

ELŻBIETA KORZENIOWSKA-REJMER*, AGNIESZKA GENEROWICZ**

ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE, FORMY SKŁADOWANIA, SYSTEMY BARIER ZABEZPIECZAJĄCYCH ŚRODOWISKO

RADIOACTIVE WASTES NEUTRALIZATION AND ENVIRONMENT PROTECTION METHODS

Streszczenie

Problem odpadów promieniotwórczych dotyczy wszystkich krajów rozwiniętych, w których wykorzystanie energii atomowej stało się powszechne praktycznie we wszystkich dziedzinach życia i gospodarki. Odpady promieniotwórcze wymagają specjalnego postępowania związanego z ich przetwarzaniem, transportem i składowaniem okresowym i ostatecznym na składowiskach powierzchniowych i podziemnych w wybranych masywach skalnych. W artykule przedstawiono rodzaje odpadów promieniotwórczych powstających w Polsce, kryteria ich podziału i klasyfikacji, sposoby unieszkodliwiania i utylizacji. Omówiono również systemy barier zabezpieczających środowisko dla składowisk odpadów promieniotwórczych szczególnie uwarunkowania wynikające z budowy geologicznej oraz własności gruntów stanowiących naturalną barierę ochronną.

Słowa kluczowe: odpady promieniotwórcze, bariery ochronne, składowanie odpadów

Abstract

The problem of radioactive wastes concerns all developed countries in which nuclear energy has become common in practically all spheres of life and economy. Radioactive wastes require special treatment connected with their processing, transport and temporary and permanent storage in surface and underground stockpiles in chosen rock outcroppings. The paper presents types of radioactive wastes formed in Poland, criteria of their division and classification, methods of neutralization and utilization. Systems of barriers for radioactive wastes stockpiles protecting the environment are presented, especially conditions resulting from geological structure and soil properties, which form a natural protective barrier.

Keywords: radioactive wastes, systems of barriers protections, landfills

* Dr inż. Elżbieta Korzeniowska-Rejmer, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Dr inż. Agnieszka Generowicz, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Problem odpadów promieniotwórczych istnieje nie tylko w Polsce, ale dotyczy wszystkich krajów rozwiniętych, w których wykorzystanie energii atomowej stało się powszechne, praktycznie we wszystkich dziedzinach życia i gospodarki.

W latach 80. przyjęto na świecie zasadę, że kraj, który czerpie korzyści ze stosowania energii jądrowej w różnych dziedzinach życia i gospodarki musi sam poradzić sobie z unieszkodliwianiem odpadów promieniotwórczych i to na tyle skutecznie, by tym problemem nie obciążać przyszłych pokoleń. Znalazło to swój wyraz w ustawodawstwie najbiedniejszych nawet krajów świata.

Nie można odpadów promieniotwórczych ani wypalonego paliwa wyeksportować w celu ostatecznego ich składowania poza granice państwa, w którym one powstały. Nie ma dotąd jednak jednoznacznych sposobów i międzynarodowych przepisów, jak to należy robić w sposób rutynowy.

W Polsce obecnie jest realizowana operacja wywozów wysoko wzbogaconego wypalonego paliwa jądrowego z polskich reaktorów badawczych, dostarczonego przez Rosję. Operacja ta jest konsekwencją przystąpienia Polski do Inicjatywy Redukcji Globalnego Zagrożenia (*The Global Threat Reduction Initiative – GTRI*). Celem tego programu jest zminimalizowanie, tak szybko jak to możliwe, ilości łatwo dostępnych materiałów jądrowych, które mogłyby być użyte w produkcji broni jądrowej, jak również ich zabezpieczenia. Program został ustanowiony przez administrację USA i objęty patronatem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) z siedzibą w Wiedniu.

Część programu określana mianem *Research Reactors' Russian Fuel Return* obejmuje zwrot wysoko wzbogaconego wypalonego paliwa jądrowego, stosowanego w czasie dotychczasowej eksploatacji reaktorów badawczych, do kraju producenta. W przypadku Polski jest to Federacja Rosyjska.

W literaturze fachowej podane są rozwiązania stosowane w poszczególnych krajach, zwłaszcza tych, które mają rozwiniętą energetykę jądrową. Jednak IAEA wydaje publikacje zawierające zalecenia ułatwiające projektowanie składowisk odpadów promieniotwórczych [9].

Ze względu jednak na różny charakter wytwarzanych odpadów i różny charakter formacji skalnych, w których ich składowanie jest możliwe, a także różne nastawienie opinii publicznej do jej działalności, każdy kraj zmuszony jest do wypracowania własnej koncepcji budowy takiego składowiska i jej realizacji.

W Polsce konieczne do rozwiązania problemy techniczne i organizacyjne wynikają z obecnego stanu wykorzystania techniki jądrowej i izotopowej oraz zgromadzonych dotychczas w kraju materiałów promieniotwórczych. Problemy te wynikają z następujących czynników [7, 10]:

- dalszego wzrostu liczby użytkowników źródeł (zwłaszcza w medycynie), w tym także źródeł terapeutycznych o dużej aktywności,
- wzrostu liczby odpadów alfa promieniotwórczych, związanych z wycofaniem radu z zastosowań medycznych,
- konieczności rozwiązania problemu składowania już wypalonego paliwa jądrowego z reaktora badawczego MARIA oraz wypalonego paliwa, które powstanie w wyniku dalszej eksploatacji reaktora,

- konieczności wywozu paliwa wysoko wzbogaconego, które jest i będzie jeszcze przez pewien czas stosowane,
- dalszego postępowania z wypalonym paliwem nisko wzbogaconym oraz wysokoaktywnymi odpadami promieniotwórczymi, powstałymi w wyniku przerobu odpadów promieniotwórczych.

