

UNIESZKODLIWIANE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH - PERSPEKTYWY DLA ENERGETYKI JĄDROWEJ

Janusz Włodarski

Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa

1. WSTĘP

Odpady promieniotwórcze występują w postaci gazowej, ciekłej jak i stałej. Grupę odpadów ciekłych stanowią głównie wodne roztwory i zawiesiny substancji promieniotwórczych. Do grupy odpadów stałych zaliczane są zużyte zamknięte źródła promieniotwórcze, zanieczyszczone substancjami promieniotwórczymi środki ochrony osobistej (rękawice gumowe, odzież ochronna, obuwie), materiały i sprzęt laboratoryjny (szkło, elementy aparatury, lignina, wata, folia), zużyte narzędzia i elementy urządzeń technologicznych (zawory, fragmenty rurociągów, części pomp) oraz wykorzystane materiały sorpcyjne i filtracyjne stosowane w procesie oczyszczania roztworów promieniotwórczych, bądź powietrza uwalnianego z reaktorów i pracowni izotopowych (zużyte jonity, szlamy postrąceninowe, wkłady filtracyjne itp.).

Z uwagi na rodzaj wysyłanego promieniowania i typ odpadów można wyróżnić ich następujące kategorie:

- beta i gamma promieniotwórcze (niskoaktywne, średnioaktywne i wysokoaktywne),
- alfa promieniotwórcze (niezależnie od aktywności),
- zamknięte źródła promieniotwórcze.

Wypalone paliwo jądrowe stanowi odrębną grupę materiałów promieniotwórczych, zazwyczaj zaliczaną do odpadów wysokoaktywnych. Początkowa wysoka aktywność wypalonego paliwa i generowanie ciepła stwarzają konieczność stosownego magazynowania okresowego w przechowalnikach wodnych przed ich ostatecznym składowaniem lub przerobem. W przypadku braku odpowiednich obiektów do składowania, wypalone paliwo powinno być (po okresie przechowywania „mokrego”) czasowo przechowywane w suchych przechowalnikach.

Powszechnie stosowane postępowanie z odpadami promieniotwórczymi nisko i średnioaktywnymi krótkożyciowych (o okresie półrozpadu poniżej 30 lat) polega na ich przetworzeniu do postaci stabilnej pod względem chemicznym i fizycznym, a następnie na izolowaniu od otaczającego środowiska poprzez czasowe przechowywanie w obiektach magazynowych a następnie składowanie w obiektach do tego przeznaczonych.

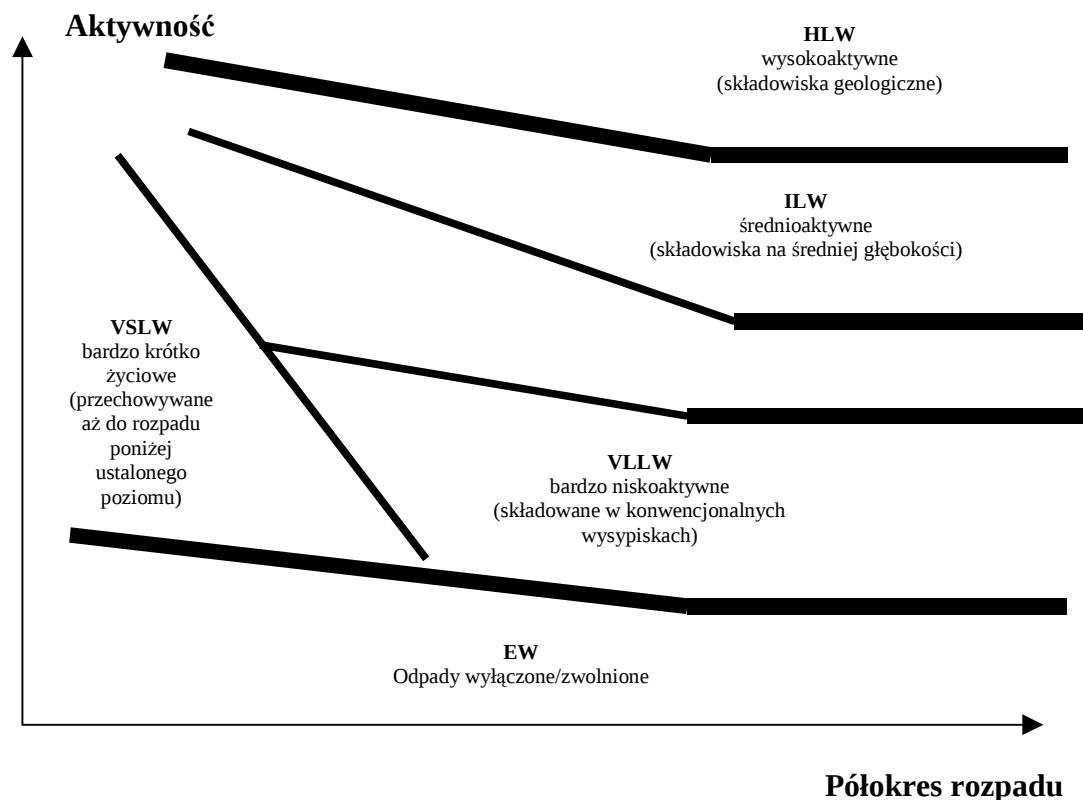
2. KLASYFIKACJA ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W DOKUMENTACH MAEA

Ze względu na fakt, że trudno jest znaleźć w krajach UE zbliżone do siebie zasady kwalifikowania odpadów promieniotwórczych i jasno określone kryteria, np. liczbowe, poniżej na Rys. 1 przedstawiono ilustrację koncepcji klasyfikacji odpadów promieniotwórczych proponowaną przez MAEA [1], gdzie oś pionowa odpowiada aktywności odpadów, zaś oś pozioma – okresowi połowicznego rozpadu radioizotopów zawartych w odpadach.

Należy zaznaczyć, że proponowana klasyfikacja dotyczy w zasadzie odpadów stałych i jest opracowana z punktu widzenia składowania. Według dokumentu MAEA [1]:

Odpady wyłączone (EW)

Odpady wyłączone zawierają tak małe stężenia radioizotopów, że nie wymagają stosowania środków ochrony przed promieniowaniem, bez względu na to, czy są składowane na konwencjonalnych wysypiskach, czy poddawane recyklingowi. Materiały takie można zwolnić lub wyłączyć spod kontroli dozorowej, albo w ogóle ich nie uwzględniać w tym kontekście.



Rys. 1. Ilustracja klasyfikacji odpadów promieniotwórczych wg MAEA [1]: *Exempt waste (EW)* – odpady wyłączone spod kontroli dozorowej; *Very Short Lived Waste (VSLW)* – odpady bardzo krótko życiowe; *Very Low Level Waste (VLLW)* – odpady bardzo niskoaktywne; *Low Level Waste* – odpady niskoaktywne; *Intermediate Level Waste* – odpady średnioaktywne; *High Level Waste (HLW)* – odpady wysokoaktywne.

Pewną analogię stanowią odpady ciekłe lub gazowe uwalniane do środowiska pod odpowiednią kontrolą dozorową, ponieważ uwalniane materiały nie wymagają uwzględnienia z punktu widzenia bezpieczeństwa i ochrony przed promieniowaniem. Istnieją jednak pewne ważne różnice dotyczące ustalania ilości takich odpadów, jakie można uwalniać; poza tym zwykle prowadzi się monitoring środowiska.

