

Głębokie składowiska długożyciowych, wysokoaktywnych odpadów radioaktywnych z uwzględnieniem roli minerałów ilastych

Deep repositories of long-lived, high-level radioactive waste with a focus on the role of clay minerals

Anna Przelaskowska, Grażyna Łykowska

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W związku z planami rozwoju energetyki jądrowej w Polsce istotnym zagadnieniem staje się problem składowania odpadów promieniotwórczych. Najbezpieczniejszą opcją dla długożyciowych odpadów wysokoaktywnych, do jakich zalicza się wypalone paliwo jądrowe, są składowiska zlokalizowane w głębokich strukturach geologicznych. System głębokiego składowania odpadów promieniotwórczych, gwarantujący długotrwałe bezpieczeństwo, jest oparty na koncepcji wielobarierowej, obejmującej bariery naturalne, jakimi są różne ośrodki skalne, oraz bariery inżynierskie. Skąły i minerały ilaste mogą pełnić dwojaką funkcję w składowaniu odpadów promieniotwórczych. Formacje ilaste stanowią naturalne bariery ochronne, w tej roli wykorzystywane są np. we Francji formacje ilaste Callovo-Oxfordian i w Szwajcarii formacje Opalinus Clay. Z drugiej strony skąły ilaste o dużych właściwościach pęczniących, takie jak bentonity, wchodzą w skład geotechnicznych systemów barier (ang. *engineered barrier systems*, EBS). Wykorzystanie bentonitów w roli bufora w składowiskach odpadów promieniotwórczych jest związane z właściwościami takimi jak: dominacja transportu dyfuzyjnego i niska przepuszczalność, wysokie zdolności absorpcyjne i dobre właściwości pęczniące, umożliwiające samouszczelnienie. W pracy dokonano przeglądu istniejących i planowanych głębokich składowisk odpadów wysokoaktywnych na świecie. Przykładem takiego składowiska jest obiekt w szwedzkim Forsmark, zaprojektowany z wykorzystaniem metody KBS-3. W metodzie tej wypalone paliwo jądrowe składowane jest najpierw przez 30 lat w składowisku pośrednim, a następnie zostaje umieszczone w miedzianych kapsułach z żeliwnym wkładem. Kapsuły są otoczone warstwą buforu bentonitowego o grubości 2 m i składowane na głębokości około 500 m w granitowych skałach. Bufor bentonitowy odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu podstawowych funkcji bezpieczeństwa, czyli ograniczenia (całkowita izolacja odpadów) i opóźnienia (zmniejszenie tempa migracji radionuklidów w razie niepowodzenia izolacji, np. rozszczelnienia kapsuły). W pracy przedstawiono różne funkcje bezpieczeństwa zapewniane przez minerały ilaste, a także metody badawcze stosowane w analizach ilów wykorzystywanych w składowiskach odpadów promieniotwórczych. Wieloletnie, szeroko zakrojone badania dotyczące zarówno lokalizacji składowiska, jak i roli barier geotechnicznych mających sprawować funkcję ochronną przed ewentualnymi zagrożeniami są niezbędne ze względu na konieczność zabezpieczenia odpadów na bardzo długi czas bez ingerencji człowieka.

Słowa kluczowe: głębokie składowisko odpadów radioaktywnych, bariera geotechniczna, bentonit, transport dyfuzyjny, właściwości pęczniące.

ABSTRACT: In light of plans for nuclear power development, radioactive waste storage is becoming an important issue in Poland. The safest option for long-lived, high-level waste, including spent nuclear fuel, involves repositories located in deep geological structures. The deep disposal system for nuclear waste, which guarantees long-term safety, is based on a multi-barrier concept with natural barriers (host rock) and engineered barrier systems. Clay minerals and rocks can be used both as host rock, as in France (Callovo-Oxfordian Clay formations) and Switzerland (Opalinus Clay formations), and as key elements of the geotechnical barrier systems (EBS). The use of bentonites as a buffer in radioactive waste repositories is related to properties such as: dominance of the diffusive transport, low permeability, high absorption capacity, and high swelling properties, which enable self-sealing of the buffer. This paper reviews existing and planned deep repositories for high-level waste worldwide. An example of such a repository is the facility in Forsmark, Sweden, designed using the KBS 3 method. In this method, spent nuclear fuel is stored in an intermediate repository for 30 years and then placed in copper canisters with cast iron liners. The canisters are surrounded by a 2 m thick layer of bentonite buffer and stored at a depth of about 500 m in granite rock. The bentonite buffer plays a key role in providing the basic safety functions of containment (complete isolation of waste) and retardation (reducing the rate of radionuclide migration in the event of isolation failure, such as canister leaks). This paper presents several safety functions provided by clay minerals and various

Autor do korespondencji: A. Przelaskowska, e-mail: anna.przelaskowska@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 11.06.2024 r. Zatwierdzono do druku: 15.10.2024 r.

investigation methods of clays used in radioactive waste repositories. Many years of extensive research into both the location of the repository and the role of geotechnical barriers are necessary because of the need to secure the waste for a very long time without human intervention.

Key words: deep repository of nuclear waste, engineered barrier, bentonite, diffusive transport, swelling properties.

Wstęp

W Polsce postępowanie z odpadami promieniotwórczymi (szczegółowa kwalifikacja, warunki przechowywania i wymagania składowania) jest regulowane ustawą z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2000 r. nr 3, poz. 18 ze zm.) i rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 14 grudnia 2015 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz.U. z 2015 r. poz. 2267). Zgodnie z definicją ustawową za odpady promieniotwórcze uznaje się „materiały stałe, ciekłe lub gazowe, zawierające substancje promieniotwórcze lub materiały skażone tymi substancjami, których wykorzystanie nie jest przewidywane ani rozważane, w tym wypalone paliwo jądrowe przeznaczone do składowania” (Dz.U. z 2023 r. poz. 1173). W związku z tym, że pierwiastki w nich zawarte emitują promieniowanie przewyższające poziom promieniowania tła, konieczne jest odpowiednie izolowanie ich od środowiska.

Bezpieczne postępowanie z odpadami promieniotwórczymi jest zależne od ich właściwości. Klasyfikacje odpadów promieniotwórczych można przeprowadzać, uwzględniając różne cechy. Najogólniejszy podział opiera się na porządkowaniu odpadów według ich stanu skupienia – na stałe, ciekłe i gazowe. Inny wiąże się z długością okresu półrozpadu pierwiastka promieniotwórczego znajdującego się w odpadach – podział na przejściowe, krótkożyciowe, długożyciowe. Jednak najważniejszym podziałem jest klasyfikacja odpadów na podstawie kryterium aktywności promieniotwórczej – podział na wysokoaktywne, średnioaktywne, niskoaktywne.

