

**Łukasz ZABOKLICKI, Kazimierz GARBULEWSKI**

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie  
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

## **Metody unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych z elektrowni atomowych**

### **Methods of waste disposal from nuclear power station**

**Słowa kluczowe:** odpady radioaktywne, unieszkodliwianie odpadów

**Key words:** radioactive waste, disposal of waste

### **Wprowadzenie**

Rada Ministrów 13 stycznia 2009 roku przyjęła uchwałę dotyczącą rozpoczęcia prac nad nowym Programem Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ), którego zasadniczym celem jest budowa i uruchomienie w 2020 roku pierwszej w Polsce elektrowni atomowej. Analizując PPEJ, można dojść do wniosku, że Polska stoi przed ogromnym wyzwaniem modyfikacji i rozwoju strefy sektora energetycznego, a dotychczasowe strategie polskiej elektroenergetyki, zakładające wykorzystanie niemal wyłącznie spalania węgla, powinny być uznane za sprzeczne z międzynarodowymi dążeniami w kierunku ochrony środowiska naturalnego. Zgodnie z myślą

idei dywersyfikacji źródeł pozyskiwania energii rodzi się potrzeba wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE), bez względu na ich znaczne koszty. Jednakże należy stwierdzić, że przy obecnych możliwościach wykorzystania technologii OZE (energetyka wodna, energia wiatru czy nasłonecznienia) nie są w stanie zaspokoić stale rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną, choćby z powodu ograniczeń środowiskowych i klimatycznych naszego kraju. Ekonomicznie korzystnymi i czystymi źródłami energii, podobnie jak w większości państw UE, mogą stać się elektrownie jądrowe, jednakże pod warunkiem, że zostaną wyeliminowane negatywne ich oddziaływania na ekosystem i zdrowie człowieka. Jednym z najpoważniejszych zagrożeń są niebezpieczne odpady radioaktywne.

Według uchwały głównym inwestorem będzie PGE Polska Grupa Energetyczna S.A., której pełnomocnik będzie

sprawować swoje obowiązki w randze podsekretarza stanu (wiceministra) w Ministerstwie Gospodarki. Polska Grupa Energetyczna planuje budowę dwóch siłowni, każda o mocy około 3000 MW (<http://wyborcza.biz/>). Proponowane lokalizacje elektrowni przedstawiono na rysunku 1.

W artykule przedstawiono właściwości odpadów powstających w elektrowniach atomowych oraz metody ich nieszkodliwiania.

## Odpady promieniotwórcze

Podczas produkcji energii w reaktorze atomowym metodą rozszczepienia jąder, najczęściej uranu lub plutonu, dochodzi do powstania znacznej ilości radioaktywnych produktów rozszczepienia. W skład tych produktów wchodzi ponad 200 radionuklidów. Wspólną ich cechą jest zdolność emitowania promieniowania beta i gamma, w niewielu przypadkach tylko beta. Promieniowanie alfa



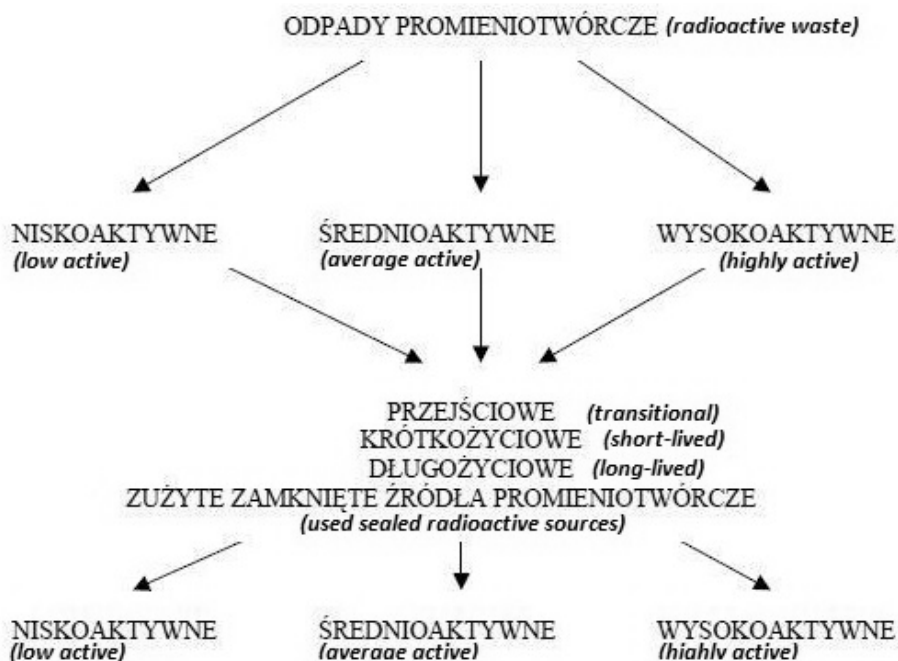
RYSunEK 1. Lokalizacje proponowanych elektrowni jądrowych w Polsce (<http://www.atom.edu.pl/>)  
 FIGURE 1. Location of nuclear power stations planned at Poland