Dalsza efektywna i bezpieczna gospodarka odpadami promieniotwórczymi w Polsce wymagać zatem będzie:

- zlokalizowania, zaprojektowania, wybudowania i uruchomienia nowego powierzchniowego składowiska odpadów promieniotwórczych nisko- i średnioaktywnych (a następnie zamknięcia obecnie eksploatowanego Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych),
- zlokalizowania, zaprojektowania, wybudowania i uruchomienia głębokiego składowiska wypalonego paliwa jądrowego, odpadów alfa promieniotwórczych i odpadów wysokoaktywnych,
- wdrożenia prawno-organizacyjnych zasad gospodarki odpadami promieniotwórczymi oraz zastosowania nowych technologii przetwarzania odpadów,
- podjęcia działań informacyjnych dla społeczeństwa w zakresie gospodarki odpadami promieniotwórczymi.

2. Rodzaje odpadów promieniotwórczych powstających w Polsce

Odpady promieniotwórcze to materiały stałe, ciekłe lub gazowe, zawierające substancje promieniotwórcze lub skażone tymi substancjami, których wykorzystanie jest niecelowe lub niemożliwe. Odpady promieniotwórcze są kwalifikowane ze względu na poziom aktywności lub moc dawki na powierzchni do kategorii odpadów [11]:

- niskoaktywnych – *Low Level Waste* (LLW),
- średnioaktywnych – *Intermediate Level Waste* (ILW),
- średnioaktywnych długożyciowych – *Long Live* (ILW-LL),
- wysokoaktywnych – *High Level Waste* (HLW).

Kategorie mogą być podzielone na podkategorie ze względu na okres połowicznego rozpadu zawartych w odpadach izotopów promieniotwórczych lub wydzielaną moc cieplną.

Wycofane z użytkowania (zużyte) zamknięte źródła promieniotwórcze tworzą dodatkową kategorię odpadów promieniotwórczych. Zużyte zamknięte źródła promieniotwórcze kwalifikowane są ze względu na poziom aktywności do podkategorii zużytych zamkniętych źródeł: niskoaktywnych, średnioaktywnych i wysokoaktywnych, które ze względu na okres połowicznego rozpadu zawartych w nich izotopów dzieli się na krótkożyciowe i długożyciowe [7].

Sposoby kwalifikowania, prowadzenia ewidencji i kontroli odpadów promieniotwórczych oraz warunków, jakie powinny spełniać składowiska, określa Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 3 grudnia 2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz. U. Nr 230, poz. 1925).

Odbiorem, transportem, przetwarzaniem oraz składowaniem odpadów powstających u wszystkich użytkowników materiałów promieniotwórczych w kraju zajmuje się Zakład

Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych – Przedsiębiorstwo Państwowe w Świerku koło Warszawy (ZUOP). W skład ZUOP wchodzi Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Róźnie.

ZUOP posiada odpowiednie zezwolenia Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) zarówno na działalność polegającą na transporcie, przetwarzaniu i magazynowaniu na terenie ośrodka w Świerku odpadów promieniotwórczych odebranych od jednostek organizacyjnych z terenu całego kraju, jak i na eksploatację KSOP w Róźnie [10, 11].

Odpady promieniotwórcze charakteryzowane są z punktu widzenia wymagań technologii ich unieszkodliwiania i składowania oraz ochrony radiologicznej.

Kryteria, według których dokonuje się podziału i klasyfikacji odpadów są następujące:

- **stan skupienia:** stałe, ciekłe, gazowe,
- **rodzaj wysyłanego promieniowania:** alfa-promieniotwórcze, beta-promieniotwórcze, gamma-promieniotwórcze,
- **okres półroczu:** krótkożyciowe ($T_{1/2} < 30$ lat), długożyciowe ($T_{1/2} > 30$ lat),
- **aktywność właściwa (tylko odpady beta i gamma promieniotwórcze):** niskoaktywne, średnioaktywne, wysokoaktywne,
- **rodzaj źródła promieniotwórczego:** otwarte, zamknięte,
- **palność:** palne, niepalne,
- **podatność na ściskanie:** prasowalne, nieprasowalne,
- **rodzaj materiału:** organiczne, biologiczne,
- **specyficzne własności:** trucizny zawierające mikroorganizmy, np. bakterie chorobotwórcze, materiały wybuchowe, materiały ulegające samozapłonowi, np. w kontakcie z tlenem z powietrza.

Przedstawiona wyżej klasyfikacja odpadów promieniotwórczych stanowi podstawę ich segregacji w miejscu powstawania. Jest to bardzo istotny etap w procesie unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych, gdyż nie ma jednej uniwersalnej technologii unieszkodliwiania i składowania odpadów. Rodzaj i własności odpadów decydują o wyborze technologii ich unieszkodliwiania.

Informacje o własnościach odpadów promieniotwórczych stanowią podstawę do decyzji o przyjęciu ich przez ZUOP do unieszkodliwiania (np. nie odbierane są skażone materiały wybuchowe czy odpady zawierające aktywne zarazki chorobotwórcze) [12].

