

Biuletyn Miesięczny PSE, 4/06 2006, s.5-21

Czy mamy obawiać się odpadów radioaktywnych z elektrowni jądrowych?

Dr inż. A. Strupczewski¹

Typową reakcją ludzi słyszących o budowie elektrowni jądrowych jest pytanie – No dobrze, elektrownia jądrowa będzie bezpieczna, ale co zrobicie z odpadami radioaktywnymi?!

Zanim przystąpimy do oceny zagrożenia ze strony odpadów promieniotwórczych, trzeba sobie zdać sprawę, że cała Ziemia pełna jest pierwiastków ulegających rozpadowi radioaktywnym, i to wcale nie wskutek awarii w Czarnobylu. Setki izotopów promieniotwórczych² rozpadają się w naszym środowisku naturalnym, na przykład potas K-41, stanowiący nieodłączną część mleka, które tyłu ludzi pije – i które jest tak zdrowe, gdy niemowlę ssie je z piersi matki. Jedyną możliwość by zmniejszyć radioaktywność mleka to dodać do niego wody, ale nawet i w zwykłej wodzie są rozpuszczone pierwiastki emitujące promieniowanie. We wnętrzu Ziemi nieustannie generują się ogromne ilości ciepła właśnie wskutek rozpadu izotopów promieniotwórczych, dlatego mimo oddawania ciepła w przestrzeń kosmiczną Ziemia nadal jest ciepła. Wszyscy żyjemy stale i żyliśmy od zarania dziejów w środowisku radioaktywnym, a nasze organizmy są do niego przystosowane. Dlatego w dyskusji o odpadach promieniotwórczych patrzmy na proporcje skutków działań człowieka i przyrody - i na tej podstawie dokonujemy ocen naszego postępowania.

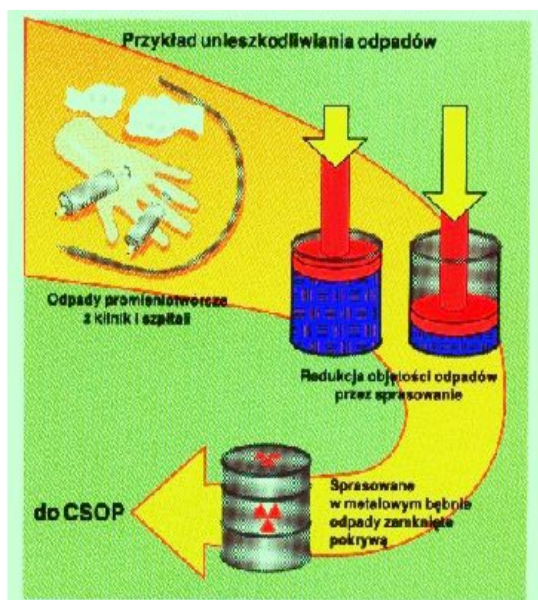
Promieniowanie odpadów radioaktywnych ma małą energię i wystarcza niewielka grubość materiału osłonowego by je zatrzymać. Pojemniki, w których przewozi się odpady radioaktywne, są wyposażone w warstwy osłonowe z żelaza lub ołowiu, które zapewniają pełne bezpieczeństwo otoczenia przed promieniowaniem. Zasadniczym potencjalnym zagrożeniem jest rozsypanie odpadów promieniotwórczych po powierzchni ziemi, przeniknięcie ich do wody pitnej i wchłonięcie przez istoty żywe, w których promieniowanie może oddziaływać bezpośrednio na komórki i procesy zachodzące w organizmie.

Dlatego w gospodarce odpadami radioaktywnymi stosujemy system barier, które zapewniają skuteczne zatrzymywanie izotopów radioaktywnych daleko od otoczenia człowieka.

Pojęcie odpadów radioaktywnych obejmuje szeroką gamę przedmiotów i materiałów, począwszy od rękawiczek gumowych i pokrowców ochronnych na obuwie (są to tzw. odpady niskoaktywne) poprzez ścieki z obiegów chłodzenia elektrowni (odpady średnioaktywne) aż do odpadów z procesu przerobu wypalonego paliwa jądrowego, stanowiących odpady wysokoaktywne. W Polsce mamy już blisko pół wieku doświadczenia z odpadami o niskiej i średniej aktywności, i wiemy dobrze, że Centralne Składowisko Odpadów Promieniotwórczych (CSOP) w Róźnie pracujące od 1960 roku nie spowodowało żadnego zagrożenia dla zdrowia okolicznej ludności i pracowników –przeciwnie, gmina i miasto Różan należą do okolic o NAJNIŻSZEJ w Polsce umieralności na raka.

¹ Przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego Instytutu Energii Atomowej,
A.Strupczewski@cyf.gov.pl

² O własnościach chemicznych pierwiastka decyduje liczba znajdujących się w jego jądrze protonów równa krążącej wokół jądra liczbie elektronów. Liczba neutronów w jądrze może być większa lub mniejsza, np. jądro uranu może zawierać łącznie 238, 235 lub 233 neutrony i protony. Takie odmiany danego pierwiastka różniące się liczbą neutronów nazywamy izotopami. Ich własności chemiczne są takie same, natomiast różnią się ich własności fizyczne, np. U-238 ma bardzo długi okres rozpadu a U-235 rozpada się znacznie szybciej.



Podobnie pozytywne doświadczenia z pracy składowisk odpadów o średniej i niskiej aktywności zebrano w wielu innych krajach. Zazwyczaj składowiska te są akceptowane przez miejscową ludność, bo zapewniają one dobre miejsca pracy (dobrze płatnej, czystej i zdrowej), a radioaktywność po kilkunastu lub kilkudziesięciu latach zanika³ i przestaje być problemem. Natomiast głównym przedmiotem ataku organizacji antynuklearnych są składowiska odpadów o wysokiej aktywności, powstających po przerobie paliwa, lub zawierających paliwo, którego nie poddano przerobowi. Zanim przejdziemy do dyskusji oddziaływania takich składowisk na otoczenie,

popatrzmy na rysunek 2 pokazujący dwa zasadnicze warianty gospodarki w jądrowym cyklu paliwowym.