Obecnie w Polsce działa jedno składowisko powierzchniowe odpadów promieniotwórczych – Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych (KSOP), znajdujące się w miejscowości Różan nad Narwią, około 90 km na północny wschód od Warszawy. Składowisko to funkcjonuje od 1961 roku i jest zlokalizowane na terenie dawnego fortu wojskowego, o powierzchni 3,045 ha. Przeznaczone jest do składowania wyłącznie krajowych odpadów krótkożyciowych nisko- i średnioaktywnych oraz do okresowego przechowywania odpadów długożyciowych. Składowiska powierzchniowe nie nadają się do magazynowania odpadów wysokoaktywnych z elektrowni jądrowej ani wypalonego paliwa jądrowego. Takie odpady wymagają budowy obiektu o zupełnie innej charakterystyce, najbezpieczniejszą opcją jest ich składowanie w głębokich strukturach geologicznych.

Według Państwowej Agencji Atomistyki (Serwis Rzeczypospolitej Polskiej) Polska ma odpowiednie warunki geologiczne do budowy głębokiego składowiska odpadów promieniotwórczych. Do głębokiego magazynowania odpadów nadają się trzy rodzaje formacji skalnych: złoża soli kamiennej na Niżu Polskim, utwory ilaste na monoklinie przedsudeckiej oraz skały magmowe i metamorficzne w północno-wschodniej Polsce. Jednak rozwój Programu polskiej energetyki jądrowej (PPEJ) wymaga ponownej weryfikacji geologicznej kraju pod kątem budowy i eksploatacji magazynów odpadów promieniotwórczych. Polska dąży do przyjęcia najlepszych praktyk międzynarodowych, wzorując się na doświadczeniach krajów, w których prace w zakresie budowy głębokiego składowiska są najbardziej zaawansowane, takich jak: Francja (projekt Cigeo), Finlandia (Onkalo) oraz Szwecja (Forsmark). Rozważane są dwie opcje budowy głębokiego składowiska. Pierwsza zakłada wspólną lokalizację głębokiego zbiornika odpadów promieniotwórczych (SGOP) wraz z podziemnym laboratorium badawczym. Druga opcja to wybudowanie laboratorium w innym miejscu niż planowany SGOP. Harmonogram prac związanych z tworzeniem głębokiego składowiska odpadów promieniotwórczych zakłada m.in. prowadzenie badań w Polskim Podziemnym Laboratorium Badawczym (PURL) (ang. *Polish Underground Research Laboratory*) (Serwis Rzeczypospolitej Polskiej) oraz szczegółowych badań w lokalizacji składowiska, opracowanie koncepcji projektowej SGOP oraz uzyskanie zezwoleń i decyzji związanych z budową, co może zająć około 27–30 lat. Wieloletnie, szeroko zakrojone badania dotyczące zarówno lokalizacji składowiska, jak i roli barier geotechnicznych mających sprawować funkcję ochronną przed ewentualnymi zagrożeniami są niezbędne ze względu na konieczność zabezpieczenia odpadów na bardzo długi czas bez ingerencji człowieka.

Celem pracy jest przybliżenie idei głębokich składowisk odpadów radioaktywnych ze szczególnym uwzględnieniem właściwości i metod badawczych minerałów ilastych budujących bariery geotechniczne.

Charakterystyka głębokiego składowiska odpadów radioaktywnych na przykładzie Forsmark w Szwecji (metoda KBS-3)

Składowiska odpadów promieniotwórczych projektowane są w ten sposób, aby zapewnić skuteczną ochronę ludzi

i środowiska przed skutkami promieniowania jonizującego. Od lat prowadzone są na świecie szeroko zakrojone badania pod kątem składowania geologicznego odpadów radioaktywnych. Organizacje zajmujące się gospodarką odpadami takie jak: ANDRA (Francja), COVRA (Holandia), KORAD (Korea Południowa), Nagra (Szwajcaria), NUMO (Japonia), NWMO (Kanada), ONDRAF/NIRAS (Belgia), POSIVA (Finlandia), PURAM (Węgry), RWM (Wielka Brytania), SKB (Szwecja) i SÚRAO (Czechy) realizują liczne programy badawcze mające na celu projektowanie i zapewnienie bezpieczeństwa długoterminowych składowisk wysokoaktywnych, długozyciowych odpadów radioaktywnych (Norris, 2019).

W tabeli 1 przedstawiono wybrane głębokie składowiska długozyciowych odpadów wysokoaktywnych na różnych etapach realizacji.

Przykładem takiego składowiska jest obiekt w Forsmark w Szwecji, zaprojektowany z wykorzystaniem metody KBS-3. W metodzie tej wypalone paliwo jądrowe składowane jest najpierw przez 30 lat w składowisku pośrednim, a następnie zostaje umieszczone w miedzianych kapsułach z żeliwnym wkładem. Kapsuły otoczone są warstwą bariery bentonitowej o grubości 2 m i składowane na głębokości około 500 m w granitowych skałach (rysunek 1).

Operator składowiska jest odpowiedzialny za zapewnienie bezpieczeństwa i jest zobowiązany do przedstawiania systematycznych raportów potwierdzających zgodność parametrów projektowych i operacyjnych z wymogami bezpieczeństwa (IAEA, 2011; Lankof, 2016). Raporty takie są niezbędne dla uzyskania pozwolenia na budowę i uruchomienia składowiska.

Wieloletnie badania zaowocowały utworzeniem szeregu raportów bezpieczeństwa, w tym raportu przedstawiającego symulację warunków po zamknięciu składowiska Forsmark (SKB, 2022).