3. Formy unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych

Ze względu na szczególny charakter odpadów promieniotwórczych wymagają one specjalnego postępowania. Dotyczy ono gromadzenia, przetwarzania, zestalania, transportu, składowania okresowego i ostatecznego. Z tego względu ograniczenie źródeł i ilości powstających odpadów jest czynnikiem bardzo ważnym.

Wnikliwa analiza technologii wytwarzania i warunków stosowania materiałów promieniotwórczych w każdym przypadku prowadzi do zmniejszenia ilości odpadów o kilka, a nawet kilkadziesiąt procent. Dzięki np. zmianie technologii z mokrej na suchą przy produkcji preparatów jodowych, znacznie ograniczono ilości powstających ścieków promieniotwórczych [7].

Odpady promieniotwórcze ciekłe lub gazowe, powstałe w wyniku działalności określonych w art. 4 ust.1 Prawa atomowego (Dz. U. z 2007 r. Nr 42, poz. 276, z 2008 r. Nr 93, poz. 583, Dz.U. z 2012r, poz. 264), mogą być odprowadzane do środowiska, o ile stężenie promieniotwórcze w środowisku może być pominięte z punktu widzenia ochrony radiologicznej. Sposób odprowadzania odpadów i ich dopuszczalną aktywność określa się w zezwoleniu Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki [12].

Odpady ciekłe

Ciekłe odpady niskoaktywne są magazynowane w zbiornikach retencyjnych ZUOP. Ich oczyszczanie odbywa się po obniżeniu aktywności w wyniku rozpadu izotopów o $T_{1/2} < 60$ dni. W niektórych przypadkach retencja ścieków może spowodować obniżenie ich aktywności do takiego poziomu, że nie będą one już kwalifikowane do grupy ścieków promieniotwórczych. Ścieki te mogą być wypuszczone bez dalszego przetwarzania do kanalizacji sanitarnej.

Podstawową, obecnie stosowaną technologią oczyszczania ścieków jest sorpcja na mieszaninie węglańcu boru i żelazocyjanku miedzi, w obecności nadmiaru jonów siarczanowych, dodawanej w postaci wodnej zawiesiny. Po rozdzieleniu faz, materiał sorpcyjny zawiera od 80 do 99% początkowej aktywności ścieków i poddany jest dalszemu procesowi przetwarzania (zestalania).

Niewielkie objętości (ok. 2 m³/rok) ścieków średnioaktywnych są zatężane metodą odparowania. Powstały koncentrat, stanowiący nie więcej niż 1/30 początkowej objętości ścieków zestalany jest w cemencie [10].

Odpady stałe

Odpady stałe, zawierające izotopy promieniotwórcze o $T_{1/2} < 60$ dni magazynowane są w celu obniżenia aktywności. W niektórych przypadkach, po kilku lub kilkunastu miesiącach, aktywność odpadów obniża się na tyle, że możliwe jest przekwalifikowanie ich do grupy odpadów niepromieniotwórczych. Takie postępowanie jest możliwe tylko wtedy, gdy są bardzo rygorystycznie przestrzegane zasady segregacji odpadów w miejscu ich powstawania.

W sytuacji gdy w odpadach są różne izotopy promieniotwórcze ($T_{1/2} < 60$ dni i $T_{1/2} > 60$ dni), przetrzymywanie odpadów jest postępowaniem pożądanym z punktu widzenia ochrony radiologicznej, zmniejsza się bowiem narażenie pracowników. Blisko 45% wszystkich stałych odpadów promieniotwórczych stanowią odpady niskoaktywne, prasowalne. Ich przetwarzanie odbywa się przez zgniatanie w stalowych bębnach o objętości 200 dm³, w prasie hydraulicznej o nacisku 12 ton. W zależności od rodzaju prasowanych odpadów, uzyskiwane wartości współczynników redukcji objętości (WRO) wynoszą 1,5–3,0 [3].

Inne mechaniczne metody redukcji objętości, tj. fragmentację (cięcie), stosuje się w przypadku odpadów o większych gabarytach w celu optymalizacji transportu i warunków składowania. Sprasowane lub pocięte odpady znajdujące się w stalowych bębnach zalewane są betonem, zamykane stalową pokrywą i w tej postaci transportowane do miejsca składowania.

Zestalanie odpadów

W ZUOP stosowane są następujące technologie zestalania odpadów [10]:

- asfaltowanie,
- betonowanie (cementowanie),

- zestalanie w żywicy epoksydowej,
- zestalanie w żywicy mocznikowo-formaldehydowej.

Różnorodność stosowanych materiałów wiążących wynika zarówno z różnego rodzaju zestalanych odpadów, jak też jest rezultatem dążeń do otrzymywania produktów o najkorzystniejszych właściwościach z punktu widzenia długotrwałego składowania.