emituje, powstające w niewielkiej ilości w reaktorze, długowieczne pierwiastki transuranowe. Dopuszczalne stężenia tych związków w środowisku są określone przez przepisy, które podlegają wytycznym międzynarodowych organizacji: Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA), Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP) oraz Komitetowi Naukowemu ONZ do spraw Skutków Napromienowania (UNESCEAR). Analizując skutki szkodliwego oddziaływania promieniowania jonizującego na biosferę, nie ma potrzeby ustalania dopuszczalnych norm na zerowym poziomie. Spełnienie tego warunku byłoby praktycznie niemożliwe do zrealizowania zarówno pod względem ekonomicznym, jak i technicznym. Jednak utrzymywanie promieniowania

na jak najniższym poziomie jest kluczowym założeniem działań ICRP.

Odpady promieniotwórcze występują w trzech stanach skupienia: stałym, ciekłym i gazowym. Klasyfikację odpadów przeprowadza się, biorąc pod uwagę aktywność właściwą (wyrażoną w  $\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ ) oraz okres połowicznego rozpadu (Krzystyniak 1976). W większości krajów, w tym również w Polsce, stosowana jest klasyfikacja według trzech kategorii (rys. 2).

Większość produktów rozszczepienia stanowią izotopy krótkowieczne, które już po upływie jednej doby po wyłączeniu reaktora wygasają, zmniejszając swoją aktywność pięciokrotnie. Pozostałe charakteryzują się dłuższym okresem rozpadu – po upływie 3 miesięcy aktywność ich zmniejsza się pięciokrotnie, a po 10 latach pozostaje jedynie



RYSUNEK 2. Schemat klasyfikacji odpadów radioaktywnych (<http://www.sprawynauki.edu.pl/>)  
 FIGURE 2. Scheme of radioactive waste classification

niewielka jej ilość, stanowiąca około 0,2% początkowej aktywności produktów rozszczepienia.

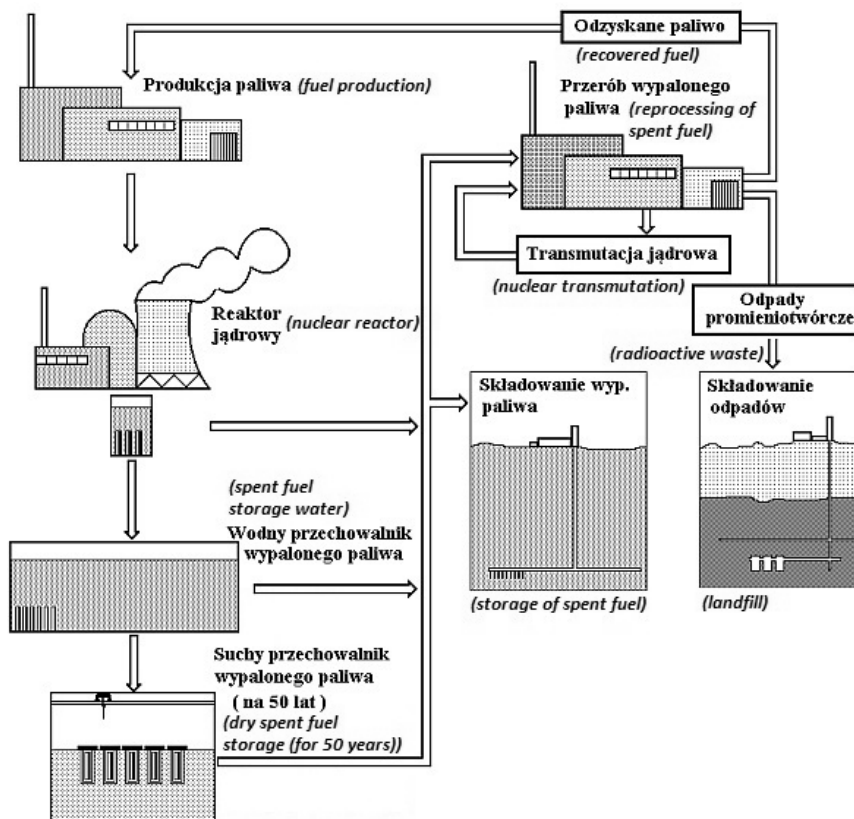
W procesie eksploatacji reaktorów jądrowych często dochodzi do rozszczepienia elementów paliwowych w postaci mikroporów i pęknięć, czego skutkiem jest przedostawanie się zwłaszcza lotnych produktów rozszczepienia do wody chłodzącej rdzeń reaktora. Rodzi to konieczność oczyszczania wody systemu chłodzącego w sposób ciągły za pomocą filtrów z żywic jonowymiennych. Stosując dodatkowo zateżenie ścieków poprzez ich destylację, można skutecznie oczyścić je z niebezpiecznych związków. Wyjątek stanowi tryt – promieniotwórczy izotop wodoru, który przechodzi prawie w całości do kondensatu jako składnik wody. Posiada on jednak małą radiotoksyczność, co znacznie zmniejsza zagrożenie w otoczeniu elektrowni. Podstawowym źródłem radioaktywnych odpadów są produkty rozszczepienia uranu i plutonu. Oprócz tego odpady powstają w procesie aktywacji neutronowej materiałów konstrukcyjnych rdzenia reaktora. Mogą one znajdować się w wodzie pierwotnego obiegu reaktora lub stanowić radioaktywne elementy konstrukcyjne reaktora, będące efektem planowych jego remontów. Powstają również w procesie przerobu wypalonego paliwa jądrowego. Kolejne etapy powstawania i przerobu odpadów są przedstawione na rysunku 3.