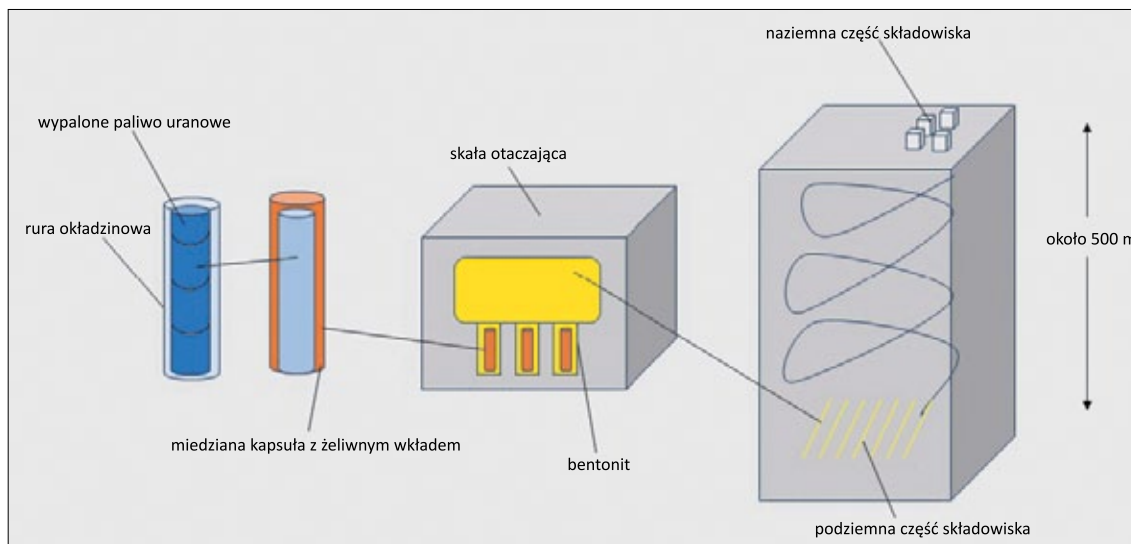
W raporcie określone są następujące zasady bezpieczeństwa:

- umieszczenie składowiska na dużej głębokości w stabilnym środowisku geologicznym, dzięki czemu odpady są odizolowane od ludzi i środowiska przypowierzchniowego. Oznacza to, że na składowisko nie mają silnego wpływu ani zmiany społeczne, ani bezpośrednie skutki długoterminowych zmian klimatycznych na powierzchni Ziemi;
- zlokalizowanie składowiska w miejscu, w którym można założyć, że skała macierzysta nie będzie miała znaczenia ekonomicznego dla przyszłych pokoleń, ryzyko ingerencji człowieka jest więc ograniczone;
- wypalone paliwo jądrowe jest otoczone kilkoma inżynierijnymi i naturalnymi barierami bezpieczeństwa;

Tabela 1. Głębokie składowiska długozyciowych, wysokoaktywnych odpadów radioaktywnych (Norris, 2019, zmienione)

Table 1. Deep repositories of long-lived, high-level radioactive waste (Norris, 2019, modified)

Lokalizacja	Operator/instytucja	Zawansowanie projektu	Skąły otaczające
Finlandia Onkalo	POSIVA Radioactive Waste Management Company	składowisko wybudowane; oczekiwanie na pozwolenie na uruchomienie składowiska (ang. <i>operating permit</i>); pierwsze na świecie głębokie składowisko długozyciowych, wysokoaktywnych odpadów radioaktywnych ma zostać uruchomione jeszcze w tym dziesięcioleciu	granity
Szwecja Forsmark	SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company	uzyskana w 2022 r. licencja na budowę składowiska; planowane rozpoczęcie budowy w bieżącym dziesięcioleciu	granity
Francja Meuse/Haute-Marne	Andra French National Radioactive Waste Management Agency składowisko Cigeo Industrial Centre for Geological Disposal	na rok 2025 planowane uzyskanie licencji na budowę składowiska; lata 2025–2040 – planowana budowa składowiska	skąły ilaste
Szwajcaria, pogranicze kantonów Zurych i Aargau	NAGRA National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste	planowane uzyskanie licencji na budowę składowiska pod koniec 2024 r.; planowana budowa w latach 40.	skąły ilaste
Canada	NWMO Nuclear Waste Management Organization	etap wyboru lokalizacji; dwie lokalizacje w prowincji Ontario, jedna w skałach krystalicznych, a jedna w osadowych; opracowane raporty bezpieczeństwa (ang. <i>Confidence in Safety reports</i>) dla obu lokalizacji; kolejne badania będą wykonane po wyborze lokalizacji	
Wielka Brytania	NWS Nuclear Waste Services	etap wyboru lokalizacji; cztery potencjalne lokalizacje; rozpoczęcie prac nad oceną poszczególnych lokalizacji	



Rysunek 1. Schemat metody KBS-3 dla składowania wypalonego paliwa jądrowego (Sellin i Leupin, 2013, zmienione; SKB, 2022)
Figure 1. The KBS-3 method for spent nuclear fuel storage (Sellin and Leupin, 2013, modified; SKB, 2022)

Zużyte paliwo	Projekt referencyjny	Opis lokalizacji składowiska	Wyniki prac badawczo-rozwojowych	Wyniki wcześniejszych raportów	Bazy danych FEP
1. Identyfikacja FEPs (<i>features, events and processes</i>) – parametrów, zdarzeń i procesów: stan początkowy, procesy wewnętrzne, czynniki zewnętrzne.					
2a. Opis stanu początkowego rejonu lokalizacji składowiska.		2b. Opis stanu początkowego barier geotechnicznych.		2c. Opis struktury składowiska.	
3. Charakterystyka warunków zewnętrznych: – klimat i czynniki związane z klimatem, – działalność człowieka w przyszłości.			4. Kompilacja raportów dotyczących procesów wewnętrznych (zachodzących w systemie składowiska).		
5. Definicje funkcji bezpieczeństwa i wskaźników funkcji bezpieczeństwa: – funkcje bezpieczeństwa systemu, – mierzalne wskaźniki funkcji bezpieczeństwa, – kryteria wskaźników funkcji bezpieczeństwa.			6. Kompilacja danych wejściowych.		
7. Definicja i analiza ewolucji systemu składowiska. Analiza ewolucji składowiska dla dwóch przypadków: – warunki zewnętrzne przez 120 000 lat po zamknięciu repozytorium są takie, jakie zrekonstruowano dla ostatniego cyklu lodowcowego na badanym obszarze, – warunki związane z globalnym ociepleniem.					
8. Wybór scenariuszy oparty na: – analizie ewolucji systemu składowiska, – analizie FEPs, – funkcjach bezpieczeństwa.			9. Analiza wybranych scenariuszy w odniesieniu do: – izolacji paliwa (<i>confinement</i>), – opóźnienia (<i>retardation</i>).		
10. Dodatkowe analizy: – scenariusze związane z przyszłą działalnością człowieka, – istotność wykluczonych FEPs, – czas ponad milion lat.			11. Podsumowanie: – zgodność z wymaganiami odpowiednich regulacji prawnych, – <i>feedback</i> dla projektu i badań systemu składowiska oraz prac badawczo-rozwojowych.		

