



Leszek LANKOF\*

## ***Długoterminowa ocena bezpieczeństwa składowisk nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych***

Streszczenie: Składowanie nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych wymaga opracowania długoletniej koncepcji zapewniającej bezpieczeństwo środowiska. Narzędziem pozwalającym uwiarygodnić przyjęte koncepcje składowania jest kompleksowa ocena bezpieczeństwa opracowywana zarówno indywidualnie przez organizacje zajmujące się gospodarką odpadami promieniotwórczymi w poszczególnych krajach, jak również w ramach międzynarodowej współpracy np. pod auspicjami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu (MAEA). Prace prowadzone w ramach międzynarodowych projektów finansowanych przez MAEA pozwoliły na opracowanie założeń metodycznych w zakresie oceny bezpieczeństwa dla składowisk odpadów promieniotwórczych.

W niniejszym artykule zostaną przedstawione zagadnienie związane z oceną bezpieczeństwa obejmującą: charakterystykę systemu składowania oraz analizy bezpieczeństwa związane z oceną możliwości uwalniania i migracji izotopów promieniotwórczych do środowiska i pozwalającą na określenie poziomu narażenia na promieniowanie jonizujące.

Słowa kluczowe: odpady promieniotwórcze, ocena bezpieczeństwa, analizy bezpieczeństwa, składowisko nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych

### ***Safety study for the disposal of low and intermediate level radioactive waste***

Abstract: The storage of low and intermediate level radioactive waste requires the development of a long-term safety strategy ensuring environmental safety.

The tool for building confidence for the concepts of waste disposal is a comprehensive safety study which is developed individually by the organizations involved in radioactive waste management as well as within the framework of international cooperation e.g. under the auspices of the International Atomic Energy Agency in Vienna (IAEA). International cooperation within the framework of projects financed by the IAEA has allowed for the development of safety assessment methodologies for radioactive waste disposal facilities.

\* Dr, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: lankof@min-pan.krakow.pl

In this article, the issues regarding the safety study including disposal system characteristics and safety assessments of the potential radionuclide release and its migration in the geosphere to identify the level of exposure to ionizing radiation will be presented.

Keywords: radioactive waste, safety study, safety assessment, low and intermediate radioactive waste repository

## **Wprowadzenie**

Składowanie odpadów promieniotwórczych jest finalnym etapem procesu gospodarki odpadami promieniotwórczymi. Składowiska tych odpadów są projektowane w taki sposób, aby zapewnić maksymalną ochronę ludzi i środowiska przed skutkami promieniowania jonizującego zarówno w fazie operacyjnej, jak i po jego zamknięciu, jak również ograniczać do minimum prawdopodobieństwo nieumyślnego wtargnięcia niepowołanych osób w obręb składowiska. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi powinna stosować bezpieczne dla środowiska oraz technicznie odpowiednie i wykonalne rozwiązania (IAEA i in. 2006).

W przypadku wszystkich obiektów jądrowych, jak również składowisk odpadów promieniotwórczych, podstawową odpowiedzialność za ich prawidłowe działanie ponosi operator obiektu. Jest on również odpowiedzialny za oszacowanie bezpieczeństwa poprzez przedstawienie odpowiednich analiz potwierdzających zgodność parametrów projektowych i operacyjnych danych obiektów z odpowiednimi wymogami bezpieczeństwa (IAEA 2011).

Długoterminowa analiza bezpieczeństwa jest zbiorem naukowych, technicznych i administracyjnych argumentów potwierdzających brak zagrożeń ze strony obiektów jądrowych i składowisk odpadów promieniotwórczych dla środowiska.

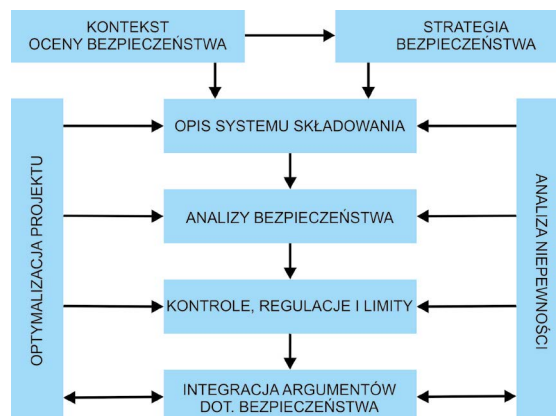
Długoterminowe analizy bezpieczeństwa obejmują wszelkie argumenty, badania i analizy związane ze wszystkimi fazami działalności składowisk odpadów promieniotwórczych od wyboru odpowiedniej lokalizacji, poprzez projekt, budowę, fazę operacyjną obiektu, jego zamknięcie, fazę instytucjonalnej kontroli oraz okres wykraczający poza kontrolę obiektu.