Spośród wszystkich odpadów najniebezpieczniejsze dla człowieka i biosfery są pierwiastki transuranowe (PTRU), najmniej zaś niebezpieczeństwo niesie ze sobą tryt, znajdujący się w wodzie sys-

temu chłodzącego reaktora. Zagrożenie związane z pierwiastkami transuranowymi związane jest z ich długim okresem półowicznego rozpadu, sięgającym 20 000 lat oraz całkowitym zanikiem aktywności dopiero po 100 000 latach (Wandrasz i Biegańska 2003). Odpady nisko- i średnioaktywne nie zawierają pierwiastków transuranowych. Spośród nich największe znaczenie stanowią radionuklidy strontu i cezu o okresie półrozpadu dochodzącym do 30 lat i zaniku aktywności promieniotwórczej po okresie 300 lat.

Ilość produktów rozszczepienia, stanowiących odpady z elektrowni jądrowej, jest stosunkowo mała – sięga kilku kilogramów na dobę. Reakcje zachodzące w reaktorze generują rozpad jednych izotopów i tworzenie w ich miejsce innych. Praktycznie całość produktów rozszczepienia pozostaje w miejscu ich powstania, czyli wewnątrz szczelnych osłon elementów paliwowych, w tzw. koszulkach.

Materiały konstrukcyjne reaktora i instalacji pomocniczych oraz chłodzących ulegają z czasem korozji. Powstające w tym procesie produkty przedostają się do chłodziwa i w momencie kontaktu z rdzeniem reaktora ulegają aktywacji, tworząc izotopy promieniotwórcze. Jednak ilość tych radionuklidów, głównie żelaza, manganu i niklu, jest stosunkowo mała. Regulacja procesów rozszczepienia w rdzeniu reaktora zachodzi dzięki wykorzystaniu prętów wykonanych z boru lub rozpuszczalnych jego związków. Jego zadaniem jest pochłanianie neutronów chłodziwa i przekształcanie go na promieniotwórcze izotopy wodoru.



RYSUNEK 3. Schemat powstawania i unieszkodliwiania odpadów radioaktywnych (<http://www.elektrownieatomowe.info/>)

FIGURE 3. Diagram of radioactive waste generation and utilization

## Metody unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych

Metody unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych są ściśle związane z wielkością emitowanego przez nie promieniowania oraz ich stanem skupienia (Goliński 1980). W przypadku odpadów gazowych najskuteczniejszymi sposobami oczyszczania skażonego powietrza z radionuklidów są: schładzanie, adsorpcja, filtracja i rozcieńczanie. Proces oczyszczania gazów trwa od kilkunastu minut do kilkudziesięciu dni i polega na

ich wstępnym schłodzeniu, a następnie przepuszczaniu przez filtry. Zanim strumień powietrza zostanie odprowadzony do atmosfery przez komin zostaje na ogół rozcieńczony czystym powietrzem. Stosowanie filtrów ma za zadanie przechwytywanie z powietrza promieniotwórczych aerozoli oraz stałych cząstek aktywnych, których źródłem są produkty rozszczepienia uranu lub produkty aktywacji zanieczyszczeń powietrza, mającego kontakt z rdzeniem reaktora jądrowego.

Z praktycznego punktu widzenia powietrze usuwane z elektrowni atomowych zawsze w mniejszym lub większym stopniu jest skażone związkami promieniotwórczymi. Istotny jest jednak fakt, iż aktywność gazów promieniotwórczych emitowanych do środowiska jest znacznie mniejsza od dopuszczalnych norm, które są określane indywidualnie dla każdej elektrowni, w zależności od jej lokalizacji, wysokości komina, kierunku oraz prędkości wiatru.

Odpady promieniotwórcze w stanie płynnym, o niskim i średnim stopniu aktywności, są poddawane następującym procesom: schładzaniu, filtracji, wymianie jonowej, a następnie zestalaniu do postaci ciała stałego lub destylacji – odparowywaniu i rozcieńczaniu (Listwan 2007). Wstępne schładzanie promieniotwórczych ścieków umożliwia rozpad promieniotwórczy, zmniejszający aktywność cieczy przed jej przerobem. Jest to proces czasochłonny. Pięciokrotne zmniejszenie aktywności świeżo powstałych promieniotwórczych ścieków wymaga oczyszczania ich przez 40 dni. Procesy filtracyjne mają na celu oczyszczenie ciekłych odpadów z drobnych cząstek ciał stałych, zawiesin, przygotowując tym samym ścieki do wymiany jonowej. Metoda ta wykorzystuje właściwości sorpcyjne naturalnych lub syntetycznych wymienniczy jonowych – jonitów. Powszechne zastosowanie znalazły organiczne jonity syntetyczne o składzie podobnym do tych stosowanych w elektrowniach konwencjonalnych w procesie demineralizacji wody.

