

ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE Z ELEKTROWNI JĄDROWYCH CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Jacek T. Kaniewski

Wiele osób mających wątpliwości co do korzyści z energetyki jądrowej obawia się „problemu odpadów promieniotwórczych”, związanego z eksploatacją, a następnie likwidacją elektrowni jądrowych. Jednym z warunków szerokiej akceptacji tej energetyki musi więc być, wyjaśnienie tego zagadnienia. Celem artykułu jest przedstawienie podstawowej wiedzy o odpadach promieniotwórczych, przede wszystkim pochodzących z elektrowni jądrowych z reaktorami lekkowodnymi (LWR), takimi jakie mają być uruchamiane w Polsce w latach 2020–2030, a w szczególności o klasyfikacji tych odpadów, ich składzie izotopowym, sposobach postępowania z nimi, zwłaszcza w przypadku odpadów wysokoaktywnych, zaangażowaniu krajów obecnie eksploatujących elektrownie jądrowe w rozwiązywanie tych problemów, jak również o nowych technologiach jądrowych, których wdrożenie w perspektywie 20–30 lat może zapewnić redukcję w wielkiej skali poziomu i okresu aktywności promieniotwórczej odpadów wysokoaktywnych.

Odpady promieniotwórcze i ich klasyfikacja

Odpady promieniotwórcze stanowią materiały zawierające izotopy promieniotwórcze (radioizotopy) i mogą powstawać w różnych dziedzinach działalności ludzkiej. Różnią się między sobą co do rodzaju i koncentracji zawartych radioizotopów decydujących o całkowitej aktywności promieniotwórczej¹ oraz rodzaju zagrożenia promieniowaniem i prędkości jego zaniku, o czym decyduje charakterystyczny dla danego radioizotopu rodzaj wysyłanego promieniowania i okres połowicznego rozpadu. Różnią się one także co do postaci chemicznej i fizycznej. Czynniki te decydują o sposobie traktowania tych odpadów. Odpady powstają nie tylko tam, gdzie mamy do czynienia z elektrowniami jądrowymi, czy innymi obiektami jądrowego cyklu paliwowego², lecz

także w działalności przemysłowej wymagającej stosowania radioizotopów, w lecznictwie szpitalnym stosującym odpowiednie źródła izotopowe oraz w działalności badawczej. Pojawiają się one także w wyniku spalania węgla w elektrowniach konwencjonalnych.

Postępowanie z odpadami promieniotwórczymi regulują określone przepisy i akty prawne³. Zasady kwalifikowania odpadów promieniotwórczych w różnych krajach różnią się nieco od siebie pod względem stosowanych kryteriów. Międzynarodowa Agencja Energii Jądrowej (MAEA) proponuje następującą klasyfikację odpadów:

Odpady wyłączone (EW – exempted waste) zawierają tak małe stężenia radioizotopów, że nie wymagają stosowania środków ochrony przed promieniowaniem i można je wyłączyć spod kontroli instytucjonalnej lub w ogóle nie uwzględniać ich w tym kontekście.

Odpady bardzo krótkożyciowe (VSLW – very short living waste) zawierają radioizotopy o bardzo krótkim okresie półrozpadu przy stężeniach promieniotwórczych⁴ powyżej poziomów wyłączenia. Mogą one być przechowywane jakiś czas celem doprowadzenia do ich częściowego rozpadu prowadzącego do spadku stężenia promieniotwórczego, a zatem umożliwienia ich wyłączenia i uwolnienia do biosfery. Przykładem mogą być gazy i ścieki usuwane z elektrowni jądrowych.

Odpady bardzo niskoaktywne (VLLW – very low level waste) charakteryzują się stężeniami promieniotwórczymi nieznacznie powyżej poziomów wyłączenia. Należy do nich część odpadów eksploatacyjnych oraz odpadów powstałych przy likwidacji elektrowni jądrowych. Wymagają one oceny z punktu widzenia bezpieczeństwa i ochrony przed promieniowaniem, ale można je składować w odpowiednich kontrolowanych instytucjonalnie obiektach inżynierskich typu wysypiska.

Odpady niskoaktywne (LLW – low level waste), to odpady wymagające solidnego zabezpieczenia i odizolowania w składowiskach od płytkich do średnio głębokich (30 m) przez okres ograniczony do kilkuset lat. Mogą one zawierać wiele różnych radioizotopów, zarówno krótkożyciowych, jak i długożyciowych (te drugie tylko w małych stężeniach). W czasie składowania i kontroli instytucjonalnej większość z tych radioizotopów ulegnie rozpadowi. Sposób składowania wymaga uprzedniej analizy możliwych dróg migracji i dróg narażenia na wypadek wtargnięcia człowieka do składowiska. Rozgraniczenie między tą grupą i następną nie jest jednoznaczne, zależy bowiem od rodzaju radioizotopów zawartych w tych odpadach.

Odpady średnioaktywne (ILW – intermediate level waste) zawierają radioizotopy długożyciowe w ilościach wymagających wyższego stopnia zabezpieczenia i izolacji od biosfery, niż ma to miejsce w składowiskach płytkich. Wskazane jest składowanie na głębokościach od kilkudziesięciu do kilkuset metrów, dla których bezpieczeństwo długoterminowe nie będzie zależne od istnienia instytucjonalnych środków kontroli. Dozwolone poziomy stężenie promieniotwórczych będą zależały od konkretnego składowiska i związanego z nim stanu bezpieczeństwa i jego oceny.

Odpady wysokoaktywne (HLW – high level waste) obejmują zarówno krótko-, jak i długożyciowe odpady o wysokich promieniotwórczych aktywnościach, wymagające najwyższego poziomu zabezpieczenia, które według obecnych ocen zapewnia składowanie na dużych głębokościach i odpowiednia bariera geologiczna. Odpady wysokoaktywne wymagają skutecznych osłon oraz sposobów odprowadzania wydzielanego przez nie ciepła, a w przypadku ich składowania – szeregu barier zapobiegających migracji do środo-

wiska zawartych długożyciowych radioizotopów (zwłaszcza *alfa*-promieniotwórczych).

Maksymalne poziomy stężeń aktywności promieniotwórczej dla powyższych grup zależą od rodzaju radioizotopów zawartych w odpadach i ich określenie jest możliwe tylko przy znajomości tego składu według odpowiedniej tabeli i zastosowania określonych mnożników. Tu można tylko stwierdzić, że zakres stężeń aktywności od poziomu wyłączenia do dolnego poziomu dla odpadów wysokoaktywnych jest jak jeden do dziesięciu milionów.

Praktyczny podział odpadów promieniotwórczych przyjęto we Francji, gdzie z odpadów krótkożyciowych wyodrębniono te bardzo krótkożyciowe. Zob. tab. 1.

Niezależnie od przedstawionego wyżej podziału rozróżnia się następujące kategorie odpadów z uwagi na rodzaj wysyłanego przez nie promieniowania lub ich typ:

- *beta* i *gamma* promieniotwórcze (niskoaktywne, średnioaktywne i wysokoaktywne)
- *alfa*-promieniotwórcze (niezależnie od aktywności)
- zużyte, zamknięte źródła promieniowania (nie stanowiące przedmiotu zainteresowania tego artykułu)

W celu przechowywania, a następnie składowania odpadów promieniotwórczych są one zagęszczane za pomocą metod stosownych do ich stanu skupienia oraz unieruchamiane w postaci stałej w odpowiedniej strukturze materiałowej (*matrix*) zapewniającej trwałość. Odpady palne poddaje się przedtem często spopieleniu w specjalnych służących do tego celu piecach. Inne mogą być poddawane sprasowaniu. Jako materiału zestalającego odpady średnioaktywne używa się obecnie najczęściej betonu. Ciekłe odpady

Tabela 1. Klasyfikacja odpadów promieniotwórczych we Francji w zależności od ich aktywności promieniotwórczej i okresu półrozpadu

	Bardzo krótki okres półrozpadu < 100 dni	Krótki okres półrozpadu ≤ 31 lat	Długi okres półrozpadu > 31 lat
Aktywność bardzo niska	<i>Przechowywanie w miejscu powstania odpadów do czasu obniżenia aktywności, potem składowanie konwencjonalne</i>	<i>Składowanie powierzchniowe, składowisko dla odpadów niskoaktywnych (działające)</i>	
Aktywność niska		<i>Składowanie powierzchniowe, składowisko dla odpadów nisko- i średnioaktywnych (działające)</i>	<i>Składowisko na niewielkiej głębokości (przygotowywane)</i>
Aktywność średnia			
Aktywność wysoka		<i>Składowisko głębinowe (badania)</i>	

wysokoaktywne zatapia się np.: w szkle. W dalszej części artykułu poświęca się uwagę jedynie przechowywaniu i składowaniu odpadów wysokoaktywnych.