Rysunek 2. Schemat szacowania bezpieczeństwa składowiska Forsmark (SKB, 2022). Objasnienia: nad kreską przerywaną wymienione dane wejściowe do oceny bezpieczeństwa; FEPs (ang. *features, events and processes*) – parametry/właściwości, zdarzenia i procesy mające znaczenie dla bezpieczeństwa składowiska; funkcje bezpieczeństwa – ogólnie funkcje bezpieczeństwa składowiska odpadów radioaktywnych to: ograniczenie (ang. *confinement*), czyli izolacja odpadów, i opóźnienie (ang. *retardation*), czyli opóźnienie migracji radionuklidów w razie niepowodzenia izolacji (np. rozszczelnienie kanistrów)

Figure 2. An outline of a post-closure safety assessment of the Forsmark repository (SKB, 2022). The boxes above the dashed line are inputs to the assessment; FEPs – features, events and processes; safety functions – general safety functions of a nuclear waste repository: confinement (isolation of the waste in the canisters) and retardation (retardation of the radionuclides migration in the case of an isolation failure (e.g. canister leaks)

- podstawową funkcją bezpieczeństwa barier jest izolacja paliwa w pojemnikach;
- w przypadku naruszenia zabezpieczenia drugorzędową funkcją bezpieczeństwa jest opóźnienie potencjalnego uwolnienia szkodliwych radionuklidów ze składowiska;
- bariery techniczne powinny być wykonane z naturalnie występujących materiałów, które zachowują stabilność w długim okresie w środowisku składowiska;
- składowisko powinno być zaprojektowane i zbudowane w taki sposób, aby nie dopuścić do występowania temperatur, które mogłyby mieć szkodliwy wpływ na długoterminowe właściwości barier;
- składowisko powinno być zaprojektowane i zbudowane w taki sposób, aby wyeliminować procesy wywołane promieniowaniem, które mogłyby mieć w długim okresie szkodliwy wpływ na właściwości barier technicznych lub skał otaczających;
- bariery powinny być pasywne, tj. powinny funkcjonować bez interwencji człowieka.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat szacowania bezpieczeństwa dla składowiska Forsmark.

Właściwości minerałów ilastych wykorzystywane w składowiskach odpadów promieniotwórczych

Minerały ilaste są to glinokrzemiany warstwowe zbudowane z tetraedrycznych warstw krzemio-tlenowych i warstw oktaedrycznych łączących się w pakiety. Dzielą się na minerały dwuwarstwowe typu 1:1 (grupa kaolinitu), gdzie jedna warstwa tetraedrów połączona jest z jedną warstwą oktaedrów, oraz minerały trójwarstwowe 2:1, złożone z jednej warstwy oktaedrycznej i dwóch warstw tetraedrycznych. Liczne podstawienia w sieci krystalicznej (np. Al^{3+} za Si^{4+} w warstwach tetraedrycznych, a Mg^{2+} za Al^{3+} w warstwach oktaedrycznych) powodują powstawanie ujemnego ładunku elektrycznego. Ładunek ten kompensowany jest przez występowanie kationów w przestrzeniach międzypakietowych. W minerałach typu mik i illitu występuje trwale związany potas. W minerałach, w których ładunek jest niższy, takich jak montmorylonit (smektyt), słabsze siły przyciągania międzypakietowego umożliwiają wnikanie cząsteczek wody (co skutkuje właściwościami pęczniejącymi) oraz wymianę kationów w przestrzeniach międzypakietowych (Moore i Reynolds, 1989). Minerały te wchodziły w skład bentonitów wykorzystywanych w barierach geotechnicznych (Sellin i Leupin, 2013; Norris, 2019).

Charakterystyczna budowa pęczniejących minerałów ilastych generuje wiele specyficznych właściwości

fizykochemicznych i petrofizycznych, takich jak duże zdolności jonowymiennie i sorpcyjne, właściwości pęczniejące, plastyczność, lepkość i niska przepuszczalność. Właściwości te powodują, że pęczniejące minerały ilaste stanowią znakomity materiał ochronny w składowiskach odpadów radioaktywnych. Można tutaj wymienić następujące cechy (Norris, 2019):

- bardzo niewielki przepływ płynów, związany z niską przepuszczalnością, hamuje rozprzestrzenianie się radionuklidów i zanieczyszczeń chemicznych;
- ze względu na bardzo ograniczony ruch płynów w łańcuch dominuje transport dyfuzyjny. W związku z tym cząstki migrują głównie pod wpływem gradientów stężeń, a przepływ adwekcyjny związany z ruchem wody w porach jest minimalny;
- duże zdolności absorpcyjne umożliwiają wychwytywanie radionuklidów i zanieczyszczeń chemicznych;
- właściwości pęczniejące zapewniają zdolność do samouszczelnienia. Dzięki temu łączy stanowią doskonały materiał izolujący i uszczelniający w otworach i tunelach depozycyjnych. Dodatkowo wszelkie szczeliny, powstające w wyniku prac geotechnicznych lub naprężeń w górotworze, szybko ulegają zablężnieniu;
- duże zdolności buforowe w stosunku do zmian chemizmu powodują, że grubość warstwy łączy zmienionych na skutek oddziaływania zanieczyszczeń jest niewielka;
- homogeniczność łączy zapewnia jednorodność transportu radionuklidów i zanieczyszczeń chemicznych w całej grubości uszczelniającej warstwy skał ilastych.

Łączy mogą być wykorzystywane zarówno jako skały otaczające (pęczniejące skały ilaste), jak i składniki barier geotechnicznych (bufor bentonitowy). Przykładami skał ilastych wybranych jako skały otaczające dla składowiska odpadów są Opalinus Clay w Szwajcarii i mułowce wieku kelowej-oksford (COx) we Francji. Opalinus Clay to łupki ilaste wieku środkowej jury zawierające od 40% do 80% minerałów ilastych, w tym około 10% minerałów pęczniejących. Charakteryzują się bardzo niską przepuszczalnością, przepływ adwekcyjny jest tutaj zaniedbywalny, dominuje mechanizm transportu dyfuzyjnego. Wykazują zdolności do samouszczelnienia umożliwiające zablężnianie szczelin (Thury, 2002). Formacja ilasta kelowej-oksford we Francji zlokalizowana we wschodniej części Basenu Paryskiego, charakteryzuje się niską przepuszczalnością, homogenicznością składu mineralnego i małą zmiennością innych parametrów fizykochemicznych na dużym obszarze (Montavon et al., 2022).

