

TRANSPORT MATERIAŁÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Transport of Radioactive Materials

Krzysztof Rzymkowski

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono różne rodzaje i sposoby transportu materiałów promieniotwórczych zalecane przez wymagania ochrony radiologicznej i międzynarodowe organizacje transportowe.

Abstract: The paper presents various types and methods of transport of radioactive materials recommended by radiation protection requirements and international transport organizations.

Słowa kluczowe: Materiały promieniotwórcze, pojemniki transportowe, kontener, kod IFN

Keywords: Radioactive materials, transportation cask, container, IFN code

Szeroka współpraca międzynarodowa w zakresie energetyki jądrowej i wykorzystanie materiałów promieniotwórczych w różnych dziedzinach, medycynie, przemyśle, rolnictwie i badaniach naukowych wymaga rozbudowanego systemu transportu tych materiałów pomiędzy zakładami przemysłu jądrowego ulokowanymi na różnych kontynentach. Różnorodność ładunków promieniotwórczych (rudę uranu, wzbogacony UF_6 , świeże lub wypalone paliwo jądrowe, odpady promieniotwórcze, izotopy dla przemysłu i medycyny itd.) powodują, że liczba potencjalnych przewoźników jest ograniczona. Proponowane są różne rozwiązania przewozu materiałów promieniotwórczych z wykorzystaniem transportu samochodowego, kolejowego, nawet specjalizowanych statków do przewozu ładunków niebezpiecznych, jak i wyjątkowo transportu lotniczego (głównie materiałów do zastosowań medycznych). W celu zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i środowiska zasady transportu materiałów promieniotwórczych są objęte umowami międzynarodowymi.

Zalecenia międzynarodowe

Międzynarodowe zalecenia dotyczące transportu materiałów promieniotwórczych zostały przedstawione przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (MAEA) po raz pierwszy w 1961 r. i są stale aktualizowane. Są one respektowane przez krajowe i międzynarodowe organizacje transportowe: transport drogowy **ADR** – (*L' Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*), transport kolejowy **RID** – (*Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses*), transport lotniczy **ICAO** – (*International Civil Aviation Organization*), transport morski **IMO** – (*International Maritime Organisation*).

Zgodnie z zaleceniami ONZ (*Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations*) dotyczącymi transportu materiałów niebezpiecznych wprowadzono ich klasyfikację. Materiały promieniotwórcze należą do klasy 7.

Metody transportowania materiałów promieniotwórczych zostały szczegółowo opisane w uzgodnionych międzynarodowych zaleceniach (*IAEA – TECDOC – 1191 z 2000 r.*). Podstawą zaleceń jest klasyfikacja materiałów promieniotwórczych wynikająca z całkowitej aktywności materiału A wyrażonej w [Bq] i jego stężenia promieniotwórczego C wyrażonego w [kBq/kg].

Klasyfikacja pozwala wydzielić grupę materiałów promieniotwórczych stanowiących **materiały jądrowe** objęte szczególną kontrolą międzynarodową, ponieważ mogą one być użyte do wytworzenia jądrowych środków wybuchowych. Są to materiały zawierające izotopy ^{239}Pu , ^{233}U , ^{235}U lub ich mieszaninę, jak i wszelkie materiały wyjściowe: uran naturalny, uran wypalony, tor w każdej postaci. Zalecenia uwzględniają zabezpieczenia materiału przed jego ukryciem z zamiarem wykorzystania go do celów militarnych lub terrorystycznych.

W 1959 r. powstała w ramach ONZ Międzynarodowa Organizacja Morska – IMO opracowująca zalecenia bezpieczeństwa na morzu i dotyczące zapobieganiu jego zanieczyszczeniu. W roku 1965 przedstawiła zalecenia morskiego transportu towarów niebezpiecznych Międzynarodowy Morski Kodeks Towarów Niebezpiecznych (*International Maritime Dangerous Goods Code – IMDG*) określający zasady przewozu, pakowania, sztautowania pojemników zawierających materiały niebezpieczne. W roku 1993 Kodeks uzupełniono zaleceniami dotyczącymi przewozu materiałów promieniotwórczych zgodnie z zaleceniami MAEA z uwzględnieniem warunków bezpieczeństwa ludzi i środowiska,

również w przypadku awarii. Kodeks wprowadził zalecenia dotyczące projektowania statków przewożących materiały promieniotwórcze i odniósł się między innymi do odporności konstrukcyjnej statków, ich stabilności i ochrony przeciwpożarowej. Międzynarodowy kodeks bezpiecznego przewozu pakowanych napromieniowanych paliw jądrowych, plutonu i wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych na pokładzie statków (kod *INF International code for the safe carriage of package irradiated nuclear fuel, plutonium and high level radioactive wastes on board ship*) wszedł w życie w 2001 r. Kodeks IMDG jest uzupełnieniem konwencji o bezpieczeństwie życia na morzu (*International Convention for the Safety of Life at Sea – SOLAS*) obowiązującej od 1974 r. i konwencji zapobieganiu zanieczyszczeniu morza (*International Convention for Prevention of Marine Pollution from Ships – MARPOL*) z 1978 r.

Kod INF określa klasy statków zgodnie z zaleceniami MAEA określającymi klasyfikację materiałów promieniotwórczych wynikającą z całkowitej aktywności materiału.

Statki klasy IFN 1 mogą przewozić materiały promieniotwórcze o całkowitej aktywności mniejszej od 4000 TBq.

Statki klasy IFN 2 mogą przewozić wypalone paliwo jądrowe lub wysokoaktywne odpady promieniotwórcze o całkowitej aktywności mniejszej od $2 \cdot 10^6$ TBq oraz pluton o całkowitej aktywności mniejszej od $2 \cdot 10^5$ TBq.

Statki klasy IFN 3 mogą przewozić wypalone paliwo jądrowe lub wysokoaktywne odpady promieniotwórcze oraz pluton bez ograniczeń całkowitej aktywności.

