

UKD 621.796.039.7(24:181):622.228:551.736.3.022.4+551.71/.733(26.03)''312/31e''(438+100)

Bohdan NIELUBOWICZ

## Warunki geologiczne dla budowy podziemnych składowisk odpadów jądrowych

Omówiono stan prac nad składowaniem odpadów jądrowych w głębokich formacjach geologicznych. Przedstawiono koncepcje składowania głębokiego odpadów jądrowych w Polsce. Rozpatrzono dwie lokalizacje: jedną w cechsztyńskich solach pokładowych w północnej Polsce, drugą w skałach archaicznych i dolnopaleozoicznych podłoża krystalicznego we wschodniej Polsce. Podkreślono rolę analizy bezpieczeństwa przy wyborze środowiska skalnego dla izolacji odpadów jądrowych od biosfery. Zwrócono szczególną uwagę na konieczność precyzyjnego rozpoznania warunków wodnych jako podstawowego elementu bezpieczeństwa składowania.

### WSTĘP

Rozwój energetyki jądrowej na świecie spowodował konieczność bezpiecznego zagospodarowania narastających ilości odpadów promieniotwórczych. Większość odpadów pochodzi z eksploatacji elektrowni jądrowych, pozostałe wytwarzane są przez zakłady i laboratoria posługujące się materiałami rozszczepialnymi. Odpady jądrowe kwalifikuje się zwykle jako nisko-, średnio- i wysokoaktywne oraz wypalone paliwo jądrowe. Ze względu na bezpieczeństwo składowania odpady nisko- i średnioaktywne można podzielić na wydzielające i nie wydzielające promieniowania  $\alpha$  (F. Giraldi, G. Marsily, J. Weber, 1980). Odpady nisko- i średnioaktywne nie emitujące promieniowania  $\alpha$  pochodzą głównie z układów oczyszczających reaktorów atomowych, są to tzw. odpady reaktorowe. Pewne niewielkie ilości odpadów nie emitujących promieniowania  $\alpha$  powstają w trakcie przerobu ścieków promieniotwórczych. Pochodzą one z różnych instalacji i laboratoriów. Odpady po zestaleniu i umieszczeniu w pojemnikach lub zatopieniu w blokach betonowych są lokowane w magazynach naziemnych lub dołach zagłębionych w grunt. W niektórych krajach odpady tego typu są składane w opuszczonych kopalniach. Jako przykłady magazynowania naziemnego bądź przy-

powierzchniowego można wymienić składowiska: Maxey Flats, Oak Ridge, West Valley i Los Alamos (USA), Drigg (Wielka Brytania) oraz La Manche (CSM – Francja). W niektórych krajach (np. w USA i RFN) do magazynowania odpadów nisko- i średnioaktywnych wykorzystano wyrobiska opuszczonej kopalni soli kamiennej (A. Brandstetter, A. Harwell, 1979).

Poza składowaniem naziemnym, traktowanym jako pewnego rodzaju prowizorium, część odpadów zatapia się na dnie oceanów. Odbywa się to pod kontrolą międzynarodową (IAEA), zgodnie z Konwencją Londyńską z 1961 i 1972 r. (Site selection factors..., 1977).

Odpady nisko- i średnioaktywne nie emitujące promieniowania  $\alpha$  mogą w przyszłości stworzyć poważne problemy techniczne, związane z masowością ich wytwarzania. Dlatego też w wielu krajach podejmowane są wysiłki nad pomniejszeniem ich ilości oraz ograniczeniem w nich koncentracji szkodliwych nuklidów. Prowadzone są również prace nad ograniczeniem do minimum zagrożenia przez nie biosfery w trakcie przechowywania.

Miejsca magazynowania odpadów reaktorowych, a więc wydzielających jedynie promieniowania  $\beta$  i  $\gamma$ , powinny zabezpieczać w pełni środowisko życiowe człowieka przed napromieniowaniem w okresie od kilkudziesięciu do kilkuset lat. Okresy rozpadu nuklidów krytycznych odpadów reaktorowych (Sr-90 i Cs-137) wynoszą około 30 lat.

