

ROZDZIAŁ IX. ODPADY PROMIENIOTWÓRCZE

9.1. Uwagi wstępne

Jak omawialiśmy w rozdziale VII, paliwo jądrowe, w odróżnieniu od konwencjonalnego (np. węgla) nie jest wypalane do końca, gdyż w trakcie wypalania paliwa jądrowego powstają w nim „trucizny” silnie pochłaniające neutrony. Z tego względu, po pewnym czasie pracy, elementy paliwowe nie nadają się do dalszego bezpośredniego wykorzystania w reaktorze, stanowią więc *odpad promieniotwórczy*. Z definicji, odpadem promieniotwórczym nazywamy niepotrzebny już, ściślej - zużyty materiał, który zawiera pierwiastki promieniotwórcze. Użycie tego terminu w kontekście wypalonego paliwa jest nieco zwodnicze, gdyż dysponując odpowiednio zaawansowaną technologią wypalone pręty paliwowe można poddać obróbce chemicznej i wyekstrahować z nich użyteczny ^{235}U i ^{239}Pu . Z tego punktu widzenia wypalone paliwo odpadem nie jest. Niemniej jednak w powszechnym rozumieniu „odpadów promieniotwórczych z reaktora” rozumie się przede wszystkim wypalone paliwo, a w dalszej części np. zużyte i zaaktywowane materiały konstrukcyjne. Nasze rozważania będą dotyczyły głównie zużytego paliwa. Zawiera ono szereg promieniotwórczych nuklidów – fragmentów rozszczepień jąder uranu, a także izotopów powstałych w wyniku wychwytu radiacyjnego neutronów przez uran - głównie długożyciowych aktynowców.

Rys. 9.1 pokazuje schemat powstawania nuklidów promieniotwórczych podczas pracy reaktora. Nuklidy te staną się na dalszym etapie przedmiotem specjalnego postępowania z wypalonym paliwem.

Dla lepszego zorientowania się w powstawaniu aktynowców i produktów rozszczepienia w reaktorze prześledźmy los 1 t paliwa w trakcie trzyletniej pracy reaktora PWR o mocy 1 GWe. Przypuśćmy, że zawartość ^{235}U w świeżym paliwie wynosiła 3,3%, a więc na początku w paliwie znajdowało się 33 kg tego izotopu¹. W ciągu 3 lat pracy taki reaktor zużywa 25 kg ^{235}U i 24 kg ^{238}U , a więc pozostaje odpowiednio 8 i 943 kg. Wzbogacenie uranu spada więc do poziomu 0,8 %. Podczas wypalania paliwa utworzyło się ponadto:

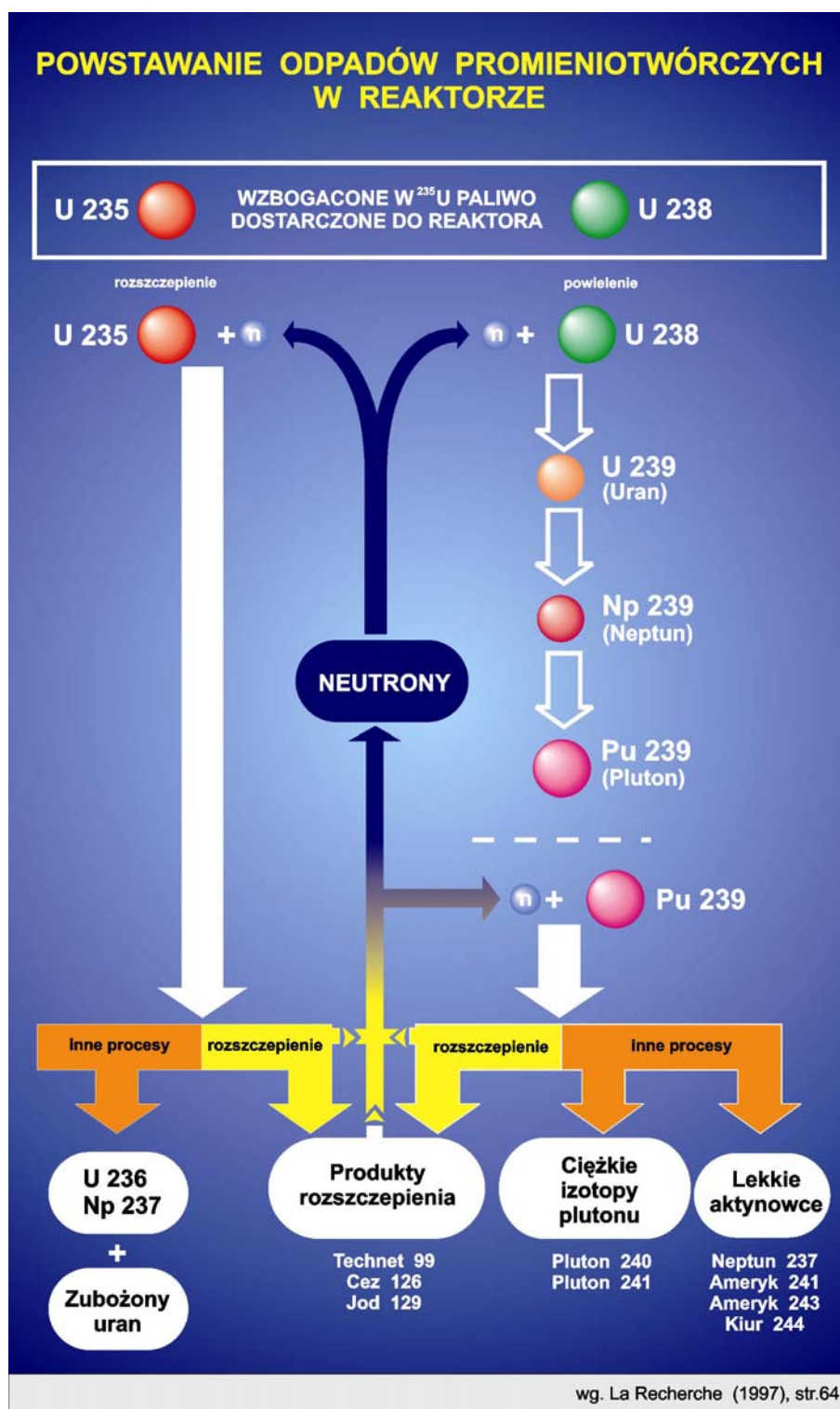
- 35 kg fragmentów rozszczepienia, w tym
 - 20,2 kg z rozszczepienia ^{235}U
 - 11,3 kg z rozszczepienia ^{239}Pu
 - 1,8 kg z rozszczepienia ^{241}Pu
 - 1,7 kg z rozszczepienia ^{238}U
- 8,9 kg mieszaniny izotopów plutonu,
- 4,6 kg ^{236}U ,
- 0,5 kg ^{237}Np ,
- 0,12 kg ^{241}Am
- 0,04 kg ^{244}Cm .

Ocenia się, że w reaktorze typu PWR o mocy elektrycznej 1000 MWe, łączna aktywność nuklidów promieniotwórczych powstałych w ciągu roku wynosi $3,8 \cdot 10^{20}$ Bq². Rys. 9.2 pokazuje zanik w czasie względnej *radiotoksyczności* wypalonego paliwa. Abstrahując na moment od ścisłej definicji radiotoksyczności, tę podamy w tym paragrafie nieco dalej, rysunek pokazuje, że aby osiągnąć sytuację z jaką spotykamy się w środowisku, a więc

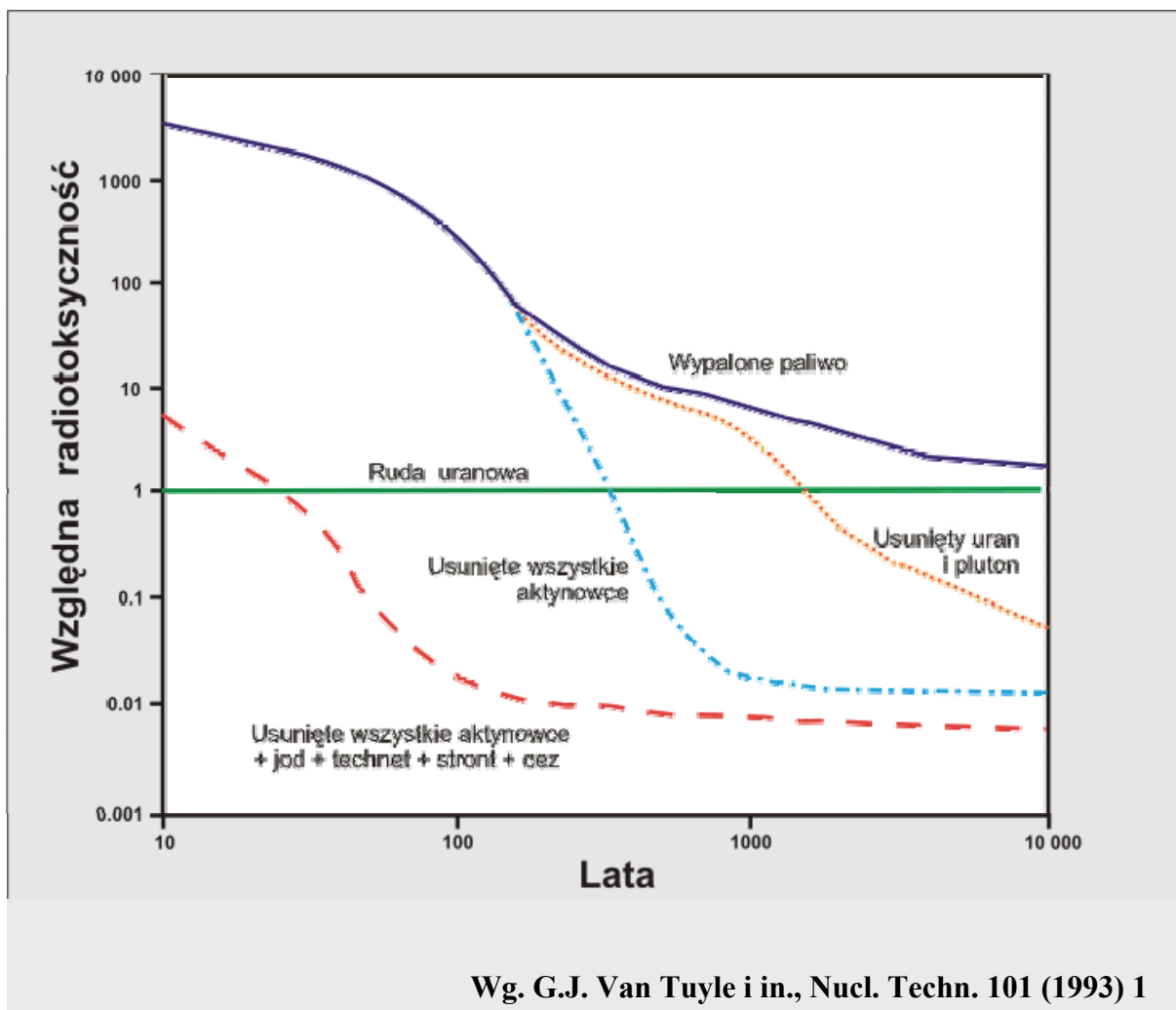
¹ Przykład ten został podany przez B.L.Cohena z Uniwersytetu w Pittsburgu w Sci. Amer. 336 No.6 (1977) 31 i wykorzystany również w monografii A.Hryniewicz, *Energia. Wyzwanie XXI wieku*, Wyd. UJ, Krakow (2002)

² 1 Bq oznacza 1 rozpad na sekundę

poziom radiotoksyczności rudy uranowej, potrzeba okresu znacznie dłuższego niż 10000 lat. Nic więc dziwnego, że problem postępowania z wypalonym paliwem jest jednym z kluczowych zagadnień w energetyce jądrowej, również z punktu widzenia jej społecznego odbioru.



Rys. 9.1 Powstawanie nuklidów promieniotwórczych w paliwie w trakcie pracy reaktora



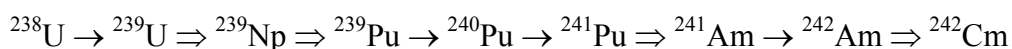
Rys. 9.2 Zanik względnej radiotoksyczności wypalonego paliwa w czasie. Wykres pokazuje także, jak ekstrakcja różnych grup pierwiastków promieniotwórczych z tego paliwa zmienia długożyciowość odpadu.

Na skład izotopowy wypalonego paliwa wpływa szereg czynników. Przede wszystkim należy uświadomić sobie, że skład ten nie zmienia się liniowo ani z czasem wypalania, ani z wytworzoną energią, lecz zmienia się od reaktora do reaktora i możemy więc mówić jedynie o pewnych cechach charakterystycznych dla wypalonego paliwa. W paliwie tym spotykamy ponad 100 izotopów o okresie połowicznego zaniku poniżej 30 minut, 45 izotopów o okresie dłuższym od 30 min ale krótszym od 1 dnia, 14 o okresie zawartym pomiędzy jednym a czternastoma dniami, wreszcie 11 nuklidów (Tabela 9.1) o okresie połowicznego zaniku dłuższym od 10 lat³. Dla niektórych z nich podaliśmy także masę wytwarzanego nuklidu w typowym reaktorze PWR o mocy elektrycznej 1 GWe w trakcie roku pracy.

Przypomnijmy, że w wypadku typowej elektrowni jądrowej, paliwem jest uran o wzbogaceniu 3-4% w ^{235}U . Rozszczepienie tego jądra prowadzi do powstania takich izotopów jak ^{90}Sr , ^{137}Cs i ^{131}I , podczas gdy transuranowce są wynikiem wychwyty neutronów przez izotop ^{238}U . Z kolei takie nuklidy promieniotwórcze jak izotopy neptunu, plutonu, czy

³ A.Hryniewicz, *Energia. Wyzwanie XXI wieku*, Wyd. UJ, Kraków (2002)

ameryku są wynikiem (często kilkustopniowej) aktywacji uranu w drodze reakcji (n,γ) i rozpadów. Jedną z możliwych dróg pokazujemy niżej:



W pokazanym łańcuchu strzałki pojedyncze oznaczają reakcje (n,γ), podwójne zaś - rozpady beta (β⁻).

Tab. 9.1 Nuklidy promieniotwórcze o okresie połowicznego zaniku dłuższym od 10 lat, znajdujące się w wypalonym paliwie ze wzbogaconego uranu.

Liczba atomowa Z	Nuklid	Okres połowicznego zaniku [lata]	Masa [kg] w PWR/1 GWe/rok ⁴	Współczynnik dawki [μSv/Bq] ⁵		Radiotoksyczność [Sv/kg] ⁶
				Spożycie	Inhalacja	
36	⁸⁵ Kr	10,76				
37	⁸⁷ Rb	4,75·10 ¹⁰		1·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴	
38	⁹⁰ Sr	29	13,4	3·10 ⁻²	4·10 ⁻²	
40	⁹³ Zr	1,53·10 ⁶	23,2	1·10 ⁻³	1·10 ⁻²	
43	⁹⁹ Tc	2,1·10 ⁵	24,7	6·10 ⁻⁴	1·10 ⁻³	4,9·10 ²
46	¹⁰⁷ Pd	6,5·10 ⁶	7,3			
50	¹²⁶ Sn	Ok. 10 ⁵	1,0			
53	¹²⁹ I	1,6·10 ⁷	5,8	1·10 ⁻¹	2·10 ⁻²	0,7·10 ³
55	¹³⁵ Cs ¹³⁷ Cs	2,0·10 ⁶ 30,1	9,4 31,8	2·10 ⁻³ 1·10 ⁻²	3·10 ⁻³ 1·10 ⁻²	0,8·10 ²
62	¹⁵¹ Sm	93				
92	²³⁴ U ²³⁵ U ²³⁶ U ²³⁸ U	2,5·10 ⁵ 7,1·10 ⁸ 2,34·10 ⁷ 4,47·10 ⁹		5·10 ⁻² 5·10 ⁻²	3 3	
93	²³⁷ Np	2,1·10 ⁶	14,5	1·10 ⁻¹	20	0,3·10 ⁴
94	²³⁸ Pu ²³⁹ Pu ²⁴⁰ Pu ²⁴¹ Pu ²⁴² Pu	87,7 24110 6564 14,35 3,8·10 ⁵	4,5 166,0 76,7 25,4 15,5	3·10 ⁻¹ 3·10 ⁻¹ 5·10 ⁻³	50 50 9·10 ⁻¹	1,4·10 ⁸ 0,6·10 ⁶ 2,1·10 ⁶
95	²⁴¹ Am ²⁴³ Am	432,2 7370	16,6 3,0	2·10 ⁻¹	40	0,3·10 ⁸ 1,5·10 ⁶
96	²⁴⁴ Cm ²⁴⁵ Cm	18,1 8500	0,6			0,5·10 ⁹

⁴ M.Suffczyński, Postępy Fizyki 45 (1994) 277

⁵ C.R.Hill, R.S.Pease, w *Nuclear Energy. Promise or Peril?*, World Scientific, Singapore (1999), 12

⁶ GSI-Nachrichten 2/99, str. 15 (1999)

Każdemu z izotopów promieniotwórczych można przypisać tzw. *radiotoksyczność*. Ponieważ działanie danego pierwiastka promieniotwórczego może zależeć od tego, czy dostał się on do organizmu drogą pokarmową, czy przez inhalację, w obu wypadkach podaje się wartości równoważnika dawki na jednostkę aktywności, a więc np. $\mu\text{Sv/Bq}$ (patrz Tab. 9.1) dla człowieka dorosłego do 70 roku życia⁷. Tak zdefiniowana radiotoksyczność lub *współczynnik dawki*, jak się czasami ten parametr nazywa, nosi niewątpliwie znamię arbitralności, niemniej jednak porównanie współczynników dla różnych izotopów daje dobry pogląd na możliwy biologiczny efekt działania danych izotopów jako wewnętrznych emiterów promieniowania. Jednocześnie warto zauważyć, że radiotoksyczność można także zdefiniować jak dawkę równoważną na jednostkę masy danego izotopu. W takim wypadku wyrażamy ją np. w Sv/kg . Wartość tak zdefiniowanej toksyczności podajemy w ostatniej kolumnie Tabeli 9.1. Radiotoksyczność definiuje się także jako ilość powietrza lub wody, w której stężenie danego izotopu osiąga maksymalną dopuszczalną wartość (oczywiście inna w powietrzu i inną w wodzie pitnej). Wielkość tę można odnieść np. do ilości wyprodukowanej energii elektrycznej. Tego rodzaju definicja jest bliska tej, którą posługujemy się w ocenie zagrożenia toksycznego w innych odpadach, np. powstałych w wyniku spalania węgla. Bez względu jednak na definicję ogólne wnioski płynące z analizy czasowego zachowania się radiotoksyczności są podobne: osiągnięcie radiotoksyczności uranu w glebie wymaga dziesiątków, a nawet setek tysięcy lat.