Odpady bardzo krótkożyciowe (VSLW)

Odpady bardzo krótkożyciowe zawierają wyłącznie radioizotopy o bardzo krótkim okresie połowicznego rozpadu przy stężeniach powyżej poziomów zwolnienia. Odpady takie można przechowywać do czasu, kiedy ich aktywność spadnie poniżej poziomów zwolnienia¹, umożliwiając takie postępowanie ze zwolnionymi odpadami, jakby były to odpady konwencjonalne. Przykładem takich odpadów są źródła Ir-192 i Tc-99m oraz odpady zawierające radioizotopy o podobnie krótkich okresach połowicznego rozpadu pochodzące z zastosowań przemysłowych i medycznych. Podobne kryteria mogą być stosowane w postępowaniu z odpadami ciekłymi i gazowymi zawierającymi radioizotopy krótkożyciowe, które przechowywane do czasu obniżenia stężenia aktywności poniżej odpowiednich ograniczeń dla uwolnień. Generalnie opcja postępowania polegająca na przechowywaniu w celu doprowadzenia do rozpadu powinna być stosowana wyłącznie dla radioizotopów o okresie połowicznego rozpadu rzędu 100 dni lub krótszym.

Odpady bardzo niskoaktywne (LLW)

Podczas eksploatacji i likwidacji obiektów jądrowych powstają spore ilości odpadów o stężeniu aktywności w obszarze nieco powyżej poziomów określonych dla zwolnienia materiałów z kontroli dozowej. Takie odpady, zawierające radioizotopy pochodzenia naturalnego, mogą powstawać także w związku z wydobywaniem lub przetwarzaniem rud i minerałów. Postępowanie z takimi odpadami, w odróżnieniu od odpadów wyłączonych, wymaga rozpatrzenia z punktu widzenia bezpieczeństwa i ochrony przed promieniowaniem, jednak zakres niezbędnych środków będzie bardzo ograniczony w porównaniu ze środkami niezbędnymi wobec odpadów bardziej promieniotwórczych, zaliczanych do klas opisanych dalej. Odpady stanowiące tak ograniczone zagrożenie, a jednak przekraczające lub zbliżone do poziomów dla odpadów wyłączonych, MAEA zaleca nazywać odpadami bardzo niskoaktywnymi. Dla takich odpadów odpowiedni poziom bezpieczeństwa można osiągnąć na drodze ich składowania w odpowiednich obiektach inżynierskich typu wysypisko. Niektóre państwa członkowskie MAEA stosują takie składowanie również w odniesieniu do odpadów o niskim stężeniu aktywności, powstających w obiektach jądrowych. Rozwiązania projektowe dla takich składowisk są różne, od prostych pokryw po systemy bardziej złożone, a generalnie składowiska takie wymagają stosowania przez odpowiedni czas czynnych i biernych środków kontroli instytucjonalnej.

Odpady niskoaktywne (LLW)

W przeszłości odpady niskoaktywne definiowano jako odpady niewymagające osłon podczas normalnego przemieszczania i transportu. Odpady promieniotwórcze wymagające osłon ale nie generujące ciepła klasyfikowano jako odpady średnioaktywne. Do rozróżnienia tych dwóch klas stosowano kontaktową moc dawki równą 2 mSv/h. W prezentowanym obecnie schemacie klasyfikacyjnym (Rys.1), który bazuje przede wszystkim na bezpieczeństwie długoterminowym, moc dawki promieniowania nie jest już wykorzystywana. Obecnie MAEA uważa, że zagadnienie to oczywiście musi być uwzględniane przy przemieszczaniu lub transporcie odpadów oraz do celów

¹ Badania prowadzone na poziomie krajowym i międzynarodowym doprowadziły do określenia poziomów wyłączenia i zwolnienia materiałów stałych, odpowiadających poszczególnym radioizotopom. Wyjaśnienia i wskazówki dotyczące koncepcji wyłączenia i zwolnienia z kontroli dozowej podano w poradniku bezpieczeństwa MAEA RS-G-1.7 *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance* (Stosowanie koncepcji nieuwzględnienia, wyłączenia i zwolnienia). Publikacja ta podaje wartości stężeń aktywności radioizotopów, zarówno naturalnych jak i sztucznych, jakie urzędy dozowe mogą stosować do określania, kiedy kontrola dozowa nad dużymi ilościami materiałów stałych nie jest wymagana, lub kiedy przestaje być konieczna.

operacyjnej ochrony przed promieniowaniem w zakładach postępowania z odpadami i składowiskach, ale nie musi to być czynnik decydujący dla długoterminowego bezpieczeństwa składowiska.

W opisywanym tu schemacie klasyfikacyjnym, odpady niskoaktywne to odpady nadające się do składowania w składowiskach płytkich. Jest to opcja składowania odpowiednia dla odpadów zawierających taką ilość materiału promieniotwórczego, która wymaga solidnego zabezpieczenia i odizolowania przez czas ograniczony, do kilkuset lat.

Z uwagi na to, że odpady nadające się do składowania w składowiskach płytkich mogą powstawać z bardzo różnymi stężeniami i mogą zawierać wiele różnych radioizotopów, istnieją różne rozwiązania projektowe dla takich składowisk - od bardzo prostych po bardziej złożone obiekty inżynieryjne, zaś głębokość składowania też może być różna, od powierzchni gruntu po głębokość 30 metrów.

Według omawianego dokumentu odpady niskoaktywne mogą zawierać małe stężenia radioizotopów długożyciowych, a duże stężenia izotopów krótkożyciowych (w okresie składowania i kontroli instytucjonalnej większość z tych izotopów ulegnie rozpadowi). Klasyfikacja powinna się odnosić do poszczególnych radioizotopów, z uwzględnieniem różnych dróg narażenia, takich jak pokarmowa (np. w przypadku długookresowej migracji radioizotopów do dostępnej biosfery w okresie po-eksploatacyjnym składowiska) i wziewna (np. w przypadku wtargnięcia człowieka do składowiska). Czynnikiem różnicującym odpady promieniotwórcze nadające się do składowania w obiektach płytkich i średnio głębokich może być czas potrzebny do ich kontrolowania w trybie kontroli instytucjonalnej a więc czas, w jakim można zapobiegać wtargnięciu człowieka do składowiska. Analiza bezpieczeństwa dla konkretnego składowiska powinna wykazać, że konkretny zestaw odpadów nadaje się do składowania w tym obiekcie.

Według MAEA nie można określić wyraźnej granicy między LLW i ILW, ponieważ ograniczenia aktywności dla różnych radioizotopów lub grup radioizotopów będą różne. Dla konkretnych składowisk kryteria akceptowalności odpadów będą zależne od konkretnego projektu i planów dla składowiska płytkiego (np. bariery inżynieryjne, czas trwania kontroli instytucjonalnej, czynniki dotyczące konkretnej lokalizacji). Ograniczenia stężeń aktywności radioizotopów długożyciowych w poszczególnych opakowaniach z odpadami można uzupełnić ograniczeniami dotyczącymi średnich poziomów aktywności lub prostymi technikami operacyjnymi, takimi jak selektywne rozmieszczanie w składowisku opakowań z odpadami o wyższej aktywności.

Władze krajowe powinny wprowadzić ograniczenia dotyczące składowania radioizotopów długożyciowych w obiektach płytkich, opierając się na ocenach bezpieczeństwa dla konkretnych składowisk.

