

LOS ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Dariusz Witold Kulczyński

W połowie XX wieku rozpoczął się dynamiczny rozwój techniki jądrowej; powstało wiele różnych typów reaktorów. Powszechnie uważa się, że lekkowodny reaktor ciśnieniowy PWR zawdzięcza swoją popularność admirałowi Hymanowi G. Rickoverowi. Rickover urodził się w Makowie Mazowieckim w 1900 r. W wieku sześciu lat wyjechał z rodzicami do Stanów Zjednoczonych, gdzie przez 62 lata służył w amerykańskich siłach zbrojnych i był niekwestionowanym ojcem amerykańskiej atomowej floty łodzi podwodnych. Do ich napędu wybrał właśnie reaktor PWR. W 1959 r. admirał Rickover odwiedził Polskę wraz z Richardem Nixonem, wówczas 36. wiceprezydentem Stanów Zjednoczonych. W reaktorach moderowanych i chłodzonych wodą z paliwa wyzyskuje się jednak nieco poniżej 1% (dokładnie 0,75%) osiągalnej energii. Natomiast przy zastosowaniu reaktora typu FNR (Fast Neutron Reactor) wykorzystującego prędkie neutrony (bez spowalniania ich do tzw. „energii termicznej”) z tej samej ilości paliwa jądrowego dałoby się teoretycznie uzyskać 134 razy więcej energii. Dodatkowo, można wybudować prędkie reaktor powielający FBR (Fast Breeder Reactor), który w czasie pracy wyprodukuje więcej paliwa rozszczepialnego niż sam zużyje. W latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych obawiano się, że złoża uranu będą się szybko wyczerpywać i pracowano nad metodą lepszego wykorzystania materiału rozszczepialnego. W szeregu krajów budowano prototypowe, a następnie komercyjne reaktory prędkie – powielające (FNR, FBR). W miarę jak odkrywano nowe złoża uranu zainteresowanie reaktorami prędkimi znacznie spadło, ponieważ koszty inwestycyjne były, co najmniej 25% wyższe niż reaktorów termicznych-lekkowodnych i wystąpiły problemy eksploatacyjne, wskutek czego współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej do produkcji elektryczności był niewysoki. W skali światowej doświadczenia z reaktorami prędkimi ocenia się jednak na 400 reaktorolat.

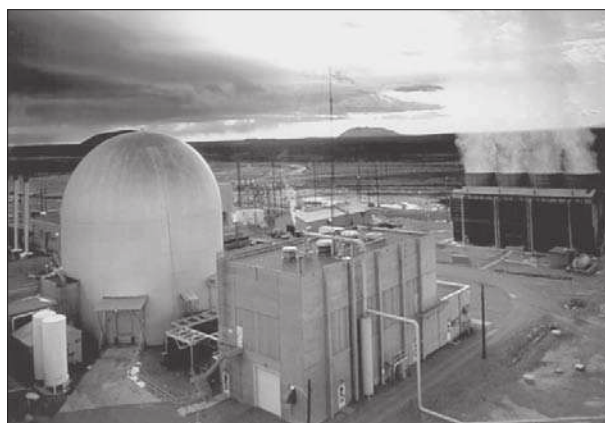
Do połowy lat 80. XX wieku nikt nie kwestionował, że przyszłość należy do energetyki jądrowej. Później jednak tani gaz ziemny, w tym coraz częściej wydobywany gaz łupkowy w połączeniu z katastrofami typu Three Mile Island, Czarnobyl

i wreszcie Fukushima Daiichi zmieniły odbiór społeczny i stosunek rządów do tej formy energetyki. Od początku lat dziewięćdziesiątych istnieją w Ameryce Północnej silne tendencje do stopniowego wycofywania się z energetyki jądrowej. Wskutek niskiego zapotrzebowania na energię elektryczną, spowodowanego kontynuującą się od 2008 r. minidepresją na kontynencie północno-amerykańskim, rząd kanadyjskiej prowincji Ontario wycofał budowę dwóch nowych bloków atomowych w elektrowni Darlington z planu perspektywicznego rozwoju energetyki do 2030 r. W USA od dziesięcioleci nie uruchomiono żadnego nowego reaktora.