Odpady nisko- i średnioaktywne emitujące promieniowanie  $\alpha$  powstają w zasadniczej swej masie w procesie przerobu wypalonego paliwa jądrowego. Pewne ich ilości nagromadzają się w trakcie produkcji elementów paliwowych oraz przy niektórych pracach laboratoryjnych. Odpady skażone emitarami promieniowania  $\alpha$  różnią się od odpadów wydzielających promieniowania  $\beta$  i  $\gamma$  skalą czasu bezpiecznej izolacji. Są one poza tym wytwarzane obecnie w niewielkich ilościach. Odpady te, podobnie jak odpady wysokoaktywne, wymagają starannej izolacji od biosfery przez tysiące lat. Zawierają one długowieczne emitery promieniowania  $\alpha$ , do których zaliczamy przede wszystkim izotopy plutonu i innych aktynowców.

Najbardziej niebezpieczne dla otoczenia jest wypalone paliwo i odpady wysokoaktywne. Paliwo jądrowe po wyjęciu z reaktora zawiera dość pokaźne ilości uranu 235, szereg izotopów plutonu oraz cały szereg krytycznych pierwiastków transuranowych. Odpady wysokoaktywne, powstałe z przerobu wypalonego paliwa, zawierają te same aktynowce oraz nieznaczne ilości nie dającego się usunąć uranu i plutonu. Wypalone paliwo, jak i odpady wysokoaktywne, ze względu na wywiązywanie się dużych ilości ciepła w pierwszym okresie magazynowania, (do 10 lat) muszą być przechowywane w odpowiednio chłodzonych pośrednich składowiskach naziemnych. Dopiero gdy moc cieplna odpadów osiągnie określony poziom, możliwe jest skierowanie ich do miejsca trwałego odizolowania. W przypadku usuwania wypalonego paliwa jądrowego pakiety prętów paliwowych umieszczone będą w specjalnych cylindrycznych pojemnikach ze stali lub miedzi, zaś odpady wysokoaktywne są stapiane ze szkliwem borowo-krzemowym i lokowane w osłonach ze stali nierdzewnej.

## SKŁADOWANIE PODZIEMNE ODPADÓW

Śledząc poczynania światowe lat siedemdziesiątych obserwuje się tendencję do odchodzenia od dotychczasowej, raczej prowizorycznej, taktyki składowania naziemnego odpadów lub zatapiania ich na dnie oceanów. Należy podkreślić.

że to ostatnie rozwiązanie spotyka się z coraz większą krytyką społeczności światowej. Poszukiwanie nowych, bardziej skutecznych i bezpiecznych rozwiązań należy wiązać z koniecznością przyszłego unieszkodliwiania wielkich ilości odpadów wysokoaktywnych. Zainteresowanie skierowano na składowaniu podziemnym w kontynentalnych formacjach geologicznych. Mogą to być specjalnie wykonane składowiska głęboko lokowane pod ziemią bądź opuszczone wyrobiska kopalniane. Masy skalne zalegające nad miejscem złożenia odpadów mają tworzyć zasadniczą barierę zabezpieczającą przed skażeniem promieniotwórczym biosfery. Izolacja ta przeciwdziałać ma migracji nuklidów krytycznych ku biosferze lub ograniczyć ją w czasie do poziomu bezpiecznego dla życia biologicznego.