Odpady średnioaktywne (ILW)

W prezentowanym schemacie klasyfikacyjnym odpady średnioaktywne zawierają radioizotopy długożyciowe w ilościach wymagających wyższego stopnia zabezpieczenia i izolacji od biosfery, niż to jest w składowiskach płytkich. Wskazane jest składowanie w obiekcie o głębokości od kilkudziesięciu do kilkuset metrów. W ten sposób, dobierając odpowiednie charakterystyki barier zarówno naturalnych jak i inżynieryjnych w obrębie składowiska, można zapewnić długotrwałą izolację odpadów od środowiska. W szczególności, na takiej głębokości generalnie można wykluczyć szkodliwe skutki erozji w krótkim i średnim horyzoncie czasowym. Inną ważną zaletą składowania odpadów na średniej głębokości jest to, że w porównaniu z obiektami nadającymi się dla LLW, prawdopodobieństwo wtargnięcia człowieka zostaje znacząco zmniejszone. W związku z tym w takich składowiskach bezpieczeństwo długoterminowe nie będzie zależne od istnienia instytucjonalnych środków kontroli.

Jak stwierdzono wyżej, nie można w uniwersalny sposób określić granicy pomiędzy LLW i ILW w odniesieniu do poziomów stężeń dla składowania odpadów promieniotwórczych, ponieważ poziomy dozwolone będą zależeć od konkretnego składowiska i związanego z nim stanu bezpieczeństwa i oceny bezpieczeństwa.

Odpady wysokoaktywne (HLW)

Klasa odpadów wysokoaktywnych zawiera wysokie stężenia radioizotopów zarówno krótko- jak i długożyciowych, i wymaga wyższego stopnia zabezpieczenia niż odpady omawiane poprzednio, zapewnionego zazwyczaj przez barierę geologiczną. HLW generują znaczące ilości ciepła pochodzącego z rozpadu promieniotwórczego. Typowe wartości poziomów aktywności świeżego wypalonego paliwa jądrowego z reaktora energetycznego są rzędu 104 do 106 TBq/m³, zaś w czasie składowania, po kilkudziesięciu latach chłodzenia, wynoszą około 104 TBq/m³.

3. METODY PRZETWARZANIA ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Odpady ciekłe:

- oczyszczanie metodami z zastosowaniem sorbentów nieorganicznych,
- zatężenie na wyparce,
- filtry jonitowe,
- zestalanie (cement, asfalt, tworzywa sztuczne),
- zeszkliwanie.

Przetwarzanie ciekłych odpadów promieniotwórczych polega na zatężeniu odpadów do jak najmniejszej objętości, a następnie przetworzeniu koncentratu w postać stałą. Duże zmniejszenie objętości ścieków jest konieczne, zarówno ze względów ekonomicznych, jak i eksploatacyjnych. Prowadzi ono do zmniejszenia wymiarów i kosztów urządzeń do zestalania.

Zawarte w ściekach nuklidy promieniotwórcze są oddzielane różnymi metodami jak: strącanie chemiczne, wymiana jonowa, destylacja. Strącanie jest dosyć prostą metodą chemiczną o niezbyt dużej skuteczności, nadającą się do wód brudnych, niskoaktywnych, o dużej zawartości soli. Wymiana jonowa jest najbardziej skuteczna przy oczyszczaniu stosunkowo czystych ścieków o małych zawartościach soli. Osiąga się wtedy współczynnik oczyszczania ok. 10⁴. Najbardziej uniwersalną i efektywną, chociaż i najbardziej kosztowną metodą oczyszczania ścieków, jest odparowywanie. Z wyjątkiem lotnych nuklidów promieniotwórczych, wszystkie inne zanieczyszczenia są skutecznie oddzielane od wody. Osiąga się współczynnik oczyszczania ok. 10⁶. W przypadku ścieków wysokoaktywnych może się okazać konieczne dodatkowe oczyszczenie wody, np. metodą wymiany jonowej lub powtórnej destylacji. Oczyszczoną wodę uwalnia się do otoczenia albo wykorzystuje w procesach technologicznych.

Pozostałe po odparowaniu szlamy i koncentraty powyparne muszą być przetworzone do postaci stałej. Jako materiałów zestalających używa się powszechnie betonów. Betonowanie jest stosunkowo proste, tanie i szeroko stosowane. Metoda polega na wymieszaniu koncentratów z masą cementową i wypełnianiu mieszaniną beczek. Wady tej metody to: znaczne zwiększenie objętości w stosunku do objętości przerabianych koncentratów; ograniczenie aktywności zestalanych odpadów (z uwagi na bezpieczeństwo personelu obsługującego); możliwość wymywania nuklidów promieniotwórczych z

betonu w czasie magazynowania; ograniczenie zawartości soli i kwasu borowego, powodujących uszkodzenia struktury betonu.

Powyższe metody są szeroko znane i stosowane w świecie w odniesieniu do odpadów nisko- i średnio-aktywnych. Odpady wysokoaktywne wymagają stosowania innych technologii.

Podstawowym problemem jest sposób przetwarzania ciekłych odpadów wysokoaktywnych, powstających wyłącznie w procesie przerobu paliwa wypalonego. Wysokoaktywne roztwory produktów rozszczepienia w zakładzie przerobu paliwa zawierają powyżej 99,9% całkowitej aktywności wszystkich odpadów w cyklu paliwowym, chociaż stanowią jedynie ok. 1% ich objętości.

W roztworach wodnych produktów rozszczepienia [2] po pierwszym cyklu ekstrakcji skupia się ponad 99,9% wszystkich produktów rozszczepienia paliwa wypalonego, $0,1 \div 0,5\%$ plutonu oraz prawie cała ilość pozostałych aktywności. Początkowa objętość tych roztworów przypadająca na tonę uranu ($4 \div 10 \text{ m}^3/\text{t U}$) zostaje w procesie odparowania wielokrotnie zmniejszona, a następnie zmagazynowana w specjalnych zbiornikach.

Obecnie na całym świecie ogromna większość wysokoaktywnych roztworów produktów rozszczepienia jest przechowywana w postaci ciekłej w zbiornikach. W czasie przechowywania aktywność roztworów znacznie spada – o ok. 90% w pierwszych 5 latach (podczas pierwszych 150 dni przechowywania paliwa wypalonego w basenie przyreaktorowym, na długo przed rozpoczęciem procesu przerobu, aktywność paliwa spada już o 30% jej początkowej wartości).

Zbiorniki są zwykle wykonane [2] w kształcie pionowych cylindrów o objętości do 1200 m^3 , ze ścianami ze stali nierdzewnej. Umieszczone są w ciężkich komorach betonowych, podziemnych lub przynajmniej częściowo zagłębionych w ziemi. Komory są wyłożone blachą ze stali nierdzewnej, a zbiornik jest ustawiony na specjalnych podporach, umieszczonych na dnie komory. Zbiorniki są wyposażone w systemy chłodzące (rurki z wymuszonym obiegiem wody zanurzone w koncentracie), systemy mieszania koncentratu (w celu niedopuszczenia do zbierania się i zestalania osadów na dnie zbiornika), systemy przepompowywania koncentratu z jednych zbiorników do innych, systemy pomiarowe (pomiar ciśnienia, temperatury, poziomu, stężenia itd.), systemy kontrolno-alarmowe (przekroczenie temperatury, wystąpienie nieszczelności), systemy wentylacji. Czas eksploatacji zbiorników wynosi $20 \div 30$ lat.