Ze względu na wagę społeczną tematu odpadów jądrowych, ale także naszą naturalną ciekawość warto też zastanowić się, jak wygląda bilans energii produkowanej przez energetykę jądrową w porównaniu z energią jądrową wyzwalaną w toku rozpadu izotopów promieniotwórczych znajdujących się w glebie.

Energia powstała z grama izotopu, którego energia rozpadu wynosi ε , dana jest przez

$$E = \frac{N_{Av}}{A} \cdot \varepsilon, \quad (9.1)$$

gdzie N_{Av} oznacza liczbę Avogadro, a A – liczbę masową rozpatrywanego nuklidu. Podstawowymi pierwiastkami promieniotwórczymi, które nas interesują są: ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U i ^{238}U . Ich zawartość w 1 tonie gleby wynosi odpowiednio 0,88, 3,29, 0,01 oraz 1,35 g. Aby obliczyć wkłady od np. ^{232}Th , czy obu izotopów uranu należy wziąć pod uwagę energię całych szeregów promieniotwórczych. W rezultacie średnia energia zawarta w 1 tonie gleby kształtuje się jak w Tabeli 9.2⁸.

Podaną w Tabeli 9.2 energię należy porównać z energią rozpadów promieniotwórczych fragmentów rozszczepienia. Przeprowadzona przez Chwaszczewskiego analiza pokazuje, że dla paliwa o początkowym wzbogaceniu 3,5% i wielkości wypalenia 30 GWdni ($2,59 \cdot 10^6$ GJ) na tonę uranu oraz przy trzyletniej kampanii paliwowej reaktora wodnego wykorzystuje on 31 kg uranu, a energia aktynowców, będących głównym źródłem energii wypalonego paliwa wynosi 2,01 MeV/rozszczeplenie. Energia fragmentów rozszczepienia wynosi zaś 0,1 MeV/rozszczeplenie. W Tab. 9.3 przedstawiamy bilans energii w odniesieniu do 1 tony uranu.

⁷ ICRP (1996); pojęcie dawki, równoważnika dawki oraz jednostki *siwert* (*Sv*) podamy w rozdziale poświęconym podstawowym wielkościom dozymetrycznym. 1 Bq, to 1 rozpad promieniotwórczy/s

⁸ S.Chwaszczewski, inf. prywatna

Energię tę można porównać z energią spalanego węgla wynoszącą ok. 29 GJ/t i oleju, wynoszącą 42 GJ/t.

Tab. 9.2 Energia rozpadów promieniotwórczych zachodzących w glebie

Izotop	Zawartość w 1 t gleby [g]	E/atom [MeV]	Energia rozpadu [GJ/t]
⁴⁰ K	0,88	1,459	2,82
²³² Th	3,29	40,7	55,7
²³⁵ U	0,01	44,33	0,182
²³⁸ U	1,35	48,7	26,66
RAZEM			85,36

Tab. 9.3 Bilans energii w odniesieniu do 1 tony paliwa o wzbogaceniu 3,5%, z którego wyprodukowano 30 GWdni ($2,59 \cdot 10^6$ GJ) energii cieplnej, po trzyletnim cyklu paliwowym w reaktorze wodnym

Masa uranu załadowanego do reaktora [kg]	1000
Początkowe wzbogacenie [%]	3,5
Masa aktynowców w wypalonym paliwie [kg]	969
Energia rozpadu [GJ]	$1,97 \cdot 10^{10}$
Energia cieplna z rozszczepień [GJ]	$2,59 \cdot 10^6$
Wyprodukowana energia elektryczna	230 GWh = $0,828 \cdot 10^6$ GJ
Energia rozpadu 31 kg uranu o wzbogaceniu 3,5% [GJ]	$5,84 \cdot 10^5$
Energia rozpadu transuranowców [GJ]	$2,65 \cdot 10^4$
Energia rozpadu produktów rozszczepienia [GJ]	$1,33 \cdot 10^3$

Jak widać, nie dość, że potrafimy z uranu wytworzyć 230 GWh energii elektrycznej, ale zmniejszamy bilans promieniotwórczości środowiska. 31 kg uranu w glebie wnosi bowiem do środowiska energię o ok. 5% większą niż łączna energia produktów rozszczepienia i pozostałych w wypalonym paliwie transuranowców. Rozumowanie to nie jest jednak w pełni poprawne, gdyż o ile pierwotna energia ma postać rozproszoną, wypalone paliwo stanowi mniej lub bardziej jednorodny produkt, jego wkład do promieniotwórczości środowiska ma ściśle lokalny charakter, aktywność i radiotoksyczność zaś znakomicie przewyższa aktywność uranu w skorupie ziemskiej (patrz rys. 9.2). Niemniej jednak należy tu brać pod uwagę następujące elementy: po pierwsze aktywność zużytego paliwa zanika w czasie, a po drugie odpady promieniotwórcze wszelkiego rodzaju odizolowuje się od człowieka, podczas gdy z promieniotwórczością naturalną, w tym tą zawartą w wodzie pitnej ma się do czynienia na co dzień, czy się tego chce, czy nie.

9.2. Tworzenie się odpadów promieniotwórczych i ich klasyfikacja

Program zbrojeń atomowych, energetyka jądrowa, a także szerokie zastosowanie źródeł promieniotwórczych w nauce, przemyśle i medycynie zaowocowało i wciąż owocuje powstawaniem dużej ilości odpadów promieniotwórczych. W wypadku energetyki jądrowej odpady promieniotwórcze powstają na kolejnych etapach technologicznych:

- podczas przerobu rudy uranowej, po procesie mielenia, w którym należy z rudy wyekstrahować minimalne zawartości uranu, pozostają promieniotwórcze hałdy w ilościach porównywalnych z ilością wydobytej rudy;
- proces wzbogacania uranu w ^{235}U dla celów pokojowych lub militarnych skutkuje powstaniem wciąż promieniotwórczego, zubożonego uranu, stanowiącego odpad w procesie wzbogacania uranu. Nota bene zubożony uran można wykorzystać w różnych celach, zarówno pokojowych (balasty do łodzi), jak militarnych (amunicja), niemniej jednak z radiacyjnego punktu widzenia jest on odpadem promieniotwórczym;
- wypalone paliwo w reaktorach stanowi specyficzną kategorię wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych, gdyż dysponując odpowiednią technologią można, jak mówiliśmy, wyekstrahować zeń rozszczepialne izotopy ^{235}U i ^{239}Pu , które można użyć do wytworzenia świeżego paliwa lub, jak w wypadku plutonu, do tworzenia broni jądrowej. Z tego względu jedni (np. NRC - National Regulatory Commission w USA) zaliczają wypalone paliwo do kategorii odpadów, inni (np. DOE - Departament Energii USA) – nie;
- proces przerobu wypalonego paliwa pozostawia zarówno odpady wysokoaktywne, jak materiały zawierające szereg długożyciowych transuranowców. Rys.9.2 pokazuje, że wydobyte z wypalonego paliwa uranu, plutonu i transuranowców skraca zanik aktywności pozostałości z wypalonego paliwa. Usunięcie dodatkowo wszystkich aktywnowców powodowałoby, że już po około 300 latach aktywność powstałego odpadu promieniotwórczego osiągałaby poziom aktywności uranu w glebie;
- przemysł zbrojeniowy pozostawia materiały zawierające długożyciowe transuranowce.

W nomenklaturze anglosaskiej przyjęło się klasyfikować tego typu odpady wg następujących kategorii:

- odpady wysokoaktywne HLW (od *High-Level Waste*), do których zaliczamy przerobione wypalone paliwo z reaktorów jądrowych i niektórych procedur podczas produkcji broni jądrowej. Odpady tego rodzaju zawierają silnie promieniotwórcze, krótkożyciowe fragmenty rozszczepienia, niebezpieczne związki chemiczne i toksyczne metale ciężkie. Niektóre z tych odpadów mogą mieć postać ciekłą, jak w wypadku przerobu wypalonego paliwa;
- Odpady niskoaktywne LLW (od *Low-Level Waste*), powstające w większości wymienionych wyżej procesów, a także w wyniku korzystania ze źródeł promieniotwórczych przez naukę, przemysł i medycynę;
- Odpady transuranowe TRU (od *TRansUranium*), których dostarczają fabryki przerobu paliwa oraz nuklearny przemysł zbrojeniowy;
- Stosowane jest także pojęcie odpadów o pośredniej aktywności ILW (od *Intermediate Level Waste*), jednak definicja tego pojęcia jest dość niekonkretna. W Wielkiej Brytanii za takie odpady uważa się materiały o aktywności właściwej⁹ β i γ większej od $1,2 \cdot 10^7$ Bq/kg oraz aktywności α ponad $4 \cdot 10^6$ Bq/kg;
- W Wielkiej Brytanii funkcjonuje także pojęcie odpadów o bardzo niskiej aktywności VLLW (od *Very Low Level Waste*), do których zalicza się odpady o aktywności właściwej α , β i γ mniejszej od 400 Bq/kg.

O ile ilość odpadów wysokoaktywnych (HLW) podaje się na ogół w metrach sześciennych, w wypadku zużytych prętów paliwowych charakteryzuje się je często przez masę zawartych w nich aktywnowców (głównie – uranu i plutonu), mierzoną tonami metrycznymi ciężkiego

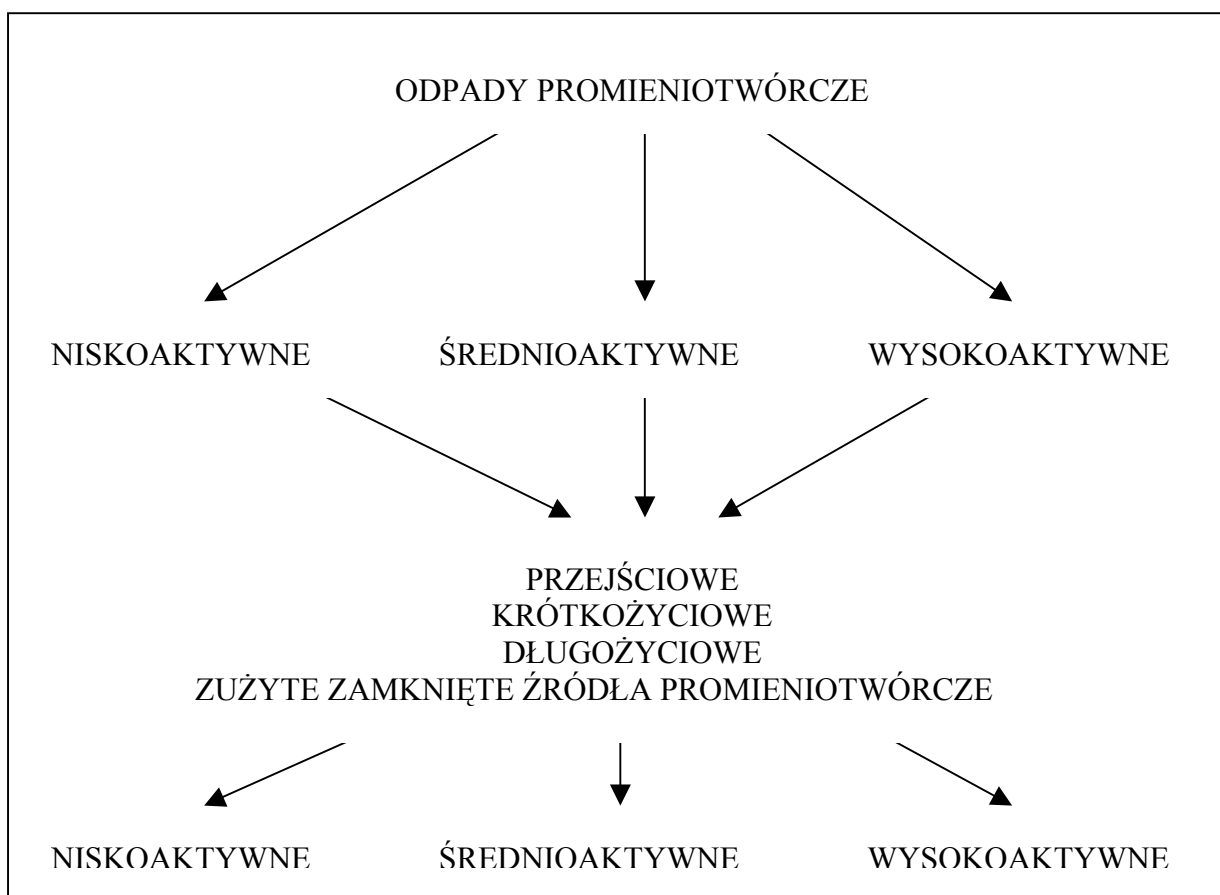
⁹ Aktywność na jednostkę masy

metal MTHM (od ang. *Metric Tons of Heavy Metals*). Ilość odpadów promieniotwórczych można także mierzyć aktywnością, wyrażoną w kiurach¹⁰ lub bekerelach. Tabela 9.4 podaje ilości wypalonego paliwa przewidywane w USA przez Departament Energii¹¹ na podstawie danych z 1995 r.

Tab. 9.4 Przewidywana ilość wypalonego paliwa na podstawie danych z końca 1995 r.

Rok	Masa (MTHM)	Aktywność [MCi]
1995	32 200	30 200
2000	42 300	32 600
2010	61 800	39 800
2020	77 100	34 700

Klasyfikacja odpadów promieniotwórczych przyjęta¹² w Polsce pokazana jest na rys. 9.3.



Rys. 9.3 Podział odpadów promieniotwórczych stosowany w Polsce

¹⁰ 1 kiur, jednostka historyczna, wynosi $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$; $1 \text{ Bq} = 1$ rozpad na sekundę

¹¹ Problemom odpadów promieniotwórczych został poświęcony niemal cały numer *Physics Today* z czerwca 1997 r. W niniejszym rozdziale obficie korzystamy z tego materiału.

¹² Rozporządzenie Rady Ministrów z dn. 3 grudnia 2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz.U. nr 230, poz. 1925 z roku 2002)

Podczas, gdy ogólna klasyfikacja nie różni się w zasadzie od podawanej wyżej, a więc podziału na odpady nisko-, średnio- i wysokoaktywne, formalny podział uwzględnia okresy połowicznego zaniku oraz zużyte, zamknięte źródła promieniotwórcze.

Odpady wysokoaktywne – niezależnie od aktywności, to głównie odpady o dużej zawartości uranu i w tej grupie znajdzie się więc wypalone paliwo jądrowe np. z pierwszego w Polsce reaktora EWA i pracującego obecnie reaktora MARIA, oba w Świerku k. Otwocka. Patrząc na problem w skali Świata można ocenić, że obecnie mamy nagromadzonych około 200 000 ton wypalonego paliwa z cywilnej energetyki jądrowej. W tej ilości znajdujemy około 4 000 ton nuklidów rozszczepialnych. W arsenałach broni jądrowej znajduje się kolejne 1 000 ton lub więcej.

Do typowych odpadów promieniotwórczych zaliczamy

- Filtry wody w reaktorach jądrowych i zużyte wymienniki jonowe (jonity);
- Materiały i narzędzia używane w rutynowej pracy przy instalacjach jądrowych, jak np. zawory, części pomp, fragmenty rurociągów;
- Wyposażenie pracowni naukowych;
- Pokrowce na buty, fartuchy, ściereczki, ręczniki papierowe itp., używane wszędzie tam, gdzie człowiek styka się z materiałami promieniotwórczymi;
- Filtry używane do testów zanieczyszczenia powietrza materiałami promieniotwórczymi, a także ciecze używane czasem do rozpuszczania tych filtrów;
- Pojemniki, ubrania, papier, wata, lignina, płyny i wyposażenie, które miały kontakt z materiałami promieniotwórczymi stosowanymi w medycynie;
- Materiały biologiczne używane w badaniach naukowych w różnych działach medycyny i farmacji.

9.3 Postępowanie z odpadami promieniotwórczymi spoza przemysłu jądrowego

9.3.1 Odpady nisko- i średnioaktywne

Jest truizmem, że gospodarka odpadami promieniotwórczymi wszelkiego rodzaju musi być podporządkowana szczegółowym regulacjom prawnym. W Polsce sprawę tę reguluje Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 3 grudnia 2002 r. Ponadto istnieją ustalone zasady postępowania z odpadami, które określają

- Jak gromadzić i przechowywać odpady stałe i płynne;
- Jak spowodować, aby nie przeniknęły one do środowiska naturalnego;
- Jak je transportować;
- W jaki sposób je bezpiecznie składować.

