcze bardziej. Należy podkreślić, że przemysł jądrowy jest jednym z bardzo niewielu gałęzi przemysłu unieszkodliwiających i magazynujących swoje odpady. Wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną przy wyraźnie obserwowalnych zmianach klimatu wymusza poszukiwanie źródeł energii nieprzyczyniających do tych zmian. Energetyka jądrowa jest przyjazną dla środowiska metodą pozyskiwania energii elektrycznej.

## PIŚMIENNICTWO

- [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 A., *Nie bójmy się energetyki jądrowej*. COSiW SEP, SEREN, Warszawa 2010.
- [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, Paris, 28 X – 7 XI 1969.
- [6] Włodarski J., *Unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych – perspektywy dla energetyki jądrowej*, [http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal2/CD\\_II\\_SZKOLA/II.%20CYKL\\_PALIWOWY/6](http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/zal2/CD_II_SZKOLA/II.%20CYKL_PALIWOWY/6)
- [7] Rzymkowski K., *Energetyka jądrowa i środowisko*, „Postępy Techniki Jądrowej” 2010, nr 3, vol. 53, z.3.
- [8] Rzymkowski K., *Postępowanie ze skażoną wodą w elektrowniach jądrowych*, „Postępy Techniki Jądrowej” 2011, nr 3, vol. 54, z. 3.