Najskuteczniejszymi sposobami zestalania odpadów są: betonowanie, asfaltowanie oraz zestalanie polimerowe. Skuteczność poszczególnych metod za-

leży od sposobu ostatecznego składowania, lokalizacji składowiska w stosunku do miejsca przerobu odpadów, kosztów materiałów i aparatury oraz sposobu i kosztów transportu zestalonych odpadów. W procesie betonowania stosowany jest cement portlandzki, posiadający dobre właściwości wytrzymałościowe i warunkujące stopień ochrony radiologicznej. Domieszki sorbentów mineralnych zmniejszają szybkość wymywania radionuklidów z produktów betonowania. Dodatkowo stosuje się impregnację betonu tworzywami sztucznymi, co sprawia, iż prędkość wymywania radionuklidów z betonu zmniejsza się od 10 do 300 razy. Proces asfaltowania opiera się na równoczesnym mieszaniu i odparowywaniu wody. W końcowym etapie tego typu zestalania powstaje produkt stanowiący mieszaninę asfaltu i substancji mineralnych. Metoda ta ma wiele zalet w porównaniu z szerzej stosowaną metodą betonowania, w tym między innymi: mniejsze są objętość i ciężar, większe jest stężenie substancji mineralnych, lecz mniejsza prędkość wypłukiwania radionuklidów i niższy koszt procesu, zwłaszcza przy większej skali zestalania. Powszechne zastosowanie znajduje metoda zestalania odpadów w tworzywach sztucznych, wykorzystująca przede wszystkim tworzywa termoutwardzalne, żywice epoksydowe oraz polietylen. Metoda ta charakteryzuje się stosunkowo niską temperaturą procesu zestalania, a prędkość wypłukiwania radionuklidów jest zbliżona lub nawet przewyższa produkty asfaltowania, co czyni tę metodę jeszcze bardziej uniwersalną.

Kolejny sposób opiera się na rozcieńczeniu uprzednio nieprzerobionych cieczy promieniotwórczych innymi, nieak-

tywnymi ściekami lub wodą, a następnie usunięciu ich do wód powierzchniowych – rzek, jezior lub innych zbiorników wodnych. W miejscach zrzutu ścieków następuje rozcieńczenie i rozproszenie radionuklidów w otoczeniu do poziomu stężeń niestanowiących większych zagrożeń dla środowiska naturalnego. Płynne odpady zalicza się do promieniotwórczych, jeżeli ich średniodobowa aktywność właściwa przekracza dziesięciokrotnie wartość dopuszczalną dla wody pitnej – dla radionuklidów o okresie połowicznego rozpadu dłuższym niż 60 dni, i stukrotnie – dla radionuklidów o okresie połowicznego rozpadu mniejszym niż 60 dni.

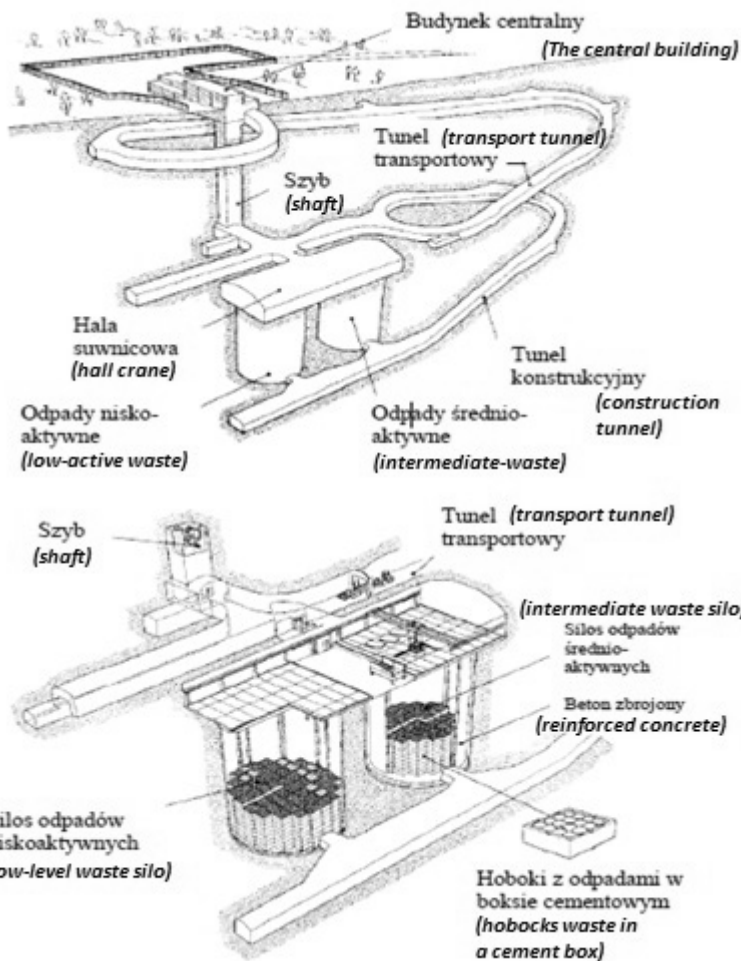
Do odpadów stałych zalicza się materiały i przedmioty skażone substancjami promieniotwórczymi. Większość powstających w elektrowniach odpadów stałych jest niskoaktywna, jednak powstają również stałe odpady wysokoaktywne, na przykład zużyte jonity oraz elementy konstrukcyjne rdzenia reaktora. Proces przerobu stałych odpadów promieniotwórczych polega na zmniejszeniu ich objętości poprzez prasowanie lub rozdrabnianie.