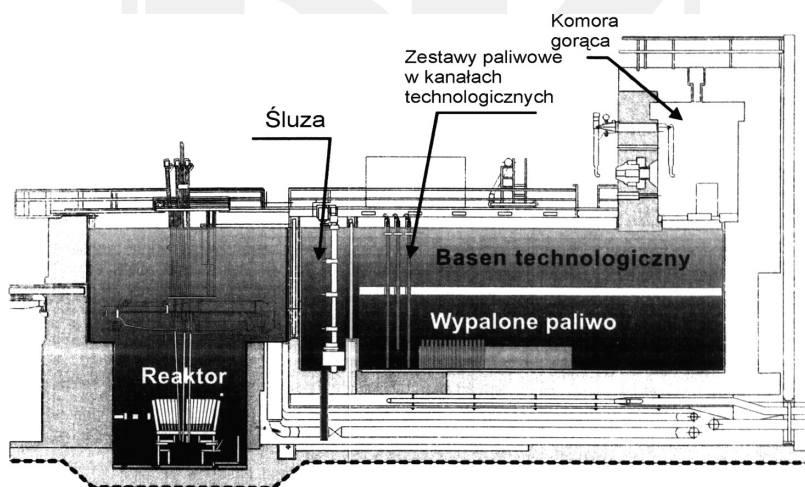
Wypalone paliwo jądrowe

Odrębną grupę wysokoaktywnych odpadów w Polsce stanowi wypalone paliwo jądrowe z reaktorów badawczych EWA i MARIA. Na terenie ośrodka Świerk znajdują się przechowalniki wypalonego paliwa – obiekty 19 i 19A. Obiekt 19 służy do przechowywania wypalonego paliwa typu EK – 10 z pierwszego okresu eksploatacji reaktora EWA do 1967 r.

Obiekt ten jest wykorzystywany również jako miejsce przechowywania niektórych stałych odpadów z likwidacji reaktora EWA i z eksploatacji reaktora MARIA oraz zużytych źródeł promieniowania gamma o dużej aktywności (wykorzystywanych w terapii nowotworowej i technice radiacyjnej) [7].

Podstawowym elementem przechowalnika jest korpus betonowy, w którym usytuowane są w siatce kwadratowej cztery cylindryczne komory. Komory są wyłożone wykładziną ze stali kwasoodpornej, a wewnątrz ich znajdują się zbiorniki przechowawcze z odpowiednimi separatorami dla umieszczenia elementów paliwowych (rys. 1).

Moc dawki promieniowania gamma w powietrzu w 2006 r. w otoczeniu ośrodka jądrowego w Świerku wynosiła od 59 do 76 $\mu\text{Gy/h}$ (średnio 69 $\mu\text{Gy/h}$), a w otoczeniu Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie – od 90 do 115 $\mu\text{Gy/h}$ (średnio 101 $\mu\text{Gy/h}$). Wyniki pomiarów nie odbiegały od poziomu z roku ubiegłego. Zróżnicowane wartości mocy dawki (nawet dla tej samej miejscowości) wynikają z lokalnych warunków geologicznych i hydrogeologicznych, decydujących o poziomie promieniowania ziemskiego [7].



Rys. 1. Przekrój przez reaktor MARIA i basen technologiczny [7]

Fig. 1. Cross section of MARIA reactor and technological basin [7]

Odpady promieniotwórcze, które zostały przetworzone lub nie wymagają przetwarzania oraz wypalone paliwo jądrowe, które nie będzie przerabiane są składowane w składowiskach. Wypalone paliwo jądrowe przeznaczone do składowania traktuje się jak odpady wysokoaktywne.

Wysoka aktywność niewielkiej przecież objętości wypalonego paliwa powoduje wydzielanie w nim ciepła. Przykładowo, jeszcze po roku wypalone paliwo wydziela ciepło w ilości 10 kW/t, malejąc do 1 kW/t po upływie 10 lat [7].

4. Składowanie odpadów i sposoby zabezpieczania środowiska

4.1. Systemy barier zabezpieczających składowiska odpadów promieniotwórczych

O bezpiecznym składowaniu odpadów promieniotwórczych decydują:

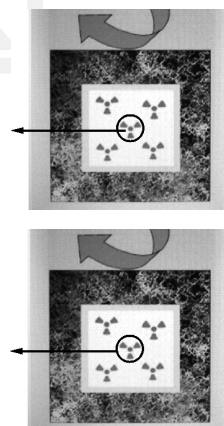
- wybór właściwego miejsca składowania w zależności do stopnia zagrożenia,
- zastosowanie sprawnego i wypróbowanego rozwiązania technologicznego, dostosowanego do lokalnych warunków środowiskowych.

Na wzór pojęcia „maksymalnej awarii projektowej” stosowanej w budownictwie, w przypadku składowisk odpadów promieniotwórczych stosuje się procedurę znaną pod pojęciem oceny ryzyka (risk assessment), u podstaw której leży idea tzw. **barier ochronnych**. Odpady promieniotwórcze muszą być odpowiednio przetworzone, zestalone, opakowane, a następnie bezpiecznie składowane [5, 11].

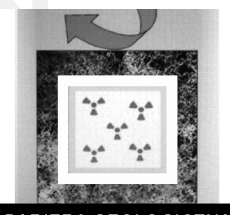
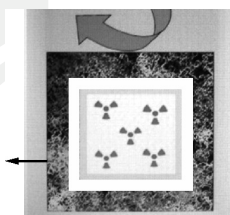
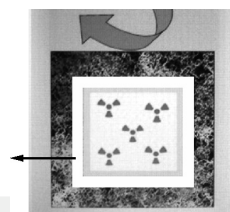
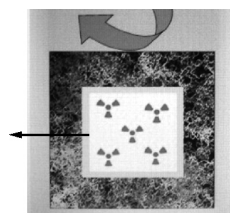
Podstawowym celem wymienionych działań jest takie zabezpieczenie odpadów promieniotwórczych, aby nie stwarzały zagrożeń dla człowieka i środowiska. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia długoterminowego (ostatecznego) składowania.