Podstawowe wymagania bezpieczeństwa transportu materiałów jądrowych

Międzynarodowe zalecenia związane z transportem materiałów promieniotwórczych określają zasady bezpieczeństwa. Podstawowym warunkiem bezpieczeństwa jest fizyczne odseparowanie materiału promieniotwórczego od środowiska poprzez zastosowanie odpowiedniego pojemnika transportowego, którego konstrukcja powinna być dostosowana do całkowitej aktywności materiału i jego stężenia promieniotwórczego.

W każdym typie stosowane są różne rozwiązania techniczne dostosowane do rodzaju transportowanego materiału. Wspólną cechą wszystkich rodzajów pojemników jest wymóg niskiego poziomu promieniowania na zewnętrznej powierzchni pojemnika. Wymagania te ustalają władze krajowe. W Stanach Zjednoczonych organizowanych jest rocznie około 40 transportów **materiałów jądrowych**, czasem na znaczne odległości. Według obowiązujących tam przepisów (10 CFR71,47,b) poziom promieniowania w dowolnym punkcie powierzchni pojemnika powinien być 0,01Sv/h, a w dowolnym punkcie powierzchni transportera (pojazdu)

musi być 0,002 Sv/h. Poziom promieniowania w odległości 2 m od powierzchni bocznych transportera musi być 0,0001 Sv/h. Kolejnym, niezwykle ważnym wymaganiem, które muszą spełniać pojemniki transportowe materiałów jądrowych, jest eliminacja możliwości powstania samorzutnej reakcji łańcuchowej, przy której powstaniu mogłoby dojść do wybuchu. Transportowane wypalone paliwo musi być utrzymywane w stanie podkrytycznym. Warunkiem utrzymania tego stanu jest wychwytywanie tzw. neutronów termicznych.

Paliwo pracujące w reaktorze ulega bardzo znacznemu rozgrzaniu. Wysoką temperaturę może ono utrzymywać przez długi okres; określa się, że nawet po upływie 10 lat 1 tona wypalonego paliwa nadal wydziela około 1 kW ciepła. Dlatego też konstrukcja pojemników transportowych powinna uniemożliwiać przegrzanie ich elementów i paliwa, by nie uległy one destrukcji powodując awarię.

Wybór rodzaju transportu

W transporcie morskim materiałów promieniotwórczych należy uwzględnić indywidualne przepisy i wymagania krajowe w portach tranzytowych i docelowych. Należą do nich zezwolenia na tranzyt, przeładunek materiałów promieniotwórczych, ubezpieczenia ładunku i potwierdzenie ważności atestów pojemników transportowych. Oprócz tego transport i wszelkie związane z nim działania muszą być dostosowane do lokalnych wymagań ustalanych przez władze lokalne, a w morskim transporcie – portowe, ponieważ ważna jest również infrastruktura portu: nadbrzeża, dźwigi, magazyny do czasowego składowania, ograniczenia wejścia do portu ze względu na pływy, lód itd.

Rodzaje materiałów promieniotwórczych

Materiałami promieniotwórczymi, najczęściej przewożonymi po regularnych trasach śródlądowych i morskich, są półprodukty używane w przemyśle jądrowym, w tym około 30% jest związane z energetyką jądrową, a 70% z innymi gałęziami przemysłu i medycyny. W większości są to produkty masowe w stanie stałym (U_3O_8 proszek "yellow cake", UF_6 z uranem wzbogaconym lub naturalnym, UO_2 w postaci proszku lub pastylek (*Pastyłka materiału paliwowego w postaci spieku ceramicznego, uzyskanego z proszku dwutlenku uranu (UO_2) lub mieszaniny dwutlenków uranu i plutonu (UO_2+PuO_2 paliwo MOX)*). Przewożone jest również świeże i wypalone paliwo. Stałe trasy przewozu to Australia – Stany Zjednoczone, Stany Zjednoczone – Europa. Europa – Stany Zjednoczone, Afryka – Europa. Ożywiona wymiana handlowa prowadzona jest również przez Chiny i Japonię.

Pojemniki transportowe

Materiały promieniotwórcze zgodnie z zaleceniami międzynarodowymi muszą być przewożone w specjalnie opracowanych do tego celu pojemnikach.

Do transportu wykorzystywane są dwa podstawowe rodzaje pojemników transportowych, przeznaczonych:

- do różnych materiałów promieniotwórczych o małych aktywnościach,
- do transportu rozszczepialnych materiałów jądrowych.

Wspólną cechą wszystkich rodzajów pojemników jest wymóg niskiego poziomu promieniowania na zewnętrznej powierzchni pojemnika. Wymagania te ustala władze krajowe.

Jak już wspomniano, materiały promieniotwórcze są klasyfikowane zależnie od poziomu całkowitej aktywności materiału i stężenia promieniotwórczego. Do transportu materiałów promieniotwórczych wykorzystywanych jest 5 klas pojemników:

- opakowania wyłączone (*excepted packages – EXC*),
- opakowania przemysłowe (*industrial packages – IP*) (IP-1, IP-2, IP-3),
- pojemniki Typu A,
- pojemniki Typu B (BM, BU),
- pojemniki Typu C.

Pojemniki do transportu materiałów promieniotwórczych

Opakowania wyłączone (*excepted packages – EXC*), są przeznaczone do transportu materiałów promieniotwórczych niebędących materiałami jądrowymi. Materiałami jądrowymi nazywane są materiały, które mogą być użyte do budowy jądrowych środków wybuchowych. Wydzielone są dwie grupy: materiały o niskiej aktywności (*Low Specific Activity – LSA*) i przedmioty skażone powierzchniowo (*Surface Contaminated Objects – SCO*). Przy małej ilości transportowanych materiałów nie są wymagane żadne specjalne zabezpieczenia.