Bentonity stanowiące składnik barier geotechnicznych (ang. *engineered barrier system*, EBS) mogą spełniać rolę buforu pomiędzy kapsułą z odpadami a skałą otaczającą oraz rolę materiału wypełniającego i uszczelniającego. W projektowanych składowiskach stosowane mają być zarówno czyste

bentonity (Forsmark, Szwecja; Onkalo, Finlandia) w roli buforu, jak i mieszaniny bentonitu z piaskiem w roli materiału wypełniającego i uszczelniającego (projekt Nagra, Szwajcaria) (Sellin i Leupin, 2013).

Funkcje bezpieczeństwa zapewniane przez minerały ilaste

Poszczególne funkcje bezpieczeństwa określają, w jaki sposób bariera geotechniczna przyczynia się do spełnienia podstawowych zadań bezpieczeństwa składowiska odpadów radioaktywnych, czyli ograniczenia i opóźnienia. Ograniczenie zapewnia całkowitą izolację odpadów, a opóźnienie – zmniejszenie tempa migracji radionuklidów w razie niepowodzenia izolacji (np. rozszczelnienie kapsuł). Kluczową rolę w zapewnieniu funkcji bezpieczeństwa odgrywają pęczniące minerały ilaste (montmorylonity) wchodzące w skład buforu bentonitowego.

Ograniczenie transportu adwekcyjnego

Istotną funkcją buforu jest ograniczenie transportu rozpuszczonych składników, które mogłyby spowodować korozję i potencjalne uwolnienie radionuklidów z uszkodzonej kapsuły. Niskie wartości przewodności hydraulicznej nasyconego buforu (w granicach od 10^{-1} do 10^{-12} m s⁻¹) związane z pęcznieniem bentonitu zapewniają, że dominującym mechanizmem transportu będzie transport dyfuzyjny. Właściwości pęczniące zapewniają również homogeniczność buforu. Pęcznienie umożliwia wypełnienie pustych przestrzeni powstałych w wyniku prac geotechnicznych, a także zatarcie różnic pomiędzy różnymi postaciami buforu (sprasowane bloki i pellety bentonitowe). Wartość ciśnienia pęcznienia zapewniającego samouszczelniające zdolności buforu wynosi od 0,1 MPa do 1 MPa (Sellin i Leupin, 2013).

Redukcja aktywności mikrobiologicznej

Bakterie siarkowe (redukujące siarczany do siarkowodoru i siarczków) mogą wywoływać niebezpieczne dla składowiska procesy korozji. W standardowych warunkach aktywność tych mikroorganizmów jest niewielka. W niektórych przypadkach większa ilość nutrientów, związana np. ze zwiększoną ilością składników organicznych w roztworach porowych w skale otaczającej, z degradacją materiałów konstrukcyjnych czy z niektórymi dodatkami do cementów, umożliwia zwiększenie aktywności bakterii. Wtedy istotną staje się rola buforu. Redukcja aktywności mikroorganizmów jest możliwa dzięki zwiększeniu ciśnienia pęcznienia, a co za tym idzie – zmniejszeniu rozmiarów porów i ograniczeniu transportu nutrientów.

Tłumienie napięć związanych z naprężeniami ścinającymi skał

Kolejną funkcją bezpieczeństwa jest zabezpieczenie kapsuł przed ruchami skał, szczególnie przed naprężeniami spowodowanymi przez trzęsienia ziemi. Plastyczność bentonitu pozwala na znaczne zmniejszenie naprężeń przenoszonych ze skały otaczającej. Zwiększenie ciśnienia pęcznienia i gęstości buforu zmniejsza plastyczność, a co za tym idzie odporność na naprężenia. Dlatego też wartość gęstości wyjściowej suchego bentonitu musi być z jednej strony na tyle wysoka, aby zapewnić odpowiednie ciśnienie pęcznienia, ograniczające transport koloidów, a z drugiej strony na tyle niska, aby nie dopuścić do znaczącego obniżenia plastyczności buforu.

W przypadku projektu składowiska Forsmark w Szwecji wartość gęstości suchego bentonitu mieści się w przedziale od 1000 kg/m³ do 2050 kg/m³ (Sellin i Leupin, 2013; SKB, 2022).

Odporność na przeobrażenia (wymagania temperaturowe)

Odpady radioaktywne zamknięte w kapsułach generują ciepło, co powoduje wzrost temperatury otaczającego je buforu i w konsekwencji może doprowadzić do transformacji montmorylonitu w minerały niepęczniące. Dlatego też istotne jest takie zaprojektowanie odległości między otworami depozycyjnymi, aby temperatura buforu bentonitowego nie przekroczyła bezpiecznej wartości. Przykładowo, w składowiskach umiejscowionych w skałach krystalicznych (Szwecja, Finlandia) temperatura ta nie może przekraczać 100°C (Sellin i Leupin, 2013; SKB, 2022).

Zapobieganie pogrążaniu się kapsuł

Ciśnienie pęcznienia bentonitu powinno być wystarczająco wysokie, aby zapobiec pogrążaniu się kapsuł w buforze, co mogłoby doprowadzić do kontaktu kapsuły ze skałą otaczającą lub ścianą otworu depozycyjnego.

Ograniczenie ciśnienia wywieranego na kapsuły i skałę

Z jednej strony ciśnienie pęcznienia musi być na tyle wysokie, aby skutecznie ograniczać transport roztworów w buforze i zapobiegać pogrążaniu się kapsuł, a z drugiej strony musi być tak ograniczone, aby nie dopuścić do uszkodzenia kapsuł lub skały otaczającej.

Ciśnienie pęcznienia rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem gęstości suchego bentonitu (Wang et al., 2012). Dlatego też tak istotne są badania ilów pęczniących mające na celu określenie wpływu wyjściowych parametrów suchego iltu na ciśnienie pęcznienia powstające pod wpływem saturacji wodami podziemnymi.

Badania minerałów ilastych

Badania minerałów ilastych w składowiskach odpadów radioaktywnych obejmują: charakterystykę ilów w stanie początkowym składowiska, analizę procesów pęcznienia związanych z saturacją wodami podziemnymi, a także szacowanie ewentualnego wpływu niekorzystnych procesów i warunków występujących po zamknięciu składowiska (np. podwyższona temperatura, wyciek radionuklidów związany z rozszczelnieniem kanistrów). Badania eksperymentalne często wykonywane są w podziemnych laboratoriach usytuowanych na obszarach, gdzie planowana jest lokalizacja głębokich składowisk odpadów radioaktywnych. Laboratoria takie znajdują się we Francji (Bure, formacja kelowejsko-oksfordzkich ilowców – COx), Szwajcarii (Mont Terri, formacja Opalinus Clay), Belgii (Mol, formacja Boom Clay), a także w Japonii (Horonobe, neogeńskie skały osadowe). Poniżej przedstawiono przegląd przykładowych prac poświęconych różnorodnym aspektom badań ilów w składowiskach odpadów radioaktywnych.