Gospodarka odpadami promieniotwórczymi obejmuje ich odbiór, transport, przetwarzanie, okresowe magazynowanie i ostateczne składowanie. Wszystkie etapy powinny przebiegać w takich warunkach, aby stopień promieniowania jonizującego dla otoczenia był utrzymywany w akceptowalnych granicach, a ostateczne składowanie nie wywoływało żadnego negatywnego wpływu na ludzi i środowisko naturalne. Czynności związane z unieszkodliwianiem odpadów, przetwarzaniem oraz tymczasowym magazynowaniem (np.

proces schładzania wysokoaktywnych odpadów) odbywają się na powierzchni. Za najbardziej korzystne miejsce do ostatecznego składowania uważa się podziemne, głębokie struktury skalne. Schemat składowiska podziemnego odpadów radioaktywnych VLJ w Olkiluoto w Finlandii przedstawiono na rysunku 4.

Głównym kryterium wyboru lokalizacji składowiska wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych jest warunek całkowitej izolacji odpadów od środowiska naturalnego (Kłeczek 2005), który wymaga spełnienia następujących zaleceń:

- składowisko musi znajdować się na dużej głębokości (duża odległość od biosfery),
- składowisko nie może kolidować aktualnie, jak również w dającej się przewidzieć przyszłości, z inną działalnością gospodarczą,
- lokalizacja nie może znajdować się na terenie aktywnym sejsmicznie,
- składowisko powinno się znajdować wśród skał nieprzepuszczalnych, stanowiących naturalną barierę, ponadto ich właściwości muszą zapewnić trwałą szczelność i dobrą współpracę z barierami technicznymi,
- skała macierzysta musi charakteryzować się dobrymi właściwościami sorpcyjnymi dla nuklidów oraz dobrym przewodnictwem cieplnym w celu prawidłowego odprowadzania ciepła emitowanego przez wysokoaktywne odpady,
- warunki hydrologiczne wokół składowiska muszą zapewniać długi czas transportu nuklidów w celu umożliwienia ich rozpadu i rozcieńczenia do nieszkodliwych poziomów.



RYSUNEK 4. Schemat podziemnego składowiska odpadów VLJ w Olkiluoto w Finlandii (<http://www.atom.edu.pl/>)

FIGURE 4. Scheme of underground waste disposal site VLJ at Olkiluoto (Finland)

Powyższe warunki spełniają jedynie nieliczne złoża soli, które są wykorzystywane do budowy podziemnych, szybowych składowisk (Tarka 1991). Próby składowania wysokoaktywnych odpadów w skałach wylewnych (bazalty), osadowych (iłowce) oraz krystalicznych (granity) nie powiodły się, gdyż słabe parametry termiczne tych skał nie

gwarantowały prawidłowego odprowadzania ciepła z terenu składowania.

Składowiska odpadów nisko- i średnioaktywnych nie wymagają spełnienia tak rygorystycznych norm bezpieczeństwa. Stosunkowo krótki czas aktywności promieniotwórczej i brak emitowanego ciepła sprawiają, że mogą być one składowane w kawernach solnych



lub innych trwale nieprzepuszczalnych skałach. Prowadzone są badania związane z możliwością wtłaczania odpadów promieniotwórczych w formie ciekłej do porowatych struktur skalnych, znajdujących się w obrębie warstw skał nieprzepuszczalnych. Projektowanie składowiska odpadów promieniotwórczych obejmuje następujące działania:

- zbadanie zasięgu określonego kompleksu skalnego,
- wybór obszaru perspektywicznego w obrębie kompleksu skalnego z uwzględnieniem zaburzeń tektonicznych,
- sprawdzenie warunków sejsmicznych i geodynamicznych obszaru perspektywicznego,
- wybór jednolitego, bez zaburzeń tektonicznych, bloku skalnego z uwzględnieniem rozmiarów i geometrii przewidywanego składowiska,
- charakterystyka przydatności bloku na podstawie analizy właściwości geologicznych, hydrogeologicznych i geomechanicznych,
- analiza społeczno-ekonomicznych czynników z uwzględnieniem przestrzennego zagospodarowania terenu potencjalnego składowiska,
- wstępna akceptacja miejsca lokalizacji,
- etap badań szczegółowych w celu ostatecznej ich akceptacji,
- wstępna decyzja miejsca lokalizacji składowiska, kompetencje Państwowej Agencji Atomistyki (PAA) oraz Organu Nadzoru Górniczego (WUG i OUG).