Nad opanowaniem technologii zeskliwiania odpadów wysokoaktywnych pracuje się w wielu krajach od dawna.

Tylko kilka krajów na świecie rozporządza przemysłowymi instalacjami przerobu wypalonego paliwa jądrowego z reaktorów wodnych (ciśnieniowych i wrzących) i technologią zeskliwiania powstałych odpadów wysokoaktywnych. Są to:

- Francja (La Hague)
- Wielka Brytania (Sellafield)
- Japonia (Tokai i w przeszłości Rokkashomura)
- Rosja (RT – 1 i RT – 2).

Odpady stałe:

- fragmentacja,
- prasowanie,
- utrwalać (cement, tworzywa sztuczne),
- spalanie.

Fragmentacji (cięcia) poddawane są te odpady, których wymiary są przeszkodą do bezpośredniego składowania. Proces fragmentacji może też prowadzić do powstawania odpadów (pyły) i zazwyczaj musi być prowadzony w kontrolowanych warunkach.

Prasowanie jest dość rozpowszechnioną metodą redukcji objętości. Jej wydajność wzrasta w przypadku z zastosowania pras o bardzo dużym nacisku.

Objętość odpadów palnych najskuteczniej redukuje się poprzez ich spalanie. Powstały popiół zajmuje na ogół nie więcej niż 1/80 część pierwotnej objętości odpadów. Po wymieszaniu go z substancjami wiążącymi (cement, piasek, woda), mieszaninę załadunku się do beczek. Spalanie prowadzi się w specjalnych piecach, w których gazy spalania są przepuszczane przez system filtrów (mechanicznych, elektrycznych) i płuczek w celu oczyszczenia ich z popiołów i pyłów oraz związków chemicznych mogących zawierać nuklidy promieniotwórcze.

Odpady biologiczne:

- utrwalanie w żywicach mocznikowo – formaldehydowych.

4. PRZECHOWYWANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Po wytworzeniu, nieprzetworzone odpady promieniotwórcze można - przed ich składowaniem - poddać szeregowi procesów takich jak przenoszenie, przetwarzanie i kondycjonowanie. Podczas takich etapów postępowania odpady promieniotwórcze mogą podlegać przechowywaniu, które ma albo ułatwić następny krok postępowania, albo spełnić rolę bufora pomiędzy kolejnymi krokami postępowania z odpadami. Zatem odpady promieniotwórcze są przechowywane w postaci przetworzonej i nieprzetworzonej, a także przez różne okresy czasu.

Istnieje wiele powodów uzasadniających przechowywanie odpadów promieniotwórczych przed ich składowaniem przez różne okresy czasu. Poniżej podano kilka przykładów:

- umożliwienie rozpadu radioizotopów krótkożyciowych do poziomu, przy którym odpady promieniotwórcze mogą być wyłączone spod kontroli dozoru lub można zezwolić na ich zwolnienie, usuwanie lub ponowne wykorzystanie albo recykling (jest to często spotykane w szpitalach, ośrodkach onkologicznych i laboratoriach medycznych; np. w miejscach gdzie stosowane są terapie jodowe);
- zebranie i zgromadzenie wystarczającej ilości odpadów promieniotwórczych przed ich przekazaniem do innego obiektu w celu poddania obróbce i kondycjonowaniu (w przypadku Polski dotyczy to np. Zakładu Unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych - ZUOP);
- zebranie i zgromadzenie wystarczającej ilości odpadów promieniotwórczych przed ich składowaniem (ZUOP – w obiekcie Magazyn Spedycyjny Odpadów Promieniotwórczych);
- zmniejszenie ilości ciepła wytwarzanego przez odpady wysokoaktywne przed ich przekazaniem do dalszego postępowania;
- zapewnienie długookresowego przechowywania odpadów promieniotwórczych w krajach, które nie posiadają odpowiednich składowisk (dobrym przykładem jest tu przedsiębiorstwo COVRA w Holandii, eksploatujące przechowalniki odpadów promieniotwórczych przystosowanych do długookresowej (ok. 120 lat) eksploatacji).

Z pierwszymi trzema przykładami mamy najczęściej do czynienia w małych przechowalnikach odpadów promieniotwórczych, w których przechowywanie ma charakter krótkotrwały wobec głównego celu, jakiego służy obiekt. Dwa ostatnie przykłady dotyczą na ogół obiektów większych,

związanych z obróbką i przechowywaniem odpadów pochodzących z obiektów należących do jądrowego cyklu paliwowego oraz z obiektów scentralizowanych, które gromadzą i przetwarzają odpady pochodzące od wielu drobnych użytkowników źródeł promieniotwórczych (np. ZUOP).

Niezbędny czas przechowywania odpadów przed ich składowaniem może być bardzo różny, może wynosić zaledwie kilka dni, tygodni lub miesięcy w przypadku przechowywania „rozpadowego” lub poprzedzającego przekazanie do innego obiektu lub do innego etapu postępowania z odpadami. Dłuższe, wieloletnie okresy przechowywania odpadów mogą być konieczne w przypadku przechowywania odpadów wysokoaktywnych w celu zmniejszenia ciepła rozpadu, albo w przypadku długookresowego przechowywania odpadów promieniotwórczych, dla których nie ma odpowiedniego składowiska.

Przechowalnik może się znajdować w obiekcie wytwarzającym odpady, takim jak elektrownia jądrowa, szpital lub laboratorium, albo może stanowić obiekt odrębny, taki jak scentralizowany lub ogólnokrajowy obiekt służący do przetwarzania i przechowywania odpadów. Przechowalniki mogą mieć bardzo różne rozmiary, od szafki czy szafy (np. w laboratorium) po duże obiekty (np. przechowalniki scentralizowane).

Ogólne wymagania projektowe i eksploatacyjne przechowalników odpadów muszą zapewniać ochronę pracowników, osób postronnych, a także ochronę środowiska i spełniać poniższe warunki [3]:

- dawki promieniowania, otrzymywane przez pracowników i osoby postronne na skutek działalności związanej z przechowywaniem odpadów, nie przekraczają odpowiednich ograniczeń ustanowionych przepisach krajowych, oraz
- zapewniona powinna być optymalizacja ochrony ludzkiego zdrowia i środowiska przed promieniowaniem, oraz
- skutki dowolnego przewidywalnego uszkodzenia lub warunków awaryjnych powinny zminimalizowane zgodnie z zasadą ALARA i wymaganiami krajowymi.

5. PRZECHOWYWANIE WYPALONEGO PALIWA JĄDROWEGO

Po wyładowaniu z reaktora jądrowego, wypalone paliwo jest źródłem bardzo intensywnego promieniowania jonizującego. W trakcie eksploatacji w reaktorze jądrowym, w paliwie jądrowym gromadzą się promieniotwórcze izotopy: produkty rozszczepienia jąder paliwa, transuranowce czy aktynowce - izotopy, które powstają w wyniku wywołanych neutronami przemian jądrowych jąder paliwa i następnie rozpadu tych izotopów. Pod wpływem promieniowania neutronowego następuje aktywacja materiałów konstrukcyjnych. Rozpad tych izotopów powoduje emisję promieniowania jonizującego: cząstek alfa, promieniowania beta i gamma oraz neutronów. Promieniowanie to powoduje również generację w wypalonym paliwie energii cieplnej.