Po wydobyciu rudy uranowej z ziemi, oczyszczeniu jej i wzbogaceniu⁴ uranu następuje produkcja paliwa, wypalenie⁵ paliwa w reaktorze i wstępne studzenie wypalonego paliwa. Po kilkunastu latach, gdy aktywność paliwa zmaleje, a generacja ciepła stanie się tak mała, że można je odprowadzić bez chłodzenia paliwa wodą, następuje moment decyzji: albo paliwo w całości usuwamy do ostatecznego składowania pod ziemią, albo też postanawiamy odzyskać zawarty w nim jeszcze uran (około 1,5 -2% U-235) i nagromadzony w toku pracy w reaktorze pluton, a do składowiska odesłać tylko odpady o wysokiej aktywności, ulegające znacznie szybszemu rozpadowi niż pluton.

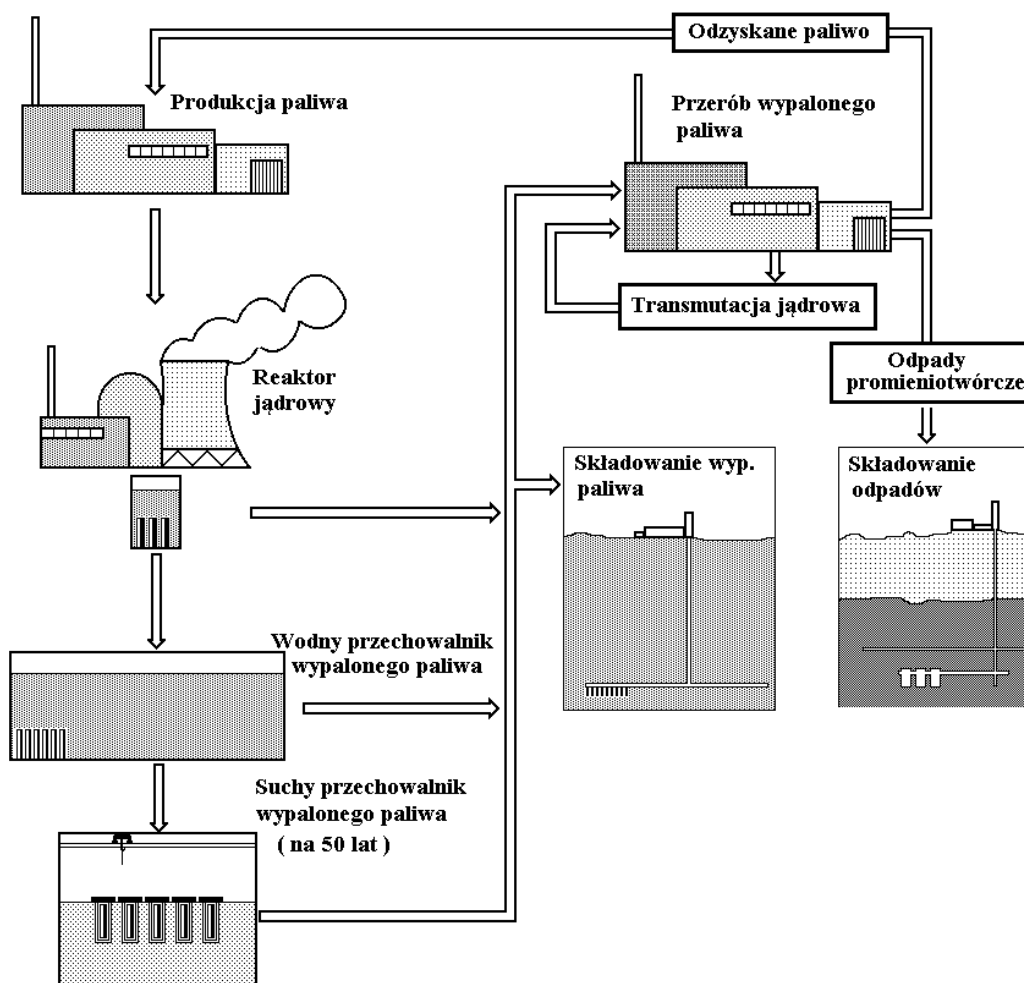
Jest to tzw. zamknięty cykl paliwowy, z przerobem paliwa lub *recykлизacją* paliwa. Cykl zamknięty można uważać za postępowanie najbardziej zgodne ze strategią ludzkości przyjętą w końcu XX wieku, polegającą na rozdzielaniu różnych materiałów odpadowych i odzyskiwaniu materiałów użytecznych, a usuwaniu tylko tych, które do niczego się nie nadają. W przypadku wypalonego paliwa jądrowego, w którym nadal pozostaje około 95% energii potencjalnie możliwej do wykorzystania, usuwanie go do składowania ostatecznego byłoby rażącym marnotrawstwem. Co więcej, stężenie plutonu w wypalonym paliwie jest tak duże, że można z niego wytwarzać nowe paliwo bez wzbogacania uranu. W praktyce takie nowe paliwo wykonuje się z mieszaniny tlenków uranu wzbogaconego i plutonu. Takie paliwo zwane MOX (*mixed oxide -mieszanina tlenków*) pracuje w wielu elektrowniach jądrowych w Europie, Rosji i Japonii. Ilości odpadów wysokoaktywnych w takim procesie są małe, np. w elektrowniach francuskich przypada około 3 m³ odpadów wysokoaktywnych na roczną pracę reaktora o mocy 1000 MWe, a

³ Każdy rozpad radioaktywny oznacza, że jakieś jądro wysłało promieniowanie i przestało być radioaktywne. Dlatego aktywność odpadów jądrowych maleje z każdym dniem, miesiącem i rokiem, i odpady wymagające dzisiaj osłon stają się nieszkodliwe po upływie 10 czy 50 lat.

⁴ Wzbogacanie to zwiększenie frakcji rozszczepialnego izotopu U-235 z około 0,71% w uranie naturalnym do około 3-4% w paliwie reaktorów PWR lub BWR.

⁵ Słowo „wypalenie” stosowane jest w przenośni. Uran nie ulega wypalaniu (czyli utlenianiu), jest on rozszczepiany, ale przez analogię z węglem stosuje się pojęcie „paliwa jądrowego” i „wypalania” w reaktorze.

więc około $3 \text{ m}^3/\text{GWe-rok}$ [1].