Zapewnienie długookresowego bezpieczeństwa wymaga wykonania kompleksowej, lokalnej analizy stosun-

ków hydrogeologicznych składowiska, otaczającej go struktury geologicznej i stosunków panujących wewnątrz składowiska w bezpośrednim sąsiedztwie odpadów (Śliziński i in. 2004). Masyw skalny powinien tworzyć utwory, które nadają się do zaadaptowania pod względem tworzenia i dalszej eksploatacji wyrobiska skalnego. Przestrzeń przeznaczona pod składowisko powinna pomieścić całą objętość pola magazynowego, zapewniając odpowiednie odległości od stref z nieciągłościami geologicznymi. Niezbędne jest uwzględnienie chemicznych i fizycznych właściwości skał wraz z możliwymi reakcjami mineralnymi, mogącymi nastąpić w trakcie eksploatacji składowiska i po wyczerpaniu jego zdolności magazynowych. Skały otaczające i nadkładowe powinny charakteryzować się zdolnościami do zmniejszania i rozpraszania pierwiastków promieniotwórczych, przedostających się przez bariery ochronne do środowiska naturalnego. Masyw skalny powinien zapewniać szczelność wyrobisk składowiska, posiadać znaczną wytrzymałość na działanie destrukcyjnych sił wewnętrznych, będących wynikiem zmian pierwotnego naprężenia górotworu, powstałych w procesie wykonania wyrobiska, a także zmian termicznych, wynikających z emitowanego przez odpady ciepła. Teren przeznaczony na cele podziemnego składowania odpadów radioaktywnych powinien charakteryzować się bardzo małą aktywnością sejsmiczną, co zmniejsza możliwość wystąpienia przemieszczeń pokładów skalnych w obrębie wyrobisk.

Najodpowiedniejszymi miejscami lokalizacji składowisk są jednorodne złoża, o nieskomplikowanej budowie

geologicznej, z takimi właściwościami skał macierzystych, aby w trakcie budowy, eksploatacji i likwidacji była zagwarantowana stateczność barier geologicznych i inżynierskich otaczających składowisko. Ponadto bariery naturalne nie powinny ulegać gwałtownym zmianom ewolucyjnym, będących wynikiem działania procesów antropogenicznych i geodynamicznych. Nie można zapominać o konieczności uzyskania przychylnego nastawienia lokalnej społeczności. Najlepszym sposobem uzyskania aprobaty jest rzetelna kampania informacyjna oparta na przeprowadzonych analizach bezpieczeństwa składowiska, przedstawiająca w obiektywnym świetle wszystkie aspekty pracy składowiska i mająca na celu wyzbycie się wśród miejscowej ludności stereotypów związanych z bliskością materiałów radioaktywnych.

Czynniki całkowicie wykluczające możliwość zaadaptowania terenu pod składowisko odpadów radioaktywnych to:

- skomplikowana budowa geologiczna,
- brak możliwości dokonania szczegółowej analizy geologicznej terenu,
- możliwość wystąpienia stref spękań w masywie skalnym,
- możliwość wystąpienia procesów neotektonicznych,
- występowanie erozji, wietrzenia, zjawisk osuwiskowych itp.,
- destabilizacja poziomów zwierciadeł wód podziemnych.

Prawidłowo geologicznie dobrana lokalizacja ma istotne znaczenie, jeśli chodzi o koszt budowy składowiska. Złożoność procesu wyboru miejsca lokalizacji składowiska sprawia, iż wszystkie kroki postępowania są uwarunkowane wynikami badań etapów poprzednich.

Niespełnienie kryteriów na początkowych etapach postępowania przygotowawczego prowadzi do rezygnacji z perspektywicznego miejsca pod lokalizację składowiska. Świadczy to o tym, jak istotne są drobiazgowo badania i szczegółowe analizy czynników determinujących bezpieczeństwo składowiska na przestrzeni kolejnych setek lat.

Odpady promieniotwórcze są składowane w Polsce w powierzchniowym składowisku w Różanie, noszącym nazwę: Centralna Składowica Odpadów Promieniotwórczych (CSOP). Powstałe w 1961 roku składowisko zajmuje powierzchnię 3045 ha na obszarze byłego fortu wojskowego. Wypełnienie składowiska w 80% oraz analizy wytrzymałości i trwałości obiektów składowicy, a także inwentaryzacja składowanych odpadów przeprowadzona w latach 1991–1997, wymuszają opracowanie koncepcji zakończenia eksploatacji tego składowiska. Niesie to ze sobą szereg następstw, z których najważniejsze jest opracowanie koncepcji budowy w Polsce nowego składowiska odpadów promieniotwórczych. Wydaje się, że najwłaściwszym rozwiązaniem ostatecznego składowania wysokoaktywnych odpadów oraz wypalonego paliwa jądrowego jest koncepcja składowiska głębokiego, zwanego inaczej geologicznym – GeoSOP (Kłęczek 2004).