Odpady promieniotwórcze powstające podczas eksploatacji elektrowni jądrowych z reaktorami lekkowodnymi (LWR) i w wyniku likwidacji elektrowni

Odpady ciekłe i gazowe występują w zasadzie tylko jako odpady eksploatacyjne. Są one uwalniane do środowiska pod odpowiednią kontrolą dozоровą i przy zapewnieniu monitoringu środowiska. Uwolnione odpady ciekłe obejmują ścieki zawierające niewielkie ilości trytu H-3 (12,35 lat)⁵. Ten izotop wodoru powstaje w wyniku rzadkich rozszczepień ciężkich jąder w reaktorze prowadzących do powstania trzech jąder z jednego jądra rozszczepianego. Także inne powstałe w reaktorze radioizotopy mogą przedostawać się do wody chłodzącej elementy paliwowe, zarówno w reaktorze jak i w basenie na wypalone paliwo. Może to mieć miejsce w przypadku nieszczelności elementów paliwowych, co obecnie zdarza się bardzo rzadko. Z wyjątkiem trytu są one gromadzone w filtrach i na żywicach wymienników jonowych stosowanych do oczyszczania wody. Uwolnienia gazowe do atmosfery dotyczą niewielkich ilości radioizotopów gazów szlachetnych Kr-85 (okres półrozpadu 10,7 lat) i Xe-133 (5,2 dni) oraz śladowych ilości jodu I-131 (8,04 dni) i są dokonywane z opóźnieniem umożliwiającym częściowy rozpad tych izotopów. Stężenia uwalnianych radioizotopów są tak niskie, że mogą one być traktowane jako odpady wyłączone. Np. aktywność uwolnień gazowych jest mniejsza od aktywności dymów odlotowych z elektrowni o porównywalnej mocy opalanych węglem.

Odpady stałe z elektrowni jądrowych można podzielić się na trzy grupy:

- odpady eksploatacyjne,
- wypalone paliwo jądrowe, które jednak jako takie nie musi być *a priori* traktowane jako odpad, o czym będzie dalej mowa,
- odpady pochodzące z likwidacji elektrowni jądrowej w jej części jądrowej.

Na eksploatacyjne odpady stałe kwalifikowane jako niskoaktywne składają się: zanieczyszczone substancjami promieniotwórczymi środki ochrony osobistej, zużyte narzędzia i wymieniane elementy urządzeń technologicznych jak uszczelki, zawory, części rurociągów i pomp, elementy wyposażenia basenów na wypalone paliwo. Filtry służące do oczyszczania wody obiegów

chłodzących reaktor i wypalone paliwo podlegają regularnej wymianie i wraz z wykorzystanymi materiałami sorpcyjnymi i filtracyjnymi tworzą odpady średnioaktywne. Podlegające wymianie nie-paliwowe elementy wewnątrzreaktorowe mogą się zaliczać do odpadów średnio- lub wysokoaktywnych. Znaczna część odpadów eksploatacyjnych praktycznie nie wykazuje aktywności i jest kwalifikowana jako odpady bardzo niskoaktywne.

Wypalone paliwo ma właściwości odpadów wysokoaktywnych ale jest traktowane odrębnie (zaliczane do odpadów wysokoaktywnych jedynie w przypadku rezygnacji z jego przerobu). Sumaryczna aktywność promieniotwórcza wypalonego paliwa jest odpowiedzialna za około 99% aktywności wszystkich odpadów eksploatacyjnych z elektrowni jądrowej. Z perspektywy debaty nad odpadami z elektrowni jądrowych jest więc ono bez wątpienia najważniejsze.

Odpady promieniotwórcze pochodzące z likwidacji elektrowni jądrowej po usunięciu z niej wypalonego paliwa to elementy konstrukcji i urządzeń wewnątrz i na zewnątrz zbiornika ciśnieniowego reaktora, a także zlokalizowane w dalszej części budynku reaktora, gdzie mogły ulec skażeniu wskutek przenoszenia substancji promieniotwórczych przez wodę chłodzącą. Główna aktywność promieniotwórcza jest związana ze stalowymi elementami konstrukcyjnymi, które zostały zaaktywowane pod wpływem neutronów. Powstały w nich głównie izotopy Fe-55 (2,68 lat), Co-60 (5,27 lat), Ni-63 (100,1 lat) i C-14 (5730 lat). Pierwsze dwa są bardzo silnie promieniotwórcze, ale krótkożyciowe. Powoduje to, że po 50 latach od wyłączenia reaktora nie stanowią większego zagrożenia. W odpadach z likwidacji możliwa jest też obecność pewnych ilości cezu Cs-137 (30,1 lat). Inne – to krótkożyciowy izotop Cr-51 (27,7 dni) i powstające w minimalnych ilościach izotopy manganu. Ogólnie biorąc odpady z likwidacji poza tymi, które zawierają Fe-55 i Co-60, mogą być zaliczone do średnio- i niskoaktywnych.

Typowa elektrownia jądrowa z reaktorem lekkowodnym II generacji o mocy 1000 MWe wytwarza około 155 m³ odpadów niskoaktywnych oraz 22 m³ średnioaktywnych rocznie. Wyładunek wypalonego paliwa prowadzi do jego nagromadzenia w ilości średnio około 20 m³ (27 ton) w przeliczeniu na rok. W przypadku jego przerobu powstałoby około 3 m³ odpadów wysokoaktywnych stanowiących około 1% wszystkich odpadów promieniotwórczych. Dla porównania: elektrownia węglowa o podobnej mocy wytwarza rocznie ze spalania węgla co najmniej

300 000 ton popiołów zawierających toksyczne substancje jak arsen, kadm, rtęć i inne, a także izotopy promieniotwórcze. Popioły te zwyczajnie zalegają w środowisku, choć w niektórych przypadkach powinny być kwalifikowane jako odpady niskoaktywne.

Klasyfikację wszystkich odpadów stałych z elektrowni jądrowych według ich aktywności oraz szybkości jej zaniku ukazuje tab. 2. W sumie, według informacji Szwedzkiej Kompanii Gospodarowania Paliwem Jądrowym i Odpadami (SKB), przeciętne spożycie przez gospodarstwo domowe w Szwecji energii elektrycznej pochodzącej z elektrowni jądrowych prowadzi do powstania około jednego litra odpadów promieniotwórczych w postaci stałej. Połowa z nich to odpady, które będą pochodzić z likwidacji elektrowni jądrowych, 40% – odpady eksploatacyjne, 5% – części pochodzące z reaktora i 5% – wypalone paliwo⁶. Dane te dotyczą reaktorów II generacji. W przypadku reaktorów generacji III i III+ względny udział odpadów eksploatacyjnych zapewne będzie większy wskutek dłuższego o połowę okresu eksploatacji – nie 40, lecz 60 lat. Mniejszy będzie z kolei udział wypalonego paliwa dzięki większemu wzbogaceniu paliwa pozwalającemu na jego większe wypalenie, a zatem dłuższy czas przebywania w reaktorze (średnia roczna ilość przetwarzanego paliwa zmniejszy się z 27 do 20 ton).

