

SKŁADOWANIE I PRZETWARZANIE ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH – DOSTĘPNE TECHNOLOGIE A PRZEKONANIA SPOŁECZNE

Paweł Żbikowski

Prezes Zarządu, Nuclear PL sp. z o.o.

Warszawa, Polska

Pawel.Zbikowski@nuclear.pl

Streszczenie

Składowanie i przetwarzanie odpadów promieniotwórczych to jedno z kluczowych wyzwań współczesnej energetyki jądrowej. Choć temat ten budzi społeczny niepokój, nowoczesne technologie i uregulowania prawne pozwalają na bezpieczne i kontrolowane zarządzanie tymi materiałami. Artykuł omawia klasyfikację odpadów (nisko-, średnio- i wysokoaktywne) oraz ich właściwości i pochodzenie. Przedstawiono różne metody ich przechowywania – od czasowego (mokrego i suchego) po długoterminowe (składowiska geologiczne). Omówiono także możliwości recyklingu wypalonego paliwa, m.in. w postaci paliwa MOX, oraz najnowsze rozwiązania inżynierskie wdrażane w projektach takich jak Onkalo (Finlandia) i Forsmark (Szwecja). Całość ukazuje, że problem odpadów jądrowych jest technicznie rozwiązywalny, a nowoczesna energetyka jądrowa może funkcjonować w sposób zrównoważony i bezpieczny.

Słowa kluczowe

#energetykajądrowa, #odpady, #społeczeństwo, #opiniapubliczna, #atom, #nuclearPL

Wstęp

Energetyka jądrowa od dziesięcioleci stanowi jedno z najbardziej kontrowersyjnych źródeł energii – mimo że należy do najczystszych pod względem emisji CO₂ i jest też jedną z najbezpieczniejszych technologii produkcji energii elektrycznej.

Jednym z najczęściej podnoszonych argumentów przeciwników jest problem odpadów promieniotwórczych. Panuje przekonanie, że odpady te są niemal niemożliwe do bezpiecznego przechowania, a ich zagrożenie dla ludzi i środowiska będzie trwało przez setki tysięcy lat. Tymczasem rzeczywistość wygląda zupełnie inaczej – metody zarządzania odpadami promieniotwórczymi są od lat rozwijane i udoskonalane, a technologie ich przechowywania i składowania są jednymi z najlepiej opracowanych w całej branży energetycznej.

Rodzaje odpadów promieniotwórczych i ich właściwości

Odpady promieniotwórcze to materiały stałe, ciekłe lub gazowe, które zawierają radionuklidy w stężeniach przekraczających dopuszczalne poziomy, a które zgodnie z definicją Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (ang. International Atomic Energy Agency, IAEA) nie są przeznaczone do dalszego wykorzystania i które wymagają odpowiedniego zarządzania w celu ochrony zdrowia ludzi i środowiska.

Odpady promieniotwórcze dzieli się przede wszystkim na podstawie ich aktywności oraz okresu półtrwania zawartych w nich izotopów. Ze względu na aktywność odpady dzielimy na:

- Niskoaktywne odpady (ang. Low-level Waste, LLW) - to między innymi ubrania ochronne, filtry, narzędzia, rękawice – zawierające śladowe ilości promieniotwórczości. Są one zazwyczaj krótkotrwałe i przetwarzane w prosty sposób – przez prasowanie, betonowanie i przechowywanie w bezpiecznych pojemnikach.
- Średnioaktywne odpady (ang. Intermediate-level Waste, ILW) - mogą zawierać np. elementy zdemontowane z wnętrza reaktorów czy żywice jonowymienne. Często wymagają ekranowania przed promieniowaniem, ale nie generują dużej ilości ciepła.
- Wysokoaktywne odpady (ang. High-level Waste, HLW) - najczęściej stanowią wypalone paliwo jądrowe. To one są źródłem największego ciepła i promieniowania – i właśnie z nimi wiąże się największe zainteresowanie publiczne.

Odpady można również klasyfikować ze względu na długość okresu półtrwania dominujących radionuklidów:

- Krótkożyciowe – zawierają izotopy o $T_{1/2} < 30$ lat (np. jod-131, technet-99m, cez-137).
- Długożyciowe – zawierają izotopy o $T_{1/2} > 30$ lat (np. pluton-239, neptun-237, ameryk-241).

Pochodzenie odpadów promieniotwórczych

Największym źródłem odpadów są elektrownie jądrowe, gdzie powstają wszystkie kategorie odpadów: LLW i ILW (np. materiały eksploatacyjne, narzędzia, filtry, osady z oczyszczania wody), HLW (zużyte paliwo jądrowe, zawierające mieszaninę produktów rozszczepienia i transuranowców).