Rys. 2 Schemat postępowania z wypalonym paliwem: Z wodnego lub suchego przechwalnika przewożone jest ono albo 1) do ostatecznego składowania pod ziemią, albo 2) do zakładu przerobu paliwa wypalonego, z którego wraca do elektrowni jądrowej do ponownego wypalenia. W tym drugim przypadku pod ziemię usuwane są tylko odpady wysokoaktywne, bez plutonu i uranu. Rysunek zaczerpnięty z [2] za zgodą autora.

Tabl. 1 Ilości odpadów z EJ z reaktorem PWR [1]

Aktywność odpadów	Objętość $\text{m}^3/\text{GWe-rok}$
Wysoka	3
Średnia	22
Niska	155



Rys. 3 Objętość odpadów radioaktywnych (zszklwionych), 1 osoba / życie. Rysunek zaczerpnięty z [2] za zgodą autora

Natomiast ilości odpadów produkowane rocznie przez nowoczesne elektrownie węglowe są ogromne. Dane dla elektrowni niemieckich podajemy wg studium Komisji Europejskiej [1] w tabl. 2. Dane dla elektrowni polskich są podobne.

Tabl. 2 Ilości odpadów z elektrowni opalanej węglem kamiennym (WK) lub brunatnym (WB) [1]

Elektrownia	Lauffen, WK	Grevenbroich WB
	ton/GWe- rok	ton/GWe-rok
Popiół	310 000	557 000
Gips	147 000	67 000
Ścieki wodne	131 000	2 230 000

Dzięki temu, że ilości odpadów promieniotwórczych są małe, możliwe jest stosowanie w gospodarce odpadami jądrowymi innej strategii niż w energetyce węglowej.

Tabl. 3 Różnice w strategii postępowania z odpadami w cyklu jądrowym i węglowym.

Energetyka jądrowa	Spalanie węgla
Odpady radioaktywne są zamykane szczelnie i trwale oddzielane od otoczenia człowieka	Żużel i popiół są oddzielane od wody na kilkadziesiąt lat
Radioaktywność odpadów maleje z czasem do zera	Żużel i popiół pozostają toksyczne na zawsze

Skutki tych różnic w podejściu do gospodarki odpadami omówimy poniżej.

1. Odpady radioaktywne są zagęszczane, zamykane w pojemnikach i składowane w magazynach pod kontrolą, podczas gdy odpady z elektrowni z paliwem organicznym są

rozpraszane w otoczeniu.

System zamykania odpadów radioaktywnych i ich składowania wybiera się stosownie do aktywności odpadów i długości czasu, w ciągu którego odpady stanowią potencjalne zagrożenie dla człowieka i środowiska. Zeszlone odpady wysokoaktywne⁶, zawierające praktycznie wszystkie izotopy długożyciowe⁷, są zwykle zamykane w systemie wielu barier i umieszczane głęboko pod ziemią – stąd często stosowana nazwa składowiska *głębinowego*. W systemie tym stosuje się materiały naturalne, tak by układ składowiska geologicznego był maksymalnie podobny do środowiska naturalnego. Układ wielu kolejnych barier gwarantuje bezpieczeństwo – nawet, jeśli jedna z nich zawiedzie, pozostałe powstrzymają skutecznie rozchodzenie się materiałów radioaktywnych.

Na początek odpady wysokoaktywne są witrafikowane⁸ w postaci cylindrów szklanych o bardzo wysokiej odporności na wymywanie przez wodę. Odporność tę potwierdziło wiele doświadczeń, w których wykazano, że przez tysiąc lat zaledwie mały ułamek procenta odpadów przenika do wody, nawet jeśli zeszlone odpady są omywane wodą. W rzeczywistości nie dopuszczamy do tego, bo zeszlone odpady są zamykane w pojemniki z miedzi lub stali nierdzewnej, nie dopuszczające do kontaktu wody ze szkłem. Jak długo pojemnik miedziany jest szczelny, żadne radioizotopy nie mogą wydostać się na zewnątrz. Główne zagrożenie stanowi korozja (powodowana przez tlen i związki siarki rozpuszczone w wodach podziemnych) i ruchy górotworu, które mogą spowodować pęknięcie pojemnika.

Miedź jest materiałem bardzo odpornym na działanie agresywnych substancji w wodzie podziemnej. Wkładka stalowa lub żeliwna pozwala pojemnikowi znieść ogromne obciążenia mechaniczne bez uszkodzenia.

Pojemnik jest otoczony warstwą gliny bentonitowej, zwanej buforową, która zabezpiecza pojemnik przed małymi ruchami skały i utrzymuje go na miejscu. Ta warstwa buforowa spełnia dwie dodatkowe funkcje. Bentonit puchnie w zetknięciu z wodą, co zabezpiecza znakomicie przed przeniknięciem wody do wnętrza pojemnika. Jednocześnie glina bentonitowa działa jako filtr. Radionuklidy przylegają do powierzchni cząstek gliny. W mało prawdopodobnym przypadku pęknięcia pojemnika, ogromna większość radionuklidów pozostanie wewnątrz pojemnika. Większość z tych, które wydostaną się z pojemnika, zostanie schwytana przez cząstki gliny bentonitowej. Transport radionuklidów na powierzchnię będzie w ten sposób skutecznie opóźniony, co zapewni dalszy rozpad radioaktywny i zmniejszenie aktywności odpadów zanim wydostaną się na powierzchnię.

Również skała opóźnia transport radionuklidów. Główną jej funkcją jest jednak zabezpieczenie pojemnika i warstwy buforowej przed uszkodzeniem mechanicznym i zapewnienie stabilnego środowiska chemicznego. Dla całości pojemnika ważne jest, by wody podziemne nie zawierały rozpuszczonych tlenków. Niska prędkość przesączania wody przez skałę jest wielką zaletą wspomagającą utrzymanie systemu barier. Taki system barier przyjęto w Szwecji do

⁶ Odpady dzielą się na niskoaktywne, średnioaktywne i wysokoaktywne. Np. dla cieczy odpady niskoaktywne to takie substancje, które przy spożyciu 1 litra powodują otrzymanie od 0,00001 do 0,1 rocznej dawki dopuszczalnej (RDD), średnioaktywne - od 0,1 do 100 RDD, a wysokoaktywne- powyżej 100 RDD.