Tabela 2. Klasyfikacja stałych odpadów promieniotwórczych pochodzących z elektrowni jądrowych z reaktorami lekkowodnymi (wypalone paliwo jest tu potraktowane jako odpady)

	Długozyciowe	Krótkozyciowe
Niskoaktywne		odpady eksploatacyjne
Średnioaktywne (niezbędne osłony)	niektóre części z reaktora	odpady eksploatacyjne, odpady z likwidacji
Wysokoaktywne (niezbędne osłony i chłodzenie)	wypalone paliwo oraz niektóre części z reaktora	

Przechowywanie wypalonego paliwa wymaga 3,75 razy większej przestrzeni niż wynosi ich objętość (rocznie 75 m³), zaś odpadów wysokoaktywnych powstałych wskutek przerobu wypalonego paliwa – około 9 razy (rocznie 28 m³). Liczby w nawiasach odnoszą się do reaktorów LWR II generacji, o mocy 1000 MWe. Przestrzeń potrzebna dla powstających w ciągu roku odpadów z eksploatacji elektrowni z reaktorem o mocy 1000 MWe jest zatem tak mała jak pokójkiy dziennej o powierzchni 9 m².

Procesy zachodzące w paliwie jądrowym w czasie pracy reaktora lekkowodnego

W trakcie wypalania paliwa uranowego w reaktorach LWR około 80% zawartego w nim izotopu U-235 podlega rozszczepieniu przez neutrony spowolnione do energii termicznych wyzwalając energię. Tylko niewielka część U-238 ulega rozszczepieniom przez neutrony o wysokich energiach, które nie zdążyły ulec spowolnieniu w moderatorze. Oprócz uranu rozszczepieniom podlegają także powstałe w reaktorze nieparzyste izotopy plutonu: Pu-239 i Pu-241. Każde rozszczepienie prowadzi do powstania przeważnie dwóch jąder o odpowiednio mniejszych masach. W wyniku rozszczepień uranu i plutonu powstaje około 300 różnych izotopów produktów rozszczepienia, które w 97% są promieniotwórcze.

Drugim procesem, zachodzącym w reaktorze są przemiany jądrowe prowadzące do powstania jąder cięższych w wyniku pochłonięcia neutronu (reakcja „n”), lub lżejszych – w wyniku pochłonięcia jednego neutronu i emisji dwóch (reakcja „n, 2n”), przy czym dominuje pierwsza z tych reakcji. Ich skutkiem jest powstanie w paliwie uranowym izotopów uranu, które mogły nie występować w świeżym paliwie, oraz transuranowców: plutonu wraz z pomniejszymi aktywnościami, do których należą neptun (Np), ameryk (Am) i kiur (Cm).

W wyniku reakcji n,2n powstaje z U-235 izotop uranu U-234. Z kolei w wyniku reakcji n powstają z U-235, U-236 i U-238 odpowiednio izotopy U-236, U-237 i U-239. Dalej powstają izotopy plutonu i pomniejszych aktywnościami począwszy od Pu-239, poprzez Pu-240, Pu-241, Pu-242 oraz bardzo krótkozyciowy Pu-243 (8,8 godz.), ale Pu-239 musi najpierw powstać z U-239 jak opisano w następnym akapicie. Izotop Pu-238 powstaje z Pu-239 „w odwrotną stronę” w drodze reakcji n,2n, lub dłuższą drogą, począwszy od U-235 poprzez cztery izotopy pośrednie tworzone w drodze reakcji n lub emisji β. Wszystkie pomniejsze aktywności z wyjątkiem izotopów Np-239, Am-243 i Cm-244 powstają w wyniku pochłonięcia neutronu. Tylko te trzy izotopy powstają z innych izotopów drogą rozpadu β.

Trzecim procesem zachodzącym zarówno w reaktorze jak i w usuniętym z niego wypalonym paliwie są przemiany jądrowe w drodze rozpadu promieniotwórczego izotopów z emisją cząstek: w przypadku transuranowców – α lub β, natomiast w przypadku produktów rozszczepienia – tylko β, któremu czasem towarzyszy promieniowanie γ. Spośród wszystkich transuranowców rozpadowi β podlegają jedynie bardzo krótkozyciowe U-237, U-239 i Pu-243 oraz krótkozycio-

wy Pu-241. Rozpad β izotopu U-239 prowadzi poprzez Np-239 do powstania Pu-239. Z kolei rozpad U-237 prowadzi do powstania długożyłowego izotopu Np-237, zaś rozpad izotopu Pu-241 powoduje powstanie Am-241. Oba tak powstałe izotopy – Am-241 i Np-237 – mają duże znaczenie z punktu widzenia postępowania z wypalonym paliwem lub odpadami pochodzącymi z jego przerobu.

Skład izotopowy wypalonego paliwa

Wypalone paliwo jądrowe w przypadku II generacji LWR zawiera około 94% uranu, 1% plutonu i 5% produktów rozszczepienia i pomniejszych aktywności. Te ostatnie stanowią jedynie około 0,1% jego masy⁷. W miarę wypalania paliwa wzrasta względny udział plutonu, zwłaszcza nierozszczepialnych dla neutronów termicznych jego izotopów parzystych, oraz pomniejszych aktywności. Aktywność promieniotwórcza wypalonego paliwa zaraz po wyjęciu go z reaktora wynosi 10^{17} Bq i jest milion razy większa niż w przypadku paliwa świeżego⁸. Po szybkim zaniku izotopów β -promieniotwórczych z wyjątkiem Pu-241 obecne w wypalonym paliwie izotopy uranu, plutonu i pomniejszych aktywności są α -promieniotwórcze.

Uran w wypalonym paliwie zawiera głównie izotop U-238 ($4,5 \cdot 10^9$ lat) oraz poniżej 1% U-235 ($7 \cdot 10^8$ lat), około 0,02% U-234 ($2,4 \cdot 10^5$ lat), a także silnie pochłaniający neutrony izotop U-236 ($2,3 \cdot 10^7$ lat) w ilości około 0,5%. Powstałe w reaktorze izotopy U-237 (6,8 dni), a zwłaszcza U-239 (23 min) rozpadają się tak szybko, że w wypalonym paliwie praktycznie już nie występują.

Pluton, obecny w wypalonym paliwie w postaci izotopów od Pu-238 (87,7 lat) po Pu-242 ($3,8 \cdot 10^5$ lat) jest bardzo ważnym składnikiem wypalonego paliwa z powodu jego izotopów rozszczepialnych Pu-239 ($2,4 \cdot 10^4$ lat) i Pu-241 (14,1 lat). Izotop Pu-241 podlega jednak także szybkiemu rozpadowi β prowadzącemu do powstania Am-241 (o czym już była mowa). Ilościowo dominują Pu-239 i Pu-240 ($6,5 \cdot 10^3$ lat).

Pomniejsze aktywności mają bardzo duże znaczenie z powodu ich wysokiej aktywności α -promieniotwórczej, zwłaszcza Am-241 (432 lata), oraz Am-243 ($7,4 \cdot 10^3$ lat), a także w przypadku niektórych izotopów, szczególnie Np-237 ($2,1 \cdot 10^6$ lat) z powodu bardzo długiego okresu półrozpadu. Izotopy kiuru są krótkożyłowe za wyjątkiem Cm-245 ($8,5 \cdot 10^3$ lat).