Jednak nie jest to jedyne ich źródło. W Polsce, kraju który nie posiada jeszcze energetyki jądrowej również powstają odpady promieniotwórcze. Ich źródłem są głównie zastosowania medyczne, gdzie izotopy promieniotwórcze są używane w diagnostyce i terapii (np. technet-99m, jod-131). Odpady te mają zazwyczaj krótki okres półtrwania i klasyfikują się jako LLW.

Kolejnym źródłem jest przemysł, gdzie radionuklidy stosowane są m.in. w radiografii przemysłowej, kontrolach jakości, czy znakowaniu materiałów. Powstają tu głównie LLW.

Odpady promieniotwórcze, w tym również wypalone paliwo jądrowe powstają w wyniku prowadzenia badań naukowych. W Polsce jedynym działającym obecnie reaktorem jest MARIA w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Otwocku-Świerku. Powstające tam krótkożyciowe odpady niskoaktywne i średnioaktywne, a także okresowo odpady długożyciowe są przetwarzane przez Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych w Otwocku-Świerku i składowane w Krajowym Składowisku Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie. Wypalone paliwo jądrowe z reaktorów badawczych jest natomiast przechowywane w mokrych przechowalnikach wypalonego paliwa przez ZUOP na terenie ośrodka jądrowego w Otwocku-Świerku i ostatecznie przekazywane do kraju pochodzenia.

Polska posiada ponad 60-letnie doświadczenie z postępowaniem z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym, jednak to co rodzi największe obawy społeczeństwa to wypalone paliwo jądrowe i odpady promieniotwórcze, które miałyby pochodzić z elektrowni jądrowej.

Od reaktora do składowiska – droga wypalonego paliwa

Wyladowywane z reaktora jądrowego wypalone paliwo umieszczane jest w basenie wypalonego paliwa wypełnionym wodą, gdzie pozostaje przez kilka lat (co najmniej 3 lata, zwykle do 7-10 lat). Jest ono w tym czasie schładzane, a jego aktywność kilkukrotnie spada. Stąd wypalone paliwo – o ile nie jest poddane procesowi przetwarzania – może zostać przeniesione do okresowego, suchego lub rzadziej mokrego przechowalnika, zwykle zlokalizowanego na terenie elektrowni jądrowej. Suchy przechowalnik to zbiór betonowych pojemników, specjalnie ekranowanych kontenerów o wysokiej odporności mechanicznej i radiacyjnej. Takie pojemniki są bezpieczne i mogą być przechowywane na powierzchni przez dziesiątki lat.

Następnie wypalone paliwo jądrowe może zostać poddane procesom recyklingu lub zostać przeniesione do składowiska w formacjach geologicznych celem jego długookresowego lub ostatecznego składowania.

Recykling paliwa i jego ponowne użycie

Potencjał energetyczny materiałów paliwowych przy jednokrotnym użyciu paliwa w reaktorze termicznym – czyli w otwartym cyklu paliwowym (bez przerobu wypalonego paliwa jądrowego) wykorzystywany jest w bardzo małym stopniu. Taki cykl paliwowy uranowo-plutonowy typu otwartego charakteryzuje się stosunkowo niskim, szacowanym na 0,6% wykorzystaniem wydobytego uranu, zaś potencjał energetyczny paliwa jądrowego wykorzystywany jest w zaledwie w ok. 5%.

Dlatego też, w wielu krajach, takich jak np. Francja czy Rosja, pracuje się nad zamknięciem cyklu paliwowego, w wyniku czego wypalone paliwo podlega przeróbce i odzyskuje się z niego pluton i uran, które mogą zostać użyte do produkcji nowego paliwa – np. MOX (Mixed Oxide Fuel) – i które ponownie zostaną wykorzystane do wytworzenia świeżych zestawów paliwowych, natomiast pozostałe odpady radioaktywne są odpowiednio pakowane i przygotowywane do składowania.

Przetwarzanie wypalonego paliwa, z recyklingiem uranu i plutonu – w szczególności do wytworzenia paliwa MOX, pozwala zwiększyć wykorzystanie potencjału energetycznego paliwa i zaoszczędzić ok. 30% świeżego uranu.

Składowiska geologiczne – rozwiązanie długoterminowe

Najbardziej perspektywiczną i uznawaną metodą składowania długożyciowych odpadów jest głębokie składowanie geologiczne, które polega na umieszczeniu odpadów w specjalnie przygotowanych formacjach skalnych kilkaset metrów pod ziemią.

Głównym celem składowania geologicznego jest izolacja odpadów promieniotwórczych od biosfery, kontrola migracji radionuklidów i zapewnienie bezpieczeństwa nawet w przypadku

awarii systemów technicznych. Bezpieczeństwo zapewnia się przez system wielobarierowy, składający się z barier inżynierskich (np. miedziane pojemniki na paliwo, bentonitowe buforowe złoża), geologicznych (naturalna izolacja w postaci stabilnej formacji skalnej na głębokości 400–600 m), administracyjnych (ograniczenia dostępu).