Opakowania przemysłowe (*industrial packages – IP*) (IP-1, IP-2, IP-3), są przeznaczone do transportu materiałów o niskiej aktywności LSA i przedmiotów zanieczyszczonych powierzchniowo SCO. Materiały LSA mają niski poziom aktywności całkowitej i małe stężenie promieniotwórcze. Różnice pomiędzy typami tych pojemników polegają głównie na dodatkowych wymaganiach dotyczących ciśnienia i temperatury oraz wymaganiach wytrzymałościowych i ewentualnego wykorzystania w transporcie lotniczym.

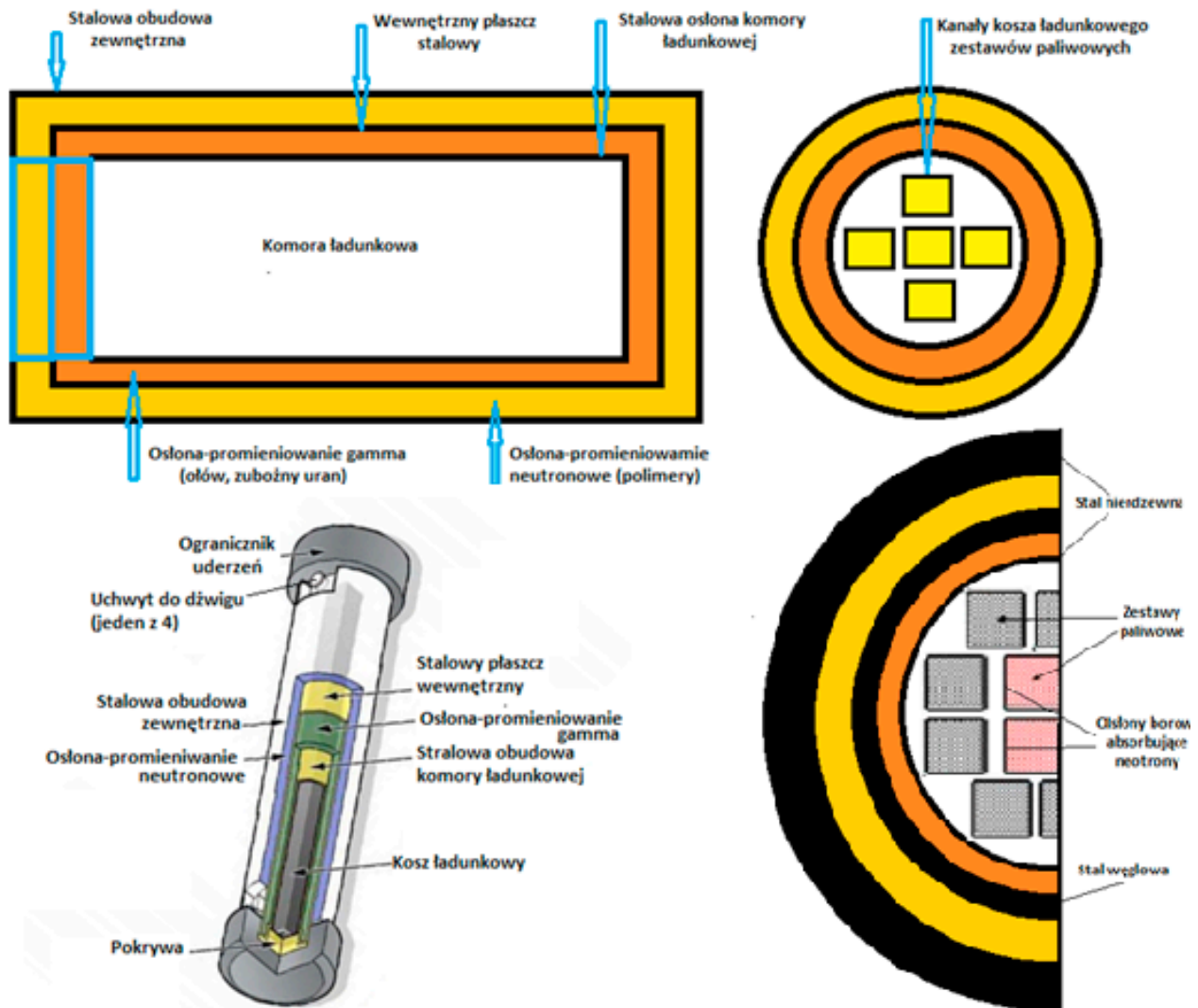
Pojemniki do transportu materiałów jądrowych

Konstrukcja pojemników do transportu **materiałów** jądrowych jest dostosowywana do rodzaju

przewożonego materiału z uwzględnieniem jego aktywności promieniotwórczej, składu izotopowego, postaci fizycznej (ciekłej, gazowej lub stałej). Odmiennie wymagania dotyczące transportu materiałów jądrowych, w zakładach cyklu paliwowego, spowodowały konieczność opracowania specjalizowanych pojemników transportowych dostosowanych do aktualnych potrzeb etapu procesu technologicznego. Podstawowe wymagania dotyczące konstrukcji pojemników ograniczają się do zaleceń zachowania ochrony przed promieniowaniem, bezpieczeństwa jądrowego (np. zabezpieczenia przed samorzutną reakcją łańcuchową, niekontrolowanym wzrostem ciśnienia i temperatury) i bardzo ostrych wymagań wytrzymałościowych. O pozostałych parametrach, takich jak np. wymiary, waga, rodzaj używanych materiałów do budowy pojemnika, osłon w oparciu o dane wynikające z przeznaczenia pojemnika, sposobu jego transportowania decyduje konstruktor.