⁷ W zależności od szybkości rozpadu promieniotwórczego, radioizotopy dzielimy na krótko życiowe (aktywność ich maleje dwukrotnie w ciągu sekund lub godzin), średnio życiowe – dni i miesiące i długo życiowe – lata i setki lat.

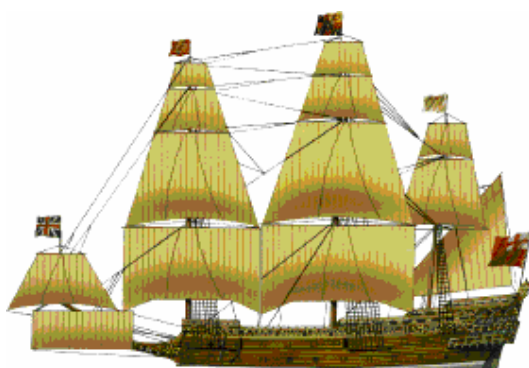
⁸ Zatapianie odpadów w szkło. Produktem tego procesu są bardzo trwałe i łatwe do przechowywania cylindry o strukturze szklanej.

przechowywania wypalonego paliwa [3], a podobne układy barier stosowane są w przechowalnikach paliwa zaprojektowanych w innych krajach np. w Finlandii, USA, Japonii czy w Korei.

Czemu wciąż podkreślamy sprawę wymywania i systemu barier?

Dlatego, że odpady wysokoaktywne umieszczane są głęboko pod ziemią, np. na głębokości 500 m. i dopóki tam pozostają, ich promieniowanie nie żadnego znaczenia, bo już kilka metrów gruntu wystarcza, by stało się ono niewykrywalnie małe. Zagrożenie może powstać jedynie wtedy, jeśli woda spowoduje skorodowanie pojemników, następnie wymyje odpady ze szkła, w którym zostały one zatopione, a na koniec uniesie rozpuszczone odpady w kierunku powierzchni ziemi, do źródeł wody pitnej. Dopiero, gdy odpady zostaną wypite przez człowieka, mogą one stanowić zagrożenie. Ale np. pokłady solne zostałyby dawno rozpuszczone, gdyby przenikała do nich woda. Sól rozpuszcza się znacznie szybciej, niż szkło!

Gdy umieszczamy pojemniki z odpadami w pokładach soli, mamy pewność, że woda do nich nie przeniknie. Jak długo? Na pewno dłużej, niż odpady będą niebezpieczne. Życie człowieka trwa krótko w stosunku do okresu połowicznego rozpadu niektórych radioizotopów, ale przemiany geologiczne następują bardzo wolno. Szybkość wymywania zeszlonych odpadów będzie minimalna, bo metody zamykania odpadów stosowane przez przemysł jądrowy są bardzo skuteczne. Odpady będą więc odseparowane od biosfery przez bardzo długi czas, a nawet w razie ich wymycia z pojemników tempo przesączania będzie bardzo małe. Ale ponadto, samo przechowywanie paliwa w pojemnikach szczelnych zapewnia ich separację od otoczenia nie przez tysiące lat [4]! Nie jest to technicznie trudne – przemysł nuklearny gotowy jest do budowy takich składowisk odpadów promieniotwórczych już w szeregu różnych krajów.

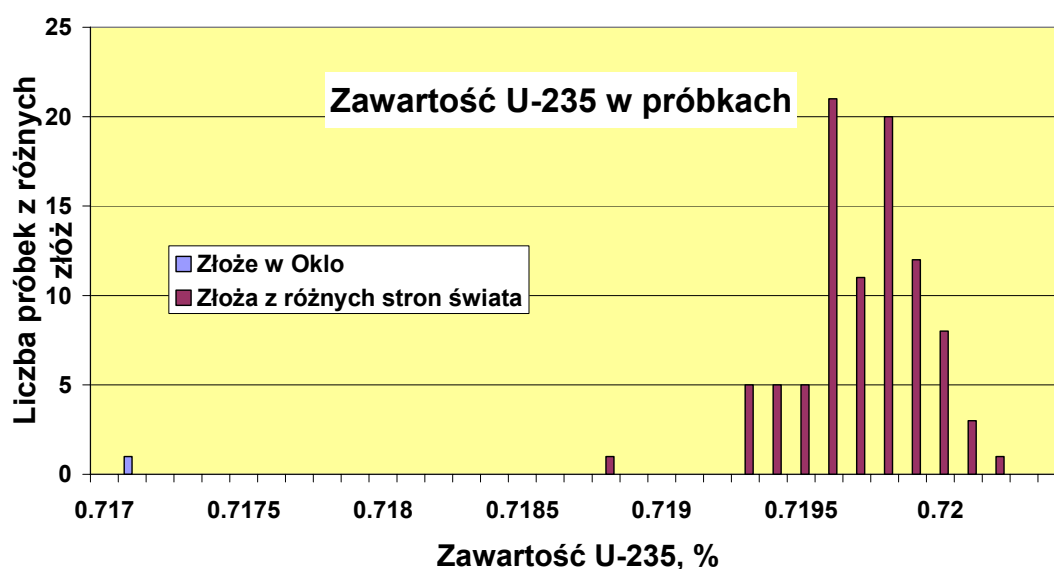


Słyszałem nieraz powątpiewania, czy potrafimy utrzymać produkty rozszczepienia tak długo w jednym miejscu. Dwa przykłady, każdy z zupełnie innej epoki, mogą pomóc nam zrozumieć, że procesy naturalne przebiegają znacznie wolniej niż działania człowieka. Pierwszy przykład to historia okrętu wojennego Waza, zbudowanego w czasach wojen szwedzkich, a więc przed 400 laty. Warto poświęcić jej chwilę uwagi, nie tylko z powodu odpadów radioaktywnych.