Promieniotwórcze produkty rozszczepienia składają się z dwóch grup izotopów. Pierwsza charakteryzuje się okresami półrozpadu do stu

lat a druga – powyżej 100 000 lat. Tylko nieco ponad 10 z nich charakteryzuje się okresem półrocznego rozpadu dłuższym od 10 lat, przy czym dla 8 z nich okres ten jest bardzo długi: Se-79 ($2,95 \cdot 10^5$ lat), Rb-87 ($4,75 \cdot 10^{10}$ lat), Zr-93 ($1,53 \cdot 10^6$ lat), Tc-99 ($2,1 \cdot 10^5$ lat), Pd-107 ($6,5 \cdot 10^6$ lat), Sn-126 ($1 \cdot 10^5$ lat), I-129 ($1,6 \cdot 10^7$ lat), Cs-135 ($1,6 \cdot 10^7$ lat). Bardzo aktywne i przy tym silnie wydzielające ciepło są średniożyłowe izotopy cezu Cs-137 (30,1 lat) i strontu Sr-90 (29 lat). Spośród długożyłowych izotopów istotne znaczenie mają głównie średnioaktywne izotopy technetu Tc-99 ($2,1 \cdot 10^5$ lat), I-129 ($1,6 \cdot 10^7$ lat) i cezu Cs-135 ($2,3 \cdot 10^6$ lat) ponieważ pozostałe występują w małych ilościach.

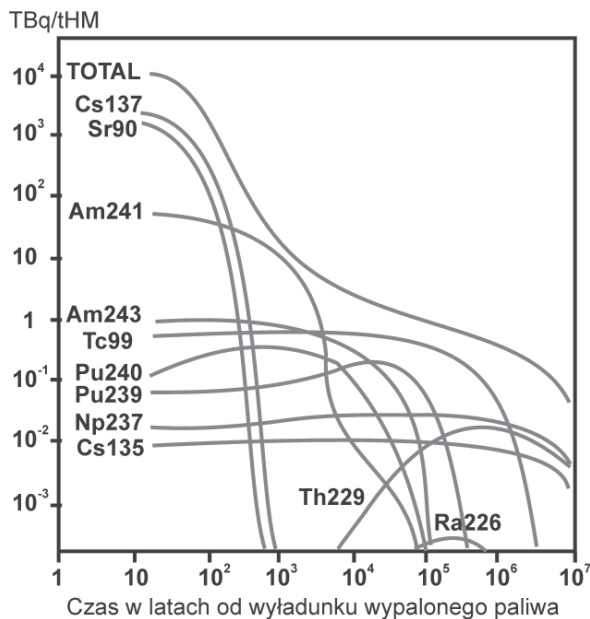
Spadek aktywności promieniotwórczej wypalonego paliwa w miarę upływu czasu od jego wyładunku z reaktora

Szybki rozpad części promieniotwórczych izotopów produktów rozszczepienia powoduje, że po trzech latach od wyładunku wypalonego paliwa z reaktora pozostaje już tylko około 200 takich izotopów. W ciągu pierwszych 10 lat schładzania wypalonego paliwa jego aktywność spada o rząd wielkości głównie dzięki rozpadowi krótkożyłowych izotopów Ru-106 (366,5 dni), Cs-134 (2,064 lat) i Pr-144 (17,3 min).

Dalszy spadek aktywności produktów rozszczepienia pokazuje w skali logarytmicznej rys. 1. Początkowo aktywność ta maleje o trzy rzędy wielkości w okresie niecałego tysiąca lat dzięki rozpadowi izotopów krótkożyłowych Cs-137 (30,1 lat) i Sr-90 (29 lat). Dłużej rozpada się Sm-151 (90 lat), ale występuje on w stosunkowo niewielkich ilościach gdyż łatwo ulega przemianom w czasie pracy reaktora. Warto zauważyć, że im wyższa jest aktywność promieniotwórcza radioizotopu tym szybszy jest jego rozpad.

W jeszcze dalszym okresie czasu o aktywności wypalonego paliwa będą decydowały produkty rozszczepienia Tc-99 oraz Cs-135 i transurany. Udział Tc-99 w aktywności wypalonego paliwa jest wprawdzie ponad tysiącrotnie niższy od początkowego udziału Cs-137 i Sr-90, za to izotop ten jest długożyłowym produktem rozszczepienia występującym w większej ilości. Po obniżeniu wpływu na aktywność wypalonego paliwa najbardziej aktywnego z grupy pomniejszych aktywności izotopu Am-241 (którego obecność początkowo się zwiększa w wyniku rozpadu Pu-241), a następnie Am-243, o jej wysokości decydować będzie głównie długożyłowy Np-237. Krzywe dla Pu-239, Pu-240 i Np-237, a także dla izotopów toru Th-229 i radu Ra-226 wskazują na zachodzenie określonych przemian

jądrowych w wyładowanym z reaktora wypalonym paliwie. Na przykład Th-229 pojawi się po kilku tysiącach lat w wyniku łańcucha rozpadu Np-237 poprzez protaktyn Pa-233 (26,95 dni) i uran U-233 ($1,59 \cdot 10^5$ lat). Podobnie rad Ra-226 powstanie w drodze łańcucha rozpadu wytworzonego w reaktorze U-234 ($2,47 \cdot 10^5$ lat) i powstałego z niego toru Th-230 ($8 \cdot 10^4$ lat). Powodem ich stosunkowo późnego pojawienia się są, jak łatwo zauważyć, długożyciowe izotopy występujące w tych łańcuchach.



Rys. 1. Spadek w czasie podanej w skali bezwzględnej aktywności promieniotwórczej najbardziej aktywnych izotopów zawartych w wypalonym paliwie reaktorów lekkowodnych. Aktywność podana jest w terabekerelach ($1\text{TBq} = 10^{12}\text{Bq}$) na tonę ciężkiego metalu (tHM)⁹ paliwa jądrowego (źródło: <http://www.ricin.com/nuke/bg/hlw.html>)

Początkowy szybki spadek aktywności wypalonego paliwa po wyładowaniu z reaktora pozwala na jego wyjęcie z przyreaktorowego basenu chłodzącego i transport w odpowiednio przystosowanych pojemnikach do innego przechowalnika lub do zakładu przerobu. Transport jest obecnie możliwy dzięki odpowiednio skonstruowanym pojemnikom osłonowym już po dwóch latach od wyładowania. Przerób wypalonego paliwa jest możliwy najwcześniej po trzech latach od wyładowania, a proces zeszkliwania powstałych po przerobie paliwa odpadów wysokoaktywnych – już po około pięciu latach. Aktywność promieniotwórcza jednej tony wypalonego paliwa podawanego przerobowi wynosi wg danych francuskich 100 TBq dla emiterów β i 26 000 TBq dla emiterów α .

W przypadku wypalonego paliwa i odpadów wysokoaktywnych ma miejsce bardzo silna emisja ciepła, co wymaga specjalnego uwzględnienia w postępowaniu z nimi (chłodzenie przy przechowywaniu, odpowiednie pojemniki w transporcie, możliwość odprowadzania ciepła w składowisku). Dla przykładu: jeżeli w pracującym reaktorze jądrowym moc cieplna tony paliwa wynosi 30 000 kilowatów, to pół roku po wyładowaniu tego paliwa z reaktora wynosi ona jeszcze 20 kilowatów, po trzech latach – kilka kilowatów, a po 30–40 latach – 1 kilowat na tonę.

Możliwe sposoby postępowania z wypalonym paliwem

Przechowywanie wypalonego paliwa. Przechowywanie wypalonego paliwa w okresie wielu dziesięcioleci nie stanowi problemu technologicznego i nie stwarza zagrożenia dla ludzi i środowiska. Po upływie około 50 lat od wyładowania z reaktora jego aktywność promieniotwórcza i emisja ciepła maleją w wystarczającym stopniu by ułatwić ewentualne składowanie tego paliwa. Jest to jednym z powodów odkładania w czasie przystąpienia do budowy składowiska. Przechowywanie wypalonego paliwa po zapewnieniu basenów przyreaktorowych, może mieć obecnie miejsce w trzech przypadkach:

- założenie, że energetyka jądrowa jest w danym kraju możliwa jedynie w cyklu otwartym, tj. bez przerobu wypalonego paliwa,
- przechowywanie tymczasowe do momentu podjęcia dalszych decyzji, np. o przerobie wypalonego paliwa,
- przechowywanie do czasu wdrożenia nowych technologii przerobu wypalonego paliwa oraz reaktorów powielających na neutronach prędkich IV generacji, które będą potrzebowały do ich uruchomienia znacznych ilości plutonu, a ponadto będą w stanie spalać także pomniejsze aktywnowce.