Najbardziej perspektywicznym terenem pod lokalizację geologicznego składowiska są złoża soli kamiennej lubińsko-głogowskiego obszaru miedziowego (LGOM). Koncepcja ta ma wiele zalet oraz brak ograniczeń związanych z rozwiązaniami i wymaganiami stawianymi przez PAA. Istotną zaletą są warunki hydrogeologiczne – całkowita izolacja pokładu solnego od warstw wodonośnych.

Lokalizacja składowiska w złożu pokładowym daje duże możliwości poziomego powiększania wyrobiska w czasie jego eksploatacji. Jedyną trudnością jest fakt głębokiego zalegania warstwy pokładu soli, co znacznie zwiększa koszty inwestycyjne, związane z głębinami szybów. Jednak znaczna głębokość pokładu solnego daje gwarancję szczelnego odizolowania komór składowiska po jego zapelnieniu odpadami.

Alternatywną lokalizacją są wysady solne Łanięta i Damasławek oraz część południowa wysadu Kłodawa. Zakwaszone wysady solne są efektem halokinezy, procesu polegającego na wypiętrzeniu masy solnej ze znacznych głębokości (do kilku kilometrów) ku powierzchni. W związku z tym stwierdzono znaczne pofałdowania warstw skał solnych oraz towarzyszących im warstw skał ilastych, gipsów, anhydrytów, co wymusza konieczność przeprowadzenia

dokładnego rozpoznania geologiczno-górniczego masywu solnego, które doprowadzi do wyboru jednorodnego kompleksu solnego, o odpowiedniej w stosunku do wielkości składowiska powierzchni, miąższości oraz głębokości zalegania. Spośród wymienionych wyżej wysadów jedynie wysad Damasławek nie spełnia wymagań rozpoznania geologicznego, wysad zaś Łanięta jest znacznie dokładniej rozpoznany, lecz pełni on funkcję rezerwowej lokalizacji po planowanej na 2020 rok likwidacji kopalni Kłodawa, gdzie prowadzona jest sucha eksploatacja złoża soli. Proponowane lokalizacje przedstawiono na rysunku 5.

## Podsumowanie

Polska, jako członek UE, jest zobowiązana do przestrzegania unijnych dyrektyw dotyczących energetyki ato-

Legenda (*Legend*):

1. Wsady soli kamiennej (*Ripples of salt rocks*);
2. Kompleks skał ilastych (*Complex argillaceous rocks*);
3. Skały magmowe (granity i inne) - lokalizacje rezerwowe (*Igneous rocks (granites and others) - reserve locations*)



RYSUNEK 5. Proponowane lokalizacje podziemnego składowiska odpadów promieniotwórczych w Polsce (<http://www.atom.edu.pl/>)

FIGURE 5. Location of underground nuclear waste disposal sites proposed at Poland

mowej oraz powiązanych z nią sektorów gospodarki, m.in. gospodarki odpadami promieniotwórczymi. O wadze problemu najlepiej świadczą słowa unijnego komisarza ds. energii Guenthera Oettingera: „Naszym punktem odniesienia powinny być najwyższe standardy na świecie, by chronić obywateli, glebę i wodę przed skażeniem radiologicznym” ([http://serwisy.gazetaprawna.pl/ekologia/artykuly/463124,ke\\_za\\_zakazem\\_eksportu\\_odpadow\\_nuklearnych\\_i\\_budowa\\_skladowisk.html](http://serwisy.gazetaprawna.pl/ekologia/artykuly/463124,ke_za_zakazem_eksportu_odpadow_nuklearnych_i_budowa_skladowisk.html)). Mimo iż od uruchomienia pierwszego reaktora jądrowego upłynęło przeszło 50 lat (Calder Hall w Wielkiej Brytanii, 1956 rok), w UE nadal brakuje ostatecznych składowisk odpadów promieniotwórczych. Dlatego znaczna część z 7000 m<sup>3</sup> najgroźniejszych wysokoaktywnych odpadów, wytwarzanych każdego roku w UE, jest składowana płytko pod ziemią albo na powierzchni w tymczasowych przechowalniach, co stwarza realne zagrożenie dla ekosystemów.

Dyrektywa UE przewiduje wspólne dla wszystkich krajów normy bezpieczeństwa, dotyczące składowania odpadów promieniotwórczych oraz wypalonego paliwa jądrowego z elektrowni atomowych. Zgodnie z planami Komisji Europejskiej (KE) dyrektywa dotycząca gospodarki powyższymi odpadami powinna być przyjęta w 2011 roku, by po 4 latach od wejścia jej w życie, czyli w 2015 roku, rządy poszczególnych krajów przedstawiły programy dotyczące unieszkodliwiania odpadów, m.in. wykaz lokalizacji, szczegółowy harmonogram oraz technologię budowy ostatecznych składowisk odpadów i plan zarządzania nimi. Opracowane plany działania posiadają już niektóre państwa