W gruncie rzeczy idea przechowywania odpadów jest bardzo prosta i sprowadza się do spełnienia trzech warunków: należy maksymalnie zmniejszyć objętość odpadów, zapewnić im odporność na działanie wody i rozpraszanie oraz przechować w sposób nie zagrażający środowisku. Dla spełnienia tych prostych warunków stosuje się jednak system wielu barier zabezpieczających.

Na *system barier* zapobiegających rozprzestrzenianiu się substancji promieniotwórczych oraz pochłanianiających promieniowanie składają się:

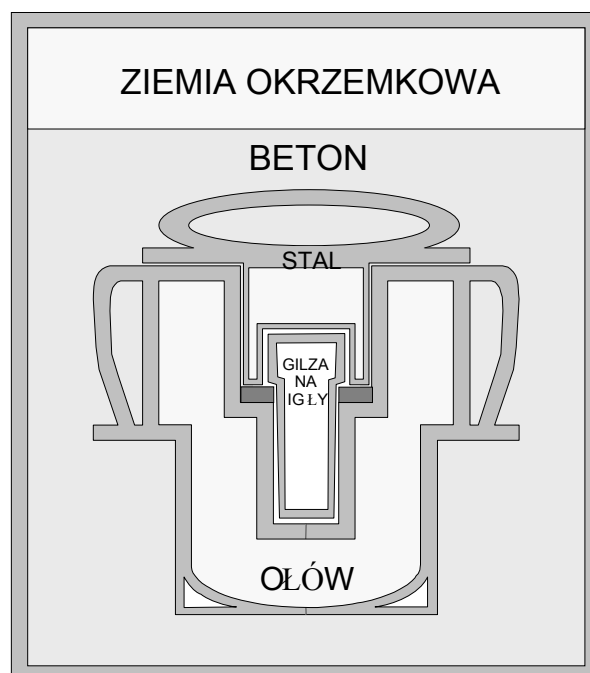
- *Tworzenie trudno rozpuszczalnych związków chemicznych* (koncentratów) wiążących izotopy promieniotwórcze;
- *Materiał wiążący* (spoiwo), który służy do zestalania odpadów, co przeciwdziała rozsypaniu, rozproszaniu, rozpyleniu i wymywaniu substancji promieniotwórczych. Spoiwem może być beton (działa jednocześnie jako osłona biologiczna), asfalt, polimery organiczne i masy ceramiczne;
- *Opakowanie odpadów*, zabezpieczające je przed uszkodzeniami mechanicznymi, działaniem czynników atmosferycznych i kontaktem z wodą. Stałe lub zestalone odpady zamykane są na ogół w pojemnikach metalowych lub betonowych i w tej postaci są przewożone, magazynowane i składowane;
- *Betonowa konstrukcja składowiska*, która stanowi dodatkowe zabezpieczenie odpadów przed działaniem czynników atmosferycznych, zapobiega korozji opakowań oraz migracji substancji promieniotwórczych z miejsca ich składowania;
- *Struktura geologiczna terenu*. Ta bariera decyduje o wyborze miejsca na lokalizację składowiska. Teren składowiska musi być m.in. asejsmiczny, niezatapialny (np. w czasie powodzi), mało przydatny gospodarczo i oddalony od skupisk ludzkich. Odpowiednie warunki geologiczne i hydrogeologiczne mają zapobiec rozprzestrzenianiu się radionuklidów w glebie i przenikaniu ich do wód gruntowych i powierzchniowych. Np. poziom wód gruntowych powinien być o kilkanaście metrów niższy od poziomu składowiska, a skład podłoża musi przeciwdziałać migracji radionuklidów;
- *Impregnująca warstwa bitumiczna* pokrywająca wierzchnią warstwę betonu, która zapobiega m.in. przenikaniu wód opadowych do strefy składowania odpadów, uniemożliwia korozję opakowań oraz wymywanie substancji promieniotwórczych.



Rys. 9.4 Komora z pojemnikami (hobokami) oraz przekrój pojemnika zawierającego metaliczne odpady promieniotwórcze

Na rysunkach 9.4 i 9.5 pokazujemy przykłady będących w użyciu pojemników z odpadami promieniotwórczymi.

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



Rys.9.5 Przekrój przez pojemnik na zużyte igły radowe. Całość jest zamknięta w pokrywie stalowej o grubości 5 mm. Taki pojemnik waży ok. 100 kg.

9.3.2 Wybór miejsca na składowisko odpadów promieniotwórczych

Omówimy tu krótko postępowanie związane z wyborem miejsca na składowisko niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Niezależnie od przepisów bezpieczeństwa, które istnieją we wszystkich państwach, mamy tu do czynienia z logicznym ciągiem zdarzeń, który każe:

- określić kryteria, którym powinny odpowiadać miejsca na składowiska;
- wyjaśnić ich stan prawny;
- szczegółowo zbadać wytypowane miejsca;
- wybrać jedno z nich.

Podstawowym kryterium wyboru są warunki geologiczne i hydrogeologiczne terenu. Niemniej jednak należy brać pod uwagę szereg innych warunków o ważnym znaczeniu społecznym. Należą do nich:

- ochrona ludności przed uwolnieniem się odpadów promieniotwórczych;
- zabezpieczenie ludzi przed przypadkowym wejściem na teren składowiska;
- zapewnienie bezpieczeństwa ludności *podczas* działania składowiska;

- zapewnienie bezpieczeństwa samego składowiska i okolicy również *po* jego zamknięciu.

Powyższe warunki oznaczają więc m.in., że przy wyborze miejsca należy uwzględniać choćby takie czynniki, jak przyrost naturalny w danej okolicy, czy też stan świadomości i nastroje lokalnej ludności. Mieszkańcy muszą wiedzieć, że składowisko jest dla nich bezpieczne, co nie zmienia faktu, że mogą domagać się zapewnienia szczególnych warunków finansowych gminie, na terenie której ma znaleźć się składowisko. Bierze się to choćby stąd, że obecność składowiska może obniżyć wartość terenu i zabudowań nań się znajdujących, a ludność, w obawie o swoje zdrowie, będzie domagała się lepszej opieki medycznej, sprawniejszego systemu ratowniczego (obejmującego wspólne działania miejscowych władz, policji, straży pożarnych, zaplecza medycznego oraz Terenowej Obrony Cywilnej), czy też lepszych dróg dojazdowych itp. Obniżona wartość terenu może z kolei powodować, że do kasy gminnej będą wpływały mniejsze podatki, co gmina będzie chciała sobie niewątpliwie powetować poprzez zapewnienie stosownych opłat od operatorów składowiska.

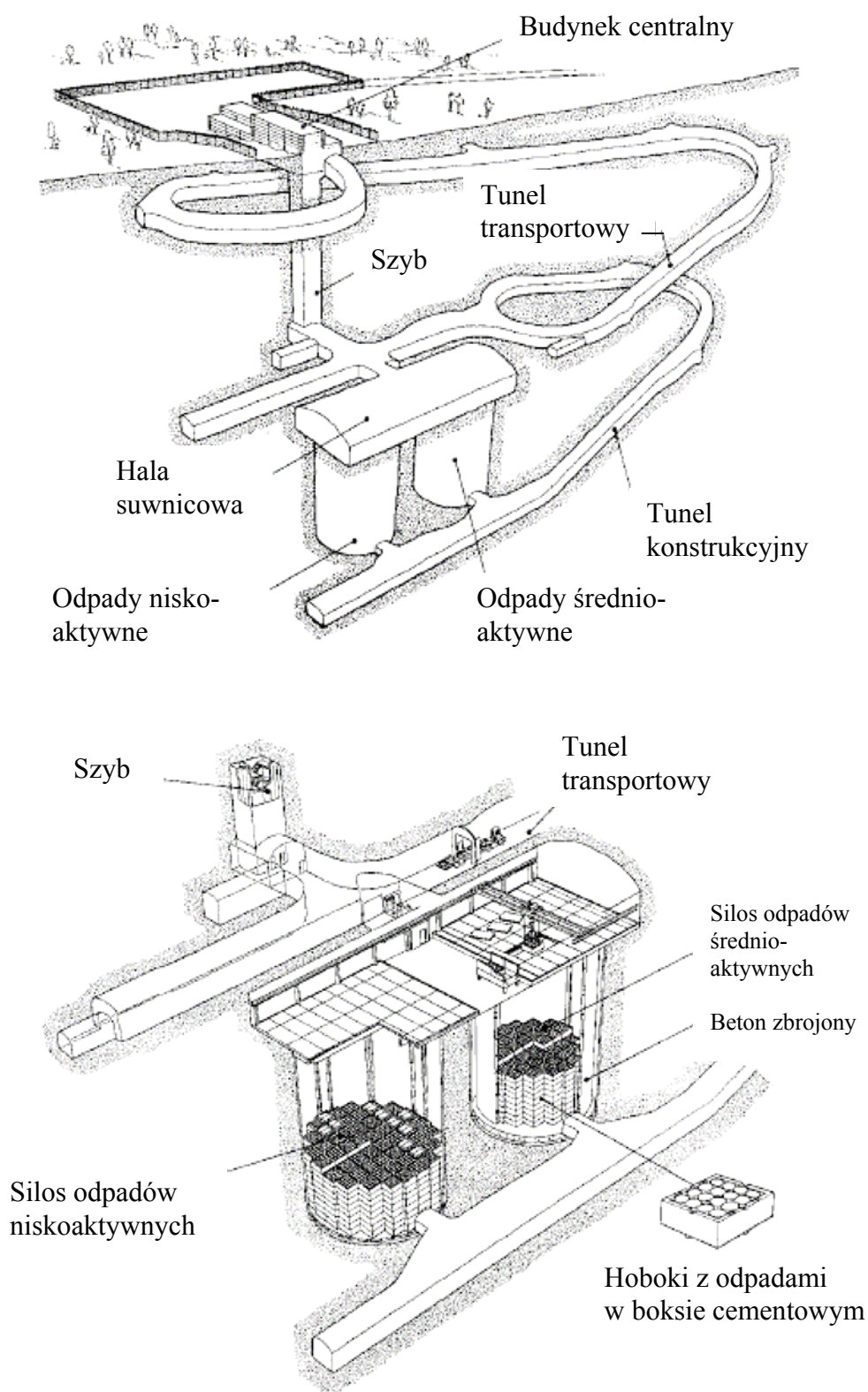
Jak widać, z wyborem miejsca na składowisko wiążą się dość trudne sprawy, których rozwiązanie wymaga dobrej woli i zrozumienia obu stron. W szczególności, ludność terenu, na którym planuje się zainstalować składowisko musi mieć pewność, że w każdej chwili będzie mogła skontrolować prawidłowość działania składowiska poprzez wybrane przez siebie służby monitorujące środowisko naturalne, i że zawsze będzie traktowana jak równorzędny partner. Ta sytuacja nakłada na operatorów składowiska szczególną odpowiedzialność i wymaga od nich umiejętności rzeczowej i życzliwej rozmowy z reprezentantami lokalnej społeczności. Z tego też względu edukacja ludności od najwcześniejszych lat jest sprawą pierwszorzędnej wagi. Odpowiedzialni za pracę składowiska muszą więc na terenie swego działania prowadzić odpowiednią edukację dotyczącą promieniowania jonizującego.

Przykład podziemnego składowiska odpadów nisko- i średnioaktywnych, zbudowanego w Olkiluoto w Finlandii pokazany jest na rys. 9.6.

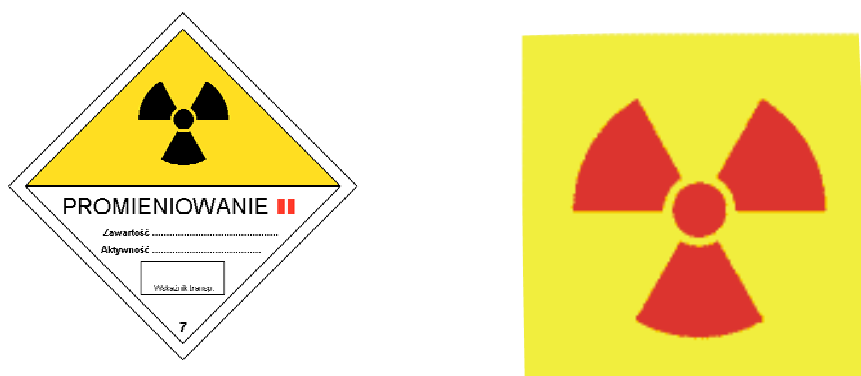
9.4.3 Transport odpadów promieniotwórczych

Odpady promieniotwórcze przewozi się pojazdem specjalnie oznakowanym. Przewożone pojemniki na odpady muszą być trwale oznakowane zgodnie ze stopniem zagrożenia. Zarówno pojazd, jak i pojemniki muszą spełniać międzynarodowe warunki bezpieczeństwa przewidziane Prawem Atomowym.

Międzynarodowym symbolem informującym o przewożeniu materiału promieniotwórczego jest nalepka z „koniczynką” czerwoną lub czarną na żółtym lub białym tle. Dla odpadów o większej aktywności na nalepkach (rys. 9.7) pojawiają się pionowe czerwone kreski (których liczba - od jednej do trzech – zwiększa się wraz ze wzrostem aktywności) oraz dodatkowa informacja o zawartości pojemnika i aktywności przewożonej w nim substancji. Przewożone odpady są starannie oznaczone i ewidencjonowane przed wysłaniem ich w drogę. Dokumentacja wszystkich odpadów jest następnie przechowywana przez cały okres ich składowania.



Rys. 9.6 Schemat podziemnego składowiska odpadów VLJ w Olkiluoto w Finlandii



Rys. 9.7 Typowe nalepki informacyjne i ostrzegawcze

9.3.4 Unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych w Polsce

Unieszkodliwianiem odpadów promieniotwórczych w Polsce zajmuje się Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych (ZUOP) w Świerku, który zapewnia

- Odbiór;
- Transport;
- okresowe magazynowanie;
- przetwarzanie;
- zestalanie;
- składowanie materiałów promieniotwórczych.

Przeciętne roczne ilości odpadów przyjmowanych i unieszkodliwianych w Świerku to 150 m³ niskoaktywnych odpadów ciekłych i 100 m³ stałych, 0,5 m³ średnioaktywnych odpadów ciekłych i 2 m³ stałych oraz ok. 1000 sztuk zużytych źródeł promieniotwórczych.

Każdy etap postępowania z odpadami promieniotwórczymi regulowany jest przez przepisy prawa¹³, a w szczególności:

- zasady zaliczania odpadów do odpadów promieniotwórczych;
- kwalifikowanie;
- ewidencjonowanie;
- unieszkodliwianie;
- przechowywanie;
- składowanie odpadów.

Ciekle niskoaktywne odpady promieniotwórcze są wprawdzie magazynowane w zbiornikach retencyjnych i podlegają przerobowi po zmniejszeniu ich aktywności w wyniku rozpadu radionuklidów krótkożyciowych. Przerób polega na dodaniu do ścieków substancji pozwalających wytrącić z zawiesiny osad, który mając objętość równą zaledwie 1%

¹³ Ustawa „Prawo Atomowe” z dn. 29 listopada 2000 r. (Dz.U. z 2001 r., nr 3, poz.18 z późniejszymi zmianami). Rozporządzenie Rady Ministrów z dn. 3 grudnia 2002 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz.U. z 2003 r, nr 230, poz. 1925 z późniejszymi zmianami).Ustawa „Prawo atomowe” w wersji ujednoliconej uwzględniającej zmiany wynikające z ustawy z dnia 12 marca 2004 r (Dz.U. z 2004 r., nr 70, poz. 632)

początkowej objętości, zawiera większość radionuklidów decydujących (w ponad 99%) o aktywności ścieku. Osad ten - szlam - podlega następnie procesowi zestalania.

Doskonałe rezultaty w procesie unieszkodliwiania niskoaktywnych ciekłych odpadów promieniotwórczych uzyskuje się dzięki zastosowaniu *procesu odwróconej osmozy*, pozwalającego na rozseparowanie cząsteczek o różnych rozmiarach. W trzystopniowej instalacji odwróconej osmozy stopień oczyszczania ścieków wynosi 99,9% przy wydajności rzędu 2 m³/h.

Ciekle ścieki średnioaktywne są zagęszczane (zateżane) w instalacji wyparnej. *Metody wyparne* należą do najskuteczniejszych sposobów oczyszczania tych ścieków. Instalacja pozwala na oczyszczanie i zagęszczanie, a więc także redukcję objętości odpadów. Zestaleniu podlega więc zaledwie 1/30 początkowej objętości ścieków. Aktywność destylatu (cieczy pozostałej po oddzieleniu osadu) może być nawet 100 000 razy (!) mniejsza niż aktywność ścieku wyjściowego. W procesie wyparnym usuwane są również zanieczyszczenia typu chemicznego, jak np. metale ciężkie. Metody wyparne są uważane za szczególnie przyjazne środowisku, gdyż czystość powstających w tym procesie mediów, destylatów, jest porównywalna z czystością wód rzek i jezior kwalifikowanych jako czyste. Destylaty można zatem bezpiecznie wpuszczać do kanalizacji sanitarnej.

Odpady stałe mają z reguły (w 85% przypadków) postać umożliwiającą ich bezpośrednie wkładanie do standardowych pojemników ocynkowanych dwustronnie i zamkniętych pokrywą zabezpieczającą odpady przed kontaktem z otoczeniem (patrz rys. 9.4).