### **1. Składowanie odpadów nisko- i średnioaktywnych**

W przypadku gospodarki nisko- i średnioaktywnymi odpadami promieniotwórczymi analizy bezpieczeństwa powinny być prowadzone począwszy od fazy koncepcyjnej składowiska, aż po wygaśnięcie licencji dla jednostki odpowiedzialnej za gospodarowanie tymi odpadami (IAEA 1999). Na rysunku 1 zostały schematycznie przedstawione komponenty długoterminowej oceny bezpieczeństwa obejmującej cały proces gospodarowania odpadami promieniotwórczymi.

Ocena bezpieczeństwa systemu składowania odpadów promieniotwórczych jest procesem iteracyjnym, wymagającym ciągłej weryfikacji wraz z nowymi danymi pochodzącymi z analiz bezpieczeństwa dotyczących zarówno projektu składowiska, badań środowiskowych w rejonie planowanej lokalizacji składowiska, jak również, badań materiałowych barier inżynierskich składowiska.

Celem oceny bezpieczeństwa jest określenie możliwości osiągnięcia odpowiedniego poziomu ochrony zdrowia ludzkiego i ochrony środowiska w fazie eksploatacyjnej i poeksploatacyjnej składowiska odpadów promieniotwórczych. Oceny bezpieczeństwa sporządza-



Rys. 1. Elementy składowe długoterminowej oceny bezpieczeństwa (IAEA 2012a)

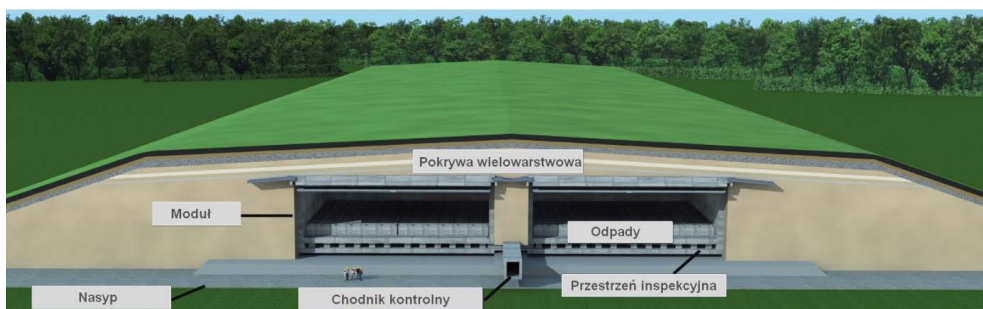
Fig. 1. Components of the safety case (IAEA 2012a)

ne są najczęściej w przypadku budowy nowych składowisk odpadów promieniotwórczych oraz w celu przedłużenia licencji na dalsze składowanie odpadów w przypadku istniejących składowisk.

### 1.1. System składowania nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych

Podstawowe elementy systemu składowania rozpatrywane w długoterminowej ocenie bezpieczeństwa stanowią: składowisko odpadów promieniotwórczych, otaczające go środowisko geologiczne oraz biosfera (IAEA 2012b).

Projekt powierzchniowego składowiska odpadów nisko- i średnioaktywnych zakłada zazwyczaj zastosowanie wielobarierowej izolacji izotopów promieniotwórczych od otaczającego środowiska. Schematyczny projekt powierzchniowego składowiska nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schematyczny projekt składowiska nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych (SCK-CEN Science Platform, <http://science.sckcen.be/en>)

Fig. 2. The scheme of near surface repository of low and intermediate level radioactive waste (after SCK-CEN Science Platform, <http://science.sckcen.be/en>)

W przypadku tego rodzaju składowisk pierwszą podstawową barierę izolującą odpady od środowiska stanowi materiał wiążący. Bariera ta powstaje na etapie zestalania lub utrwalania odpadów. Ma ona za zadanie przeciwdziałać wymywaniu izotopów promieniotwórczych i zabezpieczać je przed wpływem wysokich temperatur. Jest ona również zabezpieczeniem przed uszkodzeniami mechanicznymi w czasie transportu i składowania. Materiałami wiążącymi odpady promieniotwórcze są najczęściej: beton, asfalt, polimery organiczne lub masy ceramiczne. Postać materiału wiążącego uzależniona jest od postaci chemicznej i fizycznej oraz aktywności odpadów.

Kolejną barierę stanowi opakowanie najczęściej w postaci betonowych lub metalowych pojemników. Bariera ta spełnia również funkcję osłabiającą promieniowanie i spowalniającą uwalnianie się radionuklidów.