Otóż ówczesny król szwedzki, chcąc mieć najpotężniejszy okręt wojenny na Bałtyku, kazał wyposażać go w dodatkowy pokład armatni, co oczywiście znacznie przesunęło w górę środek ciężkości okrętu. Okręt był niestabilny, ale nikt nie śmiał tego powiedzieć, bo w owym czasie król szwedzki był w Szwecji z definicji uważany za najlepszego znawcę sztuki budowy okrętów. Według ówczesnych reguł, stabilność okrętu sprawdzano tak, że załoga biegła od jednej burty okrętu do drugiej i z powrotem, w sumie czterdzieści razy. Jednakże już przy drugim biegu przechylenie okrętu było tak silne, że kapitan rozkazał przerwać próbę przed jej ukończeniem. Cóż miał robić? Król walczył w tym czasie na Pomorzu i czekał na potężny okręt – więc kapitan rozkazał postawić żagle i wypłynąć. Podróż była krótka – po pierwszym silnym podmuchu wiatru najpotężniejszy na Bałtyku okręt wojenny Waza przechylił się – i przewrócił. Załoga poszła na dno, wraz ze wszystkimi rzeczami, które

znajdowały się na statku.

Czemu mówimy o tym? Nie tylko dlatego, że w energetyce jądrowej przechowujemy starannie w pamięci wszelkie przykłady wykazujące, że nie wolno łamać zasad bezpieczeństwa. W odniesieniu do składowania odpadów istotne jest również to, że gdy po 350 latach okręt Waza wydobyto z dna morza okazało się, że okręt i wiele przedmiotów pozostało niezniszczonych mimo ciągłego działania słonej wody, podmorskich prądów i burz. Jeśli przedmioty z drewna bez żadnej osłony pozostały nienaruszone po kilkuset latach w wodzie, czy naprawdę mamy wątplić w techniczne możliwości wykonania w XXI wieku pojemników, które zapewnią trwałe przechowywanie zeszlonych odpadów umieszczonych w najstaranniej jak można wybranych, stabilnych i suchych pokładach skalnych?



Rys. 5 Zawartość uranu U-235 w próbkach pobranych z różnych złóż na świecie. Dane liczbowe z [5].

Drugi przykład pochodzi z zupełnie innej epoki, bo sprzed niemal 2 miliardów lat. W owym czasie frakcja uranu U-235 w uranie naturalnym była znacznie większa niż obecnie i wynosiła około 3% (bo U-235 ulega rozpadowi naturalnemu z okresem połowicznego rozpadu około 700 milionów lat, podczas gdy dla U-238 okres ten wynosi ponad 4,5 miliarda lat). Stwarzało to możliwość wystąpienia reakcji łańcuchowej reakcji rozszczepienia, jeśli bogata ruda uranowa była w kontakcie z wodą. Taka sytuacja powstała w miejscowości Oklo w Gabonie, co spowodowało ukształtowanie kilku naturalnych reaktorów jądrowych, pracujących z przerwami przez kilkaset tysięcy lat. A jak to stwierdzono?

Oto pracownicy zatrudnieni w przedsiębiorstwie eksploatującym rudę uranową zauważyli, że w rudzie tej jest „za mało” uranu rozszczepialnego U-235. Było go tylko około 0,717 %, zamiast około 0,72% jak zwykle we wszystkich próbkach rudy uranowej z różnych miejsc na kuli ziemskiej [5]. Była to różnica mała, co oznaczało, że reaktory naturalne pracowały na małej mocy, i wypalały tylko około 1% uranu U-235, ale dalsze pomiary wykazały, że w Oklo występują również frakcje U-235 obniżone dla 0,621%, a w jednej z próbek frakcja U-235 wyniosła tylko 0,440%. Oznaczało to, że w ciągu kilkuset tysięcy lat pracy tych reaktorów frakcja wypalonego uranu wyniosła około 26%! Niezły wynik jak na reaktor naturalny -

wypalenie osiągnięte w nowoczesnych reaktorach dochodzi do 50-60%.

Co więcej, w minerałach z Oklo znaleziono produkty rozszczepienia takie jak neodym, a nawet ksenon – gaz, który uwięziony w ziarnach fosforanów glinu pod rejonem grzewisk wodnych przetrwał przez blisko dwa miliardy lat! [5] Produkty rozszczepienia z reaktorów naturalnych w Oklo nie były przechowywane w złożach skalnych, nie były zamykane w pojemniki ani nie ulegały zeszkleniu – oddziaływała na nie woda (której obecność była niezbędna, by reaktory mogły zacząć pracę), znajdowały się tuż pod powierzchnią gruntu, narażone na wszelkie procesy mogące sprzyjać ich migracji – a mimo to pozostały na miejscu, dopóki nie uległy naturalnemu rozpadowi. Tylko te najtrwalsze – o bardzo, bardzo długich okresach rozpadu i odpowiednio bardzo, bardzo małej aktywności - świadczą dziś o tym, że reaktory naturalne działały naprawdę i że nie spowodowały skażeń radioaktywnych w okolicy.

Dziś geologowie piszą, że procesy wymywania odpadów są bardzo powolne, i nawet gdyby były one pozbawione pojemników i wityfikacji, to i tak nie wydostałyby się z głębokości 500 m na powierzchnię ziemi wcześniej niż za 20- 100 tysięcy lat. Patrząc na próbki gazu wciąż tkwiące w minerałach w Oklo myślę, że można w to uwierzyć!

Ile potrzeba terenu na składowanie odpadów wysokoaktywnych? Według ocen studium Unii Europejskiej [1], gdyby elektrownie jądrowe o mocy 30 000 MWe pracowały na pełnej mocy bez przerwy przez 60 lat, to po przerobieniu paliwa wypalonego w tych elektrowniach pozostałoby 5400 m³ odpadów wysokoaktywnych. Po zeszkleniu i zamknięciu ich w postaci cylindrów o promieniu 22 cm i wysokości 110 cm można byłoby rozmieścić je w 600 otworach wydrążonych na terenie o powierzchni zaledwie 0,4 km².

Trzeba zaś pamiętać, że odpady z elektrowni węglowych nie są zamykane ani izolowane trwale od otoczenia. Część z nich ulatnia się w postaci popiołu lotnego, który spada w otoczeniu elektrowni – nieraz sięgając na duże odległości od punktu emisji – przedostaje się do gleby i rozpuszcza się w wodzie pitnej, a część pozostaje na filtrach elektrostatycznych i jest usuwana razem z popiołem dennym na okoliczne pola i hałdy. Oddzielanie odpadów ciekłych od otoczenia wykonuje się tak, by przegrody wystarczyły na kilkadziesiąt lat – i społeczeństwo godzi się z tym, nie zdając sobie sprawy, że chociaż odpady radioaktywne mogą rozpadać się wolno, to jednak z czasem aktywność ich zanika do zera, natomiast toksyczność arsenu, kadmu, rtęci czy ołowiu pozostaje zawsze taka sama, przez tysiące i miliony lat.