Zestalanie odpadów prowadzi się w drodze:

- asfaltowania;
- betonowania;
- zestalania w żywicy epoksydowej;
- zestalania w żywicy mocznikowo-formaldehidowej (dot. wyłącznie odpadów biologicznych: zwierząt doświadczalnych).

Po przeróbce otrzymuje się rocznie 60 m³ zestalonych odpadów o wadze 90 ton, które zajmują objętość ok. 100 m³. Dodatkowe 40 m³ przypada na materiały wiążące – głównie beton.

9.3.5 Składowanie odpadów promieniotwórczych w Polsce

Odpady promieniotwórcze w Polsce są składowane na terenie działającego od 1961 r. Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych – KSOP - w Róźnie nad Narwią. Składowisko to, zajmujące obszar 3,2 ha, znajduje się w jednym z dawnych fortów wojskowych, wybudowanych przez władze rosyjskie w latach 1905-1908. Największą zaletą samych fortów są ich grube (1,2 ÷ 1,5 m) ściany i stropy betonowe. Zapewniają one pełną osłonność biologiczną ulokowanym w nich odpadom. Wokół zachodniej i południowej granicy Składowiska biegnie sucha fosa o głębokości (2÷6) m, której fragment przedstawiony jest na rys. 9.8.

Wody gruntowe znajdują się pod warstwą gliny o bardzo małej przepuszczalności i warstwą gleby o właściwościach sorpcyjnych na głębokości kilkunastu metrów poniżej składowiska (patrz rys. 9.9). Skład podłoża przeciwdziała skutecznie migracji odpadów, które mogłyby na

skutek nieszczęśliwych wydarzeń przeniknąć do gleby i rozprzestrzeniać się dalej przez wody gruntowe.



Rys. 9.8 Fragment fosy w Krajowym Składowisku Odpadów Promieniotwórczych w Róźnie. Część fosy jest już wypełniona i zamknięta pionową ścianą betonową.

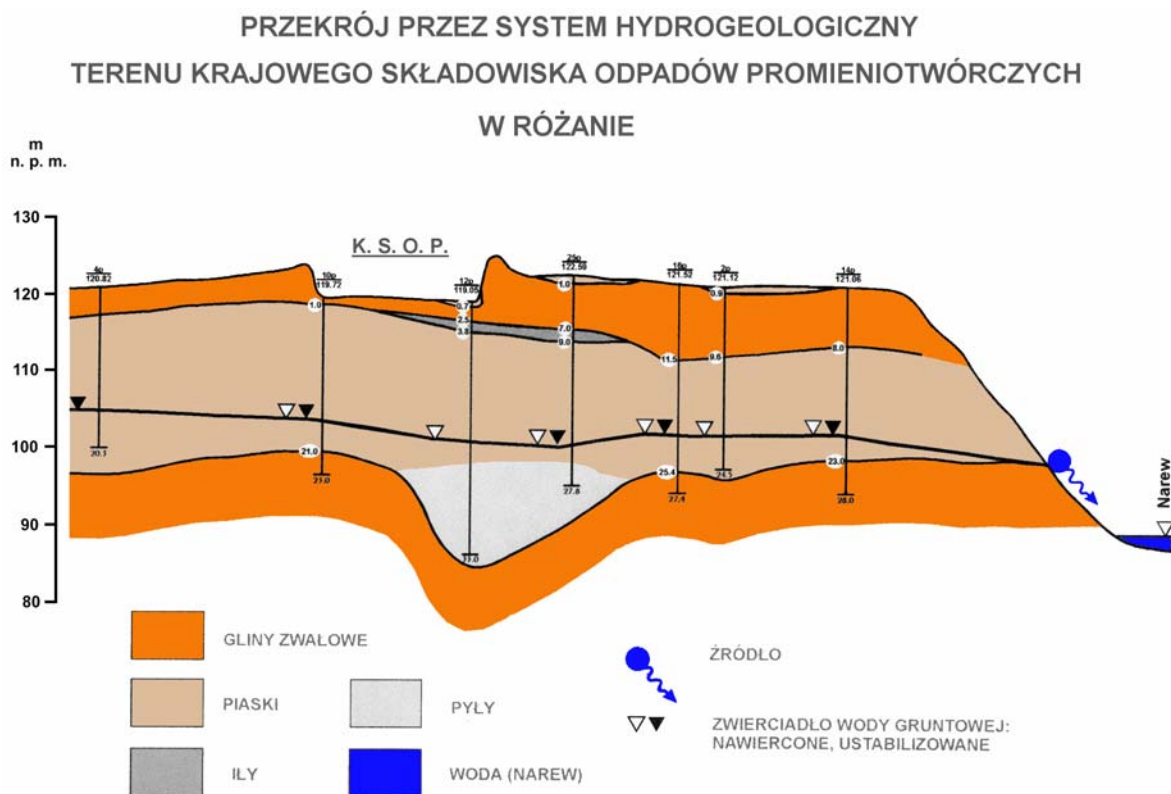
Odpady składa się w budowach betonowych, bunkrach oraz fosie. W tej ostatniej przechowuje się jedynie odpady nie zawierające długożyciowych nuklidów alfa-promieniotwórczych. Dno i zbocza fosy pokryte są 20 cm warstwą betonu.

Długożyciowe odpady alfa-promieniotwórcze składowane są w betonowych budowach fortu, komora po komorze, aż do całkowitego ich wypełnienia. Wypełnioną komorę zamyka się szczelnie lub zamurowuje. Odpady te, przed ostatecznym zamknięciem składowiska w Róźnie, będą przeniesione do składowiska docelowego, tzw. składowiska głębokiego.

Gleba, trawa i zboża z otoczenia składowiska, woda gruntowa z odwiertów kontrolnych (piezometrów) umieszczonych na terenie i w otoczeniu składowiska, woda z Narwi, powietrze atmosferyczne (przy dwóch obiektach mierzone jest stężenie radonu), wreszcie poziom promieniowania gamma na terenie i w otoczeniu składowiska, podlegają regularnej kontroli radiologicznej.

Dla przykładu, rys. 9.10 pokazuje wyniki pomiarów promieniotwórczości beta wód na terenie i w otoczeniu Składowiska w latach 1998-2003 oraz w Górze Kalwarii, gdzie nie ma obiektów stosujących źródła promieniotwórcze. Wyniki pomiarów wskazują jednoznacznie, że istnienie Krajowego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych nie ma niekorzystnego

wpływu na środowisko gminy Różan. Z innych danych wynika ponadto, że gmina ta szczyci się jednym z najniższych wskaźników zapadalności na choroby nowotworowe. Pojemność i warunki radiologiczne Składowiska pozwalają na bezpieczne zapełnianie go odpadami jeszcze przez ok. 15 lat, co jednak już teraz wymusza konieczność szukania nowego miejsca na składowisko.



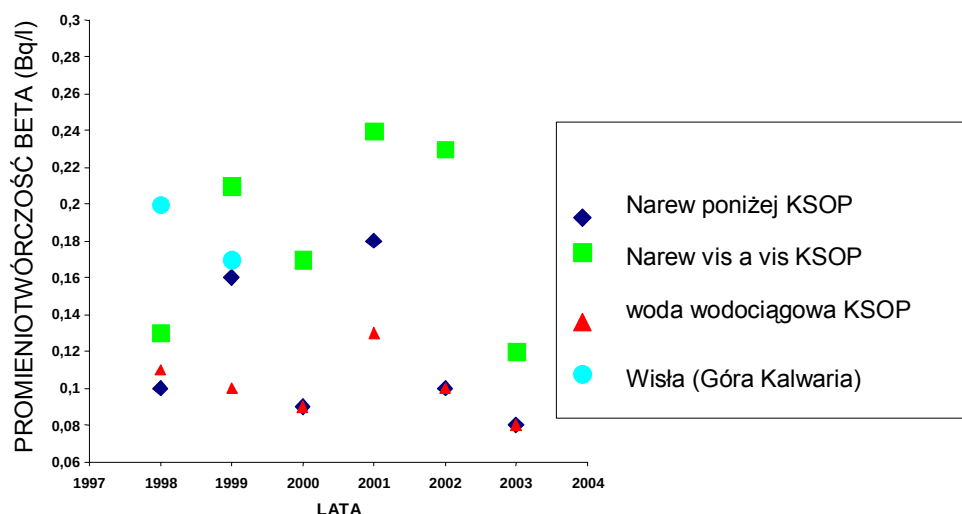
Rys. 9.9 Przekrój przez system hydrologiczno-geologiczny Krajowego Składowiska odpadów w Różanie

Dla zapewnienia maksymalnej obiektywności badań stanu radiologicznego środowiska, prowadzone są one przez jednostki niezależne od Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych, a mianowicie:

- Laboratorium Pomiarów Dozymetrycznych Instytutu Energii Atomowej;
- Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej, powołane do wypełniania funkcji kontrolnych i nadzorczych na terenie całego kraju;
- Państwowy Instytut Geologiczny.

Przed rozpoczęciem składowania odpadów aktywnych trzeba sporządzić raport bezpieczeństwa, podobnie jak dla elektrowni jądowej, opisujący normalny stan pracy,

wszystkie układy i elementy, ich możliwe awarie, błędy ludzkie, zjawiska geologiczne i ich skutki dla zdrowia ludności.



Rys. 9.10 Wyniki badania promieniotwórczości beta wody w latach 1997 - 2004

9.3.6 Ogólne wnioski

W postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi, podobnie jak i we wszelkich działaniach, w których stosujemy promieniowanie jonizujące, przestrzegamy następujących podstawowych zasad:

1. Korzyści społeczeństwa i osób narażonych na promieniowanie muszą przewyższać ewentualne straty związane z jego użyciem;
2. Dawki mają być utrzymywane w granicach rozsądku na możliwie najniższym poziomie;
3. Dawki indywidualne od wszystkich źródeł promieniowania mają być ograniczane, a stopień zagrożenia kontrolowany.

Składowiska odpadów średnio i nisko aktywnych istnieją w wielu krajach. Wszędzie stosowane są podobne bariery technologiczne jak w Polsce. Beton wypełniający hoboki zatrzymuje promieniowanie tak skutecznie, że można pracować z nimi bez dodatkowych osłon. W żadnym kraju nie stwierdzono, aby istniejące składowisko powodowało wzrost zagrożenia radiologicznego, czy wzrost zachorowalności na choroby nowotworowe wśród personelu lub ludności.

Pomimo staranności w doborze procedur i technologii składowania odpadów promieniotwórczych, lokalne społeczności odnoszą się do składowisk różnych odpadów z dużą nieufnością, a nawet strachem. Godząc się na dobrodziejstwa płynące np. z zastosowania metod jądrowych w ochronie zdrowia, z czym związana jest w znacznym stopniu produkcja odpadów, nie udzielają w zasadzie przyzwolenia na składowanie odpadów, utożsamiając ten proces z zagrożeniem zdrowia i życia, szczególnie jeśli składowisko ma być umieszczone w pobliżu własnego miejsca zamieszkania.

Aby ocenić stopień rzeczywistego zagrożenia należy je jednak przedstawić w jakiejś skali dostępnej naszym osądom. Spróbujmy więc zastanowić się nad wpływem procedur postępowania z odpadami promieniotwórczymi na moc dawki w Polsce. W otaczającym nas świecie znajdują się izotopy promieniotwórcze niektórych pierwiastków – uranu U, toru Th, rubidu Rb, potasu K, węgla C czy wodoru H - są to radionuklidy naturalne. Zastanówmy się, jak wiele tych radionuklidów znajduje się w naszym najbliższym otoczeniu. Za przykładem Lorda Marshalla of Goring (Anglia), którego znakomity wykład o odpadach promieniotwórczych dostępny jest na kasecie wideo, wyobraźmy sobie, że jesteśmy właścicielami ogródka o wymiarach 20 m x 20 m. Powierzchniowa warstwa gleby o grubości 1 m waży około 600 t, a w zależności od tego, w której części Polski jesteśmy, zawiera (0,6 – 4,2) kg uranu (U), (0,2 - 6,2) kg toru (Th) i (600 – 16800) kg potasu (K). Zauważmy, że w potasie, którego tu jest bardzo dużo, tylko jeden z trzech jego izotopów ^{40}K jest promieniotwórczy i stanowi jedynie 0,0117% jego masy; na każdą tonę naturalnego potasu przypada więc 117 g izotopu ^{40}K . Oznacza to, że metrowa warstwa gleby zawiera od 0,07 kg do 1,96 kg promieniotwórczego potasu. Dawka od takiej warstwy gleby z naszego ogródka - nazwijmy ją Dawką Ogródkową – w skrócie DOG – pochodzi więc od (1 – 12) kg naturalnych radionuklidów.

W całej Polsce zamieszkuje około 38 milionów osób, więc gdybyśmy zakopali w ogródku naszą „indywidualną”, 1/38 000 000. część odpadów nisko- i średnioaktywnych (jeśli nie liczyć wypalonego paliwa z reaktorów EWA i MARIA, innych w Polsce nie mamy), zdeponowanych w ciągu roku w KSOP-Różan, to przybędzie nam 90 000 kg/38 000 000, a więc około 2,5 g - niewiele w porównaniu z masą naturalnych radionuklidów w naszym ogródku.

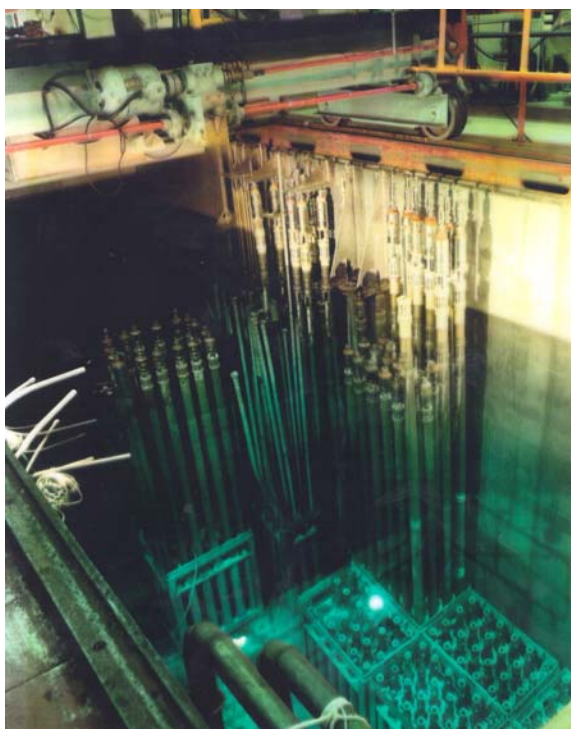
Zakopując w ogródku (metr pod powierzchnią) odpady niskoaktywne na nas przypadające, podnieśliśmyby aktywność warstwy zaledwie o 1/32000. część DOG, a przecież aktywność tych odpadów zanika jeszcze w czasie. Gdyby każdy człowiek zakopał w swym ogródku także krótkożyciowe odpady średnioaktywne na niego przypadające, zwiększyłby aktywność ogródka o nie więcej niż 1/4800. część DOG, a aktywność i tych odpadów zanika w czasie.

Długożyciowe odpady średnioaktywne, bardzo stężone, należałoby zakopywać już w głębsze pokłady ogródka, np. na głębokość 300 m. Podwyższyłyby one ryzyko, ale zaledwie o 1/30 dawki pochodzącej w naturalny sposób od 300-metrowej warstwy ziemi. Dopiero umieszczenie na tej głębokości odpadów wysokoaktywnych przypadających na człowieka stworzyłoby ryzyko większe niż aktywność naturalna. Z tego też względu - choć i tu czynnik zaniku aktywności odpadów w miarę upływu czasu gra na naszą korzyść - składowanie odpadów wysokoaktywnych podlega szczególnym technologiom i rygorom jeszcze większej ostrożności niż w dwóch poprzednich przypadkach.

Analiza wskazuje więc, że sama natura napromieniowuje nas znacznie większą dawką niż produkowane przez człowieka odpady promieniotwórcze.

9.4 Postępowanie z wypalonym paliwem

Wypalone paliwo jądrowe przechowuje się z reguły przez jakiś czas (kilka do kilkudziesięciu lat) bezpośrednio przy reaktorze w basenach przechowawczych, rys. 9.11. W tym czasie zanika aktywność większości izotopów krótkożyciowych¹⁴, a ponadto woda odbiera ciepło. Tak więc zużyte paliwo schładza się zarówno termicznie, jak i w znaczeniu radiologicznym. Jest rzeczą oczywistą, że składując paliwo w basenie należy zadbać o to, aby nie było możliwości osiągnięcia masy krytycznej w wypalonym paliwie. Warunki przechowywania paliwa są więc tak dobrane aby nawet w najbardziej niekorzystnych sytuacjach (awaryjnych) współczynnik mnożenia paliwa był znacznie niższy od jedności¹⁵. Dalszy los zależy od możliwości techniczno-finansowych i decyzji organów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo radiologiczne danego kraju. Paliwo takie albo przetwarza się, poddając je procesowi *recykliczacji*, albo przygotowuje do ostatecznego składowania. Słowo „ostateczny” nie jest tu jednak w pełni adekwatne, gdyż obecnie myśli się nad technikami, które pozwoliłyby w znaczący sposób zmniejszyć i tak już stosunkowo małe zagrożenie radiologiczne związane ze składowaniem tego paliwa.