W miarę rozpadu tych radioaktywnych izotopów intensywność promieniowania i moc wytwarzanej energii cieplnej zmniejsza się. Jednakże wypalone paliwo musi być odizolowane od środowiska przez okres setek tysięcy lat. I tylko niezwykle znikome - w stosunku do wytworzonej energii - ilości wypalonego paliwa czynią to zadanie możliwe do wykonania.

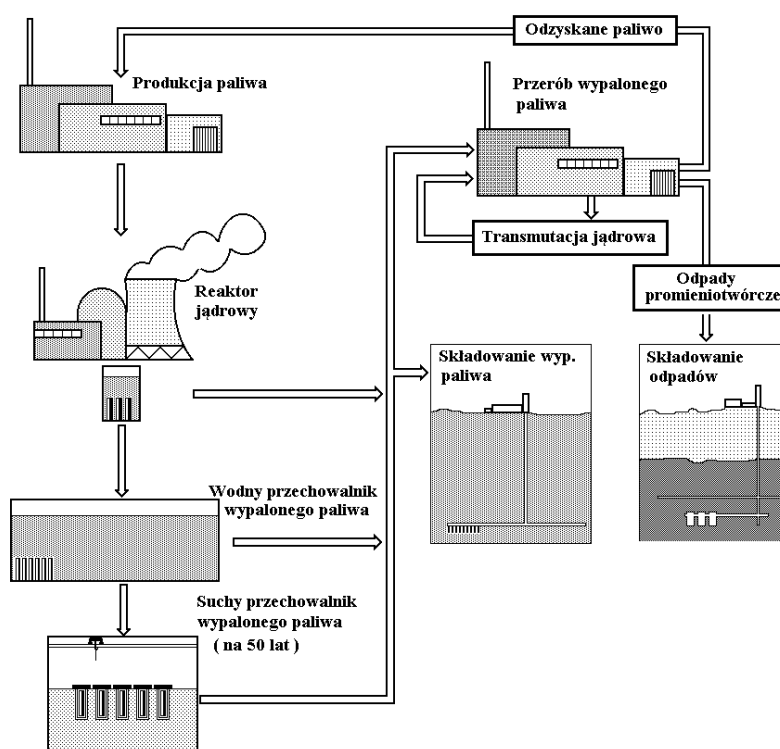
Dla przykładu, wytworzenie 1 TWh energii elektrycznej w elektrowniach z reaktorami wodnymi powoduje wytworzenie ok. 4 ton wypalonego paliwa, w którym znajduje się ok. 2,52 ton HM². Paliwo to zajmuje objętość ok. 1,5 m³ [4].

² HM – masa Heavy Metal – uran + aktynowce i produkty ich rozpadu

Ze względu na znaczną aktywność i wytwarzanie dużych ilości ciepła, po wyładowaniu z reaktora, wypalone paliwo jest przechowywane w basenach wodnych przy reaktorach. Po okresie kilku lat "schładzania" wypalone paliwo może być transportowane i dalsza gospodarka zależy od przyjętej technologii. W zasadzie, w świecie stosuje się obecnie dwie technologie postępowania z wypalonym paliwem:

1. przerób wypalonego paliwa, wykorzystanie pierwiastków rozszczepialnych do wytwarzania nowego paliwa oraz składowanie odpowiednio zabezpieczonych wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w głębokich formacjach geologicznych,
2. okresowe przechowywanie wypalonego paliwa w suchych lub wodnych przechowalnikach, odpowiednie zabezpieczenie wypalonego paliwa przez zamknięcie go w specjalnych, odpornych na korozję i inne oddziaływania pojemnikach oraz składowanie tak zabezpieczonych pojemników w głębokich formacjach geologicznych.

Powyższe opcje dobrze ilustruje rys.2.



Rys. 2. Cykl paliwowy [4].

Przechowywanie wypalonego paliwa jądrowego jest typowym, dobrze rozpoznany i technicznie rozwiązany zagadnieniem. Niemniej oprócz zagadnień technicznych z tym etapem postępowania z wypalonym paliwem jądrowym traktowanym jako materiał wyjściowy do dalszych operacji związanych z przerobem, czy jako odpad promieniotwórczy w sytuacji, gdy nie będzie ono już poddawane przerobowi, wiążą się inne zagadnienia natury ekonomicznej, bezpieczeństwa czy też problemy etyczne. Różnorodność podejścia do przechowywania wypalonego paliwa jądrowego ilustruje poniższa tabela. W tabeli zawarto nie tylko informacje o planowanym podejściu, w wymienionych krajach, do przechowywania wypalonego paliwa jądrowego ale także, generalnie do przechowywania różnych odpadów promieniotwórczych ponieważ ww. zagadnienia przechowywania

dotyczą tych wszystkich odpadów z energetyki jądrowej, choć oczywiście nie tylko ta działalność powoduje powstawanie odpadów promieniotwórczych, niemniej jest dominującą jeśli chodzi o ilości odpadów promieniotwórczych, co nie zmienia faktu, że w porównaniu z innymi technologiami wytwarzania energii elektrycznej ilości te nie są duże; ale nie o ilościowe rozważania w tym przypadku chodzi. Wymienione w tabeli 1 „długoterminowe przechowywanie” rozumieć należy jako przechowywanie w czasie nieokreślonym (być może bardzo, bardzo długim). Skróty oznaczają: LLW – odpady niskoaktywne, ILW – odpady średnioaktywne, HLW – odpady wysokoaktywne, SF – wypalone paliwo jądrowe.

Tabela 1. Podsumowanie poglądów prezentowanych przez różne kraje, dotyczących przechowywania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego w odniesieniu do różnych okresów czasu.

Kraj	Krótkoterminowe przechowywanie	Przedłużone przechowywanie	Długoterminowe przechowywanie	Inne opcje
Belgia	Głównie scentralizowane przechowywanie LLW, ILW, HLW	Rozważane w odniesieniu do krótkożyłowych LLW	Brak informacji	
Kanada	Głównie scentralizowane przechowywanie LLW i SF	Lokalne lub scentralizowane przechowywanie – powierzchniowe lub podziemne – jest rozważane dla różnych okresów czasu, włącznie z przechowywaniem długoterminowym		
Czechy	HLW i SF w scentralizowanym przechowalniku oraz Przy elektrowniach	Być może będzie rozważana	Rozważane i wykluczone jako nierealistyczne	Brak informacji
Finlandia	SF w dwóch przechowalnikach przy elektrowniach	Podjęta decyzja o budowie składowiska geologicznego		
Francja	Wiele przechowalników dla różnych rodzajów odpadów	Rozważane jako wykonalne dla SF, z powodu możliwości odzyskania materiałów rozszczepialnych	Brak informacji	
Węgry	Scentralizowany przechowalnik dla SF	rozważane	Brak informacji	
Włochy	Scentralizowane przechowalniki są planowane		Brak informacji	
Japonia	Wiele przechowalników dla odpadów różnych typów	Brak informacji		Składowisko geologiczne z zapewnioną w długim okresie czasu opcją odzyskania odpadów
Holandia	Scentralizowany przechowalnik dla większości typów odpadów	Oficjalna polityka przewiduje co najmniej 100-letnie przechowywanie	Brak informacji	300-letnie przechowywanie uważane za wykonalne