Najczęściej pojemniki (A, B, C) wykorzystywane są do transportu wypalonego paliwa. Ich zewnętrzne wymiary zależą od przewidywanej ilości transportowanych zestawów (od 1 do 48) i ich długości. Zwykle długość zestawu paliwowego nie przekracza 5 m, a jego waga wynosi około 0,5 t. Przekrój poprzeczny zestawu jest kwadratem, którego rozmiar zależy od ilości prętów paliwowych tworzących zestaw (15x15, 16x16, 17x17 reaktor PWR, 7x7, 8x8, 9x9, 10x10 reaktor BWR). Wymiar przekroju zestawu paliwowego (od około 8 do 20 cm) decyduje o wykorzystaniu wewnętrznej objętości transportowej pojemnika. Wypalone paliwo jest unieruchomione w kanałach w koszu – sztywnej konstrukcji kratowej zbliżonej do stojaków, w których przechowywane jest paliwo w przechowalniku mokrym – basenie. Konstrukcja kosza musi tworzyć z paliwem zwartą całość, musi zapewniać eliminację rezonansów mechanicznych, naprężeń mogących spowodować rozszczelnienie prętów paliwowych w zestawie. Objętość transportowa otoczona jest osłonami tłumiącymi promieniowanie. Szerokość wszystkich osłon może osiągać 25 cm. Pojemniki transportowe dla paliwa do reaktorów PWR i BWR mają postać walca o średnicy zewnętrznej nieprzekraczającej około 3 m, zależnej od pojemności pojemnika – ilości transportowanych zestawów. Waga dużego, pustego pojemnika, może wynosić około 124 t, a załadowanego może osiągnąć około 160 t. Pojemniki przeznaczone dla reaktorów CANDU ze względu na odmienną konstrukcję paliwa (są to walce o długości około 60 cm) przypominają skrzynie.

Ważnym elementem konstrukcji pojemnika transportowego jest odprowadzanie ciepła. Stosowane są różne rozwiązania. Jednym z nich jest umieszczenie na powierzchni zewnętrznej systemu żeberk tworzących radiator, inna metoda polega na specjalnej konstrukcji osłony neutronowej.



Rys. 1. Podstawowa konstrukcja pojemnika transportowego (K. Rzymkowski, ERI 2030-1101 NRC 2010)
 Fig. 1. Basic structure of a transport container transportowego (K. Rzymkowski, ERI 2030-1101 NRC 2010)

Pojemniki Typu A mają zapewnić bezpieczny i ekonomiczny transport niewielkich ilości materiałów jądrowych w postaci ciekłej, gazowej lub stałej, np. wykorzystywanych w medycynie. Powinny one zachować swoją integralność oraz stały poziom promieniowania na powierzchni zewnętrznej nawet w chwili przypadkowego upadku, posiadać odporność na warunki pogodowe, wytrzymałość na obciążenie spowodowane pięciokrotnym załadunkiem pojemników, itp. Pojemniki mogą być plombowane.

Pojemniki Typu B są przeznaczone do transportu dużych ilości wysokoaktywnych materiałów jądrowych np. wypalonego paliwa, toksycznego i aktywnego chemicznie sześćfluorku uranu UF_6 . Pojemniki muszą wytrzymać wszystkie normalne warunki transportu, tak jak pojemniki typu A. Duża ilość materiałów jądrowych wymaga zwiększenia odporności przed promieniowaniem. Pojemnik musi wytrzymać niespodziewane, cięż-

kie warunki wypadkowe, bez naruszenia jego integralności. Pojemniki typu B (U) są zaprojektowane tak, by ciepło wypromieniowywane przez materiały jądrowe nie wpływało niekorzystnie na opakowanie. Dodatkowym wymogiem jest podwyższona szczelność, tak by powstające lotne substancje promieniotwórcze nie były w niekontrolowany sposób uwalniane do atmosfery. Pojemniki Typu B (M) muszą spełniać dodatkowe, znacznie podwyższone wymagania, dotyczące zabezpieczenia przed wzrostem poziomu promieniowania na zewnątrz pojemnika, zarówno w czasie normalnych warunków transportu, jak i po wypadku. Pojemniki są przeznaczone do transportu naziemnego (drogowego lub kolejowego) i morskiego wypalonego paliwa, w pewnych warunkach mogą one być wykorzystywane w transporcie lotniczym.

Pojemniki Typu C zostały zaprojektowane z myślą o transporcie dużych ilości materiałów jądrowych sa-

molotami. Mimo, że wypadki lotnicze nie zdarzają się często to ich skutki mogą być bardzo poważne. Wymagania bezpieczeństwa dla pojemników typu C znacznie przewyższają wymagania obowiązujące dla pojemników typu B, szczególnie w odniesieniu do uderzeń.

Pojemniki do transportu morskiego

Linie żeglugowe zgodnie z przepisami transportowymi wykorzystują opakowania transportu intermodalnego, w którym używana jest tylko jedna jednostka ładunkowa, np. kontener, na całej trasie przewozu towaru, bez jego przeładunku przy zmianie rodzaju transportu. Materiał promieniotwórczy umieszczony w znormalizowanych opakowaniach bezpieczeństwa zostaje załadowany do odpowiedniego kontenera, w którym dociera do odbiorcy w zakładzie docelowym. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość zawarcia jednej umowy na przewóz z jednym wykonawcą odpowiedzialnym za dostawę towaru. Zmniejsza się również ryzyko uszkodzenia towaru. W zależności od rodzaju opakowania materiałów promieniotwórczych wykorzystywane są różne kontenery (zgodne z normami ISO) i najczęściej są to kontenery:

- do przewozu lub do przewozu i przechowywania towarów suchych;
- płaskie, przystosowane do przewozu i przechowywania ciężkich ładunków o nietypowych rozmiarach, są one przystosowane do układania jeden na drugim;
- platformowe, nadające się do ponadgabarytowych, ciężkich i nietypowych ładunków. Kontenery platformowe można połączyć ze sobą, tworząc większą platformę dla ładunków ponadgabarytowych i ciężkich, które przekraczają standardowe specyfikacje kontenerów platformowych;
- otwarte, z otwieraną ścianą górną i otwieranymi ścianami bocznymi ułatwiającymi załadunek;
- zbiornikowe, przystosowane do przewozu materiałów płynnych lub sypkich.