Rys. 9.11 Widok basenu przechowawczego w reaktorze MARIA w Świerku

Szczelność paliwa jest systematycznie kontrolowana, zasysając wodę z nad zestawów paliwowych. Obecnie, po ostudzeniu w basenie wodnym (3 lata) paliwo jest kapsułowane i przechowywane w powietrzu na sucho. Technologię kapsułowania opracował Instytut Energii Atomowej w Świerku. Niektóre etapy kapsułowania pokazuje rys. 9.12.

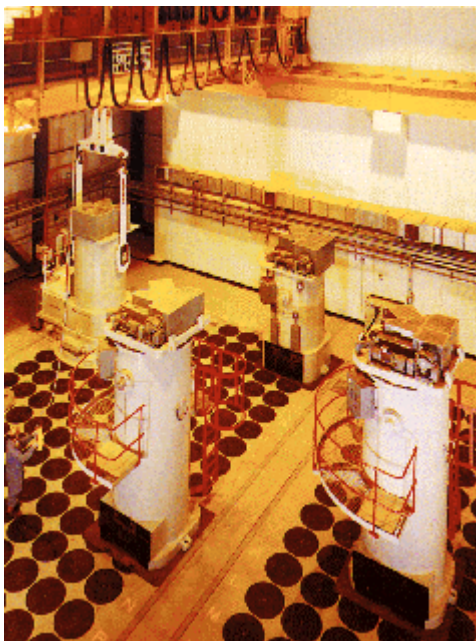
Podczas recykliczacji dokonuje się obróbki radiochemicznej, podczas której wydobywa się przede wszystkim dwa izotopy rozszczepialne, a mianowicie ^{235}U i ^{239}Pu . Z izotopów tych, a precyzyjniej z tlenków tych izotopów (UO_2 i PuO_2) można wyprodukować świeże paliwo (typu MOX od ang. *Mixed Oxides*). Paliwo MOX produkowane jest obecnie w Europie w 5 instalacjach, może być zaś użyte w 35 pracujących w Europie reaktorach (do rdzeni tych reaktorów można załadować około 20-50% paliwa MOX). Uran, o którym tu mowa, jest uranem o zawartości ^{235}U mniejszej niż 1%, dlatego też domieszka ^{239}Pu jest niezbędna do wyprodukowania świeżego paliwa. Zauważmy, że skład izotopowy paliwa MOX nie mógłby być użyty do produkcji broni jądrowej.

¹⁴ w ciągu pierwszych 40-50 lat aktywność wypalonego paliwa spada ok. 1000-krotnie

¹⁵ Podziękowania należą się dr Krzysztofowi Pytlowi za tę cenną uwagę



Rys. 9.12 Od lewej do prawej: zestaw paliwowy wkładany do kapsuły, spawanie kapsuły z zestawem paliwowym. Zamknięto już 144 zestawy (około 50%) i połowę z nich wywieziono do przechowalnika paliwa poza reaktorem



Z paliwa wypalonego przez rok pracy elektrowni o mocy 1000 MWe można uzyskać około 230 kg plutonu (1% całości wypalonego paliwa). W sumie recyklingowi (recyklizacji) podlega jakieś 97% wypalonego paliwa, pozostałe 3% (ok. 700 kg rocznie z elektrowni o mocy 1000 MWe) stanowią odpady wysokoaktywne. W wyniku przerobu pozostaje wciąż wysokoaktywny odpad w ciekłej postaci. Ciecz ta zawiera zarówno fragmenty rozszczepienia, jak i promieniotwórcze aktynowce. Stosunkowo najbezpieczniejszy obecnie przerób tej cieczy polega na jej *witryfikacji*, tj. zeszkleniu lub glazurowaniu. Tak przygotowana gorąca borosilikatowa masa szklana (Pyrex) wlewana jest do pojemników ze stali nierdzewnej, które po ostudzeniu są zaspawywane.

Rys.9.13 Ładowanie kanistrów z zeszkłonym paliwem do silosów¹⁶

Dla wyrobienia sobie poglądu na objętość zeszkłonych odpadów, rys. 9.14 pokazuje blok takiego szkła o identycznym składzie chemicznym, jak w rzeczywistym odpadzie, choć oczywiście pozbawionym izotopów promieniotwórczych. Objętość tego bloku demonstruje ilość wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych przypadających na człowieka w czasie jego życia, a pochodzących z tej części energii elektrycznej, która została wyprodukowana w elektrowni jądrowej.

¹⁶ <http://www.world-nuclear.org/education/wast.htm>



Rys. 9.14 Blok szkła borosilikatowego o objętości odpowiadającej objętości odpadów promieniotwórczych przypadających na człowieka w czasie jego życia, a pochodzących z energii elektrycznej wyprodukowanej w elektrowni jądrowej.

W każdym pojemniku (kanistrze), patrz rys. 9.13, mieści się 400 kg masy szklanej. Odpady z jednego roku pracy reaktora o mocy 1000 MWe, to 5 ton takiego szkła lub 12 kanistrów o wysokości 1,3 m i średnicy 0,4 m, które łatwo transportować i przechowywać w odpowiednich warunkach osłonowych. Przetwórnice paliwa we Francji, Wielkiej Brytanii i Belgii wytwarzają około 1000 ton rocznie takiego zeszlonego paliwa (2500 kanistrów). O relacji pomiędzy pojemnikiem transportowym, a zawartością w nim odpadów promieniotwórczych może powiedzieć porównanie mas: 6 ton odpadów zamyka się w pojemniku o masie 100 ton. Trwałość pojemnika stalowego oceniana jest na 1000 lat.

Obecne możliwości recyklingu przedstawia Tabela 9.5, a rys. 9.15 przedstawia zmianę w czasie aktywności wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w postaci 1 tony wypalonego paliwa bezpośrednio po wyładunku z reaktora, rys. 9.16 zaś - odpadów pozostałych po recyklingu 1 tony wypalonego paliwa z reaktora typu PWR. Jeśli chodzi o samą wydajność procesu, recyklicacji podlega dziś nie więcej niż około 6% plutonu. Pełna recyklicacja będzie możliwa dopiero po szerokim wdrożeniu reaktorów prędkich i opanowaniu technologii pirometalurgicznego przetwarzania paliwa.

Tabela 9.5 Możliwości recyklicacji na świecie¹⁷

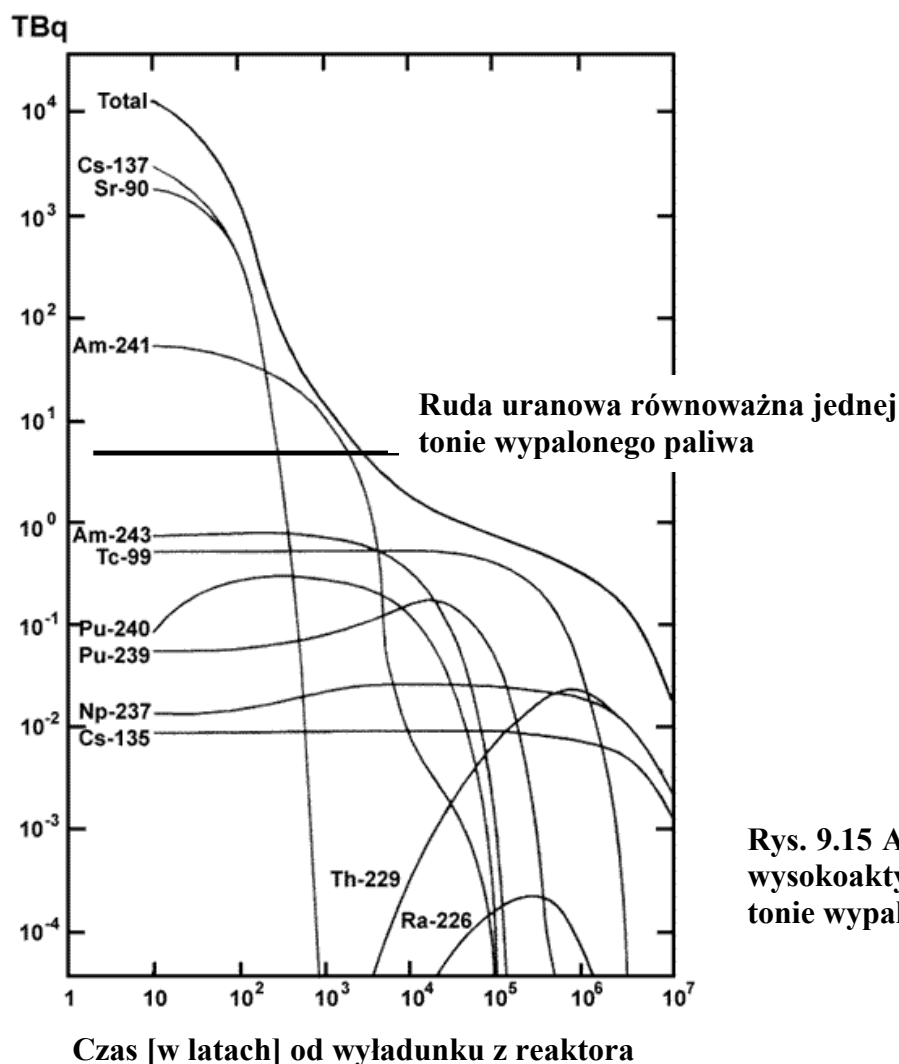
Paliwo	Kraje	Możliwość przerobu [t/rok]
Paliwo w reaktorach lekkowodnych	Francja, La Hague	1600
	Wlk. Brytania (THORP)	1200
	Rosja	40
	Japonia	100
RAZEM		3300
Inne rodzaje paliwa	Wlk. Brytania	2100
WSZYSTKIE MOŻLIWOŚCI PRZEMYSŁU CYWILNEGO		5400

Przechowywanie odpadów głęboko pod ziemią nie przedstawia dla ludzi żyjących w pobliżu składowiska podziemnego istotnego zagrożenia, chyba że ktoś przez przypadek zechce wykorzystać teren składowiska w inny sposób i zacznie w tym miejscu kopać. Nawet jednak w tym wypadku niebezpieczeństwo będzie miało na pewno charakter lokalny, a nie globalny.

Rys. 9.17 pokazuje radiotoksyczność różnych nuklidów znajdujących się w wypalonym paliwie reaktora lekkowodnego, rozumianą jako objętość wody wymagana dla rozpuszczenia radionuklidów do maksymalnej dopuszczalnej (a więc uznanej za bezpieczną) koncentracji na jednostkę masy radionuklidu. W gruncie rzeczy wykres ten nie odbiega od pokazanego na rys.

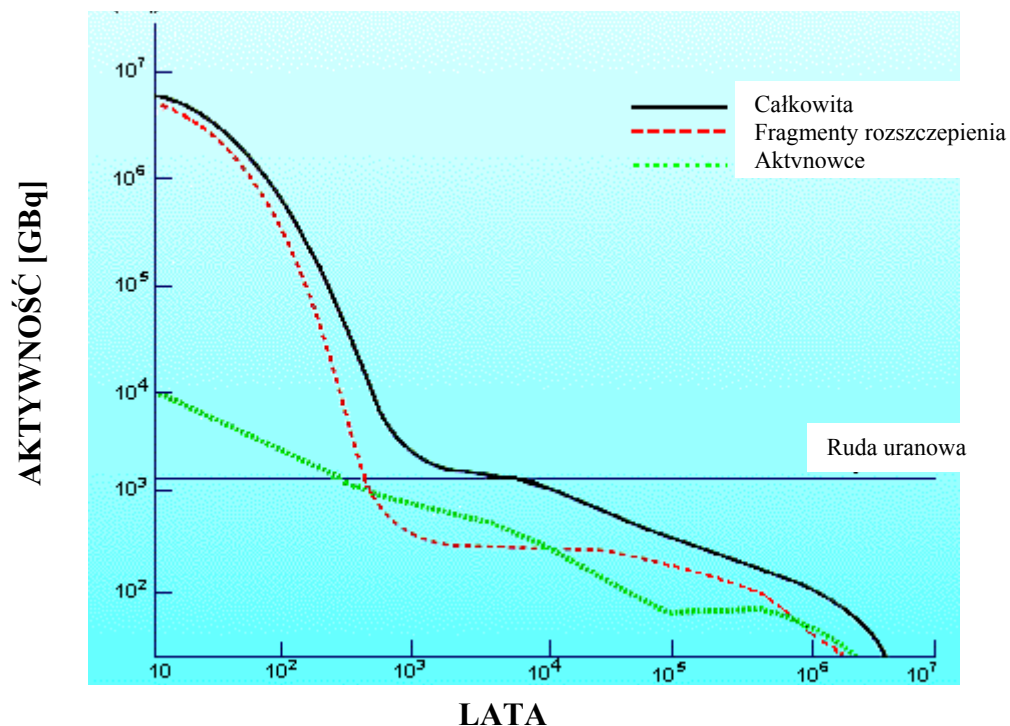
¹⁷ <http://www.world-nuclear.org/education/wast.htm>

9.15. Podane wartości dotyczą bezpośredniego wchłonięcia izotopu drogą pokarmową. Jak widać, toksyczność typowych dla reaktorów izotopów takich jak ^{90}Sr i ^{137}Cs zanika względnie szybko, gdyż okres połowicznego zaniku tych izotopów jest względnie krótki. Po kilkuset latach od wyładowania wypalonego paliwa z reaktora radiotoksyczność wypalonego paliwa jest zdominowana przez aktynowce i produkty ich rozpadu (np. rad i tor), a także niektóre fragmenty rozszczepienia. Analizując omawiany rysunek należy mieć na uwadze, że nie wszystkie rozpatrywane nuklidy są łatwo rozpuszczalne w wodzie, więc dopuszczalne poziomy nie oznaczają bynajmniej zawartości tych pierwiastków w wodzie gruntowej.

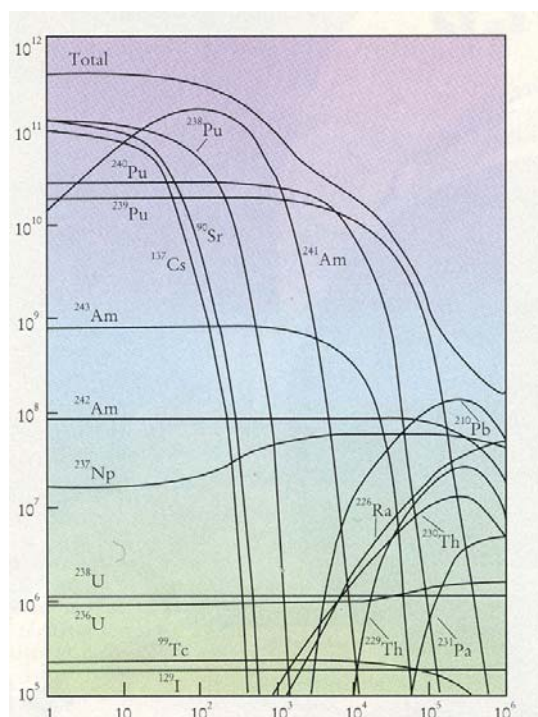


Rys. 9.15 Aktywność odpadów wysokoaktywnych w jednej tonie wypalonego paliwa

Jak przedstawia tabela 9.6, uwzględniająca dane pokazane na rys. 9.15, wszystkie odpady zgromadzone do roku 2000, po schłodzeniu ich przez okres 500 lat, będą miały aktywność odpowiadającą aktywności promieniowania naturalnego gleby ziemskiej o objętości 30x30x2 km (te 2 kilometry odpowiadają głębokości podziemnych składowisk odpadów promieniotwórczych).



Rys. 9.16 Aktywność [w gigabekerelach] pozostałości po recykliczacji 1 tony wypalonego paliwa z reaktora typu PWR. Źródło: OECD NEA 1996, *Radioactive Waste Management in Perspective*



Rys.9.17 Radiotoksyczność izotopów promieniotwórczych zawartych w wypalonym paliwie reaktora lekkowodnego w funkcji lat upływających od wyładowania paliwa z reaktora¹⁸

¹⁸ Physics Today, June (1997), str.34

Tab. 9.6 Średnia aktywność jąder promieniotwórczych w skorupie ziemskiej i całkowita aktywność odpadów promieniotwórczych pochodzących z energetyki jądrowej po 500.letnim okresie składowania¹⁹

<i>Promieniowanie środowiska</i>						
	K-40	Rb-87	Th-232	U-235	U-238	Razem
Liczba jąder promieniotwórczych w łańcuchu przemian	1	1	11	12	14	
Koncentracja jąder macierzystych w glebie, [Bq/g]						
Mediana	0,40	0,27	0,030	0,0016	0,035	
Max	3,20	-	0,360	0,0160	0,900	
Koncentracja szeregu promieniotwórczego w glebie [Bq /g]						
Mediana	0,40	0,27	0,30	0,018	0,49	1,5
Max	3,20	-	3,60	0,176	12,60	19,66
Aktywność szeregu w 1 km ³ gleby (2,7×10 ¹⁵ g), [Bq]						
Mediana	1,1×10 ¹⁵	7,3×10 ¹⁴	8,1×10 ¹⁴	4,9×10 ¹³	1,3×10 ¹⁵	4,0×10 ¹⁵
Max	8,6×10 ¹⁵		9,7×10 ¹⁵	4,8×10 ¹⁴	3,4×10 ¹⁶	5,3×10 ¹⁶
Aktywność szeregu w skorupie ziemskiej (17,3·10 ²⁴ g), [Bq]						
Mediana	8,4·10 ²⁴	5,6·10 ²⁴	6,3·10 ²⁴	3,8·10 ²³	1,0·10 ²⁵	3,1·10 ²⁵
<i>Odpady z energetyki jądrowej</i>						
Średnio- i wysokoaktywne odpady z produkcji energii elektrycznej w 2002 r., [Bq] ^a	3,0·10 ¹⁵ c - równoważne 0,06 km ³ - 0,83 km ³ gleby					
Odpady zgromadzone do 2000 r. z całego cywilnego cyklu paliwowego po 500 latach schładzania, [Bq] ^b	5,8·10 ¹⁸ d - równoważne 107 km ³ - 1611 km ³ gleby					

^a 285,4 GWe, przy założeniu 20% wydajności elektrowni jądrowej oraz 10 000 GBq/GWe na rok dla średnioaktywnych i 500 GBq/GWe na rok niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych

^b 200 000 ton odpadów w postaci tzw. "ciężkiego metalu"; ilość ta w roku 2007 wzrosła do 207 000 ton [przyp. aut.]