Przerób wypalonego paliwa. Zamknięty cykl paliwowy reaktorów LWR obejmuje przerób wypalonego paliwa i recykling, czyli kierowanie odzyskanego plutonu, uranu bądź ich obu łącznie, z powrotem do reaktora jako składników świeżego paliwa uranowo-plutonowego MOX (*mixed oxide*). W tym przypadku można zmniejszyć maksymalnie o około 25%, w porównaniu z otwartym cyklem paliwowym, zapotrzebowanie na uran ze źródeł pierwotnych oraz na usługi konwersji chemicznej i wzbogacania izotopowego uranu. Recykling w przypadku reaktorów lekkowodnych może być tylko jednorazowy. Wypalone paliwo MOX może natomiast zostać poddane przerobowi w przyszłości, po uruchomieniu re-

aktorów powielających na neutronach prędkich IV generacji. Pozostając przy otwartym cyklu paliwowym reaktorów lekkowodnych można odłożyć przerób ich wypalonego paliwa do czasu pojawienia się zapotrzebowania na pluton do załadunku reaktorów powielających na neutronach prędkich¹⁰. W takim przypadku można będzie podnieść wykorzystanie uranu pierwotnego do blisko 100% ponieważ izotop U-238 jest w takich reaktorach materiałem paliworodnym, z którego powstaje pluton. Reaktory powielające będą pracowały w cyklu zamkniętym wielokrotnym. Oprócz odzysku surowców energetycznych przerób wypalonego paliwa prowadzi do:

- obniżenia aktywności odpadów wysokoaktywnych wskutek oddzielenia plutonu, który zostanie skierowany do reaktora w charakterze paliwa (wg danych francuskich następuje przy tym około 10-krotne zmniejszenie radiotoksyczności¹¹ odpadów),
- zmniejszenia objętości odpadów wysokoaktywnych (wg danych francuskich około 5-krotne).

Składowanie wypalonego paliwa. Sztwyne stanowisko w sprawie ograniczenia *a priori* energetyki jądrowej danego kraju do działania wyłącznie w otwartym cyklu paliwowym może wynikać z przesłanek politycznych. Powoduje ono konieczność potraktowania wypalonego paliwa wyłącznie jako wysokoaktywnych i długozyciowych odpadów, które w odpowiednim czasie w sposób nieodwracalny należy wyeliminować ze środowiska. Stanowisko takie zakłada potrzebę wybudowania składowiska o dostatecznie dużej pojemności i zdolności odprowadzania ciepła.

Przechowalniki wypalonego paliwa

Przyreaktorowe baseny służące do schładzania wypalonego paliwa zapewniają się po mniej więcej dziesięciu latach i paliwo to trzeba przenieść do przechowalnika zewnętrznego, o ile nie poddaje się go przerobowi. Przechowalnik taki może mieć postać wypełnionego wodą specjalnego basenu, lub może być przystosowany do przechowywania tego paliwa w stanie suchym (w specjalnych pojemnikach, lub bunkrach). Woda służy do chłodzenia wypalonego paliwa zaś jej ponad trzymetrowa warstwa nad paliwem stanowi bardzo dobrą osłonę chroniącą przed promieniowaniem. Suche przechowalniki również muszą zapewniać osłonę przed promieniowaniem i chłodzenie. W obu przypadkach powoduje to, że przestrzeń wymagana do przechowywania wypalonego paliwa jest kilkakrotnie większa od jego objętości. Budowa przechowalników zewnętrznych może oczywiście wymagać zapew-

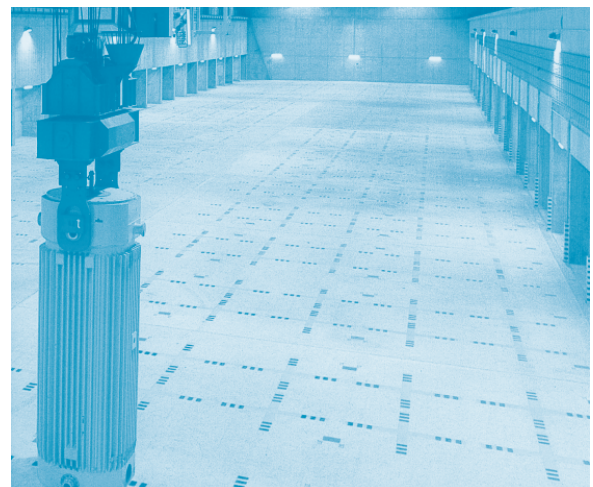
nienia im takiej lokalizacji by mogły służyć wszystkim elektrowniom jądrowym w kraju.

Większość krajów posiadających energetykę jądrową eksploatuje reaktory energetyczne i przechowuje wypalone paliwo od 40–50 lat, a niektóre nawet dłużej, co potwierdza, że może ono być bezpiecznie przechowywane przez okres wielu dziesięcioleci. Około 90% wypalonego paliwa na świecie przechowuje się w przechowalnikach mokrych a pozostałe 10% w suchych. Przykład centralnego przechowalnika mokrego można znaleźć na terenie elektrowni Oskarshamn w Szwecji, w którym wypalone paliwo jest przechowywane w instalacji CLAB w znajdujących się 25 m pod powierzchnią ziemi basenach o pojemności do 5 000 ton paliwa. Przechowalnik o pojemności takiej jak CLAB wypełniłby się w ciągu 50 lat, gdyby kierować do niego paliwo z reaktorów o łącznej mocy 5 000 MWe.

Przechowalniki suche stosuje się m.in. na dużą skalę w USA, a w mniejszej skali także w Niemczech, w pobliżu miasta Ahaus. W kraju tym przygotowano także pojemny przechowalnik naziemny w Gorleben, nie posiadający na razie zezwolenia na eksploatację, którego wnętrze pokazuje fot. 1.

Odpady promieniotwórcze po przerobie wypalonego paliwa i ich przechowywanie

Odpady wysokoaktywne, pochodzące z przerobu wypalonego paliwa mają postać ciekłą i mogą być przechowywane do 30 lat w specjalnych nierdzewnych zbiornikach cylindrycznych.



Fot. 1. Wnętrze suchego przechowalnika wypalonego paliwa w Gorleben (Niemcy). Na z przednim planie pojemnik osłonowy CASTOR, który może zawierać 6 zestawów paliwowych („kaset”) typu PWR lub 17 – BWR (źródło: H.F. Albrecht i R. Kiedrowski – Kernenergie in Deutschland. Ein Bildatlas/Ullstein)

Po przerobie wypalonego paliwa z wykorzystaniem obecnie stosowanych w skali przemysłowej technologii cywilnych produkty rozszczepienia i pomniejsze aktywnowce pozostają w odpadach wysokoaktywnych, które przechowuje się jakiś czas w postaci ciekłej by potem poddać je odpowiedniemu procesowi zestalenia a następnie ostatecznie składować. W niektórych krajach (np. we Francji) po pewnym okresie ich przechowywania poddaje się je procesowi zeszkliwiania.

Materiały konstrukcyjne¹² użyte do wytworzenia elementów paliwowych, które zostały napromienione w reaktorze podlegając aktywacji pod wpływem bombardujących je neutronów i zostały oddzielone w początkowej fazie przerobu wypalonego paliwa, kwalifikują się jako odpady średnioaktywne.