Badania pojemników

Badania wytrzymałościowe są przeprowadzane w celu sprawdzenia zakładanej wytrzymałości pojemników transportowych w normalnych warunkach transportu oraz w trudnych niespodziewanych sytuacjach awaryjnych. Badania są przeprowadzane według międzynarodowych standardów, zgodnych z zaleceniami MAEA opracowanymi w 1996 r. Badania mają symulować spodziewane warunki pogodowe i transportowe, nieumiejętne obchodzenie się z ładunkiem i wynikające z tego powodu drobne wypadki. Ze względu na ogromną wagę pojemników do badań wytrzymałościowych mogą być wykorzystywane modele.

Badania pojemników sprawdzające ich wytrzymałość w przewidywanych bezawaryjnych warunkach transportu jak i niemożliwych do przewidzenia sytuacjach awaryjnych sprawia, że muszą one potwierdzić odporność konstrukcji pojemnika w każdych warunkach. Podstawowe testy mają skontrolować odporność pojemników na zraszanie wodą (natrysk), wytrzymałość na wstrząsy, udary, wysoką temperaturę, przy zachowaniu integralności transportowanego materiału i szczelności pojemnika oraz zachowaniu bezpiecznego poziomu promieniowania na jego powierzchni.

W czasie transportu mogą padać ulewne deszcze. **Test natryskowy** prowadzony jest w warunkach odpowiadających szybkości opadu 5 cm/h, przy równomiernym natrysku na pojemnik przez godzinę. Są to bardzo trudne warunki ponieważ w meteorologii za bardzo ulewny deszcz uważany jest opad o szybkości 0,75 cm/h. Możliwe są warianty testu symulujące różne opady zanieczyszczone drobinami pochodzącymi z emisji przemysłowych.

Test wytrzymałości na wstrząsy polega na swobodnym upadku pojemnika z wysokości 9 m lub upadku na pojemnik masy 0,5 t również z wysokości 9 m. Swobodny upadek odpowiada uderzeniu z prędkością 50 km/h. Z doświadczeń wynika, że pojemniki są w stanie wytrzymać uderzenie z szybkością 110 km. **Test udarowy** sprawdza odporność pojemnika na przebi-



Płaski (icon-containe.de)



Zbiornikowy (Hi-Marine)



Otwarty (Containertech.com)

Rys. 2. Przykłady konstrukcji kontenerów wykorzystywanych w transporcie materiałów promieniotwórczych (K. Rzymkowski)
Fig. 2. Examples of containers used for transport of radioactive materials (K. Rzymkowski)

cie i uszkodzenie jego powierzchni i polega na swobodnym upadku pręta hartowanego o średnicy 3,2 cm z półkolistym zakończeniem i masie 6 kg z wysokości 1,3 m. Testy te powinny być przeprowadzane po dokonaniu testu natryskowego. Możliwe są różne warianty łączenia testów np. natryskowych i udarowych, wszystkich jednocześnie i w różnych kombinacjach ułożenia badanego obiektu (leżący na różnych podłożach, postawiony pionowo itp.).

Badanie termiczne jest przeprowadzane w równowadze termicznej uwzględniającej temperaturę otoczenia, nasłonecznienie i temperaturę wewnętrzną wytworzoną przez ciepło paliwa jądrowego. Podczas trwania testu wielkości te ulegają zmianie, a do oceny odporności wymagana jest znaczna ilość i jakość zmian. W czasie testu pojemnik powinien znajdować się w strumieniu węglowodorowego ognia paliwowo-powietrznego w ustabilizowanych warunkach przez 30 min w temperaturze 800 °C. Badany pojemnik nie może być w czasie trwania testu i po jego zakończeniu sztucznie chłodzony, a wszelkie spalanie materiałów powinno zachodzić naturalnie.

Test szczelności pojemnika w standardowym badaniu szczelności polega na zanurzeniu go w basenie na głębokości 15 m na okres 8 godzin. Odpowiada to ciśnieniu około 150 kPa. W rozszerzonym badaniu szczególnie pojemników B (U) i B(M) (transport wypalnego paliwa) zanurzenie powinno wynosić 200 m przez 1 godzinę. Ciśnienie około 2 MPa. Badanie należy wykonywać po przeprowadzeniu testu wstrząsu lub testu udarowego oraz badań termicznych.

Pojemniki typu C przystosowywane do transportu lotniczego powinny spełniać warunki wymagane dla pojemników typu B. Istotna różnica dotyczy testu udarowego. Pręt testowy o większej średnicy i zakończeniu stożkowym powinien spadać z wysokości 3 m. Testy powinny być przeprowadzane przy użyciu tego samego pojemnika w każdym etapie badań. Innym dodatkowym wymaganiem jest test wstrząsowy, w którym testowany pojemnik powinien wytrzymać uderzenie w twarde podłoże z prędkością 324 km/h. Prędkość została ustalona na podstawie danych o wypadkach statków powietrznych zebranych przez Lawrence *Livermore National Laboratory* w Stanach Zjednoczonych.

Jednym z bardzo istotnych zagrożeń, przewidywanych przy transporcie materiałów jądrowych, jest możliwość powstania samoistnej reakcji łańcuchowej. Warunkiem niedopuszczenia do tej reakcji jest utrzymanie w pojemniku transportowym stanu podkrytycznego. Prawdopodobieństwo rozszczepienia wzrasta wraz z ilością materiału rozszczepialnego, dlatego zwraca się dużą uwagę na stopień wypalenia paliwa i takie jego rozmieszczenie by nie utworzył się „rdzeń mikro reaktora” z niedopalonego paliwa otoczonego bardziej wypalonym paliwem tworzącym rodzaj reflek-

tora dla neutronów. Kosz, w którym umieszczone jest paliwo może posiadać osłony absorbujące neutronu (zawierające np. bor, kadm, gadolin, ind). Reakcja łańcuchowa wywołwana jest głównie przez spowolnione neutrony i w pojemnikach transportowych unika się materiałów moderujących w przestrzeni pomiędzy zestawami paliwowymi. Wyjątkowo przy transporcie bardzo wypalnego paliwa, którego załadowanie odbywa się pod wodą w basenie woda może nie być usuwana. Woda basenowa zawiera związki boru absorbujące neutrony stanowi dodatkową osłonę biologiczną. Innym ważnym elementem mającym pośredni wpływ na możliwość powstania niekontrolowanej reakcji jest temperatura wewnątrz pojemnika, którego chłodzenie powinno być takie by temperatura na jego powierzchni nie przekraczała 80 °C.