Trzecią barierą jest konstrukcja składowiska. Zabezpiecza ona odpady przed wpływem czynników zewnętrznych i ogranicza tempo korozji opakowań i materiałów wiążących. Stanowi również podstawową osłonę biologiczną przed promieniowaniem. Materiały betonowe stosowane do budowy konstrukcji składowiska znacznie wykraczają swoją trwałością poza okres działalności składowisk i wymaganego okresu instytucjonalnego monitoringu składowisk. W przypadku kontaktu z wodą wytwarzają równocześnie barierę geochemiczną w postaci silnie alkalicznego środowiska obniżającego rozpuszczalność materiałów wiążących odpady.

Kolejną barierę tworzy wielowarstwowa pokrywa ziemna, która znacznie ogranicza infiltrację wód opadowych do składowiska do zaledwie kilku mm rocznie (IAEA 2004a).

Ostatnią barierę stanowią uwarunkowania geologiczne i hydrogeologiczne lokalizacji składowiska, ograniczające ewentualną migrację radionuklidów do wód podziemnych.

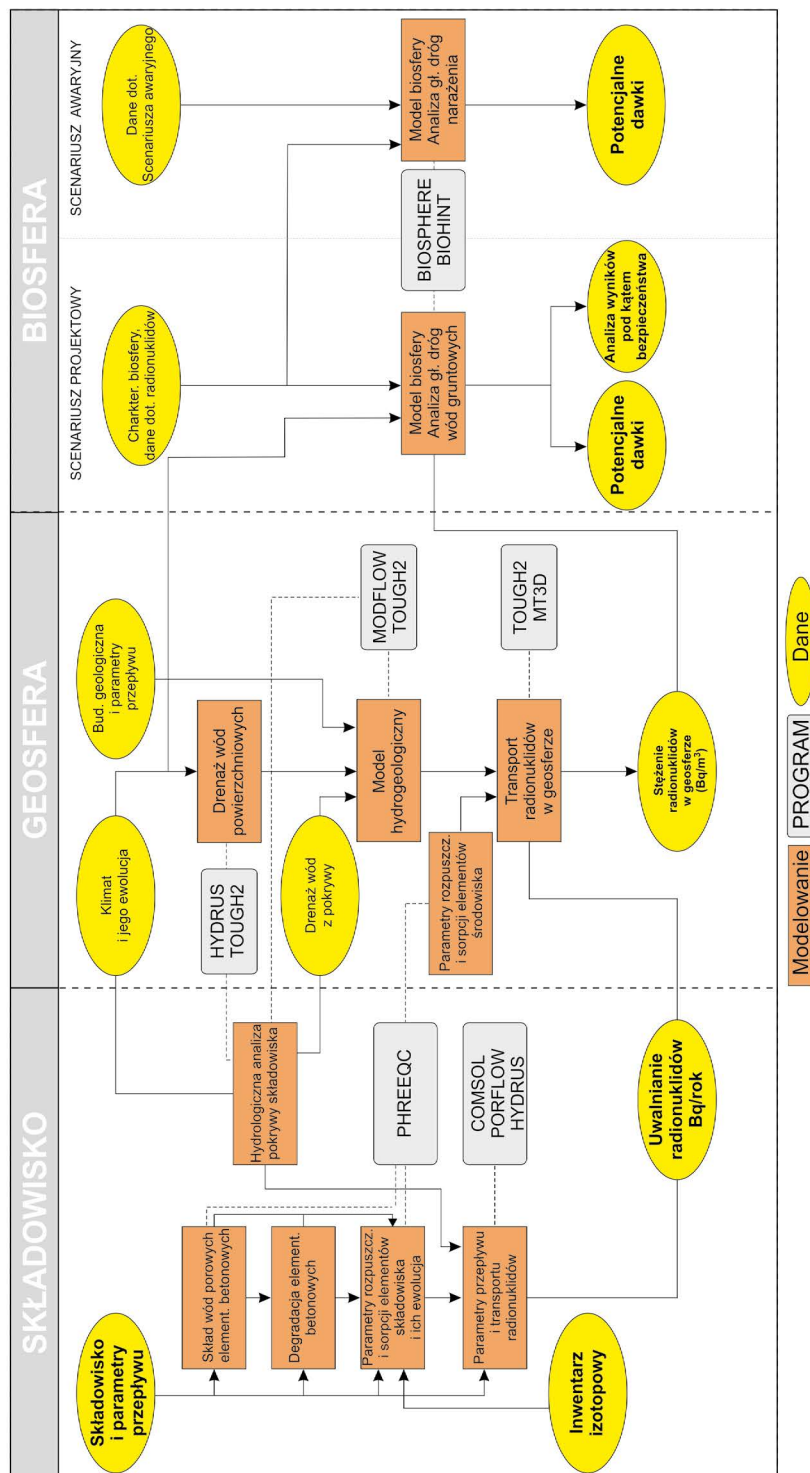
## **2. Analiza bezpieczeństwa związana z oceną uwalniania i migracji izotopów promieniotwórczych**

Jednym z najbardziej istotnych elementów oceny długotrwałego bezpieczeństwa składowisk odpadów promieniotwórczych są tzw. analizy bezpieczeństwa związane z oceną możliwości uwolnienia izotopów promieniotwórczych ze składowiska i ich migracją w otaczającym środowisku (IAEA 2004a, 2004b).