^c Odpowiada medianie aktywności naturalnej w 0,75 km³ gleby, tj. w bloku o wymiarach 0,61 x 0,61 x 2 km; lub w 0,06 km³ gleby z maksymalną koncentracją naturalnych pierwiastków promieniotwórczych, tj. w bloku o wymiarach około 0,17 x 0,17 x 2 km.

^d Odpowiada aktywności 1450 km³ gleby z koncentracją odpowiadającą medianie koncentracji naturalnych pierwiastków promieniotwórczych, tj. w bloku o wymiarach około 27 x 27 x 2 km; lub 108 km³ gleby z maksymalną koncentracją naturalnych pierwiastków promieniotwórczych, tj. bloku o wymiarach około 7,3 x 7,3 x 2 km.

¹⁹ Z.Jaworowski, *Chernobyl, Nuclear Waste and Nature*, Energy & Environment 15 (2004) 807-824

Oczywiście można rozważać, co się stanie, gdy pojemniki na wysokoaktywne odpady rozszczelnia się i materiał promieniotwórczy zacznie migrować do powierzchni. Jak mówiliśmy wcześniej, trwałość pojemnika stalowego oceniana jest na 1000 lat, więc ewentualne zagrożenia należy rozpatrywać dla poziomów aktywności paliwa po ok. 1000. letnim składowaniu. Tu jednak czasy charakterystyczne dla dyfuzji spowodują, że pokonanie warstwy 500 – 1000 m musiałoby zająć czas porównywalny z dziesiątkami tysięcy lat²⁰. Zresztą najlepszego przykładu dostarcza sytuacja w Oklo. Przez 2 miliony lat od wygaśnięcia naturalnych reaktorów materiały reaktorowe znajdują się wciąż na miejscu pomimo istnienia w okolicy dużej ilości wody wypłukującej ten materiał, który z czasem przeszedł z materiału promieniotwórczego (wypalonego paliwa) w materiał *de facto* trwały.

Również i w wypadku nie przewidywanego trzęsienia ziemi nie należy spodziewać się, że pojemniki zostaną wyrzucone na wierzch. Wręcz przeciwnie – trzęsienie ziemi powinno je zakopać jeszcze głębiej, a z powodów opisanych przed chwilą nie należy również obawiać się problemu zniszczenia tych pojemników. Na dziś poważniejszym problemem mogą być nagromadzone odpady choćby z przemysłu militarnego, przechowywane w pojemnikach metalowych w tymczasowych składowiskach. Możliwości ich rozszczelnienia, czy przeniknięcia radionuklidów do cieków wodnych należy rozważać serio²¹ i podejmować odpowiednie akcje zaradcze.

Alternatywą do szkliwienia (glazurowania) odpadów wysokoaktywnych jest uwięzienie ich w strukturze krystalicznej odpowiedniego materiału. Tego typu materiał ceramiczny, utworzony z trzech naturalnych minerałów, w których strukturę krystaliczną wbudowują się niemal wszystkie pierwiastki obecne w odpadach promieniotwórczych, nazwany Synroc od ang. *Synthetic Rock* (skała syntetyczna)²², został zaproponowany przez Teda Ringwooda z Australii, a prace nad nim rozwijane są w Australii i USA. Głównym składnikiem Synrocu jest dwutlenek tytanu, znajdujący się w materiale w 57%. Pozostałe składniki dobiera się w zależności od rodzaju odpadu. Są to takie minerały, jak holandyt ($\text{BaAl}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$), cyrkonolit ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$) i perowskit (CaTiO_3). W strukturę krystaliczną tych dwóch ostatnich minerałów łatwo wbudowuje się pluton, a w perowskit można wbudować także stront i bar. Holandyt wiąże z łatwością cez, potas, rubid i bar. W odmianie ceramiki, zwanej Synroc-C ciężar odpadów promieniotwórczych może sięgać 30% całości. Koncepcja ta, bardzo atrakcyjna ze względu na spodziewaną stabilność, wymaga umiejętności rozdzielania i ewentualnie transmutowania odpowiednich grup pierwiastków.

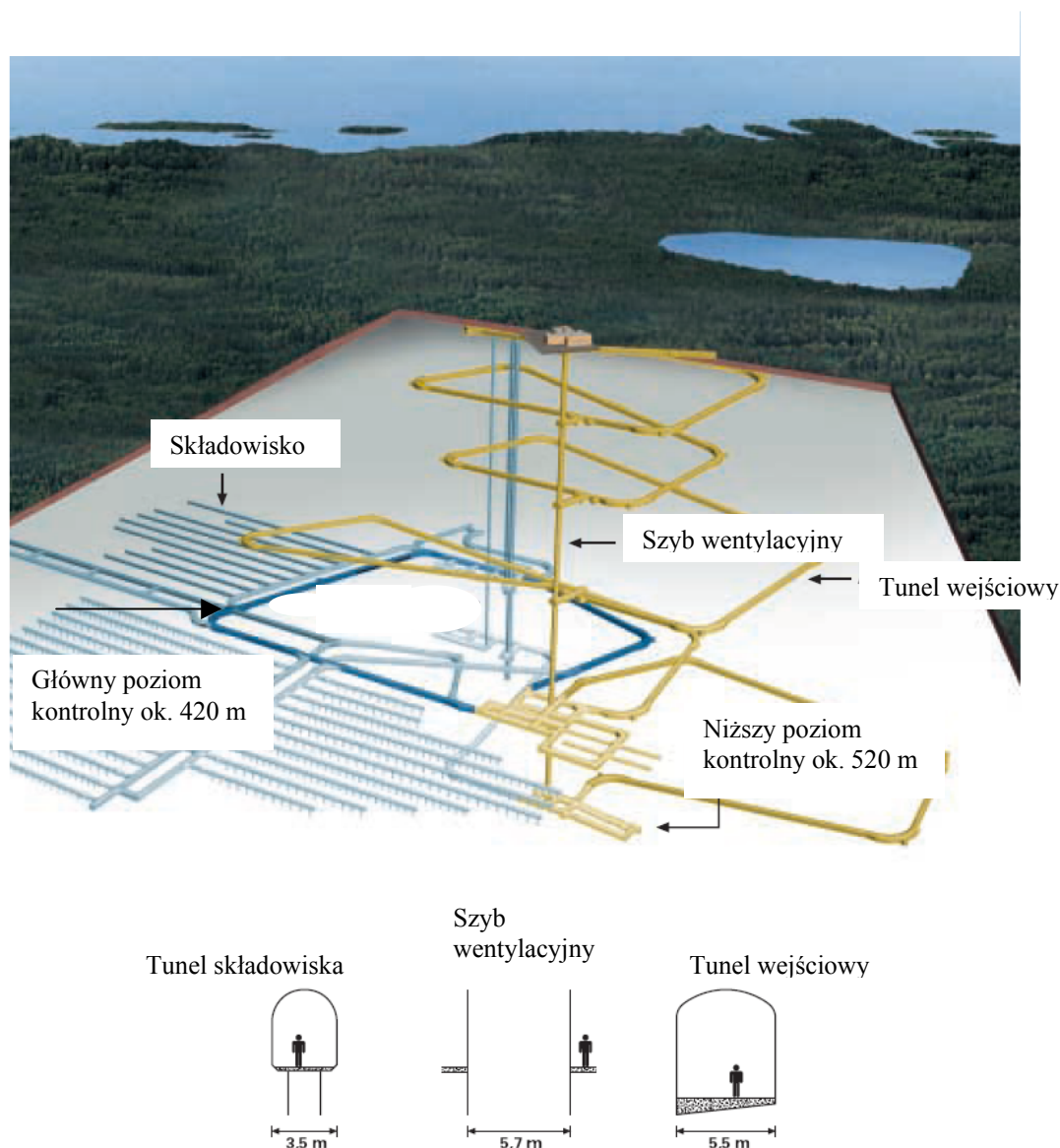
Następny krok, to składowanie. Jak dotąd nie znaleziono lepszych miejsc na składowiska niż głębokie wyrobiska w skałach solnych, w których sól kamienna pozwala na skuteczne odprowadzanie ciepła, a jednocześnie jest łatwa do drażenia. Składować można także w łach i granitach. Przechowywanie odpadów promieniotwórczych na poziomie 500 - 600 m pod ziemią zapewnia niewątpliwie większe bezpieczeństwo niż przechowywanie ich na powierzchni. Poziom promieniowania emitowanego w okresie, powiedzmy, 1000 lat odpowiada promieniowaniu naturalnemu pierwiastków promieniotwórczych w 1000 metrowej warstwie skorupy ziemskiej. Składowanie głęboko pod ziemią jest od strony technologicznej opanowane, niemniej jednak wciąż budzi obawy społeczeństw. Dziś (2008 r.) bodaj jedynym czynnym składowiskiem geologicznym jest składowisko w New Mexico, te

²⁰ EXTERNE 1995: Externalities of Energy, Vol. 1-7, European Commission, Directorate General XII, Science Research and Development, EUR 16522, Luxembourg (1995)

²¹ E.Kastenbergl, L.J.Gratton, *Hazards of Managing and Disposing of Nuclear Waste*, Physics Today, June 1997, 41-46

²² <http://www.uic.com.au/nip21.htm>

jednak przeznaczone jest dla odpadów z przemysłu militarnego. Inne, planowane w USA w Yucca Mountains wciąż czeka na ostateczną decyzję uruchomienia. W Europie najszybciej powstanie w Finlandii niedaleko elektrowni jądrowej w Olkiluoto, patrz rys. 9.18. Szwecja zamierza uruchomić około roku 2015 głębokie składowisko geologiczne w okolicy miejscowości Oskarshamn.



Rys. 9.18 Projekt składowiska geologicznego odpadów wysokoaktywnych w pobliżu Olkiluoto w Finlandii. Głębokość tunelu wejściowego i poziomu podstawowej charakteryzacji skały - 420 m. Długość tunelu 5,5 km, nachylenie 1:10. Dla wykonania składowiska trzeba wykopać 330 mln m³ skały.

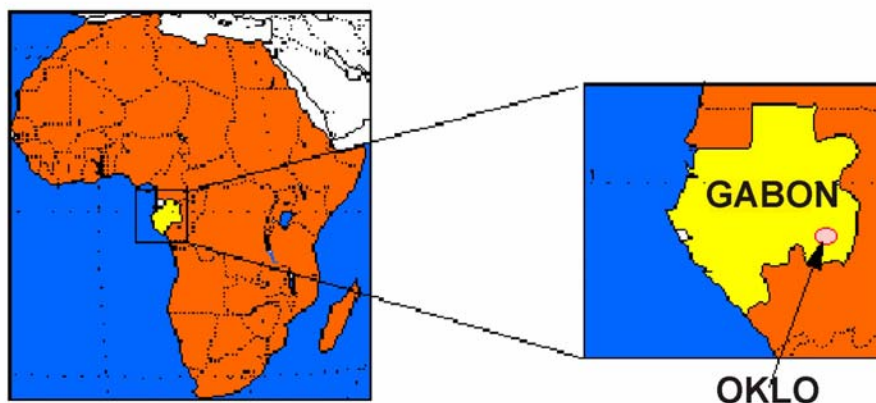
Zwróćmy uwagę, że przechowanie wypalonego paliwa podlega tym samym ogólnym regułom bezpieczeństwa, co wszystkie odpady promieniotwórcze, a regułą podstawową jest stworzenie systemu wielu barier technologicznych. Taką barierą stanowi uwięzienie odpadów w szkło lub innym materiale (np. synrocu), ewentualnie w postaci ceramicznych pastylek paliwowych,

stalowe kontenery, w których umieszczone są odpady, odpowiednia struktura bezpośredniego otoczenia pojemników, zapobiegająca przedostawaniu się wody do pojemników, głębokie składowanie podziemne w skałach w obszarze tektonicznie stabilnym, wreszcie usytuowanie składowiska w odpowiedniej odległości od siedzib ludzkich.

System przechowywania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych powoduje, że *de facto* nie istnieje żadne poważne zagrożenie dla biosfery. Już po 200 latach przechowywania tych odpadów zagrożenie stwarzane przez nie jest niższe od zagrożenia stwarzanego przez odpady z elektrowni węglowych²³ i jest wciąż bez porównania mniejsze niż zagrożenie radiologiczne związane z istnieniem rozproszonej (w przeciwieństwie do odpadów promieniotwórczych) rudy uranowej w skorupie ziemskiej. W skali realnych zagrożeń nawet maksymalne moce dawek okazują się pomijalnie małe (poniżej ok. 0,01 $\mu\text{Sv/rok}$).

9.5 Reaktory w Oklo a problem składowania odpadów wysokoaktywnych

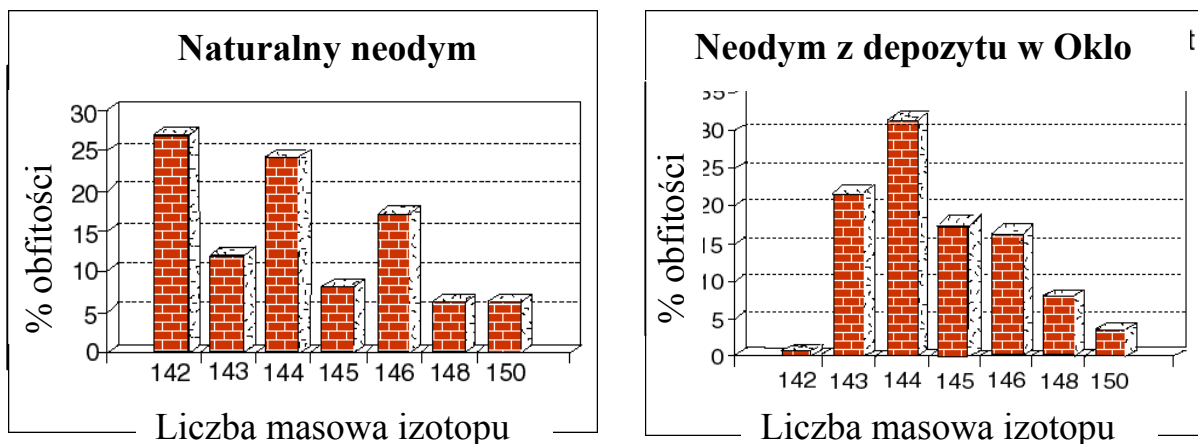
Wielokrotnie przywoływane już reaktory naturalne w Oklo stanowią bardzo interesujący przykład tego, co się dzieje po ustaniu pracy reaktora, kiedy to pozostaje tylko wypalone paliwo. Przypomnijmy, w miejscowości Oklo w Gabonie (rys. 9.19) w roku 1972 stwierdzono, że zawartość izotopu ^{235}U w uranie naturalnym jest wyraźnie mniejsza od wartości średniej 0,7202(6)%, spotykanej w innych miejscach kuli ziemskiej i wynosi 0,7175(10)%. Kolejno znajdowano rudę uranową o zawartości 0,621% a nawet 0,440% tego izotopu uranu. De facto znajdowano więc zubożony uran, typową pozostałość po wypaleniu paliwa jądrowego.



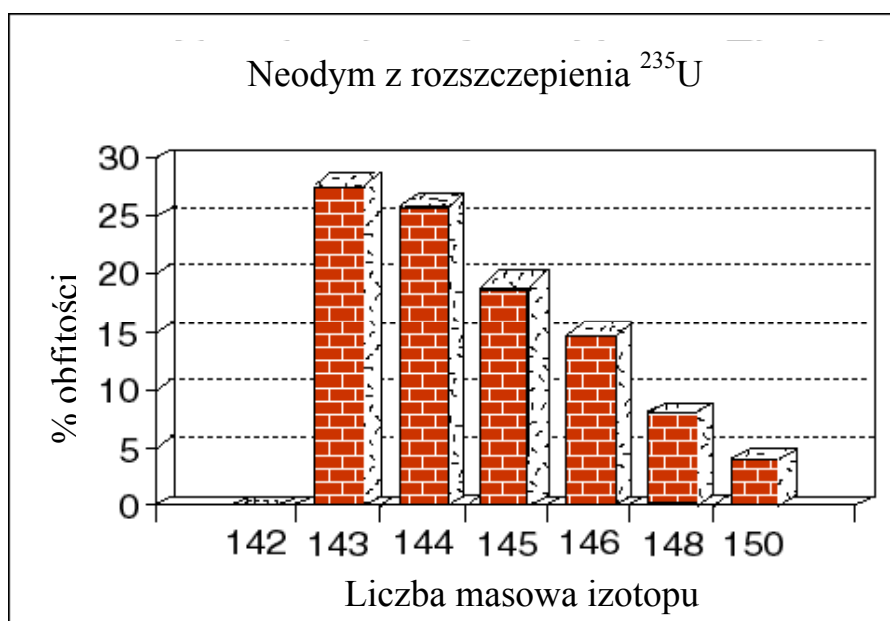
Rys. 9.19 Oklo – miejsce, w którym około 2 miliardów lat temu działały naturalne reaktory jądrowe

²³ A. Strupczewski, *Czy mamy obawiać się odpadów radioaktywnych z elektrowni jądrowych?*, Biuletyn miesięczny, PSE 4 (2006) 5

Oczywiście fakt istnienia zubożonego uranu nie mógł być jednoznacznym potwierdzeniem działania reaktorów, zwrócono więc uwagę na produkty rozpadu, jak np. neodym. Obfitości jego izotopów w stanie naturalnym i w Oklo pokazuje rys. 9.20. Ewidentne różnice, w szczególności niemal brak izotopu ^{142}Nd oraz silny wzrost zawartości izotopów ^{143}Nd i ^{145}Nd wskazywał jednoznacznie na to, że o składzie izotopowym neodymu w Oklo decydowała reakcja rozszczepienia uranu-235, gdyż w wyniku tej reakcji rozkład zawartości różnych izotopów w neodymie jest taki, jak pokazuje rys. 9.21. Jeśli skorygować rozkład neodymu w próbkach z Oklo na skład izotopowy naturalnego neodymu, wynik końcowy będzie w zasadzie identyczny z tym, który pokazuje rys. 9.21, co jest mocnym dowodem, że w Oklo neodym w znacznym stopniu powstawał w drodze rozszczepienia ^{235}U .