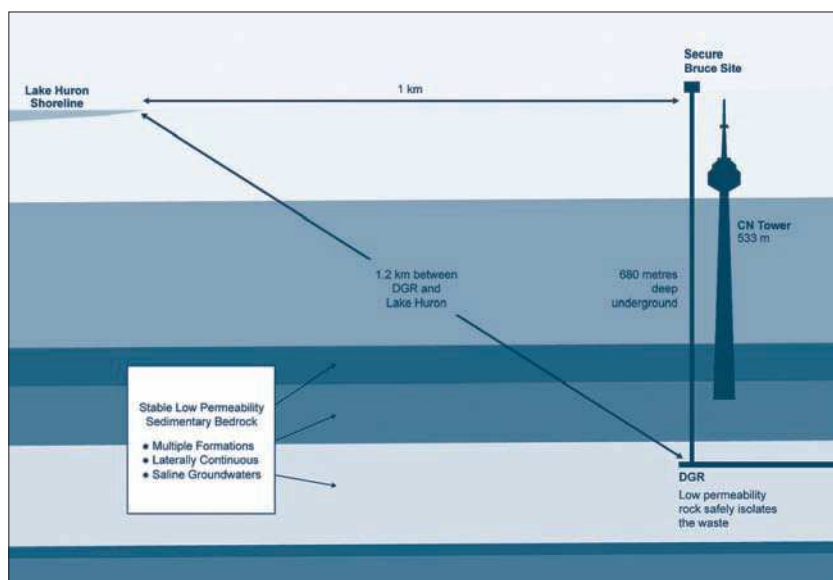
Natomiast już w latach dziewięćdziesiątych zaczęto w USA i w Kanadzie zastanawiać się nad permanentnym składowaniem zużytego paliwa, które ciągle wytwarza istniejąca „flotylla” reaktorów energetycznych. Trudno zaprzeczyć, że perspektywa przechowywania ton materiału, który pozostaje promieniotwórczy i wysoce toksyczny przez setki tysięcy lat jest poważnym problemem.

W zużytym paliwie jądrowym znajdują się produkty rozszczepienia uranu i plutonu, takie jak europ-155, cez-137, czy stront-90 o okresie połowicznego rozpadu od kilku do kilkudziesięciu lat. Istnieją wprawdzie produkty rozszczepienia o znacznie dłuższym okresie połowicznego rozpadu, ale ich zawartość jest znikoma.

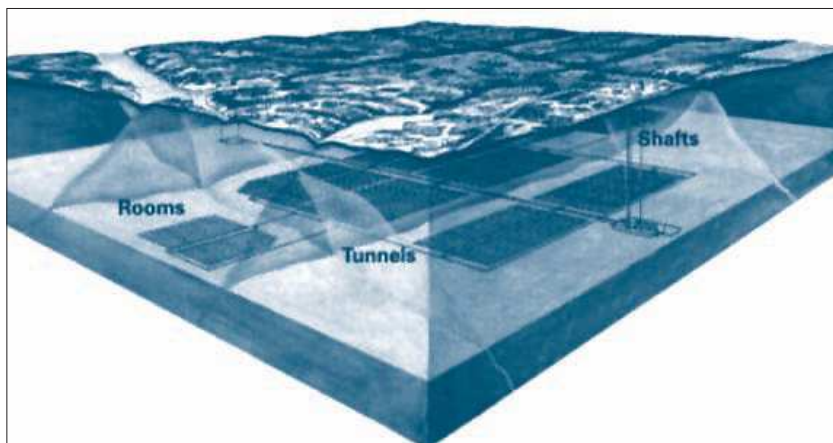
Największy problem w zużytym paliwie jądrowym stanowią uran-235, izotopy plutonu (np.



Fot. 1. Experimental Breeder Reactor II – Idaho



Rys. 1. Skład odpadów średniej aktywności DGR-Bruce



Rys. 2. CGDC-AECL (Canadian Geological Disposal Concept)

Pu-239) i inne pierwiastki transuranowe (transuranics) w tym mniejsze aktywności (minor actinides).