Hiszpania	SF i HLW przechowywane przy elektrowniach, przechowalnik scentralizowany jest planowany	Głębokie przechowywanie rozważane jako alternatywa do składowania geologicznego	Uważane za nieakceptowalne ze względu na obciążanie przyszłych pokoleń	Brak informacji
Szwecja	SF w podziemnym scentralizowanym o przechowalniku CLAB	Rozważane ale uważane za nieetyczne	Uważane za niewykonalne	Wydłużone przechowywanie w CLAB uważane za wykonalne ale porzucone na rzecz składowania
Szwajcaria	Scentralizowany przechowalnik dla większości odpadów w ZWILAG	Rozważane i odrzucone na korzyść głębokiego składowania		Monitorowane głębokie składowanie
Wielka Brytania	Wiele przechowalników dla odpadów różnych typów	W trakcie rozważań		Składowanie z możliwością odzysku
USA	Wiele przechowalników dla odpadów różnych typów	Rozważane dla odpadów zawierających pluton z broni jądrowej ale nie rekomendowane		Przedłużone przechowywanie SF jako przejaw opcji „nic nie robić” ale obciążone wieloma konsekwencjami; Składowisko w Yucca Mountain z możliwością odzysku

Przechowywanie odpadów i wypalonego paliwa jądrowego jest normalną i konieczną praktyką w postępowaniu z tymi materiałami. Bardziej szczegółowe dociekania wskazują na dużą różnorodność kondycjonowania, pakowania i „strategii” przechowywania (co do aspektów technicznych) w różnych krajach. Te strategie zmieniają się od prostych instalacji dla LLW do bardzo skomplikowanych, radiologicznie odpornych i wyposażonych w urządzenia do zdalnego sterowania budowli dla odpadów o wyższej aktywności i wypalonego paliwa jądrowego. Główną cechą instalacji do przechowywania jest możliwość odzyskania odpadów, a jeśli są one pakowane to opakowanie powinno pozostawać w dobrym stanie przez cały okres przechowywania tak, aby można je było bez problemów wykorzystać w składowisku. Z powodów ekonomicznych instalacje do przechowywania odpadów i wypalonego paliwa jądrowego są konstrukcjami naziemnymi (za wyjątkiem szwedzkiego CLAB usytuowanego kilkanaście metrów pod powierzchnią terenu). Decyzja czy budować pojedyncze przechowalniki czy jeden lub dwa scentralizowane zależy od kilku czynników:

- koszty – rozważenia wymagają koszty projektowania jednej konstrukcji czy wielu (być może różnych, dla których trudno zastosować optymalizację), z kolei koszty eksploatacji mogą też być różne w przypadku jednej dużej budowli lub kilku mniejszych, podobnie spełnienie wymagań związanych ochroną środowiska czy monitoringiem mogą być różne;
- transport – do jednego miejsca czy kilku
- zainteresowanie inwestorów (mniejszy czy większy obiekt)'
- bezpieczeństwo publiczne,
- bezpieczeństwo pracowników.

Podobne czynniki należy wziąć pod uwagę podejmując decyzje odnośnie długości przechowywania (krótkoterminowe, długo- lub bardzo długoterminowe).

Wyżej wymienione czynniki nie nastręczają trudności w ocenie jednak zwraca uwagę fakt, dość częstego rozważania długoterminowego przechowywania, co można traktować jako przejaw niepewności odnośnie technicznych i technologicznych możliwości wdrożenia rozwiązań składowisk geologicznych. Nie zawsze bowiem u podstaw tego zwlekania z zastosowaniem rozwiązań ostatecznych (składowanie) leżą względy ekonomiczne związane z potencjalnym odzyskaniem materiałów rozszczepialnych. Podobne wnioski można wyciągnąć z postawy niektórych krajów manifestującej się tzw. podejściem „nie robić nic”. Oznacza to, że kraje te nie budują składowisk gdyż technologie związane ze składowaniem geologicznym uważają za niesprawdzone i niepewne, a istnieje duża szansa, że w wyniku postępu technologicznego przyszłe pokolenia poradzą sobie z odpadami promieniotwórczymi łatwiej. Taka postawa jest w oczywistej sprzeczności z zasadą „nie obciążania przyszłych pokoleń naszymi problemami”. Ponadto, reprezentowanie podejścia opisanego powyżej nie sprzyja uzyskaniu szerokiej akceptacji społecznej dla energetyki jądrowej i związanych z nią technologii postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym.

6. SKŁADOWANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Proces lokalizacji SOP polega na odpowiednim doborze warunków geologicznych (bariera geologiczna), konstrukcji składowiska (bariery inżynierskie) i kryteriów akceptacji odpadów do składowania.

W procesie lokalizacji wyróżnia się 4 etapy:

- koncepcji i planowania oraz badań materiałów archiwalnych,
- badań regionalnych,
- szczegółowych badań obszarów wytypowanych,
- szczegółowych badań dokumentujących poprawność wyboru lokalizacji [5].

Zakres badań w poszczególnych etapach jest częściowo powtarzalny. Różni się jednak skalą i stopniem uszczegółowienia informacji oraz przeprowadzanych analiz, a także udziałem badań terenowych, których zakres wzrasta wraz z kolejną fazą dokumentowania. Do celów dwóch pierwszych etapów należy wyodrębnić obszary i formacje geologiczne perspektywiczne dla dalszych, bardziej szczegółowych badań studialnych. Analiza na tym etapie ma generalnie charakter screening'u negatywnego, tzn. badanie na wytypowanych obszarach warunków wykluczających lub ograniczających lokalizację. Pierwszy etap procesu lokalizacji przeprowadza się zazwyczaj w oparciu o istniejącą dokumentację budowy geologicznej kraju. Dopiero w następnych etapach występują badania terenowe.

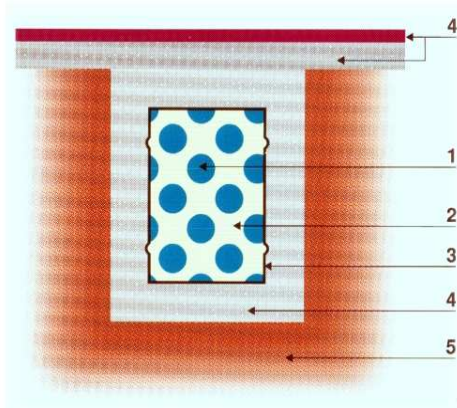
Schematyczny układ barier w składowisku pokazano na Rys.3. Na tym etapie omawiania barier ochronnych nie trzeba jeszcze rozgraniczać składowisk powierzchniowych i głębokich ponieważ ogólna idea jest wspólna. Natomiast takie rozgraniczenie jest konieczne gdy rozpatrywana jest ważność poszczególnych barier. Otóż w składowisku powierzchniowym, które powinno zachować swoje cechy izolacyjne odpadów od biosfery przez okres ok. 500 lat wpływ pierwszych czterech barier (Rys.3) jest istotny i mogą one rekompensować „pewne” niedostatki bariery naturalnej.

Wynika to z faktu, że obecnie znane są i sprawdzone technologie budowlane pozwalające utrzymać żadaną szczelność w wymaganym okresie 500 lat. Inaczej sprawa wygląda w przypadku składowiska zlokalizowanego w głębokich formacjach geologicznych - GeoSOP, w którym trwałość barier inżynierskich ma mniejsze znaczenie biorąc pod uwagę wymagany czas izolacji odpadów (tysiące lat). W tym przypadku niedostatki bariery geologicznej nie da się rekompensować w wiarygodny

sposób. Nie zmienia to faktu, że w składowiskach geologicznych należy stosować tak dobre bariery inżynierskie jak to jest tylko możliwe.