Ogólna charakterystyka przy wykorzystaniu danych geofizycznych

W charakterystyce formacji ilastych mogą być wykorzystywane dane geofizyczne. Rabaute et al. (2018) zastosowali analizę głównych składowych (PCA) i analizę skupień metodą *k*-średnich do danych geofizycznych z otworu Benken w Szwajcarii, przewiercającego środkowojurajską formację Opalinus Clay. Statystyczna obróbka danych pozwoliła na identyfikację poziomów ilastych oraz oszacowanie ich przestrzennej (lateralnej i wertykalnej) zmienności. Alcolea Rodríguez et al. (2018) zaprezentowali schemat (ang. *workflow*) wykorzystania danych geofizycznych w charakterystyce poziomów stratygraficznych od metrowej do decymetrowej skali w 13 otworach wiertniczych w północnej Szwajcarii.

Migracja gazów

W trakcie eksploatacji składowiska może dojść do wydzielania się gazów wytwarzanych podczas anaerobowej korozji stalowych kanistrów i elementów wyposażenia tuneli. Bardzo istotne jest więc zrozumienie interakcji gazów z ilami i szacowanie efektywności działania bentonitów jako barier dla migracji gazów w długim okresie. Dagher et al. (2018) proponują hydromechaniczny, poroelastyczny, liniowy model matematyczny migracji gazu dla dwufazowego (adwekcyjno-dyfuzyjnego) pęczniającego medium o niskiej przepuszczalności (bentonitu) w planowanym składowisku w Kanadzie.

Efekty termiczne

Kolejnym aspektem badań ilów są efekty termiczne związane z wytwarzaniem ciepła na skutek radioaktywnego rozpadu

radionuklidów. W pracy Papafiotou et al. (2018) przedstawiono metodę szacowania wpływu zarówno czynników termicznych, jak i związanych z migracją gazu na składowisko usytuowane w skałach ilastych (formacja Opalinus Clay) w Szwajcarii. Ren et al. (2022) wykonali badania przewodności cieplnej bentonitu za pomocą dwóch metod analitycznych: metody gorącej igły w stanie nieustalonym oraz metody sondy powierzchniowej w stanie nieustalonym. Autorzy uzyskali dobrą zgodność wyników otrzymanych obiema metodami. Oszacowali wpływ zawartości wody, suchej gęstości i temperatury sprasowanego bentonitu na jego termiczne właściwości; wszystkie te czynniki powodują wzrost wartości przewodności cieplnej. Na podstawie wykonanych badań skonstruowali dwa modele przewidywania przewodności cieplnej na podstawie wyżej wymienionych parametrów. Modele takie mogą być bardzo przydatne w symulacjach termo-hydromechanicznych właściwości bentonitu.

Procesy związane z dopływem wód podziemnych i saturacją buforu

Gwałtowny napływ wód podziemnych do składowiska może, z powodu wzrostu ciśnienia wody porowej, prowadzić do erozji i tworzenia się kanalików w buforze bentonitowym. W Japonii przeprowadzono eksperyment (Jo et al., 2018) mający na celu ocenę wpływu znacznego dopływu wód podziemnych do bariery bentonitowej. W tym celu wykorzystano testowy otwór wywiercony w skale otaczającej w podziemnym laboratorium w Horonobe.

Efektywność bariery bentonitowej jest związana z nasyceniem buforu wodami podziemnymi w trakcie resaturacji składowiska. Bardzo istotne jest więc określenie zachowania buforu w trakcie saturacji i przewidywanie warunków po saturacji takich jak rozkład gęstości suchego buforu i zmiany chemiczne. W tym celu w pracy Ishii et al. (2019) oszacowane zostało tempo przesączania wody podziemnej do buforu. Eksperyment polegał na przesączaniu roztworu NaCl przez bufor przez okres 7 lat i pozwolił na określenie zależności pomiędzy przesączaniem a przemieszczaniem się frontu saturacji w czasie.

Mechanizm pęcznienia ilów, procesy samouszczelniania

Zmiany w skałach otaczających związane z konstrukcją składowiska mogą spowodować powstawanie szczelin w buforze bentonitowym, a następnie wypełnianie ich wodami podziemnymi. Giot et al. (2018) przeprowadzili eksperyment demonstrujący zdolności ilowców do samouszczelniania. Cylindryczne próbki ilowców zostały sztucznie zeszczelinowane, szczeliny wypełnione wodą. Wykonano badania za pomocą nanotomografu przed testami, w ich trakcie i po testach, co pozwoliło na wizualizację strefy zeszczelinowanej i określenie zmian w objętości szczelin w trakcie procesu

samouszczelniania. Badano dwa rodzaje próbek iłowców, o różnej zawartości węglanów. W próbkach o niskiej zawartości węglanów zaobserwowano duży spadek objętości szczelin i spadek przepuszczalności, natomiast w skałach zawierających powyżej 40% węglanów nie stwierdzono zdolności samouszczelniających.

Badania przestrzeni porowej uwadnianych iłó

Hydratacja nieuwodnionych iłó pęczniejących jest procesem bardzo istotnym w aspekcie zachowania buforów bentonitowych wykorzystywanych w barierach geotechnicznych. Transport wody w nieuwodnionych iłach zależy od ilości i możliwości połączenia wody w systemie porów. W związku z rozkładem wielkości porów iłó (od około 1 nm do setek mikrometrów) i kompleksowością elektrochemicznych interakcji pomiędzy cząstkami wody i iłó – współwystępują w nich dwie populacje wody: woda zaadsorbowana (związana siłami elektrochemicznymi z powierzchnią iłó) i bardziej mobilna woda kapilarna. Rozkład nasycenia wodą porową ma wpływ na mobilność wody w trakcie procesów hydratacji i suszenia. Eizaguirre et al. (2024) wykorzystali metodę magnetycznego rezonansu jądrowego do badania procesów hydratacji iłó. Badania przeprowadzono na próbkach sprasowanej mieszaniny bentonitu Wyoming i piasku kwarcowego w różnych warunkach wilgotności. W pracy oszacowano ilościowo nasycenie wodą zaadsorbowaną i kapilarną w trakcie procesu hydratacji. Określono kinetykę wody zaadsorbowanej i kapilarnej w zależności od zawartości wody i wilgotności względnej. Stwierdzono, że aż do osiągnięcia wilgotności względnej około 90% i zawartości wody >30% dominują procesy związane z wodą zaadsorbowaną i mobilność wody jest bardzo niewielka. Po tym punkcie zwrotnym dominuje dynamika wody kapilarnej, co wpływa na wzrost mobilności wody.