Przerób wypalonego paliwa generuje dodatkowo pewne ilości odpadów średnio- i niskoaktywnych, które pochodzą z samego procesu przerobu. Długozyciowe odpady średnioaktywne mogą być początkowo przechowywane a następnie składowane w tym samym składowisku co odpady wysokoaktywne. Niektóre radioizotopy są uwalniane przez zakład przerobu w bezpiecznym rozcieńczeniu, podobnie jak to ma miejsce w przypadku elektrowni jądrowych. Dotyczy to tych samych radioizotopów.

Składowanie wypalonego paliwa i odpadów wysokoaktywnych

Celem składowania wypalonego paliwa traktowanego jako odpady wysokoaktywne oraz odpadów wysokoaktywnych powstałych w wyniku przerobu wypalonego paliwa jest:

- uniemożliwienie dostępu, tak by nie był potrzebny nadzór instytucjonalny,
- maksymalnie możliwa izolacja od biosfery, w tym trwałe zabezpieczenie przed możliwością przedostania się substancji promieniotwórczych do wód gruntowych i tą drogą – do wody pitnej; dotyczy to szczególnie radiotoksycznych izotopów *alfa*-promieniotwórczych.

Wymaga to stosowania skutecznych wielokrotnych barier zabezpieczających przed migracją i wydostaniem się do środowiska niepożądanych izotopów. Środki te muszą obejmować:

- unieruchomienie odpadów przez zestalenie ich w strukturze nierozpuszczalnej, takiej jak np. szkło borowo-krzemowe – w przypadku wypalonego paliwa już same ceramiczne pastylki paliwowe stanowią bardzo stabilną barierę,
- zaplombowanie (hermetyczne zamknięcie) odpadów w odpornych na korozję pojemnikach,
- umieszczenie pojemników głęboko pod ziemią,

- otoczenie pojemników nieprzepuszczalnym i elastycznym materiałem, np. gliną bentonitową¹³.

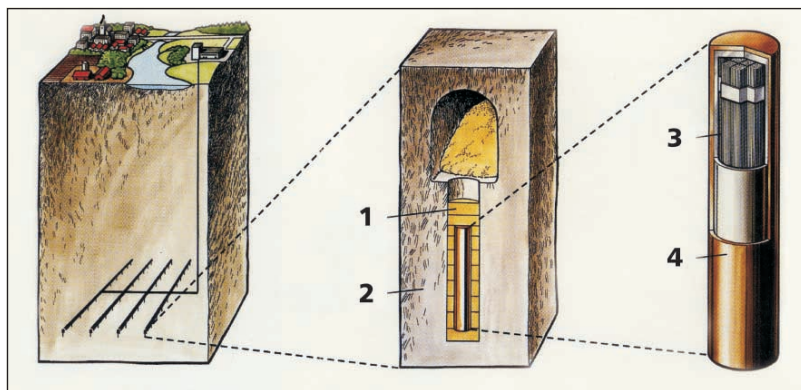
Powszechnie uznaje się, że składowisko powinno być wykonane w głębokich stabilnych strukturach geologicznych. W różnych krajach wybrano lub badane są potencjalne lokalizacje, np. w Niemczech w pokładach solnych, w Belgii w pokładach gliny, w Szwecji i Finlandii w skałach granitowych, w USA i Rosji w tufach wulkanicznych. Polska posiada pokłady solne, które mogłyby zapewnić lokalizację składowiska. Zastosowanie wielokrotnych barier, a także fakt szczątkowego wydzielania ciepła przez wypalone paliwo i odpady wysokoaktywne wymagają kilkakrotnie większej przestrzeni składowania niż wynosi sama ich objętość.

Jako przykład podejścia do składowania wypalonego paliwa można podać zaawansowane rozwiązanie przygotowywane w Szwecji w rejonie elektrowni jądrowej Oskarshamn (rys. 2).

Przyjęto tu koncepcję nie tyle ostatecznego składowania, co przechowywania na dużej głębokości w sposób gwarantujący bezpieczeństwo w bardzo odległej perspektywie czasowej, bez konieczności nadzoru ale z zapewnieniem przyszłym pokoleniom możliwości podejmowania dalszych decyzji. Wypalone paliwo będzie umieszczone w cylindrycznym hermetycznym pojemniku ze stali nierdzewnej od wewnątrz i z miedzi na zewnątrz, nie ulegającym korozji i zabezpieczającym przed (nawet mało prawdopodobnym) dostępem wód gruntowych. Pojemniki mają być umieszczone na głębokości 500 m, w połączonych tunelami i wypełnionych gliną bentonitową odwiertach w pokładzie skalnym. Gлина ma zapewnić elastyczność chroniącą przed niewielkimi ruchami skały oraz dalsze zabezpieczenie przed wodą pod wpływem której pęcznieje. Sama skała ma zapewnić filtrację wody, gdyby się jakoś w to miejsce dostała. W celu ułatwienia składowania wypalone paliwo jest początkowo przechowywane i schładzane w przechowalniku basenowym CLAB przez okres minimum 40 lat.

Sytuację w zakresie postępowania z wypalonym paliwem i przyszłego składowania odpadów wysokoaktywnych w wybranych państwach mających energetykę jądrową przedstawia wg danych z 2009 r. tab. 3.

Jak widać z tabeli decyzję w sprawie lokalizacji składowiska podjęły tylko cztery z wymienionych krajów. Inne prowadzą dopiero prace przygotowawcze w tym kierunku. Tylko nieliczne kraje opowiadają się zdecydowanie za ograniczeniem do otwartego cyklu paliwowego. W krajach tych – w Finlandii, Hiszpanii, Kanadzie, Republice Korei Płd., Szwecji, czy USA – składowiska



Rys. 2. Koncepcja składowiska wypalonego paliwa w Szwecji. Od lewej: tunele ze stanowiskami na głębokości 500 m, stanowisko z pojemnikiem, pojemnik z wypalonymi zestawami paliwowymi. Bariery chroniące: 1 – skała krystaliczna, 2 – glina bentonitowa, 3 – hermetyczny pojemnik miedziany wyłożony wewnątrz stalą nierdzewną, 4 – zestawy paliwowe. Tunel nad stanowiskami jest wypełniony mieszaniną gliny i piasku (źródło: prospekt informacyjny szwedzkiej kompanii odpowiedzialnej za postępowanie z wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi (SKB), grafika: Jan M. Rojmar)

będą służyły do składowania wypalonego paliwa. Niektóre kraje (Kanada i Hiszpania) nie wykluczają jednak możliwości odzysku (*retrieval*) składowanego wypalonego paliwa. Tam zaś gdzie stosuje się (lub stosowano) zamknięty cykl paliwowy część wypalonego paliwa nie poddana przerobowi może być składowana wraz z powstałymi z przerobu zeszkliwionymi odpadami wysokoaktywnymi. Dotyczy to np. Niemiec i Zjednoczonego Królestwa WB (UK), a także USA, które nawet w przypadku podjęcia rozważanej obecnie decyzji w sprawie budowy zakładu przerobu nie będą

w stanie przerobić wielkiej ilości nagromadzonego dotąd wypalonego paliwa.

W wielu krajach, jak również w ramach współpracy międzynarodowej (UE, GNEP) prowadzone są obecnie intensywne prace w następujących kierunkach: rozpoznanie możliwości składowania w głębokich formacjach geologicznych, stworzenie solidnych podstaw naukowych dla predykcji ewentualnych dróg migracji radioizotopów i predykcji zachowań materiałów oraz składowisk w skali setek tysięcy lat, uzyskanie do zastalania odpadów jak najtrwalszych kompozycji chemicznych o wysokiej odporności na promieniowanie α i podwyższone temperatury, a także opracowanie i sprawdzenie nowych technologii przerobu wypalonego paliwa w skali przemysłowej, pozwalających na wydzielenie szczególnie aktywnych lub długożyciowych radioizotopów. Rozważa się także propozycje utworzenia międzynarodowego składowiska w optymalnych warunkach geologicznych.