Na ww. system barier składają się:

- *Tworzenie trudno rozpuszczalnych związków chemicznych* (koncentratów) wiążących izotopy promieniotwórcze (bariera chemiczna).
- *Materiał wiążący* (spoiwo), który służy do zestalania odpadów, co przeciwdziała rozsypaniu, rozproszaniu, rozpyleniu i wymywaniu substancji promieniotwórczych. Spoiwem może być beton (działa jednocześnie jako osłona biologiczna), asfalt, polimery organiczne i masy ceramiczne (bariera fizyczna).
- *Opakowanie odpadów*, zabezpieczające je przed uszkodzeniami mechanicznymi, działaniem czynników atmosferycznych i kontaktem z wodą. Stałe lub zestalone odpady zamykane są na ogół w pojemnikach metalowych lub betonowych i w tej postaci są przewożone, magazynowane i składowane (I bariera inżynierska).



Rys. 3. Bariery ochronne: 1 – chemiczne; 2 – fizyczna; 3 – I inżynierska; 4 – II inżynierska; 5 – naturalna (geologiczna).

- *Betonowa konstrukcja składowiska*, która stanowi dodatkowe zabezpieczenie odpadów przed działaniem czynników atmosferycznych, zapobiega korozji opakowań oraz migracji substancji promieniotwórczych z miejsca ich składowania (II bariera inżynierska).
- *Pokrywa multiwarstwowa* wykonana na etapie zamknięcia składowiska, której celem jest ograniczenie m.in. migracji wody, spowolnienie zjawisk korozyjnych opakowań oraz wymywania substancji promieniotwórczych.
- *Struktura geologiczna terenu*. Ta bariera decyduje o wyborze miejsca na lokalizację składowiska. Teren składowiska musi być m.in. asejsmiczny, niezatapialny (np. w czasie powodzi) mało przydatny gospodarczo i oddalony od skupisk ludzkich. Odpowiednie warunki geologiczne i hydrogeologiczne mają zapobiegać rozprzestrzenianiu się radionuklidów w glebie i przenikaniu ich do wód gruntowych i powierzchniowych (bariera naturalna/geologiczna).

Skuteczność systemu barier związana jest z ich wielostopniowością, zabezpieczającą odpady przed rozsypaniem, rozproszaniem, rozpyleniem i wymywaniem substancji promieniotwórczych. Z tego też względu stopień narażenia środowiska na ujemne skutki promieniowania jonizującego, pochodzącego od składowanych odpadów, jest bardzo niewielki, nawet przy założeniu najbardziej pesymistycznych scenariuszy wydarzeń.

Proces lokalizacji GeoSOP jest podobny do opisanego powyżej procesu stosowanego w przypadku składowisk powierzchniowych, ale zakres koniecznych charakterystyk będzie zdecydowanie

większy, inne też będą charakterystyki składowanych odpadów i inny czas wymaganej izolacji od biosfery. Konieczne będą dane uzyskane z Podziemnego Laboratorium Badawczego (PLB).

Zwykle zakres prac w PLB obejmuje dwie grupy tematyczne [6]:

- badania *in situ* obejmujące pomiary sejsmiczne, geodezyjne, geotechniczne uwzględniające podgrzewanie ośrodka skalnego za pomocą grzałek elektrycznych symulujących ciepło wytwarzane przez pojemniki z odpadami promieniotwórczymi. Badania zagrożeń naturalnych (metanowe, solanki).
- badania laboratoryjne w celu określenia cech i parametrów fizycznych skał wysadu. Obejmują one badania mineralogiczne i petrofizyczne, geotechniczne i geomechaniczne.

Można również planować eksperymenty geochemiczne, biologiczne i inne, których celem byłoby zademonstrowanie zachowania się i trwałość różnych barier otaczających odpady promieniotwórcze w środowisku górotworu. Wszystkie eksperymenty mogą odbywać się bez użycia materiałów promieniotwórczych.

Składowisko odpadów promieniotwórczych, po zakończeniu czynnej eksploatacji, wymaga podjęcia działań organizacyjnych i technicznych związanych z jego zamknięciem.

Podstawowym celem tego przedsięwzięcia jest całkowita izolacja składowiska od biosfery, przy czym zakres i sposób jego realizacji zależy od wielu czynników, m.in. rodzaju i aktywności odpadów oraz warunków ich składowania, charakteru stosowanych barier, typu składowiska, a także obowiązujących w tej kwestii regulacji prawnych.

Mimo wielu eksploatowanych SOP na świecie tylko kilka z nich zakończyło okres czynnej eksploatacji i wobec kilku z nich podjęto działania związane z zamknięciem. Brak jest jednak informacji odnośnie zakończenia tego procesu. Zwykle rozważana jest budowa wielowarstwowej pokrywy ziemnej, która musi zawierać następujące elementy konstrukcyjne:

- barierę dla infiltracji wód opadowych,
- barierę przeciwko intruzji/penetracji roślin i zwierząt lub człowieka,
- barierę ograniczającą oddziaływanie przemarzania na bariery inżynierskie obiektów składowiska,
- barierę ograniczającą niekorzystne oddziaływanie chemiczne na bariery obiektów składowiska.

Wstępny projekt zamknięcia składowiska SOP jak i GeoSOP powinien być opracowany na etapie lokalizacji obiektu, a w trakcie budowy powinien być uszczegółowiony ze względu na rosnący zasób informacji o miejscu lokalizacji.

W Niemczech, gdzie prace nad głębokim składowaniem są prowadzone od wielu już lat przeprowadzono, z pozytywnym skutkiem, szereg badań tam izolacyjnych.

Kolejne etapy zamykania są zbliżone do tych, które stosuje się w zamykanych wyrobiskach górniczych:

- szczelne wypełnienie podsadzką suchą chodnika podstawowego, i
- chodnika wentylacyjnego.

Po zamknięciu wyrobisk podziemnych następuje zamykanie szybów. W rozważanych scenariuszach awaryjnych w fazie poeksploatacyjnej zakłada się, że najbardziej prawdopodobną drogą przedarcia się wód podziemnych do składowiska mogą być nieszczelne zamknięte szyby i otwory wiertnicze.