Izolacja odpadów promieniotwórczych jest możliwa dzięki barierom ochronnym (systemu barier), które zabezpieczają przed uwalnianiem się substancji promieniotwórczych w miejscu ich składowania i zapobiegają ich migracji w środowisku. Im większa jest ich aktywność, tym bariery powinny być skuteczniejsze. W przypadku odpadów nisko- i średnioaktywnych, a także przede wszystkim w Polsce występują, stosowane są następujące systemy barier zabezpieczających:

- 1) **chemiczna**: trudno rozpuszczalne związki chemiczne izotopów promieniotwórczych (koncentraty), powstające w procesie przerobu i oczyszczania radioaktywnych ścieków;
- 2) **fizyczna**: materiał wiążący (spoiwo) służy do zestalania lub utrwalania odpadów. Proces ten polega na zmieszaniu załadowanych już odpadów (koncentratów) ze spoiwem i nadaniu im formy stabilnego ciała stałego. Zapobiega to rozsypaniu, rozproszaniu, rozpyleniu i wymywaniu substancji promieniotwórczych. Najczęściej stosowane spoiwa to: asfalt, cement i tworzywa sztuczne;


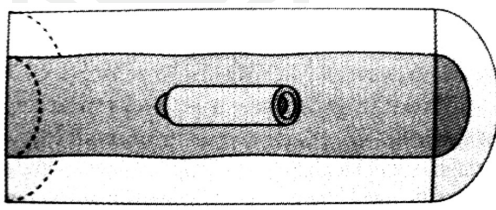


- 3) **I inżynierska:** opakowanie (pojemniki) pojedyncze lub wieloelementowe, spełniające wymagania transportowe oraz zależne od typu składowiska. Opakowanie zabezpiecza przed uszkodzeniami mechanicznymi i kontaktem z wodą. Stanowi również osłonę biologiczną, ponieważ osłabia promieniowanie. **Opakowania muszą gwarantować szczelność przez co najmniej 1000 lat;**
- 4) **II inżynierska:** betonowa konstrukcja składowiska oraz impregnująca warstwa bitumiczna, chroni pojemniki z odpadami przed wpływem opadów atmosferycznych, wilgocią i korozją;
- 5) **III inżynierska:** uszczelnienia – mineralne warstwy izolacyjne. Tworzą je grunty lub materiały gruntowe o odpowiednim składzie mineralnym frakcji ilastej, właściwościach sorpcyjnych i filtracyjnych. Właściwości fizykochemiczne oraz mechaniczne, jak również ich miąższość określane powinny być dla każdej lokalizacji oraz rodzajów odpadów indywidualnie. Ocena ich przydatności wymaga spełnienia odpowiednich kryteriów geotechnicznych: (kryterium granulometryczne, mineralogiczne, formowania, plastyczności, deformacyjne, sorpcji, szczelności, odkształcenia i kryterium wytrzymałościowe);
- 6) **naturalna (geologiczna):** utworzona przez struktury geologiczne i warunki hydrogeologiczne w podłożu w miejscu lokalizacji składowiska odpadów, uniemożliwiający migrację radioizotopów i zapobiegający ich rozprzestrzenianiu w środowisku gruntowo-wodnym. Miąższość powinna wynosić co najmniej 15 metrów [3, 4]. Jest to bariera wynikająca z właściwości gruntów zalegających w podłożu na znacznym obszarze. Oznacza to, że pod składowiskiem do określonej głębokości nie może występować intensywny przepływ wód podziemnych, a w miejscu lokalizacji musi zalegać nieprzepuszczalna warstwa gruntów. Podłoże musi charakteryzować się znaczną nośnością, zapewniającą przenoszenie obciążeń od odpadów i warstw konstrukcyjnych, bez deformacji warstw uszczelniających w znacznym przedziale czasowym. Ocenę bariery geologicznej przeprowadza się po wykonaniu szczegółowych badań określających jej parametry i po przeprowadzeniu analiz, łącznie z modelowaniem matematycznym.



BARIERA GEOLOGICZNA

System multibarier musi być zaprojektowany odrębnie dla każdej konkretnej lokalizacji i typu składowiska. Na rys. 2 przedstawiono schematycznie technologię składowania i system barier zabezpieczających dla wysokoaktywnych odpadów powstałych po przeróbce paliwa jądrowego. Przygotowanie odpadów do składowania poprzedzone jest z reguły redukcją ich objętości.

<p>Zeszlona obudowa w osłonie stalowej:</p> <ul style="list-style-type: none"> - niski stopień korozji szkła, - wysoka odporność na wpływy radiologiczne, - homogeniczny rozkład izotopów promieniotwórczych 	
<p>Pojemnik stalowy:</p> <ul style="list-style-type: none"> - absolutne zamknięcie odpadów na okres powyżej 1000 lat, - produkty korozji powodują korzystną reakcję chemiczną (produkty korozji wiążą izotopy promieniotwórcze) 	
<p>Wypełnienie bentonitem:</p> <ul style="list-style-type: none"> - długi czas nasycenia, niski stopień wodoprzepuszczalności ($k < 10^{-10}$ m/s), - spowolnienie transportu izotopów (sorpcja), - niska rozpuszczalność izotopów przy ługowaniu osnowy, - zatrzymuje koloidy, nadaje plastyczność osłony 	
<p>Bariery geologiczne Strefa magazynowania:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ograniczony dopływ wody, - korzystna hydrochemia, - stabilność mechaniczna. <p>Geosfera:</p> <ul style="list-style-type: none"> - spowolnienie (opóźnienie) przenoszonych z wodą izotopów (sorpcja, dyfuzja), - redukcja stężenia izotopów (rozcieńczenie, rozpad promieniotwórczy), ochrona bariery technicznej 	