W paliwie usuwanym z reaktorów lekkowodnych PWR znajduje się aż 0,9% rozszczepialnego uranu-235 i 0,6% izotopów plutonu. W zużytym paliwie reaktorów ciężkowodnych (PHWR, CANDU) jest odpowiednio 0,23% uranu-235 i 0,27% plutonu. Pierwiastki transuranowe mają liczbę atomową większą niż uran (>92) i w przyrodzie prawie nie występują, gdyż mają okresy połowicznego rozpadu znacznie niższe od wieku Ziemi. Takie pierwiastki jak neptun, pluton, ameryk itd. zostały odkryte w laboratoriach po pierwszych doświadczeniach jądrowych. Aktywności to pierwiastki od liczby atomowej 89 (Actinium – Ac) do 103 (Lawrencium – Lr). Pluton i uran noszą nazwę większych aktywności (major actinides), zaś pozostałe, takie jak np. ameryk (Am) określa się mianem mniejszych aktywności (minor actinides). Okres połowicznego rozpadu zawartych w zużytym paliwie aktywności jest zwykle bez porównania dłuższy niż produk-

tów rozszczepienia. Na przykład dla U-235 wynosi on 703,8 mln lat! Gdyby, zatem można było usunąć aktywności, wtedy, biorąc pod uwagę ich stężenie, można by zmniejszyć promieniotwórczość zużytego paliwa jądrowego o kilka rzędów wielkości. Na tym polega pomysł wykorzystania reaktorów prędkich do dalszego wykorzystywania zużytego w reaktorach termicznych paliwa jądrowego, co potocznie nazywa się „dopalaniem”. W wyniku tego procesu, w zużytym paliwie jądrowym, pozostałyby wyłącznie produkty reakcji łańcuchowej pierwiastków rozszczepialnych o dużo niższym okresie połowicznego rozpadu. Aktywność zużytego paliwa obniżyłaby się do bezpiecznego poziomu w ciągu zaledwie kilkuset lat.

Reaktor dopalający ma rdzeń wykonany z silnie wzbogaconego uranu (ok. 20% U-235) otoczony warstwą zużytego paliwa jądrowego zawierającego aktywności. Prędkie neutrony powodują przetworzenie (transmutację) pierwiastków transuranowych tworząc izotopy o nieparzystej liczbie masowej (np. Pu-240 zamienia się w Pu-241). Takie izotopy aktywności są bardzo łatwo rozszczepialne i tworzą jądra pierwiastków o znacznie krótszym okresie

połowicznego rozpadu (dla Cs-137 wynosi on np.: 30,1 lat).

W Kanadzie orędownikiem idei opisanej powyżej neutralizacji odpadów jądrowych jest prof. Peter Ottensmeyer, emerytowany kierownik katedry Biofizyki Medycznej Uniwersytetu w Toronto (UofT). Należy on do prestiżowego Królewskiego Towarzystwa Kanadyjskiego (Royal Canadian Society) zrzeszającego 2000 najbardziej cenionych naukowców i artystów w Kanadzie. Prof. Ottensmeyer posiada bogaty dorobek badawczy w dziedzinie inżynierii fizycznej (metalurgii), fizyki ciała stałego, biofizyki, spektrometrów elektronowych oraz badań molekularnych związanych z radioizotopami. Pracował również w Instytucie Rakowym w Ontario (*Ontario Cancer Institute*). Przez ostatnie dziewięć lat prof. Peter Ottensmeyer zajmuje się zagadnieniem długoterminowego przechowywania odpadów jądrowych o wysokiej aktywności wygłaszając liczne odczyty mające zainteresować decydentów bardziej, jego zdaniem, racjonalnym

zagospodarowaniem zużytego paliwa z reaktorów CANDU. Profesor uważa, że zamiast składować to paliwo głęboko pod Ziemią przez 400 tys. i więcej lat, można je wypalić w reaktorach prędkich, uzyskując ponad 99% energii, która nadal w nim pozostaje i zmniejszyć jego radiotoksyczność 1,5 mln razy, tak, że w ciągu zaledwie 300 lat osiągnie poziom aktywności zwykłej rudy uranowej. Prof. Ottensmeyer obliczył, że 43 660 ton zużytego paliwa CANDU obecnie składowanego w basenach elektrowni jądrowych lub w tymczasowych składowiskach suchych mogłoby dostarczyć energii elektrycznej o wartości 48,4 bln. dolarów. Przy obecnym zużyciu pokryłoby to zapotrzebowanie na energię elektryczną całej Kanady przez prawie 400 lat i to bez emisji dwutlenku węgla. Według prof. Ottensmeyer'a zaprojektowanie i wybudowanie odpowiednio ekonomicznych reaktorów prędkich (*Fast Neutron Reactors*) zajęłoby nie więcej niż 10 lat i kosztowało, co najmniej o połowę mniej niż budowa głębokich składowisk geologicznych. Idąc dalej, prof. Ottensmeyer sugeruje, że chłodzony sodem reaktor prędkiej firmy GE-Hitachi PRISM (*Power Reactor Innovative Small Module*) o mocy 300 MW nadawałby się do wybudowania w Kanadzie już teraz. Pewne zainteresowanie projektem PRISM wykazały w 2010 r. Stany Zjednoczone, a w 2011 r. Wielka Brytania, ale nikt go jeszcze nie kupił.