2. Aktywność odpadów radioaktywnych maleje z czasem, natomiast toksyczność odpadów ze spalania węgla pozostaje niezmiennie wysoka.

Spróbujmy porównać zagrożenie od odpadów radioaktywnych i od zwykłych odpadów z procesu spalania węgla zakładając, że w obu przypadkach odpady zostaną rozpuszczone w wodzie pitnej. Miarą zagrożenia jest wskaźnik zagrożenia radiotoksycznego WZR definiowany jako ilość wody potrzebna do rozpuszczenia odpadów tak, by ich stężenie nie przekroczyło maksymalnego stężenia dopuszczalnego w wodzie pitnej. Podobny wskaźnik WZR oparty na maksymalnej dopuszczalnej koncentracji substancji toksycznych w wodzie pitnej służy jako wskaźnik narażenia na substancje toksyczne w odpadach z cyklu spalania węgla. Wskaźnik WZR mierzymy w km³ wody na jednostkę wyprodukowanej energii elektrycznej, km³/GW-rok.

Dominującym źródłem zagrożenia radiologicznego są odpady wysokoaktywne. Do wytworzenia energii elektrycznej 1 GWe-rok potrzeba 35 ton paliwa jądrowego o średnim wzbogaceniu⁹ 3.3%

⁹ W uranie naturalnym występuje uran U-238, który nie ulega rozszczepieniu w reaktorach termicznych, oraz

przy głębokości wypalenia 33 MWd/t¹⁰ w EJ o sprawności cieplnej 31.5% [6]. Do uzyskania takiej ilości paliwa potrzeba wydobyć 124 000 tony rudy uranowej o zawartości 0.17% uranu naturalnego i przetworzyć ją do postaci stosowanej przy wzbogacaniu uranu. A owa ruda uranowa zawiera nie tylko uran naturalny ulegający powolnemu rozpadowi, ale i wszystkie izotopy pochodne, włącznie z radonem czy polonem, które też promieniają i oddziałują na organizm człowieka.

Aktywność odpadów maleje i z czasem potencjalne zagrożenie od nich jest mniejsze niż zagrożenie od pierwotnie wydobytej rudy uranowej. Tymczasem ruda jest wszędzie, również w miejscach wypłukiwanych przez wodę, którą pijemy, podczas gdy odpady są skutecznie odizolowane od człowieka. W rzeczywistości można oczekiwać, że odpady pozostaną izolowane na miejscu składowania na zawsze, tak jak pozostały na miejscu produkty rozszczepienia z naturalnych reaktorów w Oklo.

Zagrożenia radioaktywne można porównać z zagrożeniem toksycznym od produktów spalania węgla. Dopuszczalne stężenia usuwanych z popiołem i żużłem substancji toksycznych (kobalt, arszenik, rtęć, miedź, mangan, nikiel, wanad itd.) w wodzie pitnej są określone przez lekarzy i przepisy państwowe. Określone są także dopuszczalne stężenia substancji promieniotwórczych. Porównanie względnych zagrożeń od odpadów radioaktywnych i od odpadów ze spalania węgla widać na rysunku 6, opracowanym przez autora i opublikowanym w [7].

Początkowo wielkość WZR w cyklu jądrowym jest określona przez aktywność produktów rozszczepienia zarówno dla cyklu z przerobem paliwa (zamkniętego) jak i dla cyklu bez przerobu (otwartego). Jednakże aktywność produktów rozszczepienia spada szybciej niż aktywność aktynowców. Dlatego ich WZR staje się pomijalnie mały w stosunku do WZR aktynowców już po 100 latach w przypadku cyklu otwartego, a po 300 latach w przypadku cyklu zamkniętego, z przerobem paliwa.