Zakres potrzebnych danych, modelowanych procesów, jak również przykładowych narzędzi obliczeniowych potrzebnych do przeprowadzenia kompleksowej oceny zagrożenia związanego z uwalnianiem się radionuklidów do środowiska przedstawia rysunek 3.

### **2.1. Modelowanie uwalniania radionuklidów ze składowiska**

W pierwszym etapie analizy takie wymagają określenia danych dotyczących budowy składowiska, rodzaju składowanych odpadów i ich rozmieszczenia oraz zastosowanych barier inżynierskich. Następnie prowadzone są prace modelowe określające m.in. skład wód porowych w elementach konstrukcyjnych składowiska, tempo degradacji barier inżynierskich, parametry przepływu i transportu radionuklidów w obrębie barier wewnętrznych składowiska, jak również parametry hydrochemiczne pokrywy składowiska. Pozwalają one



Rys. 3. Zakres danych, modelowanych procesów i przykładowych narzędzi obliczeniowych wykorzystywanych do oceny zagrożenia związanego z uwalnianiem się radionuklidów do środowiska (na podstawie *SKC-CEN Science Platform*, <http://science.sckcen.be/en>)

Fig. 3. The scope of data, modeled processes and numerical tools for assessment of radiation exposure due to release of radionuclide to geosphere (after *SKC-CEN Science Platform*, <http://science.sckcen.be/en>)

na ocenę tempa uwalniania radionuklidów ze składowiska do otoczenia. Zazwyczaj rozpatrywane są projektowe scenariusze uwalniania radionuklidów wynikające z parametrów zastosowanych materiałów i koncepcji składowania odpadów oraz scenariusze awaryjne mogące prowadzić do nagłego uwolnienia izotopów promieniotwórczych ze składowiska (IAEA 2001a, 2001b; NEA OECD 2001).

## 2.2. Modelowanie migracji radionuklidów w obrębie geosfery

Kolejny etap analizy obejmuje ocenę migracji izotopów promieniotwórczych w obrębie środowiska geologicznego. Na tym etapie konieczne jest (Lankof i Pająk 2014):

- opracowanie modelu geologicznego i hydrogeologicznego pozwalającego na określenie głównych dróg transportu ewentualnego skażenia,
- identyfikacja procesów i struktur odpowiedzialnych za transport radionuklidów i jego retardację,
- opracowanie modelu numerycznego migracji,
- testowanie i walidacja opracowanych modeli.

### Modele geologiczne i hydrogeologiczne

Opracowanie modelu geologicznego i hydrogeologicznego wymaga m.in. określenia budowy geologicznej badanego ośrodka determinującej występowanie wód, a w szczególności rozprzestrzenienia utworów wodonośnych, charakterystyki litologicznej i składu mineralnego poszczególnych warstw, miąższości warstw wodonośnych i warstw izolujących oraz charakteru porowatości i dróg krążenia wód podziemnych. Ponadto konieczne jest przeprowadzenie badań określających podstawowe parametry hydrogeologicznych skał wodonośnych i izolujących, parametrów wód podziemnych. Następnie należy określić warunki zasilania, przepływu i drenażu wód w badanym obszarze oraz występowanie ewentualnych czynników antropogenicznych kształtujących przepływ i zasilanie wód podziemnych (IAEA 2001a; Dąbrowski i in. 2003).

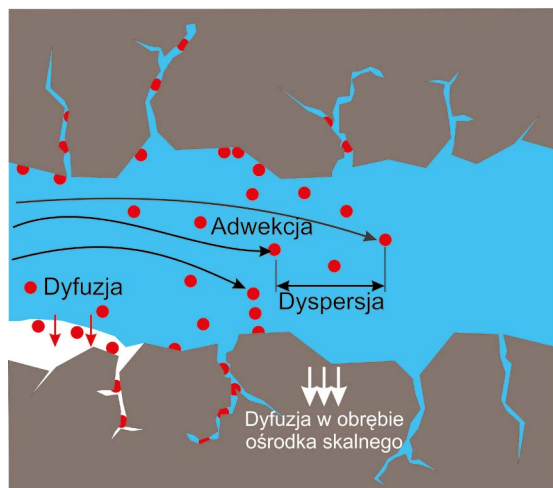
### Procesy transportu radionuklidów w środowisku

Procesy transportu radionuklidów w głównej mierze zależą od ośrodka skalnego, w którym następuje ich uwolnienie oraz od istniejących warunków geochemicznych.