Pojemniki z wypalonym paliwem względnie z odpadami wysokoaktywnymi będą umieszczane na głębokości 700–1500 m pod ziemią w otworach składowych, odwierconych z dna specjalnie wykonanej sieci wyrobisk górniczych. Zakłada się, że rozstaw wzajemny pojemników powinien umożliwić takie oddawania ciepła przez odpady, aby temperatura na powierzchni pojemników nie przekraczała 100°C. Po umieszczeniu pojemników otwory składowe, jak i wyrobiska zostaną wypełnione podsadzką, spełniającą rolę absorbera nuklidów. Pozostałe odpady mogą być umieszczone w wyodrębnionych polach składowania na tej samej głębokości co odpady wysokoaktywne lub lokowane w płycie położonych poziomach. Istnieją również koncepcje budowy odrębnych składowisk podziemnych dla odpadów reaktorowych (np. szwedzki projekt KBS „Alma”). Ogólnie przyjmuje się, że dla odpadów wytwarzających jedynie promieniowanie  $\beta + \gamma$  izolacja skalna może być ograniczona od kilkudziesięciu do 100 m. Natomiast dla odpadów nisko- i średnioaktywnych, wydzielających promieniowanie  $\alpha$ , głębokość lokowania odpadów powinna mieścić się w przedziale głębokości od 100 do 600 m. Projekty i koncepcje przewidują umieszczanie pojemników z odpadami nisko- i średnioaktywnymi w wyrobiskach komorowych z możliwym zastosowaniem materiałów podsadzkowych.

Realność koncepcji składowania głębokiego odpadów promieniotwórczych potwierdzają pierwsze realizacje eksperymentalne. Aktualnie budowane jest pilotujące składowisko głębokie w soli kamiennej (amerykański projekt WIPP w Nowym Meksyku), jak i w skałach ilastych (belgijski projekt w rejonie Mol). Niezależnie od realizacji wyżej wymienionych instalacji podziemnych rozpatrywane są również możliwości składowania odpadów nisko- i średnioaktywnych w opuszczonych głębokich kopalniach (RFN), w ługowniczych komorach solnych (RFN) oraz drogą zatłaczania płynnych odpadów z dodatkiem materiałów wiążących do głębokich szczelnych formacji geologicznych (USA, ZSRR, Szwajcaria).

#### BEZPIECZEŃSTWO SKŁADOWANIA PODZIEMNEGO

W zakresie bezpiecznego lokowania podziemnego odpadów promieniotwórczych istotną rolę odgrywa współpraca międzynarodowa, szczególnie w ramach Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu. Agencja ta powołała w latach siedemdziesiątych międzynarodową grupę ekspertów dla opracowania wytycznych geologicznych bezpiecznego składowania odpadów w głębokich formacjach geologicznych. Ze względu na uczestnictwo autora w pracach tej grupy, możliwe było przedstawienie w niniejszym opracowaniu częściowych wyników tych prac (Site investigation for..., 1980).

Przy selekcji i wyborze obszarów występowania skał przydatnych dla trwałej izolacji odpadów, jak i przy projektowaniu odpowiednich instalacji podziemnych ogólnie akceptowana jest koncepcja barierowego zabezpieczenia odpadów. Przez barierę podstawową uznaje się środowisko skalne o optymalnych parametrach geometrycznych, litologicznych, strukturalnych, hydrogeologicznych i fizyczno-mechanicznych. Wybrana lokalizacja ma w maksymalnym stopniu zabezpieczyć przed penetracją wód podziemnych w rejon składowania odpadów oraz ograniczyć do minimum możliwość ługowania nuklidów. Pozostałe bariery, o charakterze antropogennym, sprowadzają się do zestalania odpadów z materiałami odpornymi na proces ługowania, umieszczeniem ich w pojemnikach o wysokich parametrach antykorozyjnych, składowanie pojemników w osłonach z materiałów szczelnych dla penetracji wodnej i absorbujących nuklidy.

Pokładowe złoża soli kamiennej, skały krystaliczne typu granitoidów oraz wodoszczelne utwory ilaste są uważane za najodpowiedniejsze środowiska skalne dla wykonawstwa składowisk podziemnych.

## PROBLEM BEZPIECZEŃSTWA W POLSKICH KONCEPCJACH SKŁADOWANIA GŁĘBOKIEGO ODPADÓW JĄDROWYCH

Wstępna koncepcja składowania głębokiego, przyjętego dla polskiego programu zagospodarowania odpadów jądrowych, sprowadza się do instalacji podziemnej nawiązującej do głębokiej kopalni w systemie komorowo-filarowym. Łączyć ją ma z powierzchnią kilka szybów pionowych. Składowisko przeznaczone ma być dla trwałego izolowania od biosfery odpadów nisko-, średnio- i wysokoaktywnych, wyprodukowanych przez krajową energetykę jądrową do czwartej dekady lat dwutysięcznych. Pojemność wyrobisk zepalnionego składowiska po 50 latach nieprzerwanej eksploatacji oceniono na około 5,4 mln m<sup>3</sup> (J.K. Wierchoń, 1979).

Prace rozpoznawcze pozwoliły na wstępne wyselekcjonowanie obszarów możliwej budowy składowisk. Zaliczono do nich: cechsztyńskie złoża soli kamiennej w rejonie wypiętrzenia Łeby, archaiczne i dolnopaleozoiczne podłoże krystaliczne obniżenia podlaskiego, staropaleozoiczne i eokambryjskie łupki i mułowce zapadliska przedkarpackiego oraz górnokajprowe iłowce z obszaru monokliny przed-sudeckiej (Z. Duchnowski, 1980; E. Tatka, 1979; B. Nielubowicz, 1980). Wybrane strefy charakteryzują się odpowiednią litologią, stosunkowo spokojną tektoniką, znacznym rozprzestrzenieniem oraz wystarczającą miąższością i jednorodnością kompleksów skalnych. Drogą dalszych eliminacji wyznaczono trzy rejony na Pomorzu wschodnim oraz dwa na Białostocczyźnie.

Rejon pomorski umożliwia wykonanie składowiska w soli kamiennej. Mamy tu do czynienia z cechsztyńskim pokładem soli, o miąższości 130–200 m, który leży na głębokości 700–830 m. Przyjęto, że jednopoziomowe składowisko odpadów jądrowych (w tym i wysokoaktywnych) wykonane zostanie w przyspągowej strefie pokładu solnego (J.K. Wierchoń, 1979). Sól odizolowana jest w stropie i spągu ilastymi utworami nieprzepuszczalnymi. Powyżej soli mogą występować zawodnione i spękane wapienie margliste. Podobnie w spągu cechsztynu można oczekiwać pewnych stref wodonośnych. Stan zawodnienia nadległych nad cechsztynem utworów kenozoicznych i mezozoicznych jest dość znaczny. Szczególnie wodonośne są w tym obszarze piaski czwartorzędowe oraz wkładki piaszkowcowe i piaszczyste w osadach kredy, jury i triasu.

W analizie bezpieczeństwa przyszłego składowiska dużą wagę należy skoncentrować na istnieniu powiązań hydraulicznych poziomów wodnych oraz na możliwości długowiecznego oddziaływania na odpady wód zmineralizowanych. Wody zawarte w skałach mezozoicznych są typu chlorkowo-sodowego o mineralizacji ogólnej dochodzącej do 3,5–4%.

Aktualny stan rozpoznania hydrogeologicznego utrudnia sprecyzowanie zasadniczych zagrożeń wodnych i związanych z tym możliwych dróg migracji krytycznych nuklidów przez geosferę ku biosferze. Zagrożenia te sprowadzać się mogą do losowych przypadków przedarcia się wód w bezpośrednie sąsiedztwo odpadów. Najbardziej prawdopodobnymi drogami migracji wód mogą być nieszczelności poza obudową szybów lub przez nieprawidłowo wykonane uszczelnienia przestrzeni szybowych w trakcie likwidacji składowiska. Niebezpieczeństwo przedarcia się wód zewnętrznych w obszar solny składowiska wynikać może również z naruszenia szczelności skał izolujących pokład solny. Wywołane to może być nadmiernym oddziaływaniem pola temperaturowego składowiska na otaczający górotwór.

Wstępna koncepcja budowy składowiska w rejonie Białostoczczyzny (B. Nie-lubowicz, 1980) sprowadza się do wykorzystania w tym celu skał podłoża krystalicznego. Strop granodiorytów i gnejsów występuje tu na głębokości 360–470 m. Ponad utworami podłoża znajdują się skały osadowe. Są to utwory czwartorzędowe, trzeciorzędowe, kredowe, jurajskie, miejscami również eokambryjskie. Większość nadkładu jest silnie zawodniona i tworzy dwa niezależne horyzonty wodonośne – kenozoiczny i mezozoiczny. Rozgraniczająca je 100–130 metrowa warstwa nieprzepuszczalna lub słabo przepuszczalna krady piszącej reprezentuje osady kredy górnej. Warunki wodne w podłożu krystalicznym są nie rozpoznane (Z. Duchnowski, 1980). Należy domniemywać, że wglębne jego strefy są praktycznie nieprzepuszczalne a zawodniona jest jedynie zwietrzelina przystropowa. Zakłada się, że umieszczenie składowiska jednopoziomowego na głębokości około 750 m zabezpieczy je przed dopływem wód z przystropowej strefy zwietrzałej. Ulokowanie składowiska w szczelnych skałach podłoża krystalicznego nie może jednak wyeliminować niebezpieczeństwa i konsekwencji wynikających z możliwości przenikania lub przedarcia się wód podziemnych w rejon składowania. Wynika to zarówno z charakteru strukturalnego tego typu skał, jak i z konieczności rozpatrywania procesów filtracji i migracji wód w wymiarze geologicznym (okresy tysięcy lat bezpiecznego izolowania odpadów emitujących promieniowanie  $\alpha$ ). Dlatego istotny będzie wybór możliwie szczelnej strefy skał krystalicznych, pozbawionej większych nieciągłości tektonicznych i spękań oraz zalegającej pod możliwie cienką strefą zwietrzałą. Drugim istotnym elementem bezpieczeństwa składowania głębokiego będzie dobranie optymalnych parametrów technologicznych instalacji składowej wraz z zastosowaniem równie optymalnych rozwiązań dotyczących barier zabezpieczających.

## OCENA BEZPIECZNEGO SKŁADOWANIA ODPADÓW JĄDROWYCH

Ocena warunków bezpieczeństwa będzie nieodzowna dla określenia przyszłej prawidłowej funkcji składowiska i to niezależnie od wyboru jego lokalizacji. Bezpieczeństwo człowieka musi być podstawowym czynnikiem przy realizacji poszczególnych faz budowy składowiska, poczynając od wyboru miejsca a na pracach budowlano-górnictwowych i likwidacyjnych kończąc.

Sprecyzowanie warunków bezpiecznego składowania wymaga realizacji szeregu prac studialnych o charakterze ogólnym i szczegółowym. Podczas gdy prace studialne o charakterze ogólnym są użyteczne w okresie podejmowania decyzji lokalizacyjnych, oceny szczegółowe będą nieodzownymi elementami każdego z dalszych etapów prac. Podstawowym elementem tych założeń będzie określenie i zdefiniowanie zjawisk, które mogą oddziaływać na uwolnienie radionuklidów z miejsca składowania i ich wędrówkę przez geosferę i biosferę ku środowisku człowieka.

Szereg czynników i zjawisk może oddziaływać na naruszenie postulowanej izolacji odpadów. Niektóre z nich mogą być wynikiem oddziaływań indywidualnych przypadków losowych, większość z nich może być jednak rezultatem wzajemnego wpływu szeregu czynników. Zaliczyć do nich możemy:

- oddziaływania naturalnych procesów i zdarzeń, jak: przepływ wód podziemnych, erozja, zjawiska tektoniczne itp.;
- oddziaływania wynikające z działalności człowieka, np.: zmiany warunków wodnych, podziemne wyrobiska górnicze, wiercenia itp.;
- oddziaływania wzajemne pomiędzy odpadami a otaczającym środowiskiem skalnym, np.: zjawiska termomechaniczne, chemiczne, radiologiczne itp.