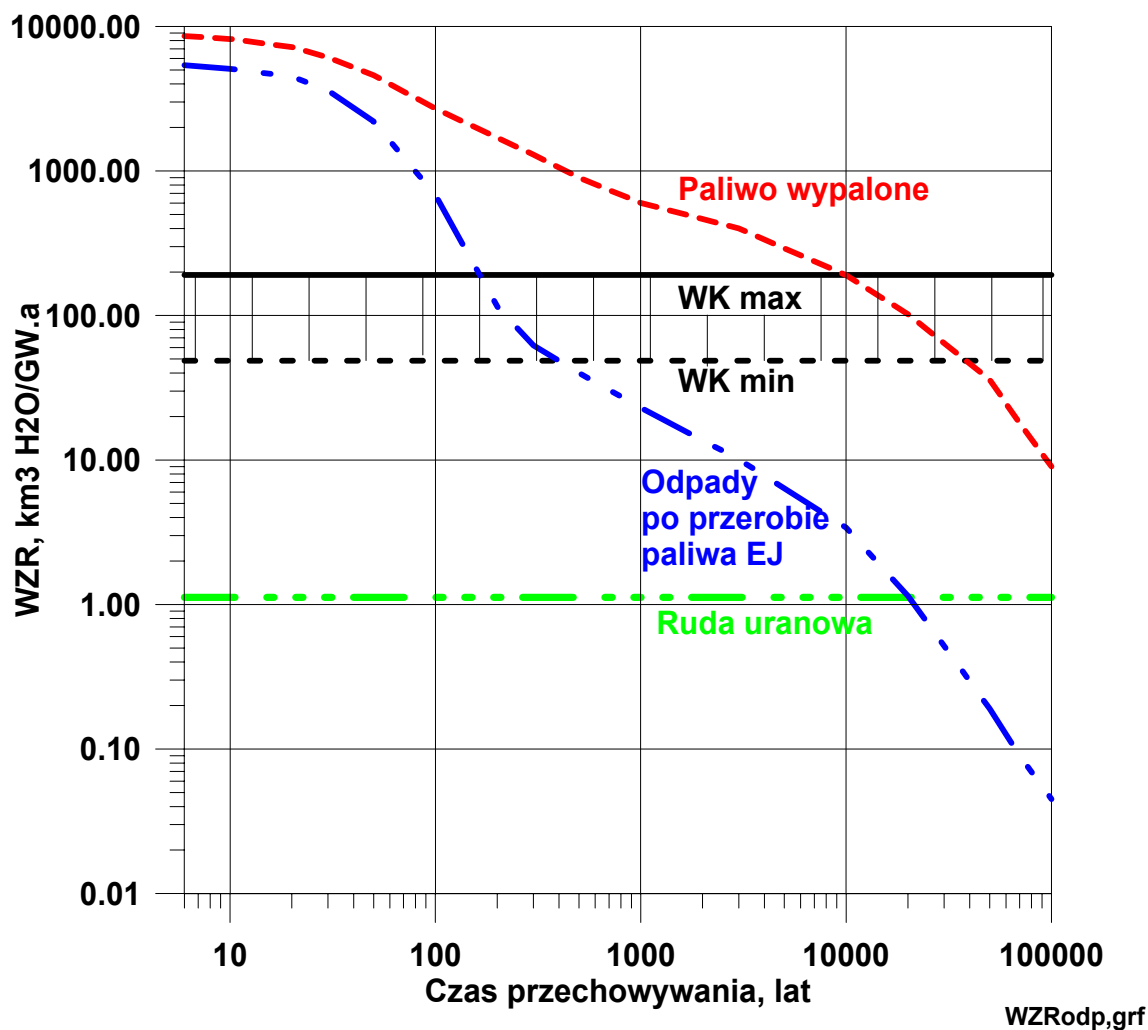
W przypadku węgla kamiennego i brunatnego dominujący wkład pochodzi z kobaltu Co, miedzi Cu i wanadu V. W węglu brunatnym istotne jest także występowanie niklu Ni. Objętości wody potrzebnej do rozcieńczenia pierwiastków toksycznych do stężeń dopuszczalnych w wodzie pitnej są o rząd większe w przypadku węgla brunatnego (2100-3085 km³/GW-rok) niż w przypadku węgla kamiennego (48-190 km³/GW-rok).

Krzywa WZR dla odpadów o wysokiej aktywności w cyklu zamkniętym (w którym uran i pluton są odzyskiwane dla powtórnego użycia w reaktorze) spada poniżej WZR dla odpadów z węgla brunatnego po 45-60 latach, a poniżej krzywej WZR dla odpadów z węgla kamiennego po 200-500 latach, w zależności od początkowego udziału pierwiastków toksycznych w węglu brunatnym lub kamiennym. WZR dla odpadów wysokoaktywnych spada poniżej WZR dla rudy uranowej po upływie 24 000 lat.

Jeśli nie prowadzimy recyklicacji paliwa, lecz składujemy je razem z odpadami radioaktywnymi to spadek zagrożenia jest dużo wolniejszy. Dlatego przerób paliwa jest opcją preferowaną przez energetykę jądrową zarówno z punktu widzenia wykorzystania energii uranu jak i ułatwienia chronienia odpadów radioaktywnych.

rozszczepialny U-235, którego frakcja wynosi tylko 0,7%. Do wykonania paliwa reaktorowego uran wzbogaca się, czyli zwiększa się frakcję U-235 do około 2,5 – 3,5%.

¹⁰ W czasie pracy w reaktorze rozszczepieniu ulega tylko część U-235, resztę usuwa się z “wypalonym” paliwem. Miara energii otrzymywanej z paliwa jest „głębokość wypalenia” mierzona w jednostkach energii cieplnej uzyskanych z jednostki wagi paliwa.



Rys. 6 Wskaźnik zagrożenia radiotoksycznego dla odpadów powstających przy wytworzeniu energii elektrycznej 1 GW-rok, mierzony ilością wody w jakiej należy rozpuścić odpady, by ich stężenie zmalało do dopuszczalnego dla wody pitnej, WZR ($\text{km}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{GW-rok}$).

- Paliwo wypalone- paliwo jądrowe składowane bez przerobu, cykl otwarty (USA)
- Odpady po przerobie paliwa EJ zawierające 0.5% resztkowego plutonu, (np. z zakładów przerobu wypalonego paliwa we Francji)
- WK max –żużel i popiół ze spalania węgla o maksymalnej zawartości zanieczyszczeń (Polska)
- WK min –żużel i popiół ze spalania węgla o minimalnej zawartości zanieczyszczeń (Polska)
- Ruda uranowa- ruda potrzebna do wytworzenia paliwa jądrowego dostarczającego 1GW.a (124 000 ton rudy o zawartości 0.17% uranu) Źródło danych: [7]

Warto pamiętać o tych krzywych rozważając minimalny czas trwałości pojemnika dla odpadów wysokoaktywnych, przyjmowany jako równy 1000 lat. Oznacza to, że w ciągu pierwszego tysiąca lat nie ma przecieków z pojemnika na zewnątrz, tak że zagrożenie względne należy

porównywać tylko dla czasów dłuższych niż 1000 lat. Nawet potem, jeżeli pojemnik ulegnie rozszczelnieniu, możliwe wycieki substancji radioaktywnych do wód podziemnych będą powolne, a ruch tych wód także jest bardzo wolny. Minie dalsze 20 000- 100 000 lat zanim pierwsze przecieki substancji radioaktywnych rozpuszczonych w wodzie dotrą do wody pitnej [1].

Tak więc, nawet zakładając pełne rozpuszczenie odpadów promieniotwórczych w wodzie podziemnej, zagrożenie związane z odpadami wysoko aktywnymi będzie mniejsze niż zagrożenie związane z odpadami z elektrowni węglowych już po upływie 200 lat. A przecież odpady radioaktywne są starannie składowane, tak że pozostają odseparowane od biosfery nie przez 200 ale przez 20 000 lat i dłużej.