Sposoby morskiego transportu materiałów promieniotwórczych

Materiały promieniotwórcze są pakowane do pojemników nie tylko zapewniających bezpieczeństwo przez odseparowanie materiału od środowiska, ale również odpowiednio dostosowanych do rodzaju materiału, jego stanu fizycznego, wymiarów, konstrukcji itp. Dla tych pojemników dopasowywane są najodpowiedniejsze kontenery. Przewożony drogą morską materiał promieniotwórczy w postaci proszku „yellow cake”, będący mieszaniną tlenków uranu jest zwykle pakowany w bębnyki o standardowych wymiarach (IP1) ładowanych i unieruchamianych w zwykłych kontenerach lub z otwieranymi ścianami. Jedna przesyłka może składać się z kilkunastu kontenerów. Innym półproduktem używanym do produkcji paliwa jądrowego jest UF_6 , który w postaci krystalicznej jest pakowany w pojemnikach przemysłowych IP 1 i IP2 wykonywanych w formie walca. UF_6 jest przesyłany w różnych wariantach, jako UF_6 naturalny przed procesem wzbogacania (IP2) oraz UF_6 wzbogacony (IP1). Ponieważ wielokontenerowy transport tych materiałów może odbywać się wraz z innymi towarami, zaleca się by w obu przypadkach poziom promieniowania w odległości 1m od pojemnika nie przekraczał 10 $\mu Sv/h$. UF_6 wzbogacony przewożony jest w pojemnikach typu A. Podobne zalecenia dotyczą materiałów do produkcji paliwa UO_2 w postaci proszku lub pastylek. Świeże paliwo przewożone jest pojemnikami typu B. Wypalone paliwo przewożone jest pojemnikami typu B lub C na statku IFN2 lub IFN3. Inne materiały promieniotwórcze pochodzące z ośrodków badawczych ze względu na zawartość Pu lub związków uranu przewożone są w pojemnikach typu A. Paliwo typu MOX (*Mixed Oxide – mieszanina tlenków uranu*) transportowano w pojemnikach typu B. Pojemniki typu IP2 (beczki) są często wykorzystywane do transportu materiałów napromieniowanych, np. płynów technicznych, zużytych olejów itp. Pojemniki typu A i B mogą

być transportowane w różnych kontenerach zbiornikowych, platformach. Walcowe pojemniki IP są transportowane w kontenerach płaskich lub zbiornikowych.

W pewnych warunkach, gdy port nie ma możliwości do załadunku kontenerowego lub nie wpływają do niego statki przewożące kontenery, wygodniej jest zrezygnować z transportu kontenerowego, mimo że zapewnia on większe bezpieczeństwo towaru. Załadunek typu "Break Bulk" polega na załadunku na statek towaru „luzem”, w przypadku materiałów promieniotwórczych tylko w pojemnikach transportowych odpowiedniego typu. Zaletą takiego rozwiązania jest to, że można transportować duże ilości materiałów promieniotwórczych stosując indywidualnie opracowaną logistykę. Wiąże się to jednak z większym ryzykiem potencjalnego uszkodzenia towaru podczas przeładunku i transferów w drodze z zakładu nadawcy do miejsca docelowego.

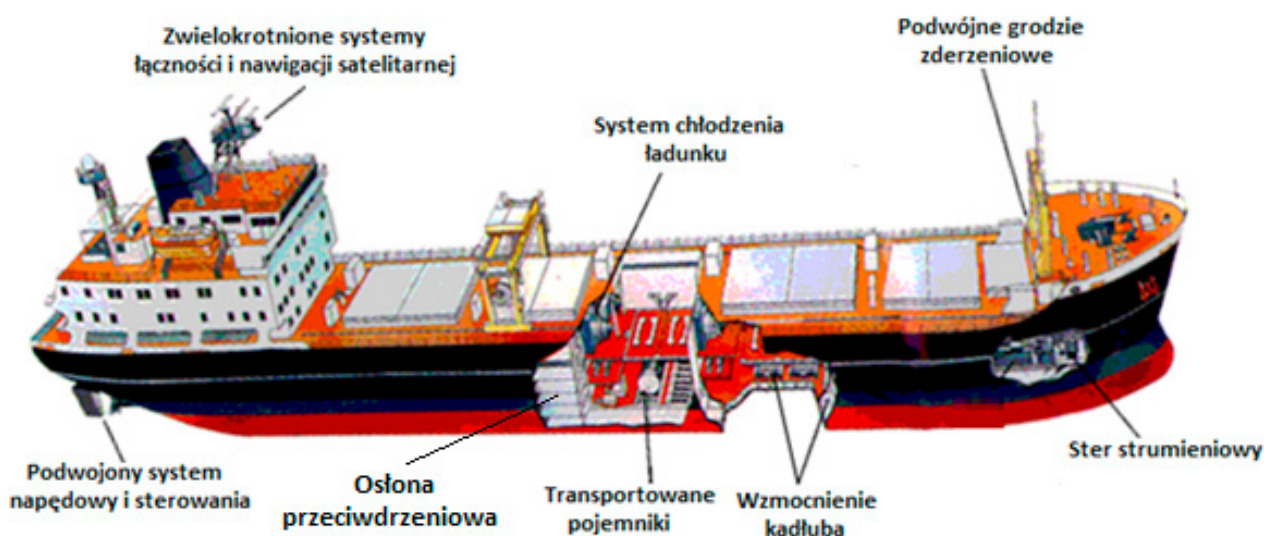
Innym rodzajem transportu używanym raczej na krótkich trasach morskich (wyjątkowo oceanicznych) jest transport materiałów promieniotwórczych typu Ro/Ro (*roll on/roll off*) polegający na tym, że pojazd wraz ze swoim ładunkiem wjeżdża na statek i wyjeżdża w porcie docelowym. Ten rodzaj transportu jest często stosowany między Wielką Brytanią i Europą.

Konieczność międzykontynentalnego bezpiecznego transportu materiałów promieniotwórczych, szczególnie wysokoaktywnych materiałów jądrowych, spowodowała budowę kilkunastu przeznaczonych do tego celu statków. Są one zaprojektowane tak, by wytrzymały kolizję boczną z dużym tankowcem. W przypadku zatonięcia statku pojemniki z materiałem jądrowym są w stanie leżeć na dnie nawet kilkanaście lat, a ich odszukanie jest ułatwione, ponieważ nowoczesne pojemniki są wyposażone w sygnalizatory umożliwiające lokaliza-

cję. Są to statki spełniające warunki klasy IFN3 do przewozu każdego rodzaju materiałów jądrowych szczególnie wzbogaconego uranu, plutonu, paliwa MOX i paliwa wypalonego. Na rys. 2 przedstawiono wspólną konstrukcję statków przystosowanych do przewozu wysokoaktywnych materiałów jądrowych. Statki posiadają wzmocnioną konstrukcję kadłuba, osłony tłumiące energię uderzenia, separację wszystkich dublowanych systemów sterowania, napędu, nawigacji, kontroli. Na statku zastosowano systemy ochrony radiologicznej: kontroli poziomu promieniowania, osłony pomieszczeń ładunkowych, oddalenie pomieszczeń załogi maszynowni i nawigacji od ładunku. Pozycja statku jest obserwowana przez systemy satelitarne.

W celu zmniejszenia ryzyka ewentualnego napadu terrorystycznego bardzo ważnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa transportu materiałów jądrowych jest utajnienie informacji dotyczących rodzaju materiału jądrowego, jego ilości, postaci, organizacji systemu ochrony fizycznej transportu (plany, szkice, konstrukcje dodatkowych zabezpieczeń), trasy i terminów transportu, czy planów awaryjnych.

W Japonii większość importowanych materiałów jądrowych wykorzystywanych w energetyce jądrowej jest przewożona z zagranicy statkami drobnicowymi. Wypalone paliwo z elektrowni jest transportowane drogą morską do zakładów przerobu paliwa jądrowego w Tokaimura w Japonii oraz do zakładów przerobu w Wielkiej Brytanii i Francji. Od roku 1998 rozpoczęto morski transport niskoaktywnych odpadów promieniotwórczych (*Low Level Waste – LLW*) do składowiska dla tego typu odpadów w Rokkasho-mura, gdzie rozpoczęto również budowę nowych zakładów przerobu paliwa (Nuclear Fuel Ltd. JNFL). W Japonii używano do przewozu wypalonego paliwa cztery podobne statki:



Rys. 3. Statek przystosowany do transportu materiałów jądrowych (wg. www.aec.gov K. Rzymkowski)
Fig. 3. Ship adapted for the transport of nuclear materials (according to www.aec.gov K. Rzymkowski)

- **Hinoura Maru** zbudowany w 1974 r., o długości 78 m, mógł przewozić 2 pojemniki: HZ-75 i 1 pojemnik NH-25 przeznaczone do użytkowania w kraju dla paliwa z PWR i BWR o wypaleniu 19,7 GWd/MTU¹.
- **Pacific Swan** zbudowany w 1978 r., o długości 106 m, mógł przewozić 8 pojemników TN-12A do użytku międzynarodowego, paliwa o wypaleniu 15 GWd/MTU. Statek uległ zniszczeniu w 2005 r.
- **Rokuei Maru** zbudowany w 1996 r., o długości 100 m, może przewozić 6 pojemników NFT-14P. Są to największe pojemniki o ładowności 14 zestawów paliwowych PWR, o wypaleniu 40 GWd/MTU.
- **Sejei Maru** zbudowany w 2019 r., o długości 100 m, może przewozić 336 pojemników LLW.

Ochrona fizyczna materiałów jądrowych

Konwencja o fizycznej ochronie materiałów jądrowych (*Convention on the Physical Protection of Nuclear Material – CPPNM*), której depozytariuszem jest MAEA w dokumencie INFCIRC/255/Rew.4 (1999) zobowiązuje państwa do współpracy, wzajemnych konsultacji, wymiany informacji o sposobach ochrony fizycznej, stosowanych technikach oraz o sposobach odzyskiwania utraconego materiału jądrowego.

System ochrony fizycznej powinien uniemożliwiać kradzież lub inne sposoby nielegalnego pozyskiwania materiałów jądrowych, szybkie wykrycie i lokalizację skradzionych materiałów, zapobiegać działaniom sabotażowym oraz szybko likwidować lub minimalizować powstałe zagrożenia radiologiczne.

Każde państwo powinno zagwarantować ochronę materiałów jądrowych znajdujących się i używanych na jego terytorium także podczas krajowego i międzynarodowego ich transportu lądowego lub na pokładzie statku lub samolotu podlegającemu jego jurysdykcji. System ochrony materiałów jądrowych jest połączeniem elementów administracyjnych, technicznych i różnego rodzaju zapór fizycznych. Kradzież materiałów jądrowych podlega odpowiednim karom, które uwzględniają stopień spowodowanego zagrożenia.