Rys. 9.20 Obfitość (w procentach) występowania izotopów neodymu w neodymie naturalnym (z lewej strony) i w neodymie znalezionym w Oklo (z prawej)



Rys. 9.21 Skład izotopowy neodymu wytworzonego jako produkt rozszczepienia w reaktorze jądrowym

Reaktory w Oklo pracowały z przerwami od kilku lat do setek tysięcy lat. Naturalnym moderatorem i reflektorem stawała się woda gruntowa. Istotnie, do utrzymania reakcji łańcuchowej z moderatorem wodnym potrzebne jest wzbogacenie uranu w ^{235}U do około 3%. Takie wzbogacenie w uranie naturalnym występowało około $1,45 \cdot 10^9$ lat temu (mniej niż 3 okresy połowicznego zaniku ^{235}U). Od zakończenia pracy reaktorów naturalnych minęło 2 miliardy lat. W tym czasie rozpadły się wszystkie produkty rozszczepienia, nawet te mające $T_{1/2}$ rzędu miliona lat. Nawet gdyby cały uran w Oklo zamienił się w takie izotopy, jak ^{129}I , ^{135}Cs , i ^{107}Pd ($T_{1/2}$ odpowiednio $1,7 \cdot 10^7$, $2,3 \cdot 10^6$ i $6,5 \cdot 10^6$ lat), to dziś pozostałby mniej niż 1 atom któregośkolwiek z tych izotopów.

Istnienie procesu naturalnego rozpadu promieniotwórczego daje nam szczególne narzędzie do mierzenia czasu. Rozpady takich izotopów jak ^{238}U , ^{87}Rb czy ^{147}Sm pozwalają nam oceniać wiek Ziemi i procesy zachodzące w geologicznych skalach czasu. Zawartości izotopów ^{237}Np , ^{107}Pd i ^{109}I mówią nam o czasie, w którym np. pracowały reaktory w Oklo, ale także o migracji produktów rozszczepienia w ciągu milionów lat. W końcu badanie zawartości takich izotopów, jak ^{99}Tc , ^{239}Pu i ^{126}Sn pozwala określić czas pracy reaktora i tempo przemieszczania się produktów rozszczepienia w skalach tysiącletnich.

Pierwszą, naturalną konstatacją obserwacji pozostałości po reaktorach w Oklo jest to, że powstałe w nich odpady promieniotwórcze miały 2 miliardy lat na przemieszczanie się, a jednak pozostały w miejscu! Druga obserwacja wiąże się ze sposobem pracy takiego reaktora. Jest rzeczą oczywistą, że w trakcie pracy woda musiała ulegać silnemu podgrzaniu i odparowywaniu (taki proces obejmował obszar o promieniu ok. 40 metrów od reaktora). W wyniku tego procesu zaczynało w pewnym momencie brakować moderatora i reaktor przerywał pracę, a wznowiał ją po kolejnym napłynięciu wody. Wydawałoby się zatem, że takie ruchy wody powinny spowodować rozplyniecie się uranu w glebie, a jednak tak się nie stało.

Trzecia wreszcie obserwacja dotyczyła niespodziewanie znalezionego na terenie Oklo ksenonu - i to nie w bogatych w uran ziarnach minerałów, lecz w nie zawierających uranu kryształach fosforanu glinu. Rozkład izotopowy w tych kryształach był także dziwny: izotopów ^{131}Xe i ^{132}Xe było więcej, a ^{134}Xe i ^{136}Xe – mniej niż w składzie izotopowym ksenonu powstającego w wyniku rozszczepienia ^{235}U w reaktorze. Odpowiedzialne za ten dziwny fakt procesy były następujące. Woda gruntowa przenikająca złożę działała jako moderator, umożliwiając rozpoczęcie reakcji rozszczepienia ^{235}U . Rozpad produktów rozszczepienia szybko doprowadził do powstania ^{134}Xe i ^{136}Xe , jednak te gazowe atomy miały tendencję do ulotnienia się na skutek rosnącej temperatury reaktora. ^{131}I i ^{132}I , będące dłużej żyjącymi prekursorami ksenonu – zostały rozpuszczone i wymyte niemal natychmiast po powstaniu. Mniej więcej 30 minut po tym, jak rozpoczynała się reakcja rozszczepienia jądrowego, temperatura osiągała wartość, przy której większość wody gruntowej wyparowywała, pozbawiając reaktor moderatora i przerywając reakcję rozszczepienia. Niektóre izotopy ^{131}I i ^{132}I wytworzone przez uprzednie pół godziny były zachowywane w resztkach w wodzie gruntowej, zatrzymanych pomiędzy mineralnymi kryształami uranu. W związku z brakiem reakcji rozszczepienia utrzymującej wysoką temperaturę ośrodka, temperatura złoża zaczynała stopniowo się zmniejszać. Po rozpuszczeniu ^{131}I i ^{132}I w wodzie i dyfuzji do kryształów fosforanu glinu, temperatura spadała, a substancje rozpuszczone w gorącej wodzie były wytrącane z roztworu, tworząc minerały fosfatu glinu, w których był zawarty jod – prekursor izotopów ^{131}Xe i ^{132}Xe . Gdy woda wracała, reakcja rozszczepienia zaczynała się znów i cały proces się powtarzał.

Analizując te dane widzimy, że mimo upływu dwóch miliardów lat, zarówno uran, jak i neodym, jak i ksenon uwięziony w fosfacie glinu – wszystkie one pozostały na miejscu. My zaś stosujemy wielokrotne warstwy w pojemnikach osłonnych i umieszczamy je w suchych i stabilnych sztolniach według najlepszej sztuki inżynierskiej XXI wieku. Zagrożenie ze strony odpadów wysokoaktywnych po przerobieniu paliwa wypalonego maleje poniżej zagrożenia od istniejącej na świecie rudy uranowej już po upływie 300 lat. Możemy więc ufać, że przechowywanie odpadów nawet przy obecnej technologii jest bezpieczne. A jak pokażemy w kolejnym rozdziale bynajmniej nie zadowolamy się obecną technologią i wciąż próbujemy zmniejszać ryzyko związane z wysokoaktywnymi odpadami promieniotwórczymi z reaktorów.

We Francji i w Finlandii parlamenty tych krajów podjęły decyzje o budowie głębokiego składowiska geologicznego dla wysokoaktywnych odpadów jądrowych. Gminy szwedzkie wręcz konkurują o uzyskanie na swym terenie składowiska odpadów radioaktywnych, gdyż nie uważają ich za groźne, natomiast w znaczący sposób podnoszą one budżety gmin. Niedawne badania opinii publicznej pokazały, że budowę w swych własnych miejscowościach popiera 79 % mieszkańców Oskarhamn i 73% mieszkańców Osthhammar. Okazało się, że kompleks NIMBY (*Not In My BackYard* - nie na moim podwórku) został przełamany. Podobna sytuacja występuje w Finlandii i w Korei Południowej. W USA parlament, senat i prezydent zatwierdzili projekt wykorzystania Yucca Mountain do składowania odpadów wysokoaktywnych z elektrowni jądrowych. Natomiast w Polsce delegaci gminy Różan jeżdżą uporczywie do wszystkich gmin, gdzie mogą być budowane składowiska odpadów radioaktywnych i starają się, by gminy te odrzuciły nowe składowisko - tak by Różan utrzymał dotychczasowe korzyści. Szkodliwość tych działań dla przyszłości składowania odpadów promieniotwórczych w Polsce jest oczywista.

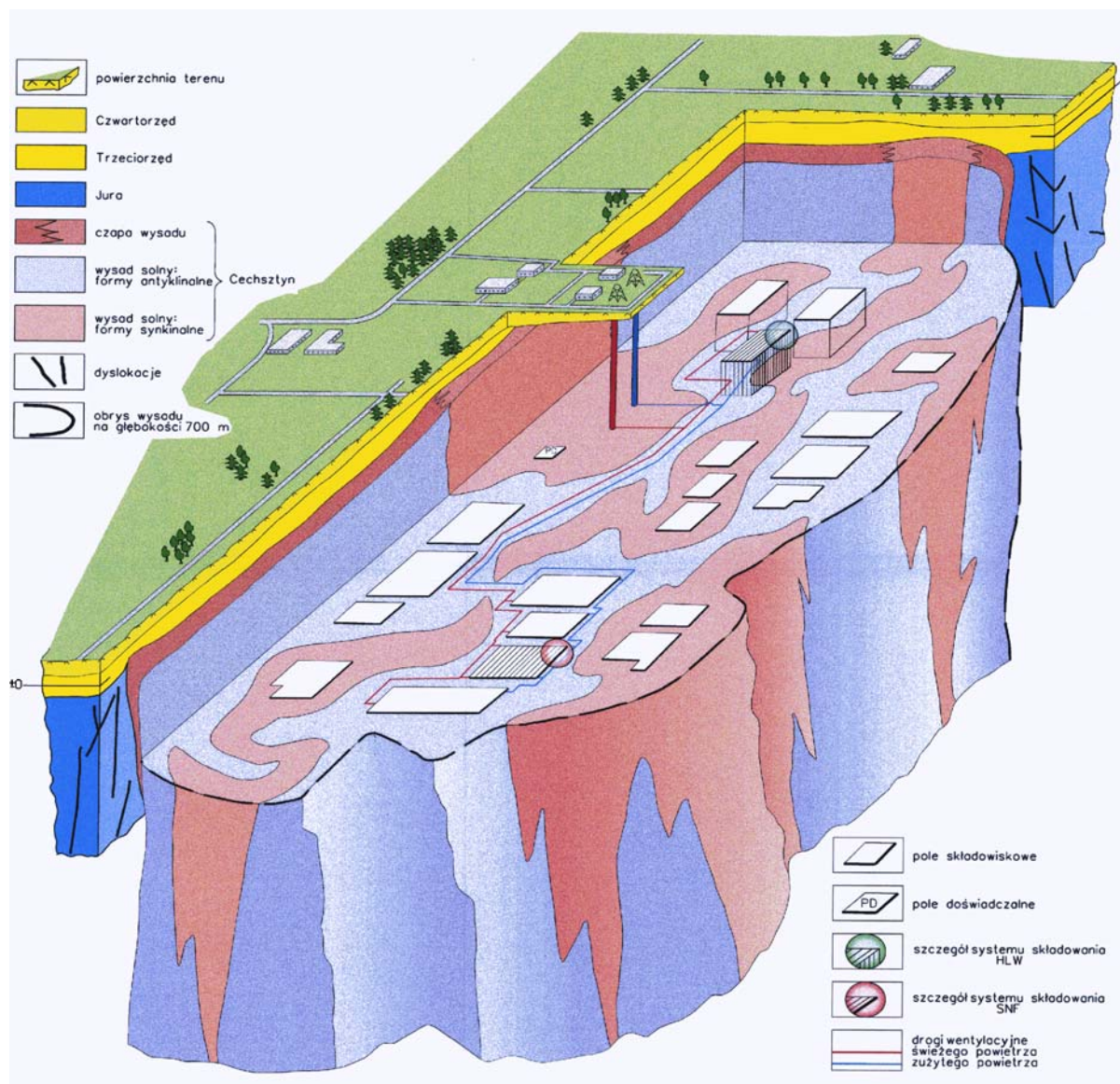
Geolodzy znaleźli kilka miejsc w Polsce, w których można bezpiecznie składować odpady. Są to Permskie złoża solne na głębokości 740 m pod powierzchnią, o grubości około 200 m. Koncepcję składowiska usytuowanego w takich złożach przedstawia rys. 9.22. Jest też kilka miejsc, w których znajdują się złoża prekambryjskie również dobrze nadające się do tych celów. Stosowane systemy barier, jak zeszklenie, odpowiednia grubość powłok pojemników stalowych (wytrzymujących 1 000 – 10 000 lat), wreszcie grube warstwy skalne, trwające niezmiennie od milionów lat, skutecznie chronią składowane odpady przed wymywaniem i uwalnianiem materiałów promieniotwórczych do atmosfery. Z całą pewnością potrafimy chronić te odpady przez kilkadziesiąt lat. A już po 200 – 300 latach te odpady będą mniej groźne niż odpady pozostałe ze spalania węgla (patrz ostatni paragraf tego rozdziału). Nawet w razie wycieku, przesączenia się materiałów promieniotwórczych przez pokłady o grubość 500-600 m trwa około 100 tysięcy lat! – czas wystarczający na całkowity rozpad tych materiałów.

9.6 Kwestia transportu wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych

Niewątpliwie problem odpadów promieniotwórczych z reaktora zawiera składnik, który jest jednym z ulubionych motywów protestujących przeciwko energetyce jądrowej, a jest nim kwestia transportu odpadów. Czy taki transport jest bezpieczny? Są tu do rozstrzygnięcia dwa pytania: czy bezpieczny jest transport jako taki i jakie skutki mogłyby wywołać ataki terrorystyczne na taki transport?

Aby odpowiedzieć na pierwsze pytanie wystarczyłoby odwołać się w znacznym stopniu już do tego, co zostało powiedziane wyżej. Sam pojemnik transportowy (tzw. pojemnik typu B)

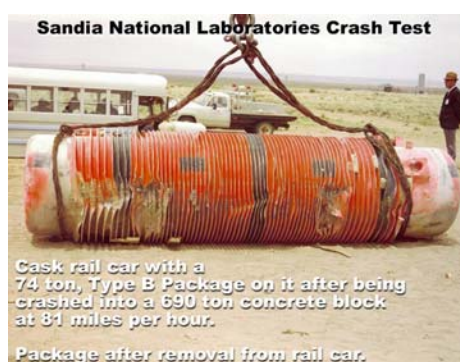
dla odpadów musi przejść szereg testów, które obejmują zderzenia pociągów (rys. 9.23), upadek z 9 m, uderzenie w żelazny pręt, pożar przez 30 minut, zatopienie w wodzie - wszystkie przy parametrach ekstremalnych, cięższych niż możliwe w praktyce. I po tych wszystkich kolejnych próbach pojemniki muszą pozostać szczelne i zapewniać dobrą osłonę. Sam pojemnik typu B, to kolos ważący nawet 110 ton, który zawiera zaledwie 6 ton odpadów.



Rys. 9.22 Model geologicznego składowiska wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w w wysadzie soli kamiennej



Rys. 9.23 Przebieg testu zderzeniowego pojemnika typu B na lorze kolejowej o wadze 74 ton ze ścianą betonową ważącą 690 ton przy prędkości pociągu ok. 130 km/godz



W skutek zderzenia pociąg został zniszczony, natomiast sam pojemnik (rys. 9.24) pozostał jedynie nieco odkształcony. A przecież test przeprowadzono przy ekstremalnej szybkości pociągu!

Rys. 9.24 Pojemnik po zdjęciu z lory, po przeprowadzonym teście zderzeniowym (rys. 9.23)

Podobne testy wykonano w Sandia Laboratories (USA) dla transportu samochodowego (rys. 9.25), a także w warunkach pożaru.



Zgodnie z normami, pojemnik musi wytrzymać pożar 30 minut bez utraty szczelności. Test wykonuje się przez 90 minut. Temperatura powierzchni pojemnika - 750 °C. Ale temperatura wewnątrz pojemnika – poniżej 150 °C, przewody paliwowe pozostają nienaruszone.

Rys. 9.25 Test zderzeniowy dla ciężarówki wiozącej pojemnik o ciężarze 22 ton, zderzający się przy prędkości ok. 100 km/godz ze ścianą betonową ważącą 690 ton.

Pojemnik musi też wytrzymać upadek z 9 m oraz przejść pozytywnie test dziurawienia – wbicia żelaznego pręta w bok pojemnika. W przeprowadzonym teście upadek modelu pojemnika z wysokości 9 m na twardą powierzchnię spowodował jedynie odkształcenie pojemnika, ale pozostawił go szczelnym. Test dziurawienia siłą $4 \cdot 10^6$ N można porównać ze skutkami zderzenia pociągów w 1997 r. koło Della, Kansas, USA. Waga jednego z pociągów wynosiła 5347 ton, a drugiego 3925 ton. Zderzenie spowodowało śmierć jednego maszynisty

i rany drugiego, pożar i ewakuację 1500 ludzi, a siła zderzenia – $2 \cdot 10^6$ N, a więc dwukrotnie mniejsza niż w przeprowadzonym teście.