Podstawowe procesy transportu izotopów promieniotwórczych w obrębie geosfery zostały schematycznie przedstawione na rysunku 4.

Podstawowym procesem odpowiedzialnym za transport radionuklidów w środowisku geologicznym jest adwekcja. Jest to proces swobodnego unoszenia radionuklidów w postaci rozpuszczonej w roztworze lub w postaci koloidalnych związków przez przepływające wody. Prędkość rozprzestrzeniania się radionuklidów jest ściśle związana z prędkością przepływających wód. Gradient ciśnienia w obrębie wód gruntowych będący ich siłą napędową wynikającą z różnicy poziomów wód gruntowych, temperatury wód, czy też gęstości związanej z zasoleniem. Końcowy efekt rozprzestrzenienia radionuklidów w środowisku geologicznym w wyniku adwekcji jest określany również jako dyspersja hydrodynamiczna.

Kolejnym procesem uwzględnianym w modelowaniu transportu izotopów promieniotwórczych w obrębie geosfery jest dyfuzja. Proces ten polega na rozprzestrzenianiu się



Rys. 4. Schemat ilustrujący procesy transportu izotopów promieniotwórczych w szczelinowatym ośrodku skalnym (Russel i in. 2005)

Fig. 4. The scheme illustrating processes of radionuclide transport in fractured media (Russel et al. 2005)

radionuklidów w danym ośrodku w kierunku obszarów o niższej wartości gradientu chemicznego. Siłą napędową procesu jest dążenie układu do równowagi termodynamicznej przez osiągnięcie jak najwyższej entropii i jak najniższej energii swobodnej. Efektem dyfuzji jest wyrównywanie się stężeń wszystkich składników w całej objętości modelowanej fazy. Prędkość dyfuzji zależy od wartości gradientu stężenia składników, jak również od współczynnika dyfuzji poszczególnych roztworów. Współczynnik dyfuzji jest funkcją właściwości skały (m.in. krętości kanałów porowych), wód gruntowych, a w szczególności ich temperatury oraz właściwości substancji dyfundującej.

Dodatkowo, oprócz bezpośrednich mechanizmów transportu poprzez adwekcję i dyfuzję, mogą występować złożone procesy transportu wód gruntowych i radionuklidów wywołane gradientem termicznym, chemicznym lub elektrycznym obejmujące m.in. osmozę, hiperfiltrację czy elektroforezę. W większości przypadków transport radionuklidów wywołany powyższymi procesami jest niewielki w porównaniu z adwekcją i dyfuzją, jednak w niektórych przypadkach (np. minerały ilaste) procesy osmozy i hiperfiltracji mają istotne znaczenie (Russel i in. 2005).

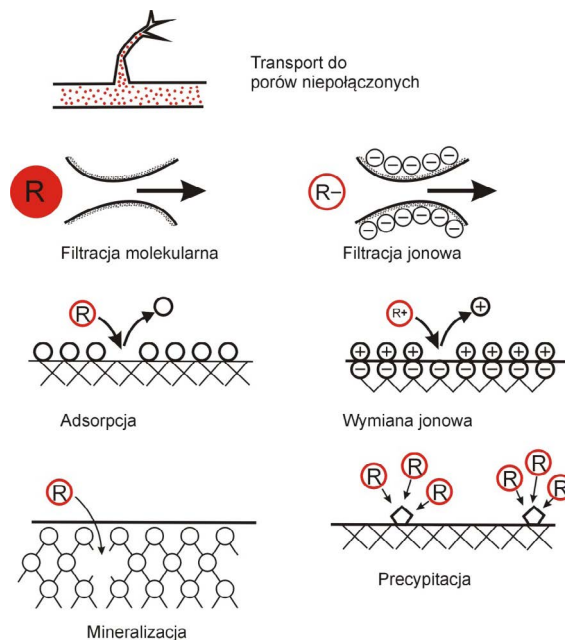
### *Procesy opóźniające transport radionuklidów*

W modelowaniu migracji radionuklidów w obrębie geosfery istotne są również mechanizmy odpowiedzialne za opóźnianie ich transportu. Podstawowe mechanizmy wpływające na opóźnianie transportu radionuklidów przedstawia rysunek 5.

Podstawowe mechanizmy odpowiedzialne za opóźnianie transportu radionuklidów, to transport do porów niepołączonych, filtracja molekularna, adsorpcja, wymiana jonowa, mineralizacja i precypitacja.