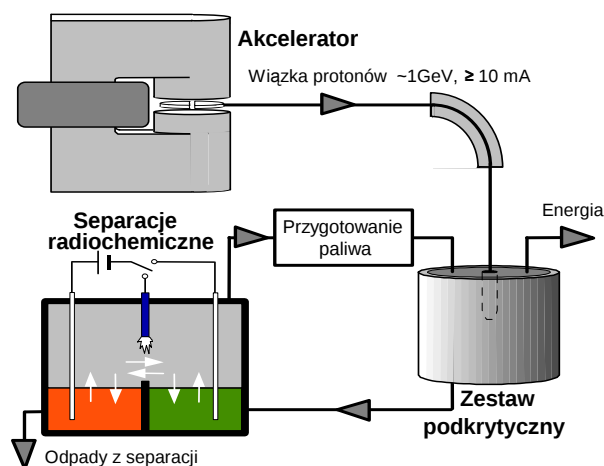
7. GLOBAL NUCLEAR ENERGY PARTNERSHIP

Rozwijana jest obecnie strategia dostarczania świeżego paliwa i postępowania z wypalonym paliwem jądrowym oparta o Global Nuclear Energy Partnership – GNEP. Polska przystąpiła do GNEP w 2006 r. Celem **GNEP** jest upowszechnianie energetyki jądrowej jako ważnego elementu zrównoważonego rozwoju gospodarki światowej, pozwalającego na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i zaspokojenie rosnącego zapotrzebowania na energię, zwłaszcza krajów rozwijających się. GNEP ma zwłaszcza na uwadze bezpieczeństwo obrotu materiałami jądrowymi oraz ograniczenie zagrożeń dla środowiska związanych m.in. ze składowaniem odpadów i wypalonego paliwa jądrowego. GNEP współpracuje z Międzynarodową Agencją Energii Atomowej i ma jej pełne poparcie. W praktyce przynależność do GNEP oznaczałaby dla Polski ograniczenie problemu składowania odpadów tylko do składowania odpadów nisko i średnioaktywnych. Przerobem wypalonego paliwa jądrowego zajął by się jego dostawca.

8. UNIESZKODLIWIANIE ODPADÓW WYSOKOAKTYWNYCH PRZY POMOCY ŹRÓDEŁ AKCELERATOROWYCH

Istotnym efektem rozszczepienia paliwa w reaktorze z punktu widzenia gospodarki paliwem wypalonym są długożyciowe pierwiastki transuranowe oraz niektóre produkty rozszczepienia o długim okresie rozpadu. Zastosowanie akceleratorowych źródeł neutronów może pozwolić na transmutację niektórych z nich, co w efekcie wytworzy krótkożyciowe izotopy transuranowców i energię. Problem przechowywania wypalonego paliwa może zostać praktycznie ograniczony do problemu gospodarki niektórymi tylko produktami rozszczepienia. Inwestycja tego rodzaju – akcelerator protonów oraz specjalny reaktor – może być ekonomicznie i ekologicznie bardziej uzasadniona niż składowanie wypalonego paliwa (lub produktów jego przerobu) w głębokich formacjach geologicznych. Celem realizacji tego projektu była ocena zasadności tego typu zastosowań.

Zarówno do neutralizacji odpadów promieniotwórczych jak i do produkcji energii elektrycznej można wykorzystać koncepcję układów podkrytycznych sterowanych akceleratorem, jako wysokowydajnym źródłem neutronów (Rys. 4).



Rys. 4. Schemat ideowy Akceleratorowego Systemu do Transmutacji (AST) [7].

W ciągu ostatnich kilku lat w świecie dokonał się zauważalny zwrot w kierunku rozwoju technologii transmutacji odpadów, a także nastąpił przełomowy wzrost zainteresowania tą metodą. Wymownym obrazem tej przemiany jest zwiększenie finansowania odnośnych badań w Unii Europejskiej

Aktualny stan wiedzy pozwala na stwierdzenie, że metoda transmutacji jest dalekowzroczną opcją rozwiązania problemu wysokotoksycznych długożyciowych odpadów promieniotwórczych. Głównym argumentem przemawiającym za jej stosowaniem jest wykorzystanie olbrzymich zasobów energii pozostającej w zużytej paliwie jądrowym. Jednocześnie należy podkreślić, że obecny poziom rozwoju technologicznego upoważnia do uznania tej metody za możliwą do realizacji na skalę przemysłową w ciągu 2-3 dekad.

Stosowanie transmutacji jądrowych [7] nie oznacza rezygnacji ze składowisk w głębokich formacjach geologicznych dla długożyciowych produktów rozszczepień. Z analizy obu sposobów rozwiązania problemu odpadów promieniotwórczych – transmutacji i składowania – wypływa jednoznacznie ich komplementarność.

Natomiast trzeba podkreślić, że - zawdzięczana recyklicacji odpadów - znikoma zawartość w nich nuklidów rozszczepialnych: ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{245}Cm eliminuje bezwzględnie wszelką możliwość krytyczności składowiska w bliższej perspektywie, a brak: ^{241}Am , ^{243}Am , i ^{237}Np - także w skali milionów lat.

Metoda transmutacji pozwala na wykorzystanie energii odpadów drogą niszczenia najbardziej toksycznych długożyciowych składników, jednocześnie ułatwiając składowanie odpadów przez ograniczenie ich wolumenu do frakcji bezużytecznych (długożyciowe produkty rozszczepienia) oraz przez ułatwienie wyboru miejsca i obniżenie kosztu składowania.

9. PODSUMOWANIE

Postępowanie z odpadami promieniotwórczymi należy uznać za proces dobrze rozpoznany, z technologiami opanowanymi i bezpiecznymi. W przypadku odpadów promieniotwórczych nisko i średnioaktywnych zarówno metody przetwarzania jak i składowanie tych odpadów nie narażają na problemy techniczne. W przypadku odpadów wysokoaktywnych i długozyciowych obserwuje się (za wyjątkiem Finlandii) pewne niezdecydowanie związane ze stosowaniem składowania w obiektach zlokalizowanych w głębokich formacjach geologicznych. Niemniej większość krajów posiadających elektrownie jądrowe prowadzi intensywne prace badawcze: laboratoryjne i terenowe związane z tą technologią składowania. Wydaje się, iż pomimo wielu prac nad obiecującymi technologiami, których stosowanie doprowadzi do zmniejszenia ilości i aktywności odpadów wysokoaktywnych, nie będzie w najbliższej przyszłości możliwe zrezygnowanie z rozważań dotyczących składowisk geologicznych.

Literatura

- [1] Classification of Radioactive Waste, IAEA, Draft Safety Guide No DS 390 (2008.02.04)
- [2] Z. Celiński, A. Strupczewski, *Podstawy energetyki jądrowej*, Warszawa, WNT 1984
- [3] Safe Storage of Radioactive Waste, Draft Safety Guide DS292, IAEA Vienna, 2005
- [4] S. Chwaszczewski i inni, *Analiza wariantowa bilansów, unieszkodliwiania i składowania odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa z reaktorów jądrowych nowej generacji (w przypadku podjęcia programu jądrowego w Polsce) w latach 2010 – 2100. (Etap I i II)*, IEA 1997/98. Praca finansowana i wykonana w ramach Strategicznego Programu Rządowego koordynowanego przez Państwową Agencję Atomistyki (1997-1999)
- [5] Z. Frankowski, J. Mitrega, *Poszukiwania lokalizacji przypowierzchniowych składowisk odpadów promieniotwórczych*, Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna, Biuletyn Informacyjny PAA Nr 3/98 (Vol.35), Warszawa, 1998
- [6] K. Ślizowski i inni, *Analiza wyników prac laboratoriów światowych dla głębokich Składowisk Odpadów Promieniotwórczych pod kątem ich przydatności dla rozwiązań krajowych*. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN, Kraków 1998. Opracowanie wykonane w ramach SPR (1997 – 1999).
- [7] S. Taczanowski i inni, *Unieszkodliwianie odpadów wysokoaktywnych przy pomocy źródeł akceleratorowych*, praca wykonana w ramach projektu badawczego finansowanego i nadzorowanego przez Komitet Badań Naukowych zgodnie z Umową Nr SPR/T09/97 z dnia 28 listopada 1997 r.