Na zakończenie serii testów wykonuje się test zatopienia pojemnika pod wodą. Próba zatopienia wykonywana jest po wszystkich kolejnych testach symulujących hipotetyczne ciężkie awarie. Obejmuje ona zatopienie pojemnika na głębokości 17 m przez 8 godzin, symulowane przez umieszczenie go w zbiorniku pod ciśnieniem. Opakowania z materiałami rozszczepialnymi umieszcza się ponadto pod wodą na głębokości 1 m przez 8 godzin. I pojemniki typu B (pokazany np. na rys. 9.26) wytrzymują te wszystkie męczarnie!



Rys. 9. 26 Pojemnik typu B stosowany do przewozu odpadów radioaktywnych o dużej aktywności, np. wypalonego paliwa. Wymagana odporność na wszystkie testy omówione powyżej. Długość pojemnika około 6 m, średnica 1,6 m, waga 82 tony.

Oczywiście nie wszystkie pojemniki transportowe muszą spełniać tak surowe normy. Przy niższych aktywnościach stosujemy albo ciężkie pojemniki, jak na rys. 9.27, które muszą jednak wytrzymać upadek z wysokości 9 m, przy jeszcze niższych opakowania typu A (pokazywane już wcześniej hobotki), a przy bardzo niskich aktywnościach w zasadzie nie wymaga się poważniejszych zabezpieczeń.

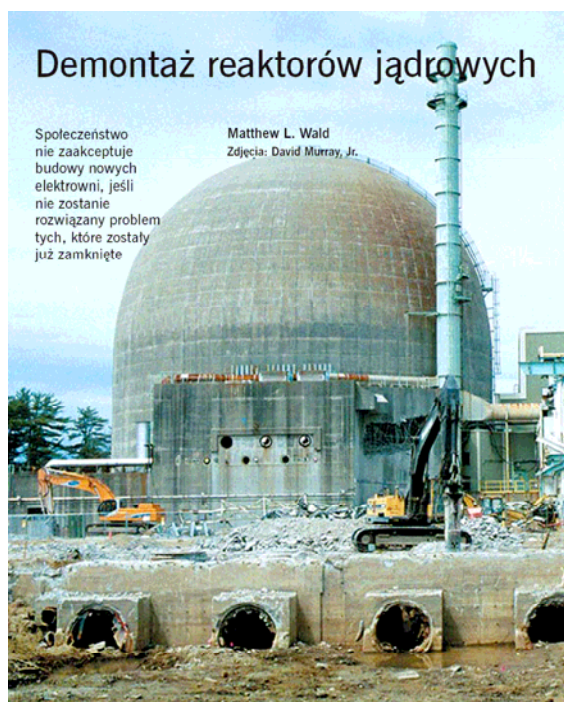


Rys. 9.27 Opakowanie przemysłowe ze stali do transportu odpadów promieniotwórczych o aktywnościach niższych niż w wypadku odpadów wysokoaktywnych z reaktora

Co możemy powiedzieć więcej o transporcie odpadów promieniotwórczych? Materiały radioaktywne przewozi się już ponad 50 lat, a co roku przewozi się na świecie 300 milionów ładunków tych materiałów. Większość ładunków przeznaczona jest do szpitali, inne do przemysłu, laboratoriów naukowych i elektrowni jądrowych. Około 1% to materiały wysokoaktywne. Od roku 1971 zanotowano około 7000 transportów wypalonego paliwa

(ponad 35 000 ton), które objęły ponad 30 milionów kilometrów drogą lądową i 8 milionów km drogą morską. Mimo tak intensywnej pracy transportu nikt nie stracił życia ani zdrowia wskutek uwolnień lub promieniowania przewożonych materiałów radioaktywnych, a inne rodzaje transportu mogą tylko czerpać wzór z bezpieczeństwa przewozu odpadów i materiałów radioaktywnych. Personel zaangażowany w przewóz tych materiałów był narażony²⁴ co najwyżej na dawkę 0,33 mSv/rok, tj. dziesięciokrotnie mniejszą od średniego narażenia od promieniowania naturalnego.

9.7 Elektrownia jądrowa, która przestała być eksploatowana też stanowi problem



Demontaż reaktorów jądrowych

Spoleczeństwo
nie zaakceptuje
budowy nowych
elektrowni, jeśli
nie zostanie
rozwiązany problem
tych, które zostały
już zamknięte

Matthew L. Wald
Zdjęcia: David Murray, Jr.

Gdy elektrownia jądrowa zakończy pracę, pozostają po niej materiały promieniotwórcze, które można zdemontować i wywieźć na odpowiednie składowisko odpadów, ale pozostaje także sama elektrownia, której elementy konstrukcyjne są zaaktywowane. Aby zilustrować problem posłużymy się przykładem demontażu elektrowni jądrowej Maine Yankee. Do operacji łatwych należy zaliczyć usunięcie głównych urządzeń jądrowych – zbiornika ciśnieniowego reaktora i trzech wytwornic pary. Wyjęto je w całości. Zbiornik reaktora i urządzenia wewnętrzne zostały pocięte pod wodą zdalnie sterowanymi narzędziami. Rdzeń reaktora wypełniono cementem, aby mieć pewność, że w ciągu kilkuset lat części wewnętrzne nie utracą stabilności. Zbiornik podniesiono i przeniesiono na barkę do przewozu. Elementy wewnętrzne reaktora zostaną ostatecznie

przewiezione tam, gdzie będzie składowane paliwo – w składowisku Yucca Mountain. Obecnie czekają one w czterech potężnych pojemnikach ze stali i betonu, razem z 60. innymi pojemnikami wypełnionymi zużyтым paliwem. Z powierzchni betonu wokół zbiornika ciśnieniowego reaktora usunięto pneumatycznie górną warstwę, by pozbyć się skażeń. Pętle obiegu pierwotnego przemyto chemicznie w celu usunięcia osadów radioaktywnych. Ich elementy przesłano na składowiska odpadów. Wbrew pozorom, to było łatwe.

Bardziej złożona jest likwidacja reszty elektrowni. Wykonano 14 300 pomiarów, w tym połowę na obszarach, gdzie nie spodziewano się skażeń. Dopuszczone przez przepisy federalne promieniowanie resztkowe jest tak małe, że trzeba było sprawdzić, jakie jest promieniowanie tła, aby uniknąć usuwania radionuklidów naturalnych. Inną możliwością mogłoby być poczekanie na rozpad przede wszystkim izotopu ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,27$ lat): po 21 latach ponad 90% tego izotopu zniknęłoby w sposób naturalny. Praktyka podpowiada jednak, że należy się spieszyć, gdyż istnieje obawa, że normy zostaną jeszcze zastrzeżone i że zabraknie składowisk odpadów.

²⁴ Ian Hore-Lacy, *Nuclear Energy in the 21st Century*, WNA Press (2006)

Normy w USA mówią o obniżeniu dodatkowej dawki promieniowania (powyżej promieniowania tła) otrzymywanej przez przeciętnego członka najbardziej narażonej grupy „do wielkości tak małej jak to praktycznie możliwe”, ale nie większej niż 0,25 mSv rocznie. Agencja Ochrony Środowiska (EPA – *Environmental Protection Agency*) wymaga 0,15 mSv/rok, w tym nie więcej niż 0,04 mSv/rok od wód gruntowych. Obecnie inicjatywę ustawodawczą przejmują poszczególne stany. W roku 2000 w stanie Maine zredukowano dopuszczalną dawkę do 0,1 mSv/rok, w tym nie więcej niż 0,04 mSv od wód gruntowych. W innych stanach zmiany przepisów są w drodze. Gdy w grę wchodzi protesty przeciw promieniowaniu, żadne normy nie są dość surowe. Jedynym akceptowalnym przez organizacje antynuklearne poziomem jest zero. Jak pokażemy dalej, nie jest to rozsądne, a wręcz społecznie szkodliwe.

Naczelną zasadą rekultywacji terenu elektrowni jądrowej jest doprowadzenie go do stanu nadającego się do wszystkich możliwych celów. Maksymalne napromienienie zbiorowe robotników przez cały okres prac na terenie elektrowni może wynieść maksymalnie 11,15 osobo-siwerta. Wielkość tę da się porównać z dawką 4,4 osobo-siwerta w roku, w którym przeprowadzano ostatnią wymianę paliwa w reaktorze. W styczniu 2002 r Maine Yankee oceniło całkowity koszt demontażu na 635 mln dolarów, w tym usunięcie odpadów niskoaktywnych 81,5 mln dol, a pakowanie i przewóz 26,8 mln. Wydatki w innych elektrowniach są tego samego rzędu. Teren elektrowni jest oczyszczany zgodnie z tak ostrymi normami, że – niezależnie od rozstrzygnięcia wpływu małych dawek promieniowania na organizm (rozdz. XIV) – nie będzie tam już materiałów, od których to promieniowanie mogłoby pochodzić. Bez względu na tę okoliczność, faktem jest, że demontaż Maine Yankee został pomyślnie zakończony.

W Polsce mamy już za sobą demontaż reaktora EWA. Reaktor doświadczalny EWA zaczął pracę na mocy 2 MW, następnie polscy inżynierowie podnosili jego moc do 4 MW, do 8 MW i na koniec do 10 MW. Reaktor EWA pracował „jak zegarek”, od poniedziałku do piątku w każdym tygodniu. Po 35 latach pracy został ostatecznie wyłączony, paliwo wywieziono, obiegi zdemontowano, a całość zdekontaminowano – likwidacja reaktora została pomyślnie wykonana przez Instytut Energii Atomowej w Świerku. Potężne osłony betonowe reaktora można będzie wykorzystać do przechowywania wypalonego paliwa z obu reaktorów doświadczalnych w Świerku.

9.8 Składowisko pod dnem oceanu?²⁵

Problem składowania odpadów promieniotwórczych z reaktorów jądrowych, czy powstałych w wyniku demontażu broni jądrowej, napotyka na znaczącą nieufność społeczną co do nieszkodliwości obecnych koncepcji składowania. Podane wcześniej argumenty nie są w stanie przekonać tych, którzy powodowani strachem i generalną nieufnością do uczonych po prostu nie przyjmują argumentów racjonalnych. Tym trudniej byłoby takich niedowiarków przekonać do wykorzystania dna oceanów jako składowiska odpadów. A przecież są takie miejsca, w których dno oceanu pokrywa kilkusetmetrowa warstwa osadów dennych, w których życie biologiczne praktycznie nie istnieje, a które mogłyby stać się świetnymi przechowalnikami wysokoaktywnych odpadów z reaktorów. Należy podkreślić, że nie myślimy tu o wodach oceanów lecz o osadach na ich dnie (kilka kilometrów poniżej stanu morza), których głębokość sięga setek metrów. Oczywiście wszelkie miejsca, w których płyty

²⁵ wg artykułu Ch.D.Hollistera i S.Nadisa, *A może pod morzem?*, Świat Nauki, Marzec 1998, str. 36-41

litosfery stykają się ze sobą i napierają na siebie byłyby bardzo niedobre, gdyż nieprzewidywalne co do zachowania. Jednak składowanie pośrodku płyt litosfery wydaje się całkiem rozsądnym pomysłem. Takie miejsca to w końcu najstabilniejsze partie naszego globu (od dziesiątków milionów lat są geologicznie stabilne), pojemnikom z odpadami nie groziłyby więc ani wybuchy wulkanów, ani trzęsienia ziemi, czy przesunięcia skorupy ziemskiej. Ponadto ility i muły na dnie słabo przepuszczają wodę, charakteryzują się dużą adsorpcją pierwiastków promieniotwórczych, jak uran czy pluton, i plastycznością, dzięki której wszelkie pęknięcia w pobliżu zbiornika z odpadami ulegałyby szybkiemu zasklepieniu.

Techniki, które należałoby wykorzystać przy składowaniu są standardowymi technikami wiertniczymi, które stosowane są np. podczas poszukiwania ropy naftowej. Miejsca do składowania mamy niewątpliwie bardzo dużo. Do zbudowanych odwiertów o głębokości kilkuset metrów można byłoby wprowadzać kanistry z wypalonym paliwem czy plutonem i ustawiać jeden nad drugim, przedzielając je ok. 20-metrową warstwą mułu. Jak pokazują doświadczenia, pluton zagrzebany w ile może przedyfundować przez warstwę ility zaledwie kilka metrów w ciągu 100 000 lat. Te czasy dyfuzji są nadzwyczaj więc długie i w takim razie można się spodziewać, że przedostanie się przez całą grubość warstwy wymagałoby takiego czasu, podczas którego nastąpiłby niemal pełny zanik radioaktywności odpadów. W zasadzie jedyną możliwością wyniesienia substancji promieniotwórczych na wierzch jest wyniesienie jej przez stworzenia żerujące na dnie oceanu.

Nie stanowi także problemu ewentualne zakłócenie życia na dnie oceanów, gdyż sądzi się, że życie istnieje zaledwie na głębokości około 1 metra w głąb, więc nie powinien to być jakiś ważki problem. Problemem może być natomiast przypadkowa awaria statku transportowego, w wyniku której zostałyby stracone ładunek odpadów. Stąd też konstrukcja pojemników na odpady powinna zapewniać ich względnie łatwe odzyskiwanie z dna oceanu – również po zagrzebaniu na dnie. Ta ostatnia możliwość dotyczy zresztą nie tylko koncepcji składowania odpadów na dnie oceanów: może przecież okazać się w przyszłości, że warto odzyskać np. pluton znajdujący się w odpadach, w związku z czym powinniśmy mieć możliwość dostępu do składowanych odpadów. Takie zadanie jest technicznie niełatwe i obecnie żadne z państw nie dysponuje odpowiednią technologią.

Projekt techniki składowania odpadów na dnie wygląda następująco: w dnie wywierca się głęboki otwór, do którego wprowadza się lej, przez który wejdzie ewentualnie inna rura wiertnicza. Ostatecznie w dnie zostaje umieszczona rura, do której można wprowadzić kanister z odpadami. Następnym etapem jest wprowadzenie do wnętrza odwiertu mułu i ułożenie kolejnych kanistrów, jednego nad drugim. Najwyżej położony kanister spoczywałby co najmniej kilkadziesiąt metrów pod dnem oceanu. Jak się oczekuje, typowy czas korozji kanistra to około 1000 lat. Od tej pory zacznie się migracja pierwiastków przez muł. Jednak w ciągu np. czasu życia plutonu (24 tysiące lat), pluton przemieści się nie więcej niż o metr.

9.9 Kilka uwag na temat odpadów z energetyki konwencjonalnej

Jest rzeczą oczywistą, że energetyka konwencjonalna wytwarza także szereg odpadów zagrażających środowisku. Typowymi odpadami są popioły zawierające szereg ciężkich metali, ale także uran i tor. Zawartość uranu w węglu wynosi około 2,9 ppm, a toru – 7,4 ppm. Ponieważ wytworzenie energii 1 GW-roku (typowa wartość dla elektrowni) wymaga zużycia około 3 mln ton węgla kamiennego, oznacza to, że w ciągu roku spalamy węgiel zawierający około 9 ton uranu i 22 tony toru. Te dwa pierwiastki promieniotwórcze znajdują

się potem w popiele, a także są rozpraszane w postaci pyłu. Jak pisze Hrynkiewicz²⁶, „gdyby opłacało się wydzielać z węgla znajdujący się w nim uran i tor, to zużywając te pierwiastki w reaktorach powielających moglibyśmy z nich uzyskać kilkanaście razy więcej energii niż ze spalania całego węgla, w którym były one zawarte”.

Pomijając obecność pierwiastków promieniotwórczych w hałdach wytwarzanego popiołu, a elektrownia węglowa o mocy 1 GWe wytwarza go około 600 000 ton rocznie, elektrownia taka produkuje 60 000 ton pyłów, 9,4 mln ton CO₂, 120 000 ton SO₂ i 20 000 ton azotków NO i NO₂ (w skrócie - NO_x). Te 3 mln ton węgla kamiennego (w wypadku węgla brunatnego ta ilość wzrasta do 7 mln ton), które zużywa rocznie elektrownia (5,7 ton/minutę!) trzeba dowozić pociągami niemal w sposób ciągły, a więc zużywać sporo energii. Z całą pewnością podwyższonej aktywności hałd popiołów nie należy w żaden sposób porównywać z aktywnością wypalonego paliwa, natomiast można porównać poziom promieniowania na hałdach i wokół składowiska odpadów promieniotwórczych – obie nie tylko nie mogą od siebie odbiegać, ale raczej to drugie powoduje mniejszy wzrost poziomu promieniowania w okolicy. Z tego względu, porównywanie szkodliwości obu typu odpadów dla środowiska można tylko mierzyć szkodliwymi emisjami z elektrowni konwencjonalnych, zniszczeniem otoczenia przez hałdy popiołów, a także zagrożeniami tzw. szkodami górniczymi, znacznie poważniejszymi niż w górnictwie uranu.



Rys. 9.28 Widok elektrowni jądrowej Loviisa, Finlandia, zimą

Wystarczy porównać przepiękny krajobraz wokół elektrowni jądrowej Loviisa, Finlandia (rys. 9.28) z terenem wokół kopalni węgla brunatnego w Niemczech (rys. 9.29), gdzie w hałdach znajdują się w znacznej koncentracji różne ciężkie metale szkodliwe dla zdrowia i środowiska, aby uświadomić sobie, gdzie leżą prawdziwe zagrożenia ekologiczne.

²⁶ A.Hrynkiewicz, *Energia. Wyzwanie XXI wieku*, Wyd. UJ, Kraków (2002)



Rys. 9.29 Teren wokół kopalni węgla brunatnego w Niemczech