Adsorpcja i wymiana jonowa często określane są wspólnym terminem sorpcji. Adsorpcja jest procesem wiązania się cząsteczek, atomów lub jonów na powierzchni lub granicy faz fizycznych. Wymiana jonowa z kolei to proces wymiany ruchliwych jonów na inne jony





Rys. 5. Mechanizmy opóźnienia transportu radionuklidów w środowisku geologicznym (wg Russel i in. 2005)

Fig. 5. The mechanisms of radionuclide transport retardation in geosphere (Russel et al. 2005)

tego samego znaku zachodzący na powierzchniach zjonizowanych. Procesy sorpcyjne są zasadniczo modelowane jako proces odwrotny do uwalniania radionuklidów do roztworu w wyniku zmiany stężenia. Kinetyka procesu desorpcji jest znacznie wolniejsza niż procesu sorpcji. Istnieją również przypadki, w których sorpcja modelowana jest jako proces nieodwracalny (głównie w przypadku relatywnie krótkiego czasu modelowania).

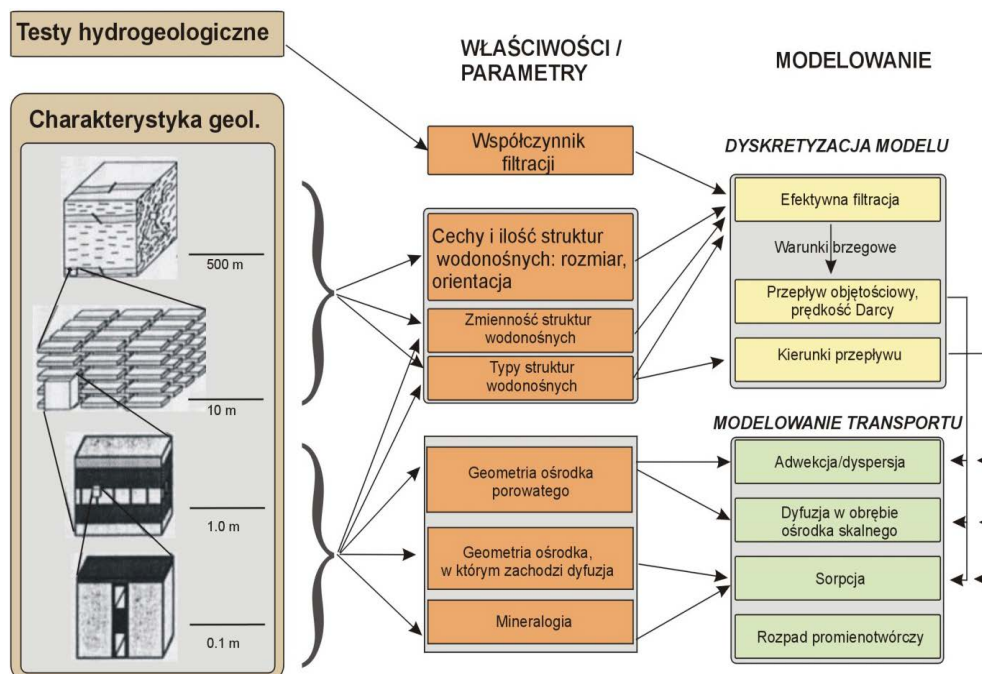
W wielu przypadkach wody gruntowe mogą ulegać stagnacji w ośrodku skalnym, co prowadzi do dyfuzji izotopów promieniotwórczych ze struktur przewodzących wodę do wód stagnujących w przestrzeniach porowych, jak również w kierunku przeciwnym w zależności od stężenia radionuklidów w poszczególnych ośrodkach. Proces ten określany jako *matrix diffusion* również prowadzi do opóźnienia migracji radionuklidów w środowisku.

### Struktury istotne w modelowaniu migracji radionuklidów

Transport radionuklidów w istotny sposób zależy od budowy geologicznej ośrodka, od jego geometrii, warunków geochemicznych i hydrogeologicznych. W większości przypadków za transport radionuklidów odpowiedzialne są struktury wodonośne stanowiące główne drogi ich migracji. Mogą to być zarówno struktury sedymentacyjne (warstwy, soczewki, kanały aluwialne itp.), jak i tektoniczne (uskoki, fleksury, strefy brekcji itp.). Zróżnicowanie ośrodka ma znaczny wpływ na udział poszczególnych procesów kontrolujących transport radionuklidów, dlatego nawet w przypadku modelowania transportu w skali setek metrów nie należy pomijać istniejących zmian lub uśredniać ich wartości.