Sorpcja radionuklidów

Zapewnienie długoterminowego bezpieczeństwa składowiska wymaga upewnienia się, że czas potencjalnego uwolnienia się radionuklidów będzie znacznie dłuższy od ich okresu połowicznego rozpadu, a także wzięcia pod uwagę takich scenariuszy działania składowiska, w których może dojść do potencjalnego uwolnienia radionuklidów. Jednym z zadań barier bentonitowych jest wychwytywanie ewentualnych radionuklidów, dlatego też charakterystyka procesów adsorpcji radionuklidów w montmorylonitach jest bardzo istotna w szacowaniu bezpieczeństwa repozytorium odpadów radioaktywnych. Jednym z radionuklidów mających duży wpływ na dawkę promieniowania jest Ra-226 (Klinkenberg et al., 2021), izotop ten jest również składnikiem naturalnie występujących materiałów radioaktywnych (NORM) związanych z odpadami po wydobyciu ropy i gazu (Gusa et al., 2020; Silva

et al., 2020). Komarneni et al. (2001) badali adsorpcję Ra-226 przez syntetyczne Na – miki i naturalne montmorylonity, oba typy minerałów wykazały pochłanianie izotopu. W pracy Klinkenberg et al. (2021) przebadano wpływ pH i siły jonowej roztworu na adsorpcję Ra-226 i Ba (Ba wykazuje zbliżone właściwości chemiczne i fizyczne do Ra, umożliwiające np. powstawanie stałych roztworów Ba/Ra) przez Na-montmorylonit. Procesy adsorpcji były zdominowane przez prostą reakcję jonowymienną Ra^{2+} i Ba^{2+} na kation międzypakietowy Na^+ w montmorylonicie. Przy wyższym pH i sile jonowej zaobserwowano dodatkowy mechanizm adsorpcji na amfoterycznych pozycjach na krawędziach pakietów. Do wartości pH równej 8 procesy adsorpcji nie wykazywały zależności od pH, tylko od siły jonowej. Przy wyższym pH adsorpcja wzrastała z rosnącym pH.

Podsumowanie

Głębokie składowiska długożyciowych, wysokoaktywnych odpadów radioaktywnych są jednym z najbezpieczniejszych i najbardziej zaawansowanych technologicznie sposobów zarządzania odpadami nuklearnymi. Kluczowym elementem tego podejścia jest wykorzystanie zarówno naturalnych barier geologicznych (skały otaczające), jak i barier geotechnicznych. Dzięki swoim unikalnym właściwościom chemicznym i fizycznym minerały ilaste wchodzące w skład barier geotechnicznych, a czasem stanowiące również skałę otaczającą (np. formacja Opalinus Clay w Szwajcarii), znacząco przyczyniają się do skutecznej izolacji i ochrony środowiska przed potencjalnym zagrożeniem promieniotwórczym.

Rola minerałów ilastych w głębokich składowiskach:

- **Izolacja i retencja:** Minerały ilaste, takie jak bentonit, mają zdolność do pęcznienia w kontakcie z wodą, co skutkuje zamknięciem porów w skale i zapobiega migracji radioaktywnych izotopów. Ich struktura pozwala na skuteczne zatrzymywanie radionuklidów poprzez sorpcję, co zmniejsza ryzyko przenikania odpadów do otaczającego środowiska.
- **Stabilność chemiczna:** Minerały ilaste są chemicznie stabilne i odporne na długotrwałe procesy geochemiczne, co zapewnia ich skuteczność jako bariery przez tysiące lat. Są mało reaktywne chemicznie, co minimalizuje ryzyko degradacji materiału w warunkach panujących w głębokich składowiskach.
- **Ochrona przed wodą:** Warstwa ilastych minerałów może działać jako bariera dla wód podziemnych, które mogłyby potencjalnie przyspieszyć korozję pojemników z odpadami oraz promować migrację radionuklidów. Dzięki temu zmniejsza się możliwość kontaktu odpadów z wodą, co jest kluczowe dla utrzymania ich stabilności.

- **Amortyzacja mechaniczna:** Minerale ilaste mogą również pełnić funkcję amortyzującą, chroniąc pojemniki z odpadami przed uszkodzeniami mechanicznymi spowodowanymi przez ruchy tektoniczne lub inne procesy geologiczne.

W związku z planowaną w Polsce budową elektrowni jądrowej niezbędne jest opracowanie koncepcji głębokiego składowiska odpadów radioaktywnych. Wymaga to wdrożenia długoletnich, multidyscyplinarnych programów badawczych, w których istotnym elementem będą badania minerałów ilastych. Doświadczenia różnych krajów pokazują, że projektowanie i budowa głębokich składowisk geologicznych to proces długotrwały, wymagający szeroko zakrojonych badań, testów i konsultacji społecznych. Minerale ilaste, zwłaszcza bentonit, odgrywają kluczową rolę w systemach barierowych, zapewniając dodatkowe zabezpieczenie przed migracją radionuklidów. Każdy kraj dostosowuje swoje podejście do lokalnych warunków geologicznych i społecznych, co prowadzi do różnych metod i technologii składowania. Składowiska takie jak Onkalo w Finlandii i Forsmark w Szwecji są najbardziej zaawansowane i stanowią wzór dla innych krajów, które znajdują się na wcześniejszych etapach planowania i realizacji swoich projektów. Właściwe zarządzanie odpadami promieniotwórczymi jest kluczowe dla zrównoważonego rozwoju energetyki jądrowej i minimalizacji jej wpływu na środowisko. Wymaga to nie tylko zaawansowanych technologii, ale także odpowiedzialnych polityk i współpracy międzynarodowej.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Rozpoznanie warunków, w jakich składowane są odpady promieniotwórcze, z uwzględnieniem funkcji minerałów ilastych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0048/SW/2024, nr archiwalny DK-4100-0034/2024.