Możliwości zmniejszenia aktywności i czasu rozpadu wysokoaktywnych i długożyciowych odpadów powstałych z przerobu wypalonego paliwa

W rozdziale na temat składu izotopowego wypalonego paliwa wskazane zostały radioizotopy produktów rozszczepienia i pomniejszych aktywności, które obecnie występują w odpadach wysokoaktywnych pochodzących z przerobu wypalonego paliwa i mają decydujący wpływ na aktywność promieniotwórczą oraz na czas potrzebny do spadku tej aktywności do poziomu nie stanowiącego praktycznego zagrożenia, oceniany na 10 000 lat.

Kraj	Liczba eksploatowanych reaktorów	Całkowita moc zainstalowana w EJ GWe	Udział EJ w produkcji energii elektr.	Przerób wypalonego paliwa	Stadium wyboru lokalizacji składowiska	Termin uchwycenia składowiska	Składowanie wypalonego paliwa
BELGIA	7	5,7	53,8	TAK	?	ok. 2040 r.	NIE
CHINY	11	8,6	2,2	TAK	prace	ok. 2050 r.	NIE
FINLANDIA	4	2,7	29,7	NIE	decyzja	2020 r.	TAK
FRANCJA	58	63,5	76,2	TAK	decyzja	2025 r.	NIE
HISZPANIA	8	7,4	18,3	NIE	?	brak	?
JAPONIA	53	46,2	24,9	TAK	prace	brak	NIE
KANADA	18	12,7	14,8	NIE	prace	brak	TAK
NIEMCY	17	20,3	28,3	TAK → NIE	wstrzym.	brak	TAK
REP.KOREI	20	17,1	35,6	NIE	?	brak	TAK
SZWAJCARIA	5	3,2	39,2	TAK	prace	po 2040 r.	NIE
SZWECJA	10	9,1	42	NIE	decyzja	2023	TAK
UK	19	11	13,5	TAK	prace	brak	TAK
USA	104	101,1	19,7	NIE → TAK?	decyzja	brak (2018?)	TAK

Tabela 3. Postępowanie z wypalonym paliwem i plany składowania odpadów wysokoaktywnych w wybranych krajach mających energetykę jądrową (znak zapytania oznacza brak decyzji)

Oddzielenie w procesie przerobu wypalonego paliwa pierwiastków zawierających powyższe izotopy i przemiana tych izotopów (postępowanie „*separation-transmutation*”) pozwoli na znaczne zmniejszenie aktywności promieniotwórczej i czasu potrzebnego do rozpadu promieniotwórczego odpadów wysokoaktywnych. Może ono także umożliwić optymalizację składowania przez zastosowanie innych rozwiązań dla składowania izotopów krótkożyciowych i innych dla długożyciowych (postępowanie „*separation-conditioning*”). Najbardziej pożądane jest wyeliminowanie z odpadów pomniejszych aktywności, które są nie tylko wysokoaktywne i długożyciowe ale także *alfa*-promieniotwórcze, zatem radiotoksyczne. Po oddzieleniu mogą one zostać poddane wypaleniu w reaktorze na neutronach prędkich, pod wpływem których ulegną rozszczepieniom. Wydzielenie krótkożyciowych izotopów Cs-137 i Sr-90 powoduje zmniejszenie aktywności pozostałych odpadów, zawierających izotopy długożyciowe, o ponad dwa rzędy wielkości. Oddzielając krótkożyciowe izotopy Cs-137 i Sr-90 można je składować oddzielnie od długożyciowych. Już obecnie takie oddzielenie jest możliwe w zakładach przerobu wypalonego paliwa w Sellafield (Zjednoczone Królestwo WB). Pożądane jest także oddzielenie długożyciowych izotopów jodu I-129 i technetu Tc-99 w celu ich transmutacji za pomocą neutronów. Na przykład oddzielając technet Tc-99 można następnie przekształcić go w drodze absorpcji neutronu w stabilny izotop Ru-100.

Podjęte w ciągu ostatniego dziesięciolecia intensywne prace nad nowymi technologiami przerobu wypalonego paliwa mogącymi spełnić powyższe wymagania są zharmonizowane z pracami nad reaktorami powielającymi na neutronach prędkich IV generacji, których wejście do eksploatacji jest spodziewane około roku 2040. Uruchomienie tych reaktorów będzie w stopniu większym niż dotąd stymulowało przerób wypalonego paliwa z reaktorów lekkowodnych prowadząc do znacznego zmniejszenia objętości i – przy zastosowaniu nowych technologii przerobu – także aktywności odpadów wysokoaktywnych.

Uwagi końcowe

Na zakończenie kilka uwag dotyczących racjonalnej oceny problemu odpadów z elektrowni jądrowych:

1. Właściwością odpadów promieniotwórczych w odróżnieniu od różnorodnych odpadów toksycznych powstających w wyniku działalności człowieka (np. w przypadku krajów OECD – w ilościach kilka tysięcy razy większych niż wszystkie odpady promieniotwórcze) jest ich

rozpad promieniotwórczy. Powoduje on nie tylko zanik w miarę upływu czasu (choć w niektórych przypadkach bardzo długiego) niebezpiecznych radioizotopów, lecz także umożliwia łatwe wykrycie i identyfikację emisji substancji promieniotwórczych gdyby dostały się do środowiska. Pozwala to na monitorowanie tego środowiska w sposób ciągły wokół obiektów jądrowych, m.in. takich jak elektrownie jądrowe, czy przechowalniki i składowiska odpadów, jak również na terenie całego kraju.

2. Całkowicie opanowane są bezpieczne sposoby ostatecznego składowania odpadów niski i średnioaktywnych (dlatego w artykule z braku miejsca nie poświęcono temu zagadnieniu szczególnej uwagi).
3. Wypalone paliwo jądrowe nie powinno być zaliczane do odpadów wysokoaktywnych lecz uważana za źródło surowca energetycznego. W przypadku jego przerobu objętość powstałych odpadów wysokoaktywnych wyniesie kilkakrotnie mniej niż objętość wypalonego paliwa co także zmniejsza problemy związane ze składowaniem.
4. Bezpieczne sposoby kilkudziesięcioletniego przechowywania wypalonego paliwa i odpadów wysokoaktywnych są technologicznie opanowane, z uwzględnieniem zarówno problemów jakie stwarza ich aktywność promieniotwórcza jak i emisja ciepła;
5. Co do ostatecznego składowania odpadów wysokoaktywnych – osiągnięto międzynarodowy konsensus uznając, że powinny one być składowane głęboko pod ziemią, oraz podjęto lub zintensyfikowano w skali światowej działania w celu optymalizacji rozwiązań dotyczących tego zagadnienia.
6. Postępowanie z odpadami promieniotwórczymi podlega szczegółowym przepisom międzynarodowym, unijnym oraz krajowym z których wynikają odpowiednie rozwiązania instytucjonalne z niezbędnymi elementami niezależnej kontroli i informowania społeczeństwa.
7. Energetyka jądrowa jest jedyną technologią generacji energii elektrycznej, która bierze pełną odpowiedzialność za odpady jakie wytwarza, izolując je od środowiska i włączając koszty ich zagospodarowania, a także likwidacji obiektów jądrowych, w cenę energii elektrycznej. Udział kosztów postępowania z tymi odpadami w kosztach wytwarzania energii elektrycznej wynosi około 5% i jest porównywalny z udziałem kosztu uranu naturalnego, a fundusze na ten cel są w niektórych krajach gromadzone na mocy prawa. Np. we Francji ściągana jest opłata w wysokości 0,1 eurocenta/kWh energii elektrycznej.