Charakterystyka geologiczna ośrodka, w którym modelowany jest transport radionuklidów, powinna uwzględniać zarówno zmiany występujące w małej skali (Moeri i in. 2003),





Rys. 6. Charakterystyka ośrodka skalnego i zakres danych wykorzystanych do modelowania transportu radionuklidów w zależności od skali (wg Mazurek i in. 1997)

Fig. 6. Site characterization and data scope used for radionuclide transport modeling depending on the scale (after Mazurek i in. 1997)

jak również w większej skali (Mazurek i in. 1997). Na rysunku 6 przedstawiono przykład ilustrujący zakres danych pochodzących z badań terenowych i laboratoryjnych wykorzystanych do modelowania transportu radionuklidów w sąsiedztwie składowiska odpadów promieniotwórczych w zależności od skali (Mazurek i in. 1997).

W innych ośrodkach skalnych, np. w obrębie skał ilastych, niski współczynnik filtracji, brak szczelin, w których dochodzi do przepływu wód powoduje z kolei, że głównym procesem odpowiedzialnym za transport radionuklidów jest dyfuzja opóźniana dodatkowo poprzez sorpcję. Również inne złożone procesy transportu nabierają znaczenia w przypadku tego typu skał szczególnie w przypadku występowania znacznego gradientu termicznego.

### Opracowanie modeli numerycznych

Kolejnym etapem analizy bezpieczeństwa związanej z oceną uwalniania i migracji izotopów promieniotwórczych do środowiska jest opracowanie modeli numerycznych odzwierciedlających w sposób ilościowy procesy migracji radionuklidów przedstawione za pomocą modeli koncepcyjnych.

Na etapie modelowania wymagane jest określenie przestrzennego rozkładu stałych opisujących warunki geologiczne i hydrogeologiczne w obszarze objętym modelowaniem.

Opracowanie modeli numerycznych wymaga uproszczenia wcześniej opracowanych modeli geologicznych i hydrogeologicznych, wynikającego najczęściej z geometrii ośrodka

i jego anizotropii oraz określenia warunków brzegowych uwzględniających geometrię i wartości parametrów ośrodka.

Większość przypowierzchniowych składowisk odpadów promieniotwórczych lokowana jest w ośrodkach, gdzie głównym mechanizmem transportu radionuklidów jest adwekcja, dlatego też proces propagacji skażenia najczęściej opisywany jest za pomocą równania różniczkowego Darcy'ego.

Do symulacji migracji radionuklidów w obrębie środowiska geologicznego zostało opracowanych wiele programów komputerowych zarówno ogólnodostępnych, jak i komercyjnych. Różnią się one zastosowaną metodą symulacyjną, możliwością modelowania w określonych ośrodkach skalnych (porowate i spękane), zastosowanym rodzajem solvera czy możliwością modelowania ilości transportowanych faz.

Podstawowym celem prowadzonych symulacji migracji radionuklidów w środowisku geologicznym w rejonie przypowierzchniowych składowisk promieniotwórczych odpadów nisko- i średnioaktywnych jest ustalenie kierunków i intensywności przepływu wód podziemnych i określenie rozkładu stężenia radionuklidów uwolnionych do środowiska.

Opracowane modele numeryczne wymagają dokładnego przetestowania, ponieważ stanowią podstawę do oceny narażenia na promieniowanie. Bezpośrednie testowanie rezultatów modelowania transportu radionuklidów w środowisku geologicznym jest niemożliwe ze względu na skalę i czas założony w modelach. Zaufanie do opracowanych modeli można zatem zdobyć poprzez wykazanie spójności przyjętych założeń i powiązanych baz danych z dużą ilością różnorodnych obserwacji i eksperymentów (Russel i in. 2005).

W przypadku modelu transportu radionuklidów w środowisku geologicznym testowanie powinno dotyczyć:

- adekwatności wyboru modelowanych procesów wchodzących w skład modelu,
- adekwatności technik gromadzenia danych i przenoszenia rezultatów eksperymentów laboratoryjnych w warunki *in situ*,
- zrozumienia i modelowania poszczególnych procesów,
- modelowania procesów złożonych w modelu transportu.

Powyższe cechy mogą być testowane za pomocą eksperymentów terenowych i badań laboratoryjnych. Należy jednak pamiętać, że może występować wiele specyficznych różnic w obrębie istotnych struktur wpływających na wartość zastosowanych parametrów.

Większość eksperymentów terenowych prowadzona jest w skali kilku do kilkudziesięciu metrów, podczas gdy modele dotyczą znacznie większego obszaru. Skala czasowa ponadto różni się znacznie bardziej w modelach w stosunku do prowadzonych eksperymentów.