Co więcej, porównanie z pierwotnie istniejącym zagrożeniem powodowanym przez rudę uranową wykazuje, że nawet gdyby minimalne dawki promieniowania stwarzały zagrożenie nowotworowe – co jest bardzo wątpliwe – praca EJ nie powodowałaby wzrostu ogólnego zagrożenia radiologicznego na Ziemi. Już w chwili, gdy wskaźnik WZR dla odpadów wysoko aktywnych zmaleje do poziomu WZR dla rudy, zagrożenie radiologiczne jest zmniejszone, ponieważ ruda jest rozproszona w otwartych obszarach, często w styku z wodami podziemnymi, podczas gdy odpady wysoko aktywne są składowane w stabilnych formacjach geologicznych i odseparowane od środowiska. W dalszych latach WZR dla odpadów jest mniejszy niż pierwotny WZR dla rudy i w miarę upływu lat różnica między nimi stale rośnie. Tak więc praca EJ przyczynia się do zmniejszenia ogólnego tła promieniowania na Ziemi. Nie jest wcale pewne, czy powinniśmy do tego dążyć, bo wiele doświadczeń wykazało, że istniejące tło promieniowania jest niezbędne do życia organizmów żywych, ale przynajmniej można z całą pewnością stwierdzić, że praca EJ i składowanie odpadów promieniotwórczych NIE zwiększa średniego zagrożenia radiologicznego dla naszych prawnuków.

A dla pojedynczego człowieka, mieszkającego nad samym składowiskiem odpadów radioaktywnych? Jakie jest jego narażenie?

Można odpowiedzieć, że jest **pomijalnie małe**. Ale krytycy zarzucą nam, że lekceważymy to zagrożenie i życie ludzkie, że na przestrzeni tysiącleci odpady spowodują jednak wiele zgonów. Czy to prawda?

Znamy na to odpowiedź, bo dociekliwi naukowcy prześledzili drogi uwalniania się produktów radioaktywnych i przebieg ich rozpadu. Okazuje się, że w perspektywie od zera do pół miliona lat (chyba dość długo?) największe dawki spowoduje wydzielanie Tc-99 i wchłanianie go z wodą pitną. Maksymalne moce dawki wystąpią po 300 000 lat i wyniosą 0,012 mikroSv/rok [1]. Z czym takie dawki można porównać?

W artykule o kosztach zewnętrznych [8] pokazywaliśmy jak rośnie moc dawki ze wzrostem wysokości nad poziomem morza. Przyrost ten wynosi średnio 0,1 mikroSv/m/rok. Można argumentować, że na ogół człowiek nie boi się wejść na wzgórze, czy mieszkać na pierwszym piętrze, zamiast na parterze, ale może przykład dotyczący absolutnie każdego z nas - nawet mieszkającego z zasady jak najbliżej poziomu morza – będzie lepszą ilustracją Problemu Zagrożenia Radiacyjnego od Małych Dawek.

Miły czytelniku, czy śpisz na łóżku? Jeśli tak, a łóżko ma średnio wysokość 40 cm, to pomyśl, że mógłbyś spać na samym materacu, o wysokości np. 20 cm. A to oznacza, że będziesz niżej i zmniejszysz moc dawki o 0,02 mikroSv/rok, dwa razy więcej niż maksymalny przyrost dawki dla kogokolwiek powodowany przez odpady wysokoaktywne. A więc – bądźmy konsekwentni

– skoro „zieloni” aktywiści grożą nam małymi dawkami promieniowania i zabraniają nam stosowania energii jądrowej „ze względów moralnych” to **trzeba ze względów moralnych potępiać producentów łóżek** znacznie bardziej niż inżynierów jądrowych!



A wózki dzieciinne? Dzieci mogłyby chodzić na czworakach i spać leżąc wyłącznie na ziemi, a my je kładziemy do wózków! To przecież powoduje zwiększenie mocy dawki, i to na istoty najbardziej narażone, na nasze dzieci, bezbronne dzieci! Czy i w tym przypadku „zieloni” aktywiści zaatakują

„praktykę powodującą wzrost mocy dawki promieniowania”?

Czy producenci łóżek i wózków dzieciennych są przestępcami, powodującymi setki zgonów w ciągu wieków? Czy też może – może powinniśmy nareszcie spojrzeć z właściwej perspektywy na minimalne wzrosty mocy dawki w różnych sytuacjach życiowych i uspokoić ludzi, by nie bali się składowania pod ziemią odpadów wysokoaktywnych?

Faktem jest, że energetyka jądrowa jest gałęzią przemysłu, która bierze pełną odpowiedzialność za swoje odpady, składowuje je i zabezpiecza starannie na tysiąclecia. Zaczęliśmy nasze rozważania od koronnego zarzutu przeciwników energii jądrowej – od pozornie nierozwiązalnej sprawy odpadów radioaktywnych. Okazuje się, że przemysł jądrowy nie musi obawiać się tego pytania. Co więcej, jak wykazaliśmy powyżej, właśnie energetyka jądrowa daje przykład, jak troszczyć się o czystość środowiska i brać pełną odpowiedzialność za produkowane odpady. Można tylko życzyć sobie, by i inne gałęzie przemysłu podejmowały takie wysiłki i gwarantowały rozwiązanie techniczne równie bezpieczne dla środowiska.

Literatura

1	EXTERNE 1995: Externalities of Energy, Vol. 1-7, published by European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, EUR 16522, Luxembourg, 1995
2	Włodarski J.: Składowanie odpadów promieniotwórczych, referat na sympozjum: Czysta i bezpieczna? Elektrownia jądrowa w Polsce, Polskie Towarzystwo Badań Radiacyjnych, Polskie Towarzystwo Nukleoniczne Państwowy Zakład Higieny Warszawa, 11 marca 2005 r.
3	Deep repository for spent nuclear fuel, Svensk Kärnbränslehantering AB, www.skb.se
4	Juhani Vira: Disposal Of High-Level Radioactive Waste In Finland Posiva Oy, Fin-00100 Helsinki, Finland , Chapter 9
5	Meshik A.: The workings of an ancient nuclear reactor Scientific American November 2005
6	Hamstra J.: Radiotoxic Hazard Measure for Buried Solid Radioactive Waste, Nuclear Safety, 16, 1975, No 2 p 180-189.
7	IAEA, Nuclear Power and Sustainable Development, 1998
8	Strupczewski A.: Koszty zewnętrzne wytwarzania energii elektrycznej w Unii Europejskiej, Biuletyn PSE, 12.2005