Literatura

- Alcolea Rodríguez A., Marschall P., Nussbaum C., Becker J.K., 2019. Automatic interpretation of geophysical well logs. [W:] Norris F., Neft E.A.C., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482: 25–38. DOI: 10.1144/SP482.9.
- Dagher E.E., Nguyen T.S., Infante Sedano J.A., 2018. Development of a mathematical model for gas migration (two-phase flow) in natural and engineered barriers for radioactive waste disposal. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482: 115–148. DOI: 10.1144/SP482.14.
- Eizaguirre P., Tang A.M., Maillet B., Sidi-Boulenouar R., Talandier J., Pereira J.M., Vu M.N., Chabot B., Dangla P., Bornert M., Aimadieu P., 2024. Exploring two regimes of water mobility in unsaturated expansive clay using NMR relaxometry. *Applied Clay Science*, 251(1). DOI: 10.1016/j.clay.2024.107324.
- Giot R., Auvray C., Talandier J., 2018. Self-sealing of claystone under X-ray nanotomography. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482. DOI: 10.1144/SP482.4.
- Gusa A.V., Tomani A., Zhang Z., Vidic R.D., 2020. Sulphate precipitation in produced water from Marcellus Shale for the control of naturally occurring radioactive material. *Water Resources*, 177. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115765.
- IAEA, 2011. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna.
- Ishii T., Kawakubo M., Asano H., Kobayashi I., Sellin P., Luterkort D., Eriksson P., 2019. A resistivity-based approach to determining rates of groundwater seepage into buffer materials. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482: 205–212. DOI: 10.1144/SP482.16.
- Jo M., Ono M., Nakayama M., Asano H., Ischi T., 2018. A study of methods to prevent piping and erosion in buffer material intended for a vertical deposition hole at the Horonobe Underground Research Laboratory. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482: 175–190. DOI: 10.1144/SP482.7.
- Klinkenberg M., Brandt F., Baeyens B., Bosbach D., Fernandez M., 2021. Adsorption of barium and radium on montmorillonite: A comparative experimental and modelling study. *Applied Geochemistry*, 135. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2021.105117.
- Komarneni S., Kozai N., Paulus W.J., 2001. Superselective clay for radium uptake. *Nature*, 410: 771. DOI: 10.1038/35071173.
- Lankof L., 2016. Długoterminowa ocena bezpieczeństwa składowisk nisko- i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 92: 171–182.
- Montavon G., Ribet S., Loni H., Maia F., Bailly C., David K., Lerouge C., Made B., Robinet J.C., Grambow B., 2022. Uranium retention in a callovo-Oxfordian clay rock formation: From laboratory based models to in natura conditions. *Chemosphere*, 299. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134307.
- Moore D.M., Reynolds R.C., 1989. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. *Oxford University Press*, xvi + 332.
- Norris F., 2019. Multiple roles of clays in radioactive waste confinement – introduction. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *London, Special Publications*, 482: 1–9. DOI: 10.1144/SP482-2019-4.
- Papafotiou A., Namhata A., Singh A., Williams M., Jigmond M., Marschall P., 2018. A workflow for parametric sensitivity analysis of heat and gas release from a deep geological repository for SF/HLW. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.), Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482: 149–173. DOI: 10.1144/SP482.2.
- Rabaute A., Garcia M.H., Becker J., 2018. Identification of log units in clay rock formations based on local and spatial statistics of well-log properties: application to the Opalinus claystone in the Benken borehole. [W:] Norris F., Neft E.A., Van Geet M. (eds.). Multiple roles of clays in radioactive waste confinement. *Geological Society, London, Special Publications*, 482: 11–24. DOI: 10.1144/SP482.22.
- Ren G.L., Chung C.C., Tsai C.E., Cuo C.J., Huang W.H., 2022. Experimental Study on the Thermal Conductivity of Compacted SPV200 Bentonite. *Minerals*, 12(18): 932. DOI: 10.3390/min12080932.
- Sellin P., Leupin O., 2013. The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management – A Review. *Clays and Clay Minerals*, 61(6): 477–498. DOI: 10.1346/CCMN.20130610601.
- Serwis Rzeczypospolitej Polskiej. <<http://gov.pl/web/polski-atom>> (dostęp: 10.09.2024).

- Silva C., Heilbron P.F.L., Pérez Guerrero J.S., Xavier A.M., Pereira G., Laceda G.B.M., Pimentel L.C.G., Landau L., Ebecken N., 2020. A computational model for estimation of ^{226}Ra and ^{228}Ra concentrations in sludge from petrol exploitation, based on radiation – level measurements on stored packages. *Environmental Earth Sciences*, 79(489): 25. DOI: 10.1007/s12665-020-09237-3.
- SKB, 2022. Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report, PSAR version. <<http://www.skb.se/publication/2506409>>.
- Thury M., 2002. The characteristics of the Opalinus Clay investigated in the Mont Terri underground rock laboratory in Switzerland. *Comptes Rendus Physique*, 3(7): 923–933. DOI: 10.1016/S1631-0705(02)01372-5.
- Wang Q., Tang A.M., Cui Y.-J., Delage P., Gatmiri B., 2012. Experimental study on the swelling behaviour of bentonite/claystone mixture.

Engineering Geology, 124: 59–66. DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.10.003.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 11 maja 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo atomowe (Dz.U. z 2023 r. poz. 1173).
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 14.12.2015 r. w sprawie odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego (Dz.U. z 2015 r. poz. 2267).
- Ustawa z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. z 2000 r. nr 3, poz. 18 ze zm.).



Mgr Anna PRZELASKOWSKA
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: anna.przelaskowska@inig.pl



Mgr Grażyna ŁYKOWSKA
Starszy specjalista inżynierjno-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej; kierownik ds. Jakości Laboratorium Geofizycznych Parametrów Skał i Płynów Złożowych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: grazyna.lykowska@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

- badania tomograficzne skał:
 - » trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT),
 - » tomografia metrowych odcinków skał, profilowanie zmian parametrów petrofizycznych rdzenia (porowatość, gęstość objętościowa);
- badania metodą jądrowego rezonansu magnetycznego:
 - » określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek,
 - » generacja map T1-T2, szacowanie nasycenia wodą/węglowodorami,
 - » identyfikacja obecności substancji organicznej TOC,
 - » oznaczenie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- badanie przewodności cieplnej skał;
- wyznaczanie współczynnika przepuszczalności;
- badanie gęstości, gęstości właściwej i porowatości;
- interpretacja i ocena stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach;
- badania serwisowe:
 - » pomiary składu chemicznego skał metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF wykonywane w celu oceny składu mineralnego oraz analiz chemostratygraficznych,
 - » spektrometryczne pomiary gamma na rdzeniu wiertniczym: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , total gamma przy wykorzystaniu mobilnego urządzenia „Gamma Logger”.



Kierownik: dr Sylwia Kowalska Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
Telefon: 12 650 64 84 Faks: 12 653 16 65 E-mail: kowalska@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy