

ROZWÓJ METOD POSTĘPOWANIA Z ODPADAMI PROMIENIOTWÓRCZYMI I WYPALONYM PALIWEM JĄDROWYM – PRACE BADAWCZO-ROZWOJOWE W IChTJ

Development of methods for managing radioactive waste and spent nuclear fuel - research and development works at IChTJ

Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz

Streszczenie: Bezpieczne zagospodarowanie odpadów promieniotwórczych, a zwłaszcza wypalonego paliwa jądrowego, jest jedną z najczęściej podnoszonych kwestii przeciwników dalszego rozwoju energetyki jądrowej i stosowania radioizotopów w różnych dziedzinach życia. Prowadzenie zaawansowanych prac badawczych wspierających program jądrowy kraju i pozwalających na dalszy rozwój metod izotopowych w medycynie, przemyśle i ochronie środowiska naturalnego, jest zadaniem nauki. Jest również jednym z podstawowych celów działania instytutów związanych z atomistyką.

Abstract: Safe management of radioactive waste, especially spent nuclear fuel, is one of the most frequently raised issues of opponents of further development of nuclear energy and the use of radioisotopes in various areas of life. Conducting advanced research works supporting the country's nuclear program and enabling further development of isotope methods in medicine, industry and environmental protection is the responsibility of science. It is also one of the main goals of the institutes related to atomic science.

Słowa kluczowe: odpady promieniotwórcze, wypalone paliwo jądrowe, składowiska odpadów promieniotwórczych, badania i rozwój

Keywords: Radioactive waste, spent nuclear fuel, radioactive waste repositories, research and development

Bezpieczne odpady

Kwestia bezpiecznego zagospodarowania odpadów promieniotwórczych, a zwłaszcza wypalonego paliwa jądrowego, jest często podnoszona przez przeciwników energetyki jądrowej. Stosowanie radioizotopów w różnych dziedzinach nauki, w medycynie i przemyśle również nie zawsze spotyka się ze społecznym zrozumieniem. Szczególne wątpliwości społeczeństwa budzi głębokie składowanie długożyłowych odpadów wysokoaktywnych.

Aktualnie na świecie zaawansowanych jest kilka projektów głębokich składowisk geologicznych. Pomimo technicznej dojrzałości technologii składowania, do tej pory nie oddano jeszcze do użytku składowiska ostatecznego dla wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego.

Sprzeciw społeczny budzi również budowa składowisk płytkich dla odpadów nisko i średnio-aktywnych. Nawet, jeśli wiąże się z tym większe zrozumienie

i akceptacja dla stosowania izotopów krótko życiowych, np. do celów medycznych, to jednak lokalizacja składowiska na własnym terenie nie budzi entuzjazmu społeczności lokalnych.

Dla zwiększenia zrozumienia problemów postępowania z odpadami promieniotwórczymi potrzebna jest efektywna informacja i edukacja społeczeństwa, jak również odpowiednie zademonstrowanie bezpieczeństwa proponowanych rozwiązań technicznych. Właściwe zagospodarowanie odpadów promieniotwórczych, powstających w badaniach naukowych, w licznych zastosowaniach technik izotopowych w przemyśle i medycynie, a także w tzw. cyklu paliwowym, jest problemem ważnym dla dalszego rozwoju technik jądrowych i energetyki opartej na reaktorach jądrowych. Stałe ulepszanie metod przeróbki, ciągle ich rozwój podążający za bieżącymi osiągnięciami światowej nauki, jest podstawowym zadaniem dla badaczy i inżynierów pracujących w różnych dyscyplinach nauki. Polska, która posiada reaktor

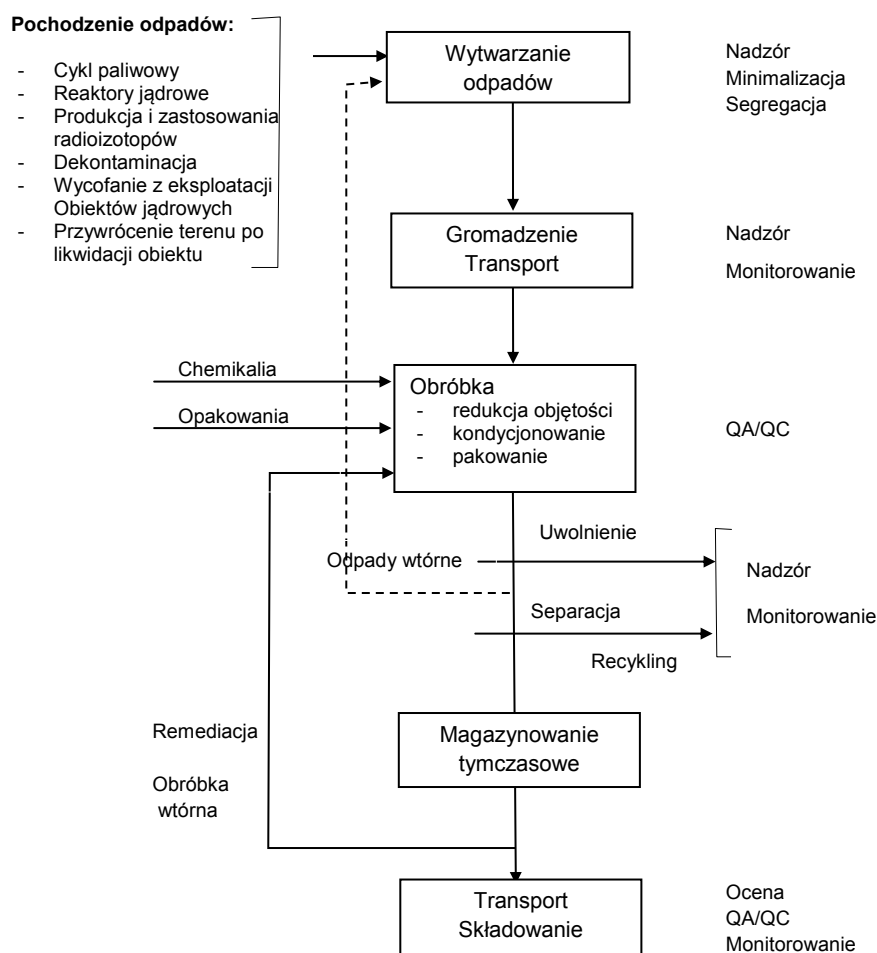
badawczy i stosuje techniki jądrowe, a także zarządza od wielu lat składowiskiem powierzchniowym odpadów promieniotwórczych, ma bogate doświadczenie w ich prawidłowym zagospodarowaniu. Wprowadzenie energetyki jądrowej i budowa w kraju pierwszej elektrowni jądrowej stawia jednak nowe wymagania i jest dużym wyzwaniem zarówno dla Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów Radioaktywnych (ZUOP), jak i naukowców pracujących nad nowymi metodami zagospodarowania powstających odpadów. Prowadzenie zaawansowanych prac badawczych wspierających program jądrowy kraju i pozwalających na dalszy rozwój zastosowań technik izotopowych jest obowiązkiem nauki, a instytutów związanych z atomistyką w szczególności. Pomocne wydaje się wykorzystanie doświadczeń krajów przodujących w dziedzinie energetyki jądrowej i pokojowego wykorzystania technik jądrowych. Aby zagwarantować pełne bezpieczeństwo postępowania z odpadami promieniotwórczymi, prace badawcze powinny objąć wszystkie etapy cyklu.

Przyjęty ogólnie schemat zagospodarowania odpadów promieniotwórczych, stosowany również w Polsce, składa się z kilku etapów (rys.1), z których każdy wymaga wiedzy i praktyki. Są to:

Zbieranie i segregacja, najpierw w miejscu powstania, u producenta odpadów, a następnie w agencji odpadów radioaktywnych; w Polsce w Zakładzie Unieszkodliwiania Odpadów Radioaktywnych, instytucji odpowiedzialnej za gromadzenie, transport, przetwarzanie i składowanie odpadów promieniotwórczych pochodzących z całego kraju.

Przetwarzanie, obróbka, sprowadzające się do redukcji objętości, czasami zmiany formy odpadu i oddzielenia określonych składników, np. nieradioaktywnych, w celu recyklingu, bądź zmniejszenia toksyczności odpadów przeznaczonych do dalszej obróbki. W zależności od stanu skupienia odpadu mogą być stosowane różne metody obróbki.

Przetwarzanie obejmuje również **kondycjonowanie**, czyli nadanie odpadom formy stosownej do wy-



Rys. 1. Ogólny schemat postępowania z odpadami promieniotwórczymi. Na podstawie *Radioactive Waste Management, An IAEA Source Book*. IAEA, Vienna 1992.

Fig. 1. General scheme for management of radioactive waste. Adapted from *Radioactive Waste Management, An IAEA Source Book*. IAEA, Vienna 1992.

magań transportu, poprzez stabilizację za pomocą adekwatnych substancji wiążących (cement, asfalt, żywice) i zastosowanie odpowiednich, standardowych opakowań. Jest to, więc ostatni etap przed przewiezieniem odpadów do przechowalnika lub na składowisko ostateczne.

Kolejnym etapem może być czasowe **przechowywanie** w celu rozpadu izotopów krótkożyciowych bądź z uwagi na inne techniczne lub organizacyjne względy. Czasowe przechowywanie w specjalnie zaprojektowanych przechowalnikach (suchych lub mokrych) jest zwykłą procedurą stosowaną wobec wypalonego paliwa bądź odpadów wysokoaktywnych, długożyciowych, dla których składowiska ostateczne nie zostały jeszcze zbudowane.

Składowanie ostateczne, w odpowiednio zaprojektowanych składowiskach, jest ostatnim etapem zagospodarowania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego. W zależności od charakterystyki odpadu, sprowadzającej się głównie do poziomu aktywności i czasu półrozpadu obecnych w nim radioizotopów, składowanie ma miejsce w składowiskach naziemnych, płytkich przypowierzchniowych, bądź głębokich. Głębokość składowiska powinna być dostosowana do poziomu aktywności składowanych w nim odpadów: odpady średnioaktywne mogą być umieszczane na głębokości kilkudziesięciu-kilkuset metrów, podczas gdy odpady wysokoaktywne, bądź wypalone paliwo jądrowe, wymaga składowania na głębokości około 1000 m pod powierzchnią ziemi.

Z tym bezpośrednio wiąże się przyjęta obecnie klasyfikacja. Proponowany obecnie przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA) system klasyfikacji odpadów promieniotwórczych opiera się na kryteriach ilościowych, w których odpady są pogrupowane według aspektów bezpieczeństwa, związanych z ich zarządzaniem, a w szczególności według opcji ich składowania [1]. Klasyfikacja ta zakłada istnienie 6 grup odpadów (Tabela 1). Są to odpady wyłączone spod kontroli regulatora, odpady bardzo krótkożyciowe, bardzo niskoaktywne, niskoaktywne, średnioaktywne i wysokoaktywne. Oddzielną gru-

pę stanowi wypalone paliwo, które w zależności od przyjętej w kraju strategii postępowania, może być traktowane, jako odpad, bądź materiał, który podlega przetwarzaniu w celu odzyskania i recyklingu aktywności. Każdej z tych grup odpadów przypisana jest odpowiednia opcja postępowania, zakończona etapem składowania w specjalnie zaprojektowanym obiekcie inżyneryjnym. W Polsce jest nim Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych w Różanie, które wprawdzie wykorzystuje istniejący fort wojskowy z początków XX w., ale zostało dostosowane do wymogów bezpieczeństwa stawianych podobnym obiektom inżyneryjnym.

Badania naukowe gwarancją bezpieczeństwa

Prace badawcze nad metodami przetwarzania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa jądrowego prowadzone są w kraju od wielu lat, m.in. w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ), w którym wchodzi w skład bloku badań statutowych pt. Badania w dziedzinie chemicznych aspektów energetyki jądrowej. Ich plany przyszłościowe zostały ujęte w „Perspektywicznych kierunkach działalności naukowej, rozwojowej i wdrożeniowej”, przyjętych przez Radę Naukową IChTJ w 2019 [2]. Dokument przedstawiający przyszłe kierunki działalności naukowej, rozwojowej i wdrożeniowej IChTJ, o których mowa w art. 29 ust. 2 pkt 5 i 6 ustawy o instytutach badawczych, powiązany jest ściśle z krajowymi oraz unijnymi programami strategii i rozwoju takimi, jak: Konstytucja dla Nauki powstała w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego, przygotowana przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska „Polityka energetyczna Polski do 2040 roku” (PEP2040), zaktualizowany „Program Polskiej Energetyki Jądrowej” (PPEJ), a także zaktualizowany w roku 2020 „Krajowy Plan postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym” (Krajowy Plan), wymagany wdrożeniem do krajowego prawodawstwa Dyrektywy Rady 2011/70/Euratom z dnia 19 lipca 2011 r. ustanawiającej ramy wspólnotowe w zakresie odpowiedzialnego i bezpiecznego gospodarowania wpa-

Tabela 1. Opcje postępowania z różnymi rodzajami odpadów promieniotwórczych
Table 1. Options for management of different types of radioactive waste

Rodzaj odpadów	Opcja postępowania
Odpady wyłączone	Brak ograniczeń, wyłączenie spod kontroli
Odpady bardzo krótkożyciowe	Przechowywanie do wygaśnięcia
Odpady bardzo niskoaktywne	Składowiska powierzchniowe
Odpady niskoaktywne	Składowiska przypowierzchniowe, płytkie
Odpady średnioaktywne	Składowiska głębokie
Odpady wysokoaktywne	Składowiska głębokie
Wypalone paliwo	Przechowalniki, składowiska głębokie / przeróbka (reprocessing)

lonym paliwem jądrowym i odpadami promieniotwórczymi. PPEJ i Krajowy Plan zawierają odniesienia do programu badawczego towarzyszącego zarówno rozwojowi energetyki jądrowej w kraju, jak i kontynuacji prac związanych z opracowaniem nowych metod postępowania z odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym. Zgodnie z powyższymi dokumentami metody te powinny być stale rozwijane i aktualizowane.

Opracowywanie nowych metod i technologii unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych generowanych przez elektrownie jądrowe, to jeden z celów statutowych IChTJ powiązanych z PPEJ i szerokim programem unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych w Polsce podjętym przez ZUOP i opisanym w Krajowym Planie. Od lat prowadzone są w instytucie prace nakierowane na pozyskiwanie nowej wiedzy w dziedzinie odpadów promieniotwórczych i cyklu paliwowego. Obszar badań obejmuje m.in. następujące zagadnienia:

- Prace nad nowymi metodami unieszkodliwiania odpadów ciekłych z użyciem procesów separacyjnych, takich jak: metody membranowe, sorpcyjne, jonowymiennie, ekstrakcyjne); zmniejszanie radioaktywności odpadów metodami radiochemicznymi przy użyciu m.in. nowych materiałów: selektywnych ekstrahentów, wymienników jonowych, nanosorbentów oraz zaawansowanych materiałów membranowych [3-8]. Prace prowadzone są przy współpracy ZUOP; w przyszłości mogą dotyczyć opracowania kompleksowych metod unieszkodliwiania ciekłych, niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych powstających w elektrowni jądrowej. Badania są wykonywane od lat w ramach licznych projektów badawczych, grantów instytucji zewnętrznych, projektów strategicznych i na bezpośrednie zlecenie ZUOP.
- Rozwój nowoczesnych metod kondycjonowania i zestawiania odpadów promieniotwórczych; badania nad zestawianiem odpadów radioaktywnych o różnej aktywności w szklach krzemionkowych oraz matrycach ceramicznych (np. materiały typu Synroc) [9, 10]. Prace te były prowadzone m.in. w zadaniu badawczym Nr 4 „Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi”, w ramach Strategicznego Programu Badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”.
- Badania nad unieszkodliwianiem odpadów stałych wybranych kategorii [11]; prace we współpracy z ZUOP i innymi ośrodkami badawczymi w kraju i na świecie. W roku 2020 ZUOP, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla wraz IChTJ, przygotowali wstępny raport dotyczący budowy doświadczalnej instalacji spalania odpadów, która miała

by poprzedzić wdrożenie metody termicznego unieszkodliwiania promieniotwórczych odpadów organicznych w ZUOP.

- Badania nad nowoczesnymi metodami przeróbki wypalonego paliwa jądrowego, uwzględniające oddzielenie aktywności mniejszościowych od produktów rozszczepienia. Prace nad nowymi ligandami umożliwiającymi separację La/Ac oraz ewentualny rozdział aktywności (np. kiur od ameryku); ekstrakcja technetu, udział w opracowaniu schematu procesu EURO-GANEX w celu recyklingu plutonu i aktywności mniejszościowych. Badania nad zagadnieniami ekstrakcji rozpuszczalnikowej zastosowanej w zaawansowanych procesach przeróbki wypalonego paliwa są od lat prowadzone przez IChTJ m.in. w ramach projektów europejskich, w konsorcjach prowadzonych przez produkuje instytucje francuskie (projekty EUROPART, ASGARD, SACSESS, GENIORS) [12, 13].
- Prace nad rozwojem technologii składowania odpadów promieniotwórczych z uwzględnieniem badań nad nowymi barierami ochronnymi (chemicznymi, fizycznymi oraz inżynierskimi). IChTJ w konsorcjum złożonym z instytucji krajowych kierowanych przez Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) wykonał pracę „Opracowanie metodyki oceny bezpieczeństwa i wskazanie optymalnej lokalizacji płytkiego składowania odpadów promieniotwórczych nisko- i średnioaktywnych”. Dalsze prace naukowo-badawcze dotyczące technologii składowania są rozwijane w miarę postępu projektu. Trwają również badania nad nowymi barierami ochronnymi opartymi m.in. na materiałach pochodzenia naturalnego [14, 15]. Zapewnienie bezpieczeństwa zamkniętych i nowych składowisk odpadów promieniotwórczych leży w zakresie zainteresowań IChTJ i jest jednym z celów prowadzonych w instytucie badań. Prowadzona jest ocena migracji radionuklidów i innych zanieczyszczeń w sąsiedztwie składowisk odpadów radioaktywnych przy użyciu adekwatnego oprogramowania, z wykorzystaniem kodów obliczeniowych do symulacji ruchu zanieczyszczeń w geosferze i modelowania transportu [16]. Wyniki symulacji pozwalają prognozować zachowanie repozytorium podczas długotrwałej eksploatacji.
- IChTJ jest również zainteresowany pracami nad składowiskiem głębokim, które mogłyby być zainicjowane budową Polskiego Podziemnego Laboratorium Badawczego (PURL), na wzór podobnych stacji doświadczalnych w krajach rozwijających technologie składowania geologicznego. W roku 2014 powstała grupa inicjatywna zrzeszająca instytucje mające wymagane do budowy takiego laboratorium kompetencje i doświadczenie wy-

niesione z przeszłości, m.in. ze realizowanego w latach 1997-1999 Strategicznego Programu Rządowego „Gospodarka odpadami promieniotwórczymi i wypalonym paliwem jądrowym”, w którym IChTJ również uczestniczył. Jednym z celów przyszłościowych będzie opracowanie programu badań dla PURL. Program taki był zarysowany już w roku 2014; plan budowy podziemnego laboratorium został włączony do Krajowego Planu i ma być kontynuowany w przyszłości. IChTJ jest członkiem Platformy Składowania Geologicznego, w ramach, której współpracuje z instytucjami europejskimi, zajmującymi się problemami składowania wypalonego paliwa jądrowego.

- Opracowanie metod fizyko-chemicznych wytwarzania paliw dla reaktorów II i III generacji z uwzględnieniem recyklingu uranu i plutonu [17]. Prace dotyczą rozwoju technologii produkcji spiekalnego ditlenku uranu w postaci paliw klasycznych (pastylki) i paliw sferycznych, a także opracowania metod chemicznych wytwarzania prekursorów paliw mieszanych typu MOX oraz analizy możliwości stosowania paliw mieszanych o różnym składzie. Były prowadzone w projekcie ACSEPT [18] i w Etapie Nr 4 pt. „Opracowanie metod chemicznych wytwarzania tlenkowych prekursorów paliwa jądrowego”, w ramach zadania badawczego Nr 3 „Podstawy zabezpieczenia potrzeb paliwowych polskiej energetyki jądrowej” realizowanego przez IChTJ w ramach strategicznego projektu badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”.
- Prace nad rozwojem technologii produkcji nowych paliw do reaktorów III+ i IV generacji w powiązaniu z separacją i recyklingiem aktywności. Prace były prowadzone w ramach różnych projektów krajowych i europejskich. W przyszłości mogą być dalej rozwijane w kierunkach:
 - dalszego rozwoju technologii produkcji sferycznych paliw jądrowych – ditlenku uranu i węgla uranu, zawierających aktywność mniejszościowe wydzielone z wypalonego paliwa jądrowego, w celu transmutacji jądrowej długożyciowych aktywności do izotopów krótkożyciowych w reaktorach prędkich IV generacji;
 - opracowania metod chemicznych wytwarzania paliw mieszanych z aktywnościami mniejszościowymi oraz analizy możliwości stosowania różnego ich składu;
 - prac nad wykorzystaniem wyodrębnionych pierwiastków z wypalonego paliwa do wytwarzania matryc inertnych (np. stabilizowany ditlenek cyrkonu) w celu transmutacji długożyciowych produktów rozszczepienia oraz aktywności w reaktorach prędkich oraz w re-

aktorach podkrytycznych sterowanych przez zewnętrzne źródło neutronów (ADS);

- prac nad rozwojem technologii wykorzystania wyodrębnionych pierwiastków z wypalonego paliwa do wytwarzania prekursorów paliw do reaktorów nowej generacji – uranowych paliw węglkowych i azotkowych;
- badań dotyczących fizyko-chemicznych aspektów technologii produkcji nowoczesnych paliw jądrowych (paliwa sferyczne, pastylki).

Badania nad nowoczesnymi paliwami były już prowadzone w ramach europejskiego 7 Programu Ramowego UE (EURATOM) – projektu Advanced fuels for Generation IV reActors: Reprocessing and Dissolution (ASGARD), a także w ramach strategicznego projektu badawczego.

W powiązaniu z PPEJ został ustanowiony w 2011 r. przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) Strategiczny Program badawczy „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”, którego zadanie nr 4 „Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi” było koordynowane i w dużym zakresie wykonywane, w IChTJ [19]. Głównym celem tego zadania były badania naukowe i prace rozwojowe nad metodami przerobu, przetwarzania, przechowywania i ostatecznego składowania wypalonego paliwa jądrowego oraz odpadów promieniotwórczych, które powstaną w trakcie eksploatacji przyszłych elektrowni jądrowych w kraju. W ramach zadania nr 4 zrealizowano następujące prace:

- Rozwój technik i technologii w zakresie wyodrębniania plutonu i długożyciowych aktywności;
- Techniki i technologie przeróbki wypalonego paliwa poprzez transmutację jego komponentów w reaktorach na neutrony prędkie;
- Rozwój technologii przerobu nisko i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych;
- Zmniejszenie radiotoksyczności odpadów promieniotwórczych, w tym metodami radiochemicznymi;
- Fizykochemiczne technologie kondycjonowania odpadów promieniotwórczych i wypalonego paliwa;
- Wykorzystywanie wyodrębnionych pierwiastków z wypalonego paliwa do wytwarzania prekursorów paliwa dla reaktorów nowej generacji.

Strategiczny Program Badawczy był ważnym elementem inwentaryzacji i konsolidacji badań prowadzonych w kraju; miał w swoim założeniu być również istotnym wsparciem dla rozpoczętego PPEJ. Wiadomo, że zasadniczym krokiem w definiowaniu strategii i formowaniu odpowiednich przepisów dotyczących unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych jest równoległy plan badań naukowych i rozwoju w zakresie charakterystyki, przetwarzania i składowania

tychże odpadów. Program strategiczny zakładał pozyskanie wyników, które mogłyby zostać wykorzystane przez szerokie grupy odbiorców, m.in. organy administracji państwowej, osoby podejmujące decyzje o budowie elektrowni jądrowych w kraju i zakresie zastosowania w nich krajowych technologii przeróbki odpadów promieniotwórczych, ośrodki zajmujące się zastosowaniem izotopów, jednostki produkujące izotopy i substancje znaczone, zakłady medycyny nuklearnej, a w przyszłości elektrownie jądrowe, w których zagospodarowanie ciekłych, niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych będzie ważnym problemem do rozwiązania.

Realizacja różnorodnych zadań związanych z Programem Polskiej Energetyki Jądrowej nakłada nowe obowiązki na organizacje zajmujące się problematyką odpadów promieniotwórczych. Do tych obowiązków należy przede wszystkim budowa nowego składowiska odpadów nisko i średnioaktywnych, w którą muszą być zaangażowane instytucje i eksperci z różnych dziedzin. Prace nad składowiskiem zaowocowały ści-

śle współpracą pomiędzy instytucjami: Instytutem Chemii i Techniki Jądrowej, Państwowym Instytutem Geologicznym-Państwowym Instytutem Badawczym (PIG-PIB) oraz ZUOP. Instytucje te wspólnie pracują nad zagadnieniami związanymi z zamknięciem starego obiektu w Róźnie i wyborem lokalizacji dla nowego składowiska. IChTJ i ZUOP ustaliły wstępnie wspólny program badawczy dotyczący opracowania procedur przetwarzania odpadów składowanych w nowym obiekcie oraz kryteriów akceptacji odpadów w przypowierzchniowym składowisku dla nisko i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych. Aby zapewnić długoterminowe wymagania bezpieczeństwa eksploatacyjnego, należy opracować odpowiednie procedury przyjmowania odpadów na składowisko oraz metodologię procesu odbioru. Stanowi to niezbędny etap, konieczny do opracowania analizy bezpieczeństwa przedkładanej do oceny regulatora, Państwowej Agencji Atomistyki.

Tabela 2. Projekty związane z odpadami promieniotwórczymi w 6 i 7 Programie Ramowym UE (FP6, FP7)

Table 2. Projects related to radioactive waste in the 6th and 7th Framework Programs of the EU (FP6, FP7)

Akronim, strona www	Projekt	Komentarz
EUROPART (FP6) https://cordis.europa.eu/project/id/508854	EUROpean research program for the PARTitioning of minor actinides and some long-lived fission products from high active wastes issuing the reprocessing of spent nuclear fuels	Opracowanie strategii postępowania z odpadami wysokoaktywnymi pochodzącymi z przerobu wypalonego paliwa jądrowego, separacja aktywności
ACSEPT https://cordis.europa.eu/project/id/211267/fr	Actinide recycling by separation and transmutation	Przerób wypalonego paliwa, separacja aktywności
SACSESS http://www.sacsess.eu/	Safety of actinide separation processes	Przerób wypalonego paliwa, separacja aktywności
ASGARD http://www.asgard-project.eu/	Advanced fuels for Generation IV reactors: reprocessing and dissolution	Przerób wypalonego paliwa, separacja aktywności; nowoczesne paliwa jądrowe
IPPA https://cordis.europa.eu/project/id/269849	Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal	Wprowadzanie składowisk do przestrzeni publicznej debaty, zagadnienia społeczne związane ze składowaniem geologicznym
NEWLANCER https://cordis.europa.eu/project/id/295826	New MS linking for an advanced cohesion in Euratom research	M.in. studia dotyczące ryzyka, bezpieczeństwa i aspektów środowiskowych odpadów promieniotwórczych (powstała grupa pracująca nad odpadami)
PLATENSO https://igdtp.eu/activity/platenso-building-a-platform-for-enhanced-societal-research-related-to-nuclear-energy-in-central-and-eastern-europe/	Building a platform for enhanced societal research related to nuclear energy in Central and Eastern Europe	Pośrednio dotykał kwestii odpadów radioaktywnych (niektóre fragmenty dotyczyły odpadów promieniotwórczych, zagadnień bezpieczeństwa)
EAGLE https://cordis.europa.eu/project/id/604521	Enhancing education, training and communication processes for informed behaviors and decision-making related to ionizing radiation risks	Pośrednio dotykał kwestii odpadów radioaktywnych (niektóre fragmenty dotyczyły odpadów promieniotwórczych, zarządzania ryzykiem przy składowaniu)

ARCADIA https://cordis.europa.eu/project/id/605116	Assessment of regional capabilities for new reactors development through an integrated approach	Pośrednio dotyczył kwestii odpadów radioaktywnych (niektóre fragmenty dotyczyły odpadów; aspekty bezpieczeństwa i odpadów promieniotwórczych przy wdrażaniu reaktora prędkiego chłodzonego ołowiem, ALFRED)
TALISMAN https://cordis.europa.eu/project/id/323300/pl	Transnational Access to Large Infrastructure for a Safe Management of ActiNide	Tworzenie sieci między istniejącymi europejskimi infrastrukturami w dziedzinie nauk o aktywnościach i ich zachowaniu w materiałach paliwowych podczas procesów separacji i po umieszczeniu w składowisku geologicznym

Tabela 3. Projekty związane z odpadami promieniotwórczymi w programie Horyzont 2020 (H2020)**Table 3.** Projects related to radioactive waste in the Horizon 2020 program (H2020)

Akronim, strona www	Projekt	Komentarz
CHANCE https://www.chance-h2020.eu/	Characterization of conditioned nuclear waste for its safe disposal in Europe	Opracowanie nowych metod charakteryzowania kondycjonowanych odpadów promieniotwórczych
GENIORS GEN IV http://www.geniors.eu/	Integrated Oxide fuels recycling strategies	Poprawa obecnego recyklingu wypalonego paliwa jądrowego i przyszłych strategii wielokrotnego recyklingu, które mają zostać wdrożone w reaktorach czwartej generacji
EURAD https://cordis.europa.eu/project/id/847593	European Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD)	Europejski Wspólny Program Gospodarki Odpadami Promieniotwórczymi, który ma pomóc państwom członkowskim UE wdrożyć dyrektywę 2011/70 / Euratom poprzez współpracę z ich programami krajowymi
DISCO https://www.disco-h2020.eu/	Modern Spent Fuel Dissolution and Chemistry in Failed Container Conditions	Zagadnienia składowania odpadów, IChTJ – w Grupie Stowarzyszonej
SHARE https://share-h2020.eu/	A Roadmap for Research in Decommissioning	Koordinacja działań w dziedzinie likwidacji obiektu jądrowego i jego późniejszego demontażu: ustanowienie mapy drogowej i strategicznej agendy badawczej

Współpraca międzynarodowa – projekty UE

Prace badawcze w IChTJ wspierane są silnie przez rozwiniętą współpracę międzynarodową, m.in. w ramach projektów ramowych UE, Euratomu i projektów IAEA (Tabela 2, Tabela 3). Obecnie instytut jest partnerem w dwóch projektach dotyczących odpadów promieniotwórczych: EURAD i CHANCE. W dalszych dwóch: DISCO i SHARE, uczestniczy w innej formie.

Inicjatywa EURAD, nie jest w zasadzie pojedynczym projektem badawczym w tradycyjnym rozumieniu, ale grupuje w sobie wiele projektów dotyczących zagadnień i problemów nurtujących kraje członkowskie UE, do tej pory nie do końca rozwiązanych. Europejski wspólny program zarządzania odpadami promieniotwórczymi (EURAD) powstał w oparciu o wcześniejsze prace przygotowawcze projektu Komisji Europejskiej JOPRAD (Towards Joint Programming on Radioactive Waste Disposal), wsparte dekadami prac badawczo-rozwojowych wspierających bezpieczne gospodarowanie

odpadami promieniotwórczymi i ich składowanie. Celem EURAD jest koordynowanie działań na podstawie uzgodnionych priorytetów i wspólnych interesów europejskich organizacji gospodarki odpadami (WMO), organizacji wsparcia technicznego (TSO) i jednostek badawczych (RE). Taki program ma za zadanie uzupełniać krajowe programy badawczo-rozwojowe poprzez wspólne ustanawianie i wspólne prowadzenie działań o wartości dodanej na poziomie europejskim. Opiera się on na już istniejących i powstających sieciach podmiotów europejskich (sieć IGD-TP, SITEX i sieć REs) poprzedzających działania koordynacyjne i wspierające (w szczególności sekretariat Platformy Składowania Geologicznego SeclGD2, projekty SITEX-II i JOPRAD). Wspólny program, pogłębiający współpracę między europejskimi podmiotami w dziedzinie gospodarki odpadami promieniotwórczymi, ma generować wiedzę i zarządzać nią w celu wsparcia państw członkowskich UE we wdrażaniu dyrektywy 2011/70/Euratom (dyrektywa w sprawie odpadów), uwzględniając różny zakres

i etapy zaawansowania programów krajowych państw członkowskich. Obejmuje to:

- Wspieranie państw członkowskich w opracowywaniu i wdrażaniu ich krajowych programów badań i rozwoju w celu bezpiecznego, długoterminowego gospodarowania pełną gamą różnych odpadów promieniotwórczych, poprzez udział we wspólnym programie RWM;
- Konsolidację istniejącej wiedzy w celu bezpiecznego rozpoczęcia eksploatacji pierwszych obiektów geologicznego składowania wypalonego paliwa jądrowego, odpadów wysokoaktywnych i innych długożyciowych odpadów promieniotwórczych oraz wspieranie optymalizacji związanej ze stopniową realizacją składowania geologicznego;
- Poprawę zarządzania wiedzą i jej transferu między organizacjami, państwami członkowskimi i pokoleniami.

Pracom badawczo-rozwojowym zaplanowanym w projekcie EURAD towarzyszą studia strategiczne i programy zarządzania wiedzą, m.in. poprzez szkolenia i mobilność młodych pracowników nauki.

Projekt CHANCE (Characterization of Conditioned Nuclear Waste for its Safe Disposal in Europe) dotyczy charakteryzowania kondycjonowanych odpadów promieniotwórczych w celu ich bezpiecznego przechowywania i składowania w istniejących już składowiskach ostatecznych. Zarówno czasowe przechowywanie, jak i ostateczne składowanie wymaga pełnej charakterystyki i stałej kontroli jakości odpadów kondycjonowanych. Projekt CHANCE ma na celu skuteczne rozwiązanie złożonego problemu charakteryzacji tych odpadów za pomocą nieniszczących technik i metod analitycznych. Metody charakteryzowania opracowywane w ramach projektu obejmują zarówno charakterystykę fizyko-chemiczną, jak i radiologiczną. Projekt, poprzez odpowiednie ankiety i analizy, ma pozwolić na kompleksowe zrozumienie obecnie stosowanych metod charakteryzacji i schematów kontroli jakości kondycjonowanych odpadów promieniotwórczych w Europie. Ponadto, w ramach projektu, są opracowywane, testowane i weryfikowane nowe techniki analityczne, które mają poprawić i uzupełnić charakterystykę odpadów. Są to:

- Kalorymetria, jako innowacyjna, nieniszcząca technika zmniejszająca niepewność identyfikacji obecnych w odpadach radionuklidów i ich stężeń;
- Tomografia mionowa opracowana w celu rozwiązania problemu nieniszczącej kontroli zawartości objętościowo dużych odpadów jądrowych;
- Pierścieniowa spektroskopia węglowa (CRDS), innowacyjna technika charakteryzująca gazy emitowane przez odpady radioaktywne.

ICHJT posiada również rozwiniętą współpracę w zakresie technologii przeróbki odpadów nisko i średnioaktywnych oraz metod ich składowania.

W ramach projektu Euratomu, NEWLACER, współpracował z ośrodkami z regionu: z Rumunii, Słowenii, Litwy, Węgier, które również budują składowiska odpadów nisko i średnioaktywnych, a także z Francji, Belgii i Włoch. Wszystkie te kraje prowadzą zaawansowane prace badawcze nad technologiami postępowania z odpadami promieniotwórczymi, m.in. dotyczące procesów towarzyszących składowaniu, wsparte modelowaniem i symulacjami komputerowymi oraz badaniem migracji już na etapie projektowania składowisk odpadów oraz w trakcie ich działania. Współpraca z tymi krajami jest kontynuowana w ramach kolejnych projektów europejskich.

Zajęcie się problematyką składowania odpadów promieniotwórczych stwarza możliwość pełnego włączenia się ICHJT w europejski nurt badawczy poprzez wejście w konsorcja realizujące duże projekty naukowe finansowane z funduszy europejskich. Kontakty w ramach ewentualnych umów bilateralnych, wizyty w instytucjach europejskich oraz udział w międzynarodowych konferencjach naukowych, poszerzają paletę zainteresowań i rozwijają istniejące kompetencje o nowe, przydatne przy budowie nowego składowiska płytkiego i realizacji programu składowania geologicznego, umiejętności.

Prace związane z przerobem wypalonego paliwa jądrowego prowadzone są w ICHJT głównie w powiązaniu z projektami Euratomu i z udziałem w programach ramowych UE. Pierwszy projekt Europejski dotyczący separacji aktynowców, w którym uczestniczyły zespoły ICHJT, EUROPART (EUROPEAN research program for the PARTitioning of minor actinides and some long-lived fission products from high active wastes issuing the reprocessing of spent nuclear fuels), realizowany był w 6 Ramowym Programie (FP6). Kolejne projekty to ACSEPT (Actinide recycling by separation and transmutation), SACSESS (Safety of actinide separation processes), ASGARD (Advanced fuels for Generation IV reactors: reprocessing and dissolution) i obecnie, wykonywany w ramach Horyzontu 2020 GENIORS (GEN IV Integrated oxide fuels recycling strategies).

Projekty Euratomu stanowiły kontynuację prowadzonych wcześniej w ICHJT prac nad ekstrakcyjnymi metodami oddzielania aktynowców od lantanowców i innych produktów rozszczepienia uranu. Badania ukierunkowane były m.in. na optymalizację procesu selektywnego wydzielania długożyciowych aktynowców (ameryk, kiur) z wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych za pomocą nowych ekstrahentów poli-N-heterocyklicznych. Prace uzupełnione były badaniami odporności radiacyjnej ekstrahentów oraz opracowaniem metod konwersji ameryku i kiuru z roztworów wodnych w tlenki dodawane do paliwa typu MOX w celu transmutacji radiotoksycznych aktynowców w reaktorach IV generacji.

Współpraca naukowa w ramach MAEA

Ważny rozdział w pracach IChTJ stanowi udział w projektach koordynowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA-CRP). Projekty MAEA posiadające szerszy niż europejski wymiar, umożliwiają stały kontakt z nauką światową i wymianę doświadczeń pomiędzy zespołami; stanowią bazę do dalszej współpracy. Podejmują również wyzwania globalne, często niewidoczne z poziomu krajowego, a niejednokrotnie inspirujące do nowych działań. Bywają również potwierdzeniem słuszności wybranych w kraju kierunków badawczych i rozwojowych. Przykładem tego, są poszukiwane od paru lat przez ZUOP metody unieszkodliwiania odpadów organicznych. Efektywnym rozwiązaniem wydają się metody termiczne, rozpoznane poprzez zorganizowany dialog techniczny, wizyty studyjne w ośrodkach zagranicznych, wreszcie podjęcie współpracy z krajowymi, wyspecjalizowanymi instytucjami, m.in. z IChTJ. Rozważając zastosowanie metod termicznych do przetwarzania odpadów organicznych, IChTJ podjął prace w ramach IAEA CRP T13017 "Management of Wastes Containing Long-lived Alpha Emitters: Characterization, Processing and Storage" zgłaszając projekt pt. „Management of Radioactive Organic Waste Containing Long-lived Alpha Emitters”. Celem CRP jest lepsze poznanie istniejącego inwentarza odpadów alfa-promieniotwórczych i jego różnorodności, a następnie metod postępowania, zwłaszcza z odpadami o wysokiej zawartości radionuklidów alfa, tak, aby końcowy produkt, mógł spełnić kryteria przyjęcia odpadów do przechowywania i ostatecznego składowania. Ważną kategorią odpadów alfa-promieniotwórczych są odpady organiczne będące przedmiotem zainteresowania ZUOP, jak również CRP T13017. Zrozumienie zakresu problemów związanych z zagospodarowaniem odpadów alfa-promieniotwórczych i ich wspólne rozwiązywanie przez naukowców, dostawców technologii oraz właścicieli i operatorów składowisk odpadów jądrowych, ma umożliwić łatwiejsze sprostanie wyzwaniom stawianym przez współczesną energetykę jądrową. Stworzenie katalogu obiecujących rozwiązań pozwoli partnerom projektu wybrać podejście zgodne z istniejącym stanem techniki i adekwatne do ich aktualnych potrzeb.

Innym przykładem dostosowania działań w ramach IAEA CRP do potrzeb krajowych był projekt I35005 „Application of Advanced Low Temperature Desalination Systems to Support Nuclear Power Plants and Non-electric Applications”, do którego IChTJ dołączył. Celem ogólnym CRP była poprawa ekonomiki i możliwości chłodzenia współczesnych reaktorów jądrowych. Wytwarzane w nich ciepło może być wykorzystane w systemach odsalających zaopatrujących elektrownie w wodę wykorzystywaną do chłodzenia

reaktora, również w przypadku wystąpienia awarii. W pracach IChTJ zaproponowano użycie ciepła z reaktorów jądrowych do wykorzystania w systemach membranowych odsalania, produkujących wodę na potrzeby elektrowni jądrowej, a także do oczyszczania ciekłych niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych.

Społeczny wymiar zarządzania odpadami radioaktywnymi

Nieodłącznym elementem zarządzania odpadami promieniotwórczymi na wszystkich etapach ich zagospodarowania jest dialog ze społeczeństwem. Osiągnięcie porozumienia ze społecznościami lokalnymi i uzyskanie ich akceptacji dla budowy obiektów przechowywania i składowania odpadów radioaktywnych jest warunkiem powodzenia takich projektów.

Zagadnienia związane z zagospodarowaniem odpadów promieniotwórczych, podobnie jak i energetyka jądrowa, budzą kontrowersje ograniczające możliwość działania realizatorów takich projektów. Jest to szczególnie trudne przy projektowaniu składowisk odpadów wysokoaktywnych i wypalonego paliwa jądrowego. Kraje z zaawansowanymi programami składowania geologicznego (np. Finlandia, Szwecja) musiały przejść przez etap żmudnych działań społecznych na rzecz budowy tych obiektów. Nie wszędzie takie działania kończą się sukcesem. Przykłady krajów, takich jak: Niemcy, Francja, Szwajcaria czy Belgia mówią same za siebie: ambitne podejście zaangażowania społeczeństwa obywatelskiego poprzez konsultacje, debaty publiczne czy tworzenie specjalnych komitetów na rzecz porozumienia nie doprowadziły dotąd do społecznej zgody, a realizacja inwestycji w tych krajach może potrwać jeszcze długie lata.

Działania w społecznościach lokalnych muszą być również podjęte w Polsce, przy wyborze lokalizacji dla nowego składowiska nisko i średnioaktywnych odpadów promieniotwórczych. Wybór powinien zostać poprzedzony rozmowami z władzami lokalnymi, konsultacjami społecznymi i debatami publicznymi, które są rutynowymi działaniami angażowania społeczeństwa w procesy decyzyjne.

Aspekt społeczny, jako ważny element w postępowaniu z odpadami promieniotwórczymi jest uwzględniany przy ustalaniu programów Euratomu. IChTJ brał udział w kilku projektach europejskich dotyczących tej tematyki. Metody i sposoby prowadzenia dialogu społecznego przy wdrażaniu składowisk odpadów promieniotwórczych były szeroko dyskutowane w ramach projektu IPPA (Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal). W projekcie została utworzona tzw. grupa referencyjna złożona z interesariuszy zaangażowanych w budowę nowego składowiska i przedstawicieli społeczeństwa, m.in.

organizacji proekologicznych. Grupa ta zorganizowała pierwsze wysłuchanie publiczne pod hasłem: Czy potrzebujemy nowego składowiska odpadów promieniotwórczych? Zgodnie z przyjętymi założeniami wysłuchanie miało na celu poinformowanie wszystkich interesariuszy o stanie przygotowań do budowy składowiska i złożoności związanych z tym zagadnień. Uczestnicy wysłuchania mogli znaleźć odpowiedzi na nurtujące ich pytania oraz przedstawić własne poglądy i oczekiwania organom odpowiedzialnym za przygotowanie inwestycji. Rozmowa miała na celu dostarczyć potrzebnych informacji, złagodzić obawy przed ewentualnymi zagrożeniami, a w konsekwencji zwiększyć zrozumienie dla planowanych działań. Dzięki obecności mediów publicznych (prasa, radio) informacja o wysłuchaniu dotarła do szerokich grup społecznych. Uczestnicy spotkania mogli zapoznać się nie tylko z opiniami na temat budowy składowiska, ale także z szerokim zakresem prac, które muszą poprzedzić jego budowę, w tym w obszarach komunikacji ze społeczeństwem. Potwierdzono również, że odpowiednia komunikacja społeczna jest przedmiotem troski państwa, a przejrzystość procesów decyzyjnych

jest nieodzownym elementem prawidłowego funkcjonowania społeczeństwa obywatelskiego [20].

Sposoby komunikacji społecznej wypracowane w ramach projektu IPPA mogą być zastosowane przy wyborze lokalizacji składowiska dla odpadów radioaktywnych w Polsce, a także w innych działaniach związanych z wdrażaniem instalacji zagospodarowania odpadów.

Metody komunikacji ze społeczeństwem, sposoby edukacji i informowania, były dalej rozwijane w ramach kolejnych projektów Euratomu: PLATENSO i EAGLE (Tabela 2), a obecnie również w projekcie EURAD realizowane jest zadanie poświęcone tym zagadnieniom.

Podsumowanie

Rozwiązanie problemu bezpiecznego zagospodarowania odpadów promieniotwórczych wydaje się obecnie kluczowe dla szerokiego wykorzystania reaktorów jądrowych, jako głównego bezemisyjnego, trwałego i niezawodnego źródła energii. Prawidłowa informacja i komunikacja społeczna może ułatwić re-



Fot. 1. Czy potrzebujemy nowego składowiska odpadów promieniotwórczych? (fot. IChTJ)

Photo 2. Do we need a new radioactive waste repository?

alizację projektów jądrowych i wypracować konsens wokół tak kontrowersyjnych obiektów, jak składowiska geologiczne. Udział nauki w rozwijaniu nowych technologii efektywnego przetwarzania i bezpiecznego składowania odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa jądrowego połączony z włączeniem ekspertów do debaty publicznej, wydaje się jedynym właściwym podejściem i gwarancją powodzenia programów jądrowych.

prof. dr hab. inż. Grażyna Zakrzewska,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

Literatura:

- [1] IAEA, Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards, No GSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [2] Perspektywiczne kierunki działalności naukowej, rozwojowej i wdrożeniowej Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, 27 czerwca 2019.
- [3] A. Miśkiewicz, A. Nowak, J. Pałka, G. Zakrzewska-Kołtuniewicz, Liquid Low-Level Radioactive Waste Treatment Using an Electrodialysis Process. *Membranes* 2021, 11, 324. <https://doi.org/10.3390/membranes11050324>
- [4] Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz, Advancement in Membrane Methods for Liquid Radioactive Waste Processing: Current Opportunities, Challenges, and the Global Scenario. In: Handbook of Membrane Separations, Chemical, Pharmaceutical, Food and Biotechnological Applications, Second Edition, ed. by A.K. Pabby, S. S.H. Rizvi, A.M. Sastre, CRC Press Taylor & Francis Group (2015), Pages 665-708.
- [5] Grażyna Zakrzewska-Trznadel, Advances in membrane technologies for the treatment of liquid radioactive waste, *Desalination*, 321 (2013) 119-130.
- [6] L. Fuks, A. Oszczak, E. Gniazdowska, D. Sternik, Calcium alginate and chitosan as potential sorbents for strontium radionuclide, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* (2014) 304(1):15-20.
- [7] Agnieszka Jaworska-Sobczak, Agnieszka Miśkiewicz, Grażyna Zakrzewska-Trznadel, Marian Harasimowicz, Koncepcja układu hybrydowego do przerobu ścieków radioaktywnych, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, vol.96 Membrany i Procesy Membranowe w Ochronie Środowiska, pod redakcją Michała Bodzka i Jacka Pelczera, Gliwice 2012, s. 181-186.
- [8] B. Danko, R.S. Dybczyński, Z. Samczyński, D. Gajda, I. Herdzik-Koniecko, G. Zakrzewska-Kołtuniewicz, E. Chajduk, K. Kulisa, Ion exchange investigation for recovery of uranium from acidic pregnant-leach solution, *Nukleonika*, 2017;62(3):213-221; doi: 10.1515/nuka-2017-0031.
- [9] Andrzej Deptuła, Magdalena Miłkowska, Wiesława Łada, Tadeusz Olczak, Danuta Wawszczak, Tomasz Smolinski, Fabio Zaza, Marcin Brykała, Andrzej G. Chmielewski, Kenneth C. Goretta, Sol-Gel Processing of Silica Nuclear Waste Glasses, *New Journal of Glass and Ceramics*, 2011, 1, 105-111.
- [10] T. Smolinski, A. Deptuła, T. Olczak, W. Łada, M. Brykała, P. Wojtowicz, D. Wawszczak, M. Rogowski, Fabio Zaza, Perovskite synthesis via complex sol-gel process to immobilize radioactive waste elements, January 2014, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 299(1):675-680.
- [11] L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, K. Kiegiel, G. Zakrzewska-Kołtuniewicz, Management of radioactive waste containing graphite: overview of methods, *Energies* 2020, 13(18), 4638; <https://doi.org/10.3390/en13184638> (registering DOI).
- [12] I. Herdzik-Koniecko, C. Wagner, M. Trumm, U. Mullich, B. Schimmelpfennig, J. Narbutt, A. Geist, P. J. Panak, "Do An(III) and Ln(III) ions form heteroleptic complexes with diglycolamide and hydrophilic BT(B)P ligands in solvent extraction systems? A spectroscopic and DFT study". *New J. Chem.*, 2019, 43, 6314-6322. DOI: 10.1039/c9nj00651f.
- [13] Ł. Steczek, J. Narbutt, M.-Ch. Charbonnel, P. Moisy: "Solvent extraction investigations on Pu(IV) and Th(IV) complexes with hydrophilic SO₃-Ph-BTP and SO₃-Ph-BTBP ligands", *Solv. Extr. Ion Exch.*, 2019, 37, 259-268. DOI: 10.1080/07366299.2019.1639366.
- [14] L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories (2018) *Applied Clay Science* 161:139-150.
- [15] L. Fuks, I. Herdzik-Koniecko, L. Maskalchuk, T. Leontieva, Clay-salt slimes of the JSC "Belaruskali" as potential engineering barriers in the radioactive waste repositories: sorption of Cs(I), Sr(II), Eu(III) and Am(III), (2017), *International journal of Environmental Science and Technology* 15(3).
- [16] Wioleta Olszewska, Agnieszka Miśkiewicz, Grażyna Zakrzewska-Kołtuniewicz, Leszek Lankof, Leszek Pająk, Multi-barrier system preventing migration of radionuclides from radioactive waste repository, *Nukleonika* 2015;60(3):557-563.
- [17] M. Brykała, A. Deptuła, M. Rogowski, W. Łada, T. Olczak, D. Wawszczak, T. Smolinski, P. Wojtowicz, G. Modolo, Synthesis of microspheres of triuranium octaoxide by simultaneous water and nitrate extraction from ascorbate-uranium sols, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, March 2014 DOI: 10.1007/s10967-013-2763-9
- [18] A. Deptuła, M. Brykała, W. Łada, T. Olczak, D. Wawszczak, G. Modolo, H. Daniels, A.G. Chmielewski, Synthesis of uranium and thorium dioxides by Complex Sol-Gel Processes (CSGP) Proceedings of the First ACSEPT International Workshop Lisbon, Portugal, 31 March - 2 April 2010.
- [19] Rozwój technik i technologii wspomagających gospodarkę wypalonym paliwem i odpadami promieniotwórczymi, Zadanie wykonane w ramach projektu strategicznego NCBR, Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej, raport pod redakcją Leona Fuksa, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2014.
- [20] Katarzyna Szczygłówna, Grażyna Zakrzewska. Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal (IPPA) FP7-269849, Deliverable 6.6 (2.9), Report summarizing hearing in Poland, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2013.