8. W przypadku Polski, dopiero przystępującej do programu energetyki jądrowej można będzie uniknąć wielu obecnie postrzeganych problemów dotyczących odpadów wysokoaktywnych. Fakt, że Polska dopiero przystępuje do programu budowy energetyki jądrowej działa tu na naszą korzyść, bowiem można będzie posłużyć się nagromadzonymi już doświadczeniami i nowymi technologiami, o których wspomniano w poprzednim rozdziale. ■

*mgr inż. Jacek T. Kaniewski,
konsultant Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*

Literatura

1. Janusz Włodarski (Państwowa Agencja Atomistyki). *Unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych – perspektywy dla energetyki jądrowej*. Wykład, II Szkoła Energetyki Jądrowej, Warszawa 3–5 listopada 2009 r.
2. Jacek Kaniewski, Andrzej Furtek. *Regulacje w zakresie Prawa atomowego na poziomie Unii Europejskiej mające zastosowanie do energetyki jądrowej*. Biuletyn informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki „Bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna” nr 4 (78)/2009
3. Jacek Kaniewski. *Wypalone paliwo jądrowe: groźne odpady czy cenny surowiec energetyczny?* Kwartalnik internetowy Ekoatom nr 1, 2011 r. <http://www.ekoatom.com.pl>
4. Jacek Kaniewski. *Co robić z wypalonym paliwem z polskich elektrowni jądrowych?* Kwartalnik internetowy Ekoatom Nr 2, 2011 r. <http://www.ekoatom.com.pl>
5. Andrzej Hryniewicz. *Energia – wyzwanie XXI wieku*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2002 r.
6. Andrzej Strupczewski. *Nie bójmy się energetyki jądrowej*. Wydane przez SEP-COSIW, Warszawa 2010 r.
7. *Radioactive Waste Management*, WNA (World Nuclear Association). <http://www.world-nuclear.org/info/inf04.html> (aktualizowane w czerwcu 2009 r.)
8. *Processing of Used Nuclear Fuel*. <http://www.world-nuclear.org/info/inf69.html> (aktualizowane w październiku 2009 r.)
9. *Generation IV Nuclear Reactors*. WNA (World Nuclear Association) <http://www.world-nuclear.org/info/inf77.html> (aktualizowane w sierpniu 2009 r.)
10. *International Framework for Nuclear Energy Cooperation (formerly Global Nuclear Energy Partnership)*. http://www.world-nuclear.org/info/inf117_gnep.html (aktualizowane w czerwcu 2010 r.)
11. Rodney C. Ewing. *Nuclear Fuel Cycle: Environmental Impact*. (University of Michigan, USA).
12. *Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2010-2012*. Synthèse. Autorité de Sûreté Nucleaire.
13. Spent fuel reprocessing: a fully mastered pathway. CLEFS CEA – No.53 – WINTER 2005-2006.
14. I. Leboucher. *Recycling for a sustainable management of nuclear waste*. ECR Public Hearing – European Parliament, October 12. 2010.
15. *Survey of National Programs for Managing High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel*. A Report to Congress and the Secretary of Energy. United States Nuclear Waste Technical Review Board, October 2009.

Przypisy

¹ Aktywność promieniotwórczą mierzy się w bekerelach (Bq). Jeden Bq oznacza jeden rozpad promieniotwórczy na sekundę. Aktywność promieniotwórcza substancji zawartych w ciele człowieka wynosi kilkadziesiąt Bq.

² Przez jądrowy cykl paliwowy rozumie się szereg etapów przetwarzania materiałów jądrowych począwszy od ich pozyskania z ziemskich zasobów naturalnych, poprzez ich oczyszczanie, konwersję chemiczną, wzbogacanie izotopowe, wytwarzanie reaktorowych elementów paliwowych, wypalenie w reaktorze, ewentualny przerób wypalonego paliwa, aż do ostatecznego składowania wypalonego paliwa lub powstałych z jego przerobu odpadów promieniotwórczych.

³ W Polsce odpowiednie regulacje zawarte są w ustawie Prawo atomowe oraz w wydanym na jej mocy Rozporządzeniu RM w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego. Powyższe akty prawne transponują do prawa polskiego właściwe dla tej problematyki dyrektywy Unii Europejskiej (UE), z których najnowsza (jeszcze nie transponowana), przyjęta 19 lipca 2011 r. przez Radę Unii Europejskiej (*European Council*) dyrektywa w sprawie postępowania z wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi wymaga od państw członkowskich ustanowienia krajowych programów takiego postępowania i przedłożenia ich Komisji Europejskiej w celu umożliwienia ich oceny i wydania ewentualnych zaleceń dotyczących poprawek. Polska jest także stroną Wspólnej Konwencji w sprawie bezpiecznego postępowania z wypalonym paliwem jądrowym i bezpiecznego postępowania z odpadami promieniotwórczymi, która weszła w życie pod auspicjami MAEA w 2001 r.

⁴ Stężenie promieniotwórcze oznacza aktywność 1 m³ odpadów.

⁵ W nawiasach podaje się okres połowicznego rozpadu radioizotopu.

⁶ W Szwecji wypalone paliwo traktuje się jako odpady. Gdyby je przetwarzano wówczas zamiast 5% – go udziału wypalonego paliwa pokazano by udział odpadów wysokoaktywnych wynoszący poniżej 1%.

⁷ W całym okresie wypalania paliwa uranowego, normalnie obejmującym trzy cykle pracy reaktora LWR II generacji powstaje w tym paliwie pluton w ilości około 3% masy paliwa. Jednak w wyniku rozszczepienia jego izotopów Pu-239 i Pu-241 udział plutonu w wypalonym paliwie jest mniejszy i wynosi około 1%, w tym około 2/3 izotopów rozszczepialnych. W reaktorach takich dokonuje się przedawków paliwa przy wyłączonym reaktorze i otwartym jego zbiorniku ciśnieniowym co 1–1,5 lat wymieniając 1/3 rdzenia.

⁸ Dla porównania można podać, że wciągu 50 lat korzystania z Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych w Różanie dostarczono tam odpady nisko- i średnioaktywne o łącznej aktywności promieniotwórczej powyżej 10¹² Bq.

⁹ W fachowej terminologii anglosaskiej używa się terminu „heavy metal” (w skrócie HM) określającego jądrowy materiał paliwowy bez części konstrukcyjnych elementu paliwowego (kasety).

¹⁰ Wcześniejszy przerób w tym przypadku nie ma sensu ponieważ jakoś odzyskanego plutonu psuje się w miarę upływu czasu od separacji plutonu. Jest to spowodowane powstawaniem Am241 kosztem rozszczepialnego Pu-241.

¹¹ Radiotoksyczność jest to cecha nuklidu promieniotwórczego, wywołująca szkodliwe następstwa oddziaływania jego promieniowania na tkanki po wniknięciu do organizmu człowieka w przypadku ich wchłonięcia drogą pokarmową lub wziewną. Zależy ona od rodzaju emitowanego promieniowania i jego energii, czasu połowicznego rozpadu, współczynnika wchłaniania do organizmu, czasu biologicznego półtrwania w organizmie, rodzaju tkanki, w której się gromadzi i jej wrażliwości na dany rodzaj promieniowania.

¹² Chodzi tu głównie o pocięte przed rozpuszczeniem wypalonego paliwa fragmenty koszulek (*hulls*) prętów paliwowych zawierających hermetycznie zamknięte paliwo jądrowe, oraz ich końcówki (*end caps*).

¹³ Gлина bentonitowa (bentonit) powstała w wyniku przemiany miążkich drobin szklanych pochodzenia wulkanicznego w minerały gliny. Sodowe bentonity są zdolne do pochłaniania wody, pęczniąc do objętości stanowiących jej wielokrotność w stanie suchym. Są stosowane m.in. do uszczelniania tam. Nazwa pochodzi od miejscowości Fort Bentona w Montanie (USA). Bentonit występuje także w Polsce.