Systemy ochrony materiałów jądrowych są opracowywane indywidualnie dla każdego obiektu i sposobu transportu. Za ich opracowanie, wprowadzenie i poprawne funkcjonowanie odpowiedzialne są władze państwowe w ramach swojego prawa krajowego zgodnego z prawem międzynarodowym. W każdym państwie mogą obowiązywać różne rozwiązania techniczne, prawne, organizacyjne, ale pomiędzy państwami powinna być wzajemna wszechstronna współpraca. Powoduje to konieczność umiędzynarodowienia problemu ochrony materiałów jądrowych, co jest szczególnie wyraźnie widoczne w sytuacji, gdy efektywność

systemu ochrony w jednym państwie jest uzależniona od działań innego państwa, np. w sytuacji konieczności transportu materiałów jądrowych przez wspólną granicę lub przy transporcie tranzytowym.

Państwo powinno powołać organ posiadający odpowiednie uprawnienia, środki finansowe i specjalistów, odpowiedzialnych za wdrażanie postanowień konwencji o ochronie fizycznej materiałów jądrowych. Funkcje powołanego organu w zakresie bezpieczeństwa transportu powinny obejmować:

- udzielanie licencji do międzynarodowego przewozu materiałów kategorii klasy 7,
- przeprowadzanie kontroli zgodności transportu materiału jądrowego z obowiązującymi przepisami,
- określenie zasad ochrony fizycznej transportu z uwzględnieniem różnych scenariuszy zagrożeń (*design basis threat-DBT*),
- przygotowanie planów bezpieczeństwa transportu (*transport security plans – TSPs*),
- aktualizowanie przepisów ochrony fizycznej w transporcie,
- testowanie systemów ochrony fizycznej, przeprowadzanie szkoleń, sprawdzanie gotowości służb pomocniczych i organów współpracujących,
- zapewnienie poufności wrażliwych informacji o transporcie,
- dobór zaufanego personelu powiązanego z transportem i jego przygotowaniem,
- ustanowienie zasad egzekwowania wydanych rozporządzeń.

Dla celów ochrony fizycznej materiałów jądrowych wprowadzono ich kategoryzację, różnicując poziom zabezpieczeń. Kategoryzacja wynika z potencjalnej atrakcyjności używanych materiałów dla celów terrorystycznych. Różne kategorie materiałów są przechowywane w obszarach wymagających różnych stopni ochrony i nie ma potrzeby stosowania wszędzie jednakowych standardów. Dostęp do obszarów chronionych jest ograniczony tylko dla wybranego i sprawdzonego personelu. Systemy ochrony posiadają również mechanizmy uwzględniające ochronę materiału jądrowego w przypadku sytuacji awaryjnych. Kategoryzacja materiałów jądrowych obowiązuje również w transporcie. Materiały jądrowe kategorii I powinny być chronione przy użyciu najbardziej rygorystycznych poziomów ochrony fizycznej (w skrajnych przypadkach nawet z ochrony wojskowej), podczas gdy materiały niższych kategorii nie wymagają tak silnych zabezpieczeń.

Istotnym problemem jest konieczność ustalenia wspólnej (wypadkowej) kategorii w przypadku przewozu w jednym transporcie różnych materiałów jądrowych o różnym wzbogaceniu materiałów rozszczepialnych. Jest to potrzebne do określenia odpowiednich środków ochrony fizycznej. Opracowano kilka sposo-

¹ Wypalenie wyraża się w gigawatodniach na tonę metryczną uranu (GWd/MTU) (gigawatt-days per metric ton of uranium – GWd/MTU).

bów wyznaczania kategorii transportowej. W przypadku, gdy postać mieszaniny materiałów nie nadaje się do jakichkolwiek zastosowań dla celów terrorystycznych można nie przeprowadzać takich obliczeń. Podstawą kategoryzacji transportowej jest kategoryzacja materiałów jądrowych opracowana na potrzeby ich ochrony fizycznej w obiektach jądrowych. Wybór metody klasyfikacji dokonuje organ państwowy odpowiedzialny za bezpieczeństwo jądrowe.

Krzysztof Rzymkowski,
Stowarzyszenie Ekologów na
Rzecz Energii Nuklearnej,
Warszawa

Literatura:

- [1] Rzymkowski Krzysztof, *Transport materiałów jądrowych*, BJOR PAA Nr 1-2 (115) 2018 Warszawa ISSN53-9062
- [2] Rzymkowski Krzysztof, *Transport morski materiałów radioaktywnych*, BJOR PAA Nr 1 (119) ISSN 53-9062 Warszawa 2021.
- [3] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material
- [4] 1996 Edition (As Amended 2003. IAEA Vienna
- [5] Security of Nuclear Material in Transport Implementing Guide IAEA Nuclear Security Series No.. 26-G Vienna 2015
- [6] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material Specific Safety Requirements No. SS-R(Rev.1) Edition 2018 IAEA Vienna 2018
- [7] A Methodology for Establishing a National Strategy for Education and Training in Radiation Transport and Waste Safety, Safety reports Series No. 93 IAEA Vienna
- [8] Transport of Radioactive Materials World Nuclear Association Update 2017, www.world-nuclear.org/.../transport...materials/transport-of-radioactive
- [9] J.S Hughes, M.P. Harvey, *A Survey into the Radiological Impact of the Natural Transport of Radiological Material by Sea*, HPA-RPD-050 2009
- [10] Sigrid now on Swedish water, www.skd.com
- [11] Transport by Sea, www.skd.com
- [12] Stefan Hioeft, *Maritime Shipments of Radiological Materials*, World Nuclear transport Institute UK
- [13] F.Lange, J. Mairs, C.Niel, *Risk associated with the transport of radioactive materials in the fuel cycle*, XA 9746018, www.iaea.org/inis/collection/.../_Public/29/013/29013479.pdf
- [14] Spent Fuel Transportation Risk Assessment, Final Report U.S. NRC NUREG 2125
- [15] International Maritime Dangerous Goods Code, en.wikipedia.org
- [16] J. M. Van Dyke, *The legal regime Concerning Sea Transport of Ultra hazardous Radiated Material*, SEAPOL Conference Bangkok 2001