### 2.3. Ocena narażenia na promieniowanie jonizujące

Wyniki prowadzonych modeli migracji radionuklidów w obrębie geosfery prowadzą do określenia stężenia poszczególnych izotopów promieniotwórczych w czasie i przestrzeni. Wyniki te stanowią podstawę do określenia poziomu narażenia na promieniowanie jonizujące w obrębie biosfery. W tym celu tworzone są szczegółowe modele określające składniki biosfery i główne drogi narażenia na promieniowanie. Opracowywane są również modele koncentracji skażenia w poszczególnych komponentach biosfery.

Na opracowanych modelach transportu radionuklidów w obrębie geosfery i biosfery określone są potencjalne wielkości dawek promieniowania za pomocą wskaźników konwersji aktywności promieniowania publikowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA 2001b).

## Podsumowanie

Proces składowania nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych wymaga określenia poziomu bezpieczeństwa podejmowanych działań w tym zakresie. W tym celu opracowywane są długoterminowe oceny bezpieczeństwa obejmujące swym zakresem wszystkie etapy procesu postępowania z odpadami. Jednym z najistotniejszych zagadnień związanych z oceną bezpieczeństwa i poziomem narażenia na promieniowanie jest modelowanie procesów uwalniania radionuklidów ze składowiska i ich migracji w środowisku. Modelowania takie wymagają opracowania modeli koncepcyjnych i scenariuszy uwalniania radionuklidów do środowiska, opracowania modeli geologicznych i hydrogeologicznych, identyfikacji podstawowych procesów i struktur odpowiedzialnych za transport radionuklidów oraz opracowanie modeli numerycznych odzwierciedlających w sposób ilościowy procesy migracji radionuklidów przedstawione za pomocą modeli koncepcyjnych. Prowadzone w ten sposób analizy bezpieczeństwa w znaczny sposób przyczyniają się do budowania zaufania do jakości prac prowadzonych w procesie składowania odpadów promieniotwórczych mających na celu wykluczenie narażenia na promieniowanie jonizujące.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej IGSMiE PAN.

## Literatura

- Dąbrowski i in. 2003 – Dąbrowski, S., Kapuściński, J., Nowicki, K., Przybyłek, J. i Szczepański, A. 2003. *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych – poradnik*. ISBN 8362662417, Wyd. Ministerstwo Środowiska 2003.
- IAEA 1999. Safety Assessment for Near Surface Disposal Facilities. Safety Guide No. WS-G-1.1, IAEA, 1999.
- IAEA 2001a. Characterization of groundwater flow for near surface disposal facilities IAEA-TECDOC-1199 Waste Technology Section International Atomic Energy Agency Wagramer Strasse 5 P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria.
- IAEA 2001b. Generic Models for Use in Assessing The Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Reports Series No.19. Wagramer Strasse 5 P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria.
- IAEA 2004a. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Vol. 1 Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. ISBN 92-0-104004-0 © IAEA, 2004.
- IAEA 2004b. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Volume 2 – Test Cases ISBN 9201040040, IAEA, 2004.
- IAEA 2011. *Disposal of Radioactive Waste*, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna, 2011.
- IAEA 2012a. The Safety Case and Safety Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide No. SSG-23, IAEA, 2012.
- IAEA 2012b. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards No. SSG-23, International Atomic Energy Agency Vienna, 2012.
- International Atomic Energy Agency, European Atomic Energy Community, Food And Agriculture Organization Of The United Nations, International Labour Organization, International Maritime Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World

- Health Organization 2006 – *Fundamental Safety Principles*, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006.
- Lankof, L. i Pająk, L. 2014. Założenia metodyczne w zakresie modelowania migracji radionuklidów w środowisku geologicznym w sąsiedztwie składowisk nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój 2*.
- Mazurek i in. 1997 – Mazurek, M., Gautschi, A. i Zuidema, P. 1997. The Geological Basis and the Representation of Spatial Variability in Fractured Media. In Proceedings of the second GEOTRAP Workshop (held in Paris, France), OECD/NEA, Paris, France.
- Moeri i in. 2003 – Moeri, A., Mazurek, M., Adler, M., Schild, Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ota, K., Ando, T., Alexander, W.R., Smith, P.A., Haag, P. i Buehler, C. 2003. Grimsel Test Site Investigation Phase IV (1994–1996): The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock IV : The insitu study of matrix porosity in the vicinity of a water conducting fracture. Nagra Technical Report NTB 00-08. Nagra, Wettingen.
- NEA OECD 2001. Scenario Development Methods and Practice. An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development. OECD Publications, Paris France.
- Russell i in. 2005 – Russell, A.W., Smith, P.A. i McKinley, I.G. 2005. Modelling radionuclide transport in the geological environment: A case study from the field of radioactive waste disposal [W:] Scott E.M. ed. Modelling Radioactivity in the Environment, Elsevier 2005.
- SCK-CEN Science Platform [Online] Dostępne w: <http://science.sckcen.be/en> [Dostęp: 2.03.2016].