Rys. 2. System barier bezpieczeństwa dla odpadów promieniotwórczych wysokoaktywnych [2]

Fig. 2. A scheme of procedures for radioactive wastes in Poland [2]

Ułatwia to dalsze operacje z odpadami oraz ogranicza ich ilości przeznaczone do okresowego czy ostatecznego składowania. Pozwala również na zoptymalizowanie procesu tworzenia barier ochronnych, a także obniża ogólne koszty unieszkodliwiania i składowania odpadów.

Bariery sztuczne i naturalne należy rozpatrywać zawsze jako układy dopełniające się i tworzące tzw. system multibarier (koncepcja wielokrotnych zabezpieczeń – MBC), dających pełne zabezpieczenie środowiska zarówno w przypadku składowania powierzchniowego, jak i podpowierzchniowego.

Własności podłoża muszą zapewnić pełną izolację odpadów od wód gruntowych i powierzchniowych przez co najmniej 10 000 lat. Dotyczy to głównie odpadów nisko i średnioaktywnych.

Wymagania dotyczą również możliwości wydłużenia prognozy zachowania się systemu składowania ponad tak zakreślony okres, pomimo świadomości istnienia dominującej roli procesów geologicznych. Do budowy i eksploatacji składowisk głębokich odpadów promieniotwórczych stosuje się przepisy działu IIIa ustawy Prawo geologiczne i górnicze, dotyczące podziemnych składowisk odpadów niebezpiecznych [13].

4.2. Warunki lokalizacyjne dla powierzchniowego składowania odpadów promieniotwórczych

Strategia lokalizacji składowisk odpadów promieniotwórczych polega na wyborze kombinacji warunków geologicznych, sposobu składowania i kryteriów akceptacji odpadów do składowania. W procesie lokalizacji wyróżnia się 4 etapy: koncepcji i planowania, badań materiałów archiwalnych, badań regionalnych, szczegółowych badań obszarów kandydujących, szczegółowych badań dokumentujących poprawność wyboru lokalizacji.

Obszar przeznaczony na składowisko powinien być m.in. asejsmiczny, niezatapialny i wyłączony z działalności gospodarczej. Jednak należy wziąć pod uwagę ewentualne zdarzenia, które mogą spowodować dezintegrację bariery geologicznej, m.in.: procesy naturalne, działalność człowieka czy zmiany w górotworze [6, 11].

W literaturze istnieją już opisane szczegółowo modele matematyczne służące do wykonywania symulacyjnych eksperymentów komputerowych (zwanymi niekiedy kodami komputerowymi), za pomocą których próbuje się ocenić prawdopodobieństwo zajścia poszczególnych zdarzeń [8].

Bardzo trudno jest osiągnąć pełny i wiarygodny opis złożoności ośrodka gruntowego. Najczęściej uzyskany w toku badań zbiór danych charakteryzujących środowisko jest tylko jednym z możliwych jego opisów parametrycznych. Dlatego pożądanymi cechami środowiska są: możliwość prognozowania i możliwość ciągłego monitoringu. Ocenę terenów pod względem perspektywicznej przydatności dla lokalizacji składowiska przeprowadza się na podstawie zespołu kryteriów wykluczających. Przydatność terenów dla perspektywicznego składowania przedstawiono w tabeli 1.

W większości krajów odpady promieniotwórcze nisko- i średnioaktywne składowane są w składowiskach powierzchniowych (przypowierzchniowych, których obiekty wykonane są na powierzchni terenu lub płytko – do 10 m ppt.).

Składowanie odpadów promieniotwórczych w obiektach składowisk powierzchniowych, zaliczone jest przez International Commission on Radiological Protection (ICRP) i Basic Safety Standards (BSS) do standardowych sposobów postępowania z odpadami promieniotwórczymi. Oznacza to, że składowiska powierzchniowe odpadów promieniotwórczych uznawane są na świecie za bezpieczne dla ludzi i środowiska; dotyczy to zarówno

okresu ich eksploatacji, jak i okresu po ich zamknięciu, obejmującego monitoring i działania rekultywacyjne [4].