Ze względu na bezprecedensowy charakter podziemnego składowania odpadów jądrowych nie dysponujemy aktualnie fizycznymi możliwościami empirycznego sprawdzenia długowiecznej skuteczności tego typu zabezpieczenia biosfery przed skażeniem radiologicznym. Ocenia się, że najskuteczniejszym sposobem kontroli jest modelowanie procesu samego składowania. Celowa jest stała konfrontacja symulacji z nowymi danymi z badań i obserwacji. Nadto rezultaty będą musiały być stale konfrontowane z przyjętymi kryteriami bezpieczeństwa. Oceny bezpieczeństwa są elementami pierwszoplanowymi w każdej fazie realizacji programu unieszkodliwiania odpadów. Analizy te powinny również stanowić podstawę do uzyskania zezwoleń na realizację kolejnych etapów prac. Wyniki modelowania powinny być na bieżąco kontrolowane przez instytucję odpowiedzialną za bezpieczeństwo składowania.

Informacje zdobywane w trakcie selekcji obszarów i miejsc najodpowiedniejszych dla budowy składowiska ocenić należy jako szczególnie istotne dla poprawnej realizacji analizy bezpieczeństwa. Mając ten etap już częściowo za sobą trzeba sobie uświadomić, że od właściwego wyboru miejsca składowania oraz prawidłowego zaprojektowania prac budowlano-górnictwowych i inżynierskich zależy ryzyko naruszenia trwałej izolacji odpadów.

Wyniki uzyskane w trakcie prowadzenia rozpoznawczych prac geologicznych w wytypowanej lokalizacji mogą stanowić szczególnie cenne dane wyjściowe do modelowania analitycznego i matematycznego procesu trwałego izolowania odpadów jądrowych. W trakcie prac rozpoznawczych mogą być wyeliminowane te czynniki, które mogą oddziaływać ujemnie na trwałą izolację odpadów. Wyniki analiz bezpieczeństwa wpływać mogą w sposób istotny na dalszy przebieg prac rozpoznawczych. Odbywać się to powinno na zasadzie współzależności efektów kolejnych przybliżeń. Pełniejsza informacja i skoncentrowanie uwagi na najistotniejszych zjawiskach i faktach może znacznie usprawnić prace terenowe. Szczególnie ważną rolę odgrywać może wprowadzenie do układu modelowego nowych uściślających danych z dziedziny hydrogeologii, geochemii i mechaniki górotworu. Są to parametry oddziaływujące w decydujący sposób na mechanizm migracji radionuklidów oraz na charakterystykę pracy całego systemu składowania. W uzasadnionych wypadkach symulacja migracji nuklidów, jak i warunków geomechanicznych przechowywania podziemnego odpadów mogą być rozpatrywane jako

wyodrębnione elementy prac modelowych. Cenne dane wyjściowe do analizy bezpieczeństwa uzyskać można nie tylko z rozpatrywania wybranej lokalizacji, ale również i z danych dotyczących aktualnie dostępnych miejsc podobnego charakteru. Typowy przykład stanowi kopalnia Stripa w Szwecji, gdzie przeprowadzane są amerykańsko-szwedzkie eksperymenty nad termiką magazynowania podziemnego odpadów wysokoaktywnych w skałach krystalicznych (M. Hood, H. Carlsson, P.H. Nelson, 1979).

Informacjami wprowadzanymi do systemu przy modelowaniu migracji radionuklidów są dane dotyczące źródła promieniowania. Zalicza się do nich: koncentrację, retencję, dyspersję, rekonzentrację oraz bioakumulację.

Przy symulacji analogowej procesu przemieszczania się nuklidów ważna jest wiarygodność danych wyjściowych użytych w modelowaniu. Dane te muszą reprezentować w miarę możliwości ściśle informacje o charakterze naukowym. Wymaga to zaangażowania i pogłębienia wiadomości w takich dziedzinach, jak: wiarygodność długowiecznych prognoz geologicznych i przewidywań na temat zachowania się przyszłościowego materiałów, długotrwałych oddziaływań radionuklidów na otaczające środowisko skalne oraz ewolucji radiologicznej nuklidów w biosferze. Konieczność ekstrapolowania wyników badań krótkotrwałych na okresy mierzone czasem geologicznym narzuca bardzo ostre wymogi na dane wyjściowe użyte w modelowaniu (F. Girardi, G. Marsily, J. Weber, 1980).