Pierwszym krajem, który rozpoczął budowę geologicznego składowiska była Finlandia, która po ponad 20 latach badań geologicznych i społecznych wybrała lokalizację składowiska w Onkalo, na półwyspie Olkiluoto. Budowa składowiska, znajdującego się w skałach krystalicznych na głębokości około 430 m, rozpoczęła się w 2004 roku i obecnie są na niej prowadzone testy kolejnych urządzeń i systemów hermetyzacji, kontroli i transportu pojemników na wypalone paliwo.

Pojemniki z wypalonym paliwem wykonane są ze stali i pokryte grubą warstwą miedzi. Są one umieszczane w odwiertach wypełnianych bentonitem, co zapewni chemiczną i hydrauliczną barierę przed migracją radionuklidów.

Po zakończeniu wszystkich testów i uzyskaniu licencji operacyjnej - co planowane jest jeszcze w tym roku - Posiva, operator składowiska, będzie mogła rozpocząć ostateczne składowanie zużytego paliwa pochodzącego z elektrowni jądrowych Olkiluoto i Loviisa. Proces ten ma trwać około 100 lat, po czym składowisko zostanie zamknięte.

Kolejnym krajem, który od lat 80. XX wieku prowadził intensywne badania lokalizacyjne i dialog społeczny w sprawie budowy składowiska geologicznego jest Szwecja.

Szwecja opracowała unikatowy system „dobrowolności lokalizacyjnej”, w którym to gminy mogły ubiegać się o lokalizację składowiska. Ostatecznie w 2009 roku jako miejsce składowiska wybrano Forsmark, w gminie Östhammar. Proces uzyskiwania zgód trwał do 2022 roku, kiedy to rząd szwedzki zatwierdził budowę składowiska. Projekt zyskał poparcie lokalnej społeczności dzięki przejrzystości, konsultacjom i funduszom rekompensacyjnym.

Prace nad budową głębokiego składowiska wypalonego paliwa jądrowego w Forsmark rozpoczęły się w styczniu 2025 roku. Inwestorem została firma Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) należąca do Vattenfall AB, Forsmarks Power Group AB, OKG Aktiebolag oraz Sydkraft Nuclear Power AB – właścicieli i operatorów szwedzkich elektrowni jądrowych Forsmark i Oskarshamn, pośrednim udziałowcem jest także fiński Fortum.

Projekt realizowanego przez SKB składowiska opiera się o metodę KBS-3, taką samą jak w przypadku składowiska Onkalo, polegającą na umieszczaniu wypalonego paliwa jądrowego w kapsułach miedzianych, które następnie będą składowane w tunelach na głębokości ok. 500 metrów. Łącznie składowisko ma pomieścić 6000 kapsuł zawierających łącznie 12 000 ton odpadów pochodzących ze szwedzkich bloków jądrowych PWR i BWR.

Budowa składowiska ma zająć 10 lat, część naziemna obejmować będzie obszar o powierzchni 24 hektarów. Koszt inwestycji to 12 miliardów koron czyli około 2 miliardy złotych. Po ukończeniu będzie to drugie składowisko tego typu na świecie, po będącym już na ukończeniu fińskim składowisku Onkalo.

Spółeczny odbiór a rzeczywistość

Wbrew obiegowej opinii, odpady jądrowe nie stanowią jak pokazano w artykule technologicznego problemu – wyzwania są raczej natury społeczno-politycznej – a nowoczesne technologie przechowywania i przetwarzania odpadów są bezpieczne, kontrolowane i lepiej udokumentowane niż dla większości odpadów przemysłowych.

Kraje takie jak Francja, Finlandia czy Szwecja pokazują, że da się prowadzić politykę zarządzania odpadami w sposób odpowiedzialny, przejrzysty i zgodny z naukowymi standardami bezpieczeństwa.

Bibliografia:

1. IAEA (2023). Fundamentals of Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA Publications.
2. Posiva Oy. (2024). Final Repository for Spent Nuclear Fuel – Technical Summary. <https://www.posiva.fi/>
3. SKB AB. (2024). KBS-3 Method – Long-Term Safety of Spent Fuel Disposal in Forsmark.
4. OECD-NEA (2022). Management and Disposal of High-Level Waste: International Experiences.
5. Vira, J. (2020). “The Finnish Final Disposal Project: Public Acceptance and Engineering Challenges.” Nuclear Engineering International, 65(3), 22–27.
6. Publikacje prasowe oraz materiały własne Portalu nuclear.pl