Tabela 1

Ocena terenów dla lokalizacji składowisk odpadów promieniotwórczych

DZIEDZINA	WARUNKI WYKLUCZAJĄCE PRZYDATNOŚĆ OBSZARU
Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne	<ul style="list-style-type: none"> – złożoność budowy geologicznej niepozwalająca na szczegółową charakterystykę i analizę, modelowanie oraz monitorowanie; – obecność ciągłych anomalii mogących stanowić uprzywilejowane drogi lub/i bariery dla przepływu wód podziemnych; – płytkie położenie zwierciadła wód podziemnych powodujące stałe podtopienie obiektów składowiska; – wahania zwierciadła wód podziemnych powodujące okresowe podtopienie obiektów składowiska; – obecność krótkich dróg krążenia powodujących szybką migrację zanieczyszczeń do biosfery lub zbiorników podziemnych wód użytkowych; – geotechniczna niestabilność podłoża
Hydrologia	<ul style="list-style-type: none"> – zagrożenie zalewami powodziowymi; – zagrożenie spływem powierzchniowym; – zagrożenie od istniejących lub projektowanych zbiorników wodnych lub obiektów hydrotechnicznych; – ujściowe obszary zlewni
Meteorologia i klimat	<ul style="list-style-type: none"> – systematycznie powtarzające się ekstremalne zjawiska klimatyczne; – intensywne opady, mogące spowodować uszkodzenia obiektów składowiska lub ich powierzchniowych zabezpieczeń; – procesy zamrażania i rozmrażania oraz zawilgacania i osuszania; – warunki będące stymulatorem rozwoju intensywnych procesów geologicznych
Procesy endogeodynamiczne	<ul style="list-style-type: none"> – występowanie niejednorodnych procesów neotektonicznych (czynne uskoki tektoniczne, aktywność sejsmiczna);
Procesy egzogeodynamiczne	<ul style="list-style-type: none"> – występowanie intensywnej erozji, wietrzenia, osuwisk, obrywów, zapadlisk na obszarach krasowych, górniczych itp.
Potencjał zasobowy surowców mineralnych	<ul style="list-style-type: none"> – obszary aktualnej eksploatacji zasobów surowcowych, w tym wód podziemnych i powierzchniowych; – obszary posiadające znane złoża surowców mineralnych o ilościach lub jakości, które w przyszłości mogą być przedmiotem konfliktu z lokalizacją składowiska
Zagospodarowanie i ochrona środowiska	<ul style="list-style-type: none"> – występowanie na większą skalę zanieczyszczeń, mogących powodować korozję, szybszą migrację, nieprzewidywalność prognoz lub zmniejszające istotnie dopuszczalne normy dla ochrony radiologicznej; – występowanie obszarów prawnie chronionych; – istniejące lub projektowane strefy ochronne; – występowanie obszarów górniczych, szczególnie szkód górniczych.

Jedynym miejscem składowania powstających w Polsce odpadów promieniotwórczych jest KSOP. Według klasyfikacji IAEA jest to składowisko powierzchniowe do ostatecznego składowania krótkożyciowych, nisko- i średnioaktywnych odpadów (o okresie poło-

wicznego rozpadu nie przekraczającego 30 lat) i zamkniętych źródeł promieniotwórczych [3]. Służy ono również do okresowego przechowywania odpadów długożyciowych, głównie alfa-promieniotwórczych, oczekujących na umieszczenie ich w głębokim składowisku geologicznym. W obiektach takich nie mogą być składowane odpady długożyciowe wysokoaktywne.

Składowiska podziemne są usytuowane na głębokości nie przekraczającej 200 m ppt. W tym wypadku wykorzystywane są wyrobiska górnicze w naturalnych formacjach skalnych. Lokować w nich można odpady nisko- i średnioaktywne, stałe lub zestalone.

Składowiska w głębokich formacjach geologicznych uważane jako ostateczne przeznaczone są do magazynowania odpadów średnioaktywnych długożyciowych (ILW-LL) i wysokoaktywnych (HLW) na głębokości zwykle od kilkuset do 2000 m ppt. Rozważane są głównie skały magmowe i metamorficzne, skały ilaste, złoża solne pokładowe i wysadowe [6].

5. Uwagi końcowe

1. Biorąc pod uwagę fakt naturalnego istnienia wielu izotopów promieniotwórczych w skorupie ziemskiej, należy zauważyć, że składowanie odpadów promieniotwórczych nie jest wcale skażeniem skorupy ziemskiej ani wprowadzaniem do niej zagrożenia promieniotwórczego o niespotykanej wielkości. Ponadto efekty składowania odpadów promieniotwórczych w skali dziesiątków czy setek tysięcy lat nie mają jakiegokolwiek praktycznego znaczenia w porównaniu z efektami nieuniknionych katastrof naturalnych (np. zmiany klimatu – spadek lub wzrost temperatury, upadki meteorytów i in.), których również należy oczekiwać w ciągu długiego czasu.
2. Stosowane systemy barier: bariery naturalne (geologiczne), bariery sztuczne, (postać fizykochemiczna substancji promieniotwórczych zawartych w odpadach wraz z materiałem nieaktywnym, z którym są związane, opakowania, obiekt budowlany, dodatkowe zabezpieczenia na kontakcie z barierą naturalną), mają za zadanie uniemożliwić uwalnianie i rozprzestrzenianie się substancji promieniotwórczych do środowiska w dłuższym przedziale czasowym.
3. Odpady promieniotwórcze można składować wyłącznie w stanie stałym, w opakowaniach zapewniających bezpieczeństwo ludzi i środowiska pod względem ochrony radiologicznej, przy zapewnieniu odprowadzenia ciepła i niedopuszczeniu do powstania masy krytycznej oraz kontroli tych czynników w okresie składowania, a także po zamknięciu składowiska [11].
4. Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Róźniec nie nadaje się jednak do składowania wysokoaktywnych i bardzo groźnych odpadów, które powstają w reaktorach jądrowych. Po pierwsze, zaczyna tam brakować miejsca, bo składowisko wykorzystywane jest od 60 lat, po drugie, jest to tzw. składowisko powierzchniowe, a odpady z reaktorów jądrowych można składować w głębokich formacjach geologicznych. Takie właśnie miejsce trzeba będzie przygotować na potrzeby naszej (planowanej) elektrowni jądrowej.
5. Obiecującą technologią składowania odpadów wysokoaktywnych jest technologia pod nazwą **Synroc** (*Synthetic Rock*) bazująca na udoskonalonej ceramice zawierającej geochemicznie stabilne naturalne minerały na bazie tytanianu, które mogą unieruchomić