W zależności od indywidualnych cech rozpatrywanego miejsca składowania ocena bezpieczeństwa może być bardziej lub mniej pracochłonna. Rozpoczyna się ona od zestawienia podstawowych danych ujmujących cały system składowania głębokiego, a więc: danych dotyczących charakterystyki wytypowanej lokalizacji, projektu magazynowania i opisu składowanych odpadów jądrowych. Dalszym etapem badań jest analiza potencjalnych mechanizmów naruszenia izolacji systemu zabezpieczającego. Mogą to być zarówno zjawiska lub zdarzenia możliwe do przewidzenia, jak i o charakterze losowym. W dalszej kolejności analizowane są wszystkie możliwe drogi przenikania nuklidów do środowiska życiowego człowieka. Określana jest spodziewana wielkość skażenia biosfery i konfrontowana z obowiązującymi w tym względzie normami. W przypadku uzyskania rezultatów możliwych do zaakceptowania uznaje się przeprowadzoną analizę za zadowalającą. W sytuacji przeciwnej przystępuje się do ponownych ocen w oparciu o zmiany lokalizacji lub projektu, bądź charakterystyki składowanych odpadów jądrowych. Przy rozpatrywaniu różnych mechanizmów migracji nuklidów znajduje zastosowanie szereg modeli matematycznych. Są to modele ogólne i szczegółowe. Pierwsze bazują na ogólnej znajomości systemu i danych uzyskiwanych z podstawowego rozpoznania wyselekcjonowanych obszarów lub jednego miejsca. Natomiast modele szczegółowe uwzględniają już specyfikę wytypowanej lokalizacji. Następuje to zwykle w oparciu o wyniki badań terenowych, laboratoryjnych i prac kameralnych.

Podsumowując dotychczasowe wywody należy podkreślić, że ostatecznym celem analizy bezpieczeństwa przechowywania podziemnego odpadów jądrowych jest bezsporne udowodnienie, że składowisko wybudowane w wybranym miejscu będzie spełniało wszystkie kryteria bezpieczeństwa postulowane przez odpowiednie organy nadzorcze oraz, że zastosowane bariery zabezpieczające, jak i ich kontrola nie mogą być zaburzone w ciągu tysięcy lat przez żadne zjawisko naturalne ani procesy lub zdarzenia wywołane przez świadomą lub nieświadomą działalność człowieka.

## PIŚMIENNICTWO

- BRANDSTETTER A., HARWELL M.A. (1979) – The waste isolation safety assessment program. Preprint, IAEA PNL-SA-7243/IAEA-SM 243/35. Symposium on Underground Disposal of Radioactive Waste. Otaniemi, Finland, 2–6 July 1979.
- DUCHNOWSKI Z. (1980) – Wybór i wstępna ocena hydrogeologiczna i geologiczno-inżynierska struktur dla składowania odpadów promieniotwórczych na obszarze Polski. Arch. Inst. Geol.
- GIRARDI F., MARSILY G., WEBER J. (1980) – Risk analysis of geological disposal of radioactive waste. Radioactive Waste Management and Disposal, Proceedings of the First European Community Conference, p. 531–551. Luxembourg, May 20–23, 1980.
- HOOD M., CARLSSON H., NELSON P.H. (1979) – Experiments conducted at Stripa, Sweden, to parameters for repository design. IAEA-SM-243/79. Symposium on Underground Disposal of Radioactive Waste. Otaniemi, Finland, 2–6 July 1979.
- NIELUBOWICZ B. (1980) – Wstępna ocena możliwości budowy w Polsce podziemnych składowisk na odpady jądrowe w skałach pozasolnych. Arch. Ośrod. Badawczo-Rozwojowego Górn. Surowców Chemicznych Kraków.
- SITE INVESTIGATION FOR THE DISPOSAL OF SOLID RADIOACTIVE WASTE IN DEEP CONTINENTAL GEOLOGICAL FORMATIONS (1980) – Draft report revised by the advisory group meeting. Vienna, 12–16 May, 1980.
- SITE SELECTION FACTORS FOR REPOSITORIES OF SOLID HIGH-LEVEL AND ALPHA-BEARING WASTES IN GEOLOGICAL FORMATIONS (1977) – IAEA, Technical Reports, Series No 177. Vienna.
- TATKA E. (1979) – Studium lokalizacyjne składowiska podziemnego na odpady promieniotwórcze w złożach soli. Arch. Ośrod. Badawczo-Rozwojowego Górn. Surowców Chemicznych. Kraków.
- WIERZCHOŃ J.K. (1979) – Koncepcja budowy składowiska odpadów promieniotwórczych w wytypowanej lokalizacji. Arch. Ośrod. Badawczo-Rozwojowego Górn. Surowców Chemicznych. Kraków.