UE, m.in. Finlandia, Szwecja i Francja, w których lokalizacje trwałego składowania odpadów zostaną uruchomione w okresie od 2020 do 2025 roku. Zgodnie z założeniami projektu powinny zostać powołane niezależne organy, odpowiedzialne za przyznawanie zezwoleń na budowę oraz przeprowadzenie analiz bezpieczeństwa dla poszczególnych składowisk. W taki sposób dyrektywa określi unijne ramy do stosowania przez państwa członkowskie norm opracowanych przez IAEA. Jednak poszczególne kraje będą miały swobodę ustalenia we własnym zakresie jeszcze bardziej radykalnych standardów bezpieczeństwa. Projekt KE został zgłoszony w ramach traktatu o Europejskiej Wspólnocie Energii Atomowej (Euratom), w którym przyznano UE kompetencje do ochrony ludności przed promieniowaniem jonizującym. O jego przyjęciu zadecydują jedynie rządy państw członkowskich, bez prawa współdecydowania przez Parlament Europejski. Spośród 27 państw UE w 14 działają elektrownie atomowe. W dwóch kolejnych – Polska i Włochy – trwają zaawansowane prace nad budową takich elektrowni. Ze 143 czynnych obecnie elektrowni 58 znajduje się na terenie Francji.

Polska nie ma odpowiedniego trwałego składowiska odpadów wysoko- i średnioaktywnych. Jedynym przedsiębiorstwem, zajmującym się odbiorem, transportem, unieszkodliwianiem i składowaniem odpadów promieniotwórczych, jest Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Radioaktywnych w Świerku, na którym prawdopodobnie również w przyszłości będzie ciążył ten obowiązek. Jednak nawet po uruchomieniu elektrowni atomowej w Polsce składo-

wisko silnie radioaktywnych odpadów nie będzie konieczne od razu. Wziąwszy pod uwagę fakt, iż zużyte paliwo jądrowe, po usunięciu z reaktora, powinno być przez około 15 lat przechowywane w specjalnie przystosowanych miejscach w obrębie elektrowni, konieczność uruchomienia składowiska końcowego odpadów w Polsce pojawi się dopiero za około 40 lat.

## Literatura

- GOLIŃSKI M., 1980. Unieszkodliwianie odpadów promieniotwórczych w energetyce jądrowej. CINTe OIC, Warszawa.
- KŁECZEK Z., ZELJAŚ D. 2004: Lokalizacja podziemnego składowiska odpadów promieniotwórczych w Polsce. *Przegląd Geologiczny* 8/1, 52.
- KŁECZEK Z., RADOMSKI A., ZELJAŚ D. 2005: Podziemne składowanie. Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice.
- KRZYSTYŃIAK E. 1976: Klasyfikacja i źródła odpadów promieniotwórczych. Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej, Warszawa.
- LISTWAN A., BAIC I., ŁUKSA A. 2007: Podstawy gospodarki odpadami niebezpiecznymi. Politechnika Radomska, Radom.
- ŚLIZIŃSKI K., KOEHLING J., LANKOF L. 2004: Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- TARKA R. 1991: Składowanie odpadów promieniotwórczych w złożach soli. *Przegląd Geologiczny* 7–8: 362–364.
- WANDRASZ J.B., BIEGAŃSKA J. 2003: Odpady niebezpieczne: podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

## Streszczenie

**Metody unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych z elektrowni atomowych.** Rozwój energetyki nuklearnej wymaga stworzenia warunków ograniczenia do minimum wpływu odpadów z produkcji energii

na środowisko naturalne. Odpady zawierające substancje radioaktywne są niezwykle niebezpieczne dla wszystkich ekosystemów, ale zastosowanie odpowiednich technologii może zmniejszyć ryzyko zanieczyszczenia środowiska. Analiza metod unieszkodliwiania odpadów stosowanych w UE została wykorzystana do oceny planów w tym zakresie Państwowej Agencji Atomistyki w Polsce. W następnej dekadzie powstanie potrzeba unieszkodliwiania odpadów z produkcji energii nuklearnej w Polsce i zadanie to powinno być przeprowadzone bez ryzyka zanieczyszczenia środowiska. W artykule przedstawiono właściwości odpadów powstających w elektrowniach atomowych oraz metody ich unieszkodliwiania.

## Summary

**Methods of waste disposal from nuclear power station.** Development of nuclear energy raises the need to minimize negative impacts of generated refuse on the environment. They are dangerous for the whole ecosystem of the planet, but with appropriate strategies and techniques for dealing with radioactive refuse, we can significantly reduce the associated risks. The analysis methods of refuse disposal based on the techniques used in European Union countries is associated with the plan of Państwowa Agencja Atomistyki (PAA) undertaken in Poland. According to this over the next decade we will face the need to refuse disposal from nuclear power station and to this point we have to be properly disposed. This paper presents the properties of wastes from nuclear power stations and the best available technologies their utilization.

### Authors' address:

Łukasz Zaboklicki, Kazimierz Garbulewski  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska  
Katedra Geoinżynierii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: zaboklicki\_mail@wp.pl  
kazimierz\_garbulewski@sggw.pl