- na miliony lat uran i tor, wbudowując te pierwiastki w swoją strukturę krystaliczną. Metoda ta została wynaleziona w 1978 r. W strukturę tę można wbudować niemal wszystkie pierwiastki, jakie występują w odpadach wysokoaktywnych [2].
6. Wobec narastającego problemu składowania odpadów promieniotwórczych podejmuje się obecnie próby redukcji ich objętości oraz nityfikacji z użyciem technologii plazmowych. Prace takie prowadzone są we Francji i Japonii [9].
 7. Jedną z bardziej perspektywicznych metod postępowania z odpadami promieniotwórczymi jest przemiana (transmutacja jądra) [2]. Polega ona na napromienieniu odpadów neutronami w celu przekształcenia jąder promieniotwórczych w jądra stabilne lub o długim okresie połowicznego rozpadu, charakteryzujące się niską aktywnością promieniotwórczą, bądź w jądra o bardzo krótkim okresie połowicznego rozpadu, które szybko zostaną wyeliminowane.
 8. Odpady promieniotwórcze niewłaściwie przechowywane mogą być groźne. Należy też wiedzieć, że żadna inna kategoria odpadów – nawet tych najbardziej toksycznych – nie jest tak starannie izolowana od człowieka i biosfery. Coraz częściej mówi się o tym, że doświadczenie i wiedza zdobyte w ciągu ostatnich 40-stu lat gospodarowania odpadami promieniotwórczymi mogą być z powodzeniem wykorzystane do unieszkodliwiania niebezpiecznych odpadów konwencjonalnych [1].
 9. Przygotowywane nowe regulacje prawne mają dostosować do definicji i układu obecnie budowanego systemu norm bezpieczeństwa MAEA opartego na 10 fundamentalnych zasadach bezpieczeństwa (*Fundamental Safety Principles*), integrujących stosowane dotychczas pojęcia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej w jeden spójny system wymagań dotyczących bezpieczeństwa jądrowego, radiacyjnego oraz transportu i postępowania z odpadami [9, 12].

Literatura

- [1] Generowicz A., *Gospodarka odpadami komunalnymi*, Monografia – Zarządzanie Środowiskowe ISO 14000, III tom, Gospodarka odpadami i ochrona gruntów, Wyd. Centrum Szkolenia i Organizacji Systemów Jakości Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, 11-92.
- [2] Jezierski G., *Energia jądrowa wczoraj i dziś*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [3] Korzeniowska-Rejmer E., *Zanieczyszczenia promieniotwórcze w środowisku – Zagrożenia, unieszkodliwianie, bariery ochronne*, Monografia – Systemy Zarządzania Środowiskowego ISO 14000/EMAS, Tom IV – Jakość wody, ścieków, zanieczyszczenia promieniotwórcze, Wyd. Centrum Szkolenia i Organizacji Systemów Jakości Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009, 89-245.
- [4] Korzeniowska-Rejmer E., *Ocena zagrożenia radiacyjnego na obszarach składowania odpadów górnictwa uranowego i działania rekultywacyjne*, Monografia – Rekultywacja i rewitalizacja terenów zdegradowanych, Wyd. PZiTS, Poznań 2009, 233-240.
- [5] Korzeniowska-Rejmer E., *Aktualne wymagania dotyczące zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w odpadach przemysłowych i surowcach stosowanych w budownictwie i rekultywacji*, Materiały Sesji Naukowej, Zastosowanie odpadów przemysłowych i geosyntetyków w budownictwie ziemnym, Akademia Rolnicza, Kraków 2004, 249-258.

- [6] Przewłocki K., *Skladowiska odpadów promieniotwórczych w głębokich formacjach geologicznych w różnych krajach świata*, Państwowa Agencja Atomistyki, Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna, Biuletyn Informacyjny, nr 2/96, Warszawa 1996.
- [7] Raport pt. Działalność Prezesa Państwowej Agencji Atomistyki oraz Ocena Stanu Bezpieczeństwa Jądrowego i Ochrony Radiologicznej w Polsce w 2007 r., Państwowa Agencja Atomistyki, Warszawa 2008.
- [8] Tomczyk W., Choleżyński A., *Skladowanie odpadów promieniotwórczych w Polsce*, Państwowa Agencja Atomistyki, Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna, Biuletyn Informacyjny, nr 22/93, Warszawa 1995.
- [9] AEA, Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines, Safety Reports Series No.33, International Atomic Energy Agency, Vienna 2003.
- [10] Włodarski J., *Zasady gospodarki odpadami promieniotwórczymi dla warunków polskich*, Państwowa Agencja Atomistyki, 2002.

Akty prawne

- [11] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 3 grudnia 2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz. U. Nr 230, poz. 1925).
- [12] Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. Prawo atomowe (jednolity tekst Dz. U. z 13 marca 2012 r. poz. 264).
- [13] Ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. Prawo i górnictwo (Dz. U. Nr 228 z 2005 r. poz. 1947 z późn. zm.).