Бохдан НЕЛЮБОВИЧ

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ  
ЯДЕРНЫХ ОТХОДОВ**

Резюме

В статье представлено состояние развития работ по безопасности хранения ядерных отходов в глубоких геологических формациях. Рассмотрен вопрос о том, какие существенные угрозы могут иметь место в случае реализации в Польше концепции создания глубокого хранилища для полной изоляции от биосферы высоко, средне и низкоактивных отходов. Эти отходы будут получаться при эксплуатации атомных электростанций.

Работы по реализации создания хранилищ в Польше находятся на этапе рассмотрения концепции подземного и наземного хранения. В случае выбора подземного варианта будут



вестись исследования на двух предварительно выбранных локализациях. Первая — это пластовая залежь каменной соли цехштейнового возраста на севере Польши, вторая — архейские и нижнепалеозойские породы кристаллического фундамента на востоке Польши. В обоих случаях над породами, признанными пригодными для размещения в них хранилища, залегают сильно обводнённые породы. Отдельные водоносные горизонты гидравлически связаны между собой. Обращено внимание на необходимость детального изучения гидрогеологических условий, являющихся основным элементом будущего безопасного хранения. Настоящее состояние гидрогеологической изученности не позволяет точно сформулировать возможную угрозу для водной системы, а в связи с этим и возможных путей миграции критических нуклидов из хранилища на поверхность. Оценено, что основную угрозу может представлять неправильная изоляция при создании и ликвидации шахт, а также чрезмерное влияние теплового поля хранилища высокоактивных отходов на окружающие породы. Эта последняя относится в основном к хранилищу в пласте каменной соли.

Bohdan NIELUBOWICZ

## GEOLOGICAL CONDITIONS IN DESIGNING UNDERGROUND RADIOACTIVE WASTE DUMPS

### Summary

The paper presents the progress in studies on safety of disposal of radioactive waste in deep-seated geological formations. Subsequently there are discussed the major hazards which may be expected when such deep-seated dumps are constructed in Poland in order to isolate high-, medium- and low-radioactivity waste from biosphere. The waste will be coming from nuclear power plants.

In Poland, works connected with designing waste disposal sites are nowadays at the stage of analysis of concepts of surface dumping and underground burial of the waste. When the latter solution is chosen, further studies will be aimed at two tentatively accepted locations: one in layered Zechstein rock salt deposits in northern Poland and the other — in Archaic and Lower Paleozoic crystalline basement rocks in eastern Poland. In both case the rocks chosen as appropriate for construction of disposal sites are overlain by strongly water-saturated rock series, with hydraulic contacts between individual aquifers. Attention is paid to the necessity of careful surveying the hydrogeological conditions as the major prerequisite of safety in waste storage. The present knowledge of hydrogeological conditions impedes identification of major potential water hazards and related possibilities of migration of critical nucleids from the dump to surface. The major hazards may be connected with insufficient sealing in time of construction and filling-up shafts and an excessive effect of thermal field of high-radioactivity waste dump on surrounding rock massif. The latter is mainly the case of waste storage in rock salt deposit.