Obecnie urzędy dozoru jądrowego, jak: NRC w USA czy CNSC w Kanadzie wymagają od firm eksploatujących elektrownie jądrowe gromadzenia wielomiliardowych funduszy na ostateczne wycofanie bloków z eksploatacji i na długoterminowe składowanie odpadów promieniotwórczych. Fundusze te są zainwestowane na rynkach finansowych aż do czasu zakończenia eksploatacji elektrowni jądrowych. W hrabstwie Bruce nad Jeziorem Huron firma Ontario Power Generation Inc. planuje w 2019 r. oddać do użytku pierwsze podziemne składowisko (*Deep Geological Repository*). Będzie ono jednak przeznaczone do odpadów o niskiej i średniej aktywności, np. skażona odzież, wsady kolumn wymiany jonów itp. (rys. 1). Nie będą tam składowane odpady wysokoaktywne, czyli zużyte paliwo jądrowe. Dla tych odpadów w dalszej przyszłości planuje się budowę jeszcze głębszych, podziemnych, składowisk w skalistym podłożu tzw. „Tarczy Kanadyjskiej” (*Canadian Shield*) dalej na północy Kanady (rys. 2).

Prof. Ottensmeyer nie jest oczywiście jedynym naukowcem popierającym budowę komercyjnych reaktorów prędkich. W listopadzie 2005 r. Amerykańskie Towarzystwo Jądrowe (*American Nuclear Society*) wydało oświadczenie, że tylko rozwój reaktorów prędkich zagwarantuje samowystarczalność energetyczną Ameryki na setki lat i zapewni dramatyczną redukcję aktywności odpadów promienio-

twórczych. Jak dotąd jednak rządy w USA i w Kanadzie nie śpieszą się, by inwestować grube miliardy dolarów w rozwój komercyjnych reaktorów wykorzystujących prędkie neutrony.

Technologia reaktorów prędkich jest bardziej skomplikowana niż reaktorów „termicznych” (moderowanych). Ma swoje wady, ale także zalety związane z fizyką samego reaktora. Początkowy wsad paliwa reaktora prędkiego musi mieć wysokie wzbogacenie rzędu 20% uranu-235, a pochłaniające neutrony produkty rozszczepienia muszą być usuwane z paliwa (oczyszczanie metodami, takimi jak PUREX, czy SANEX). Przetwarzanie wysoko aktywnego paliwa poza terenem elektrowni stwarza potencjalne zagrożenia związane z przestrzeganiem układu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej.

Chłodziwem w reaktorach prędkich nie może być woda, która moderuje i pochłania neutrony; możliwy jest ciekły metal, ciekła sól oraz gaz (hel). Obecnie reaktory prędkie używają jako chłodziwa ciekłego metalu. W pierwszych stosowano rtęć, najpopularniejszy jest ciekły sód, Rosjanie używają także ciekłego ołowiu, możliwa jest też mieszanina (eutektyka) ołowiu i bizmutu.

Sód jest łatwo palny i reaguje energicznie z powietrzem (tworzy pianę), to spowodowało decyzję wymiany reaktora prędkiego w łodzi podwodnej USS *Seawolf* (SSN-575) na tradycyjny reaktor ciśnieniowy chłodzony wodą (konwersja dokonana w latach 1958-1960). Radziecki reaktor BN350 doświadczył poważnego pożaru chłodziwa sodowego. Także w japońskiej elektrowni eksperymentalnej z reaktorem prędkim Monju w 1995 r. nastąpił wyciek sodu i jego pożar. Jednak inne reaktory chłodzone sodem, takie jak francuski Superphenix nie miały podobnych awarii.

Obiecującą konstrukcją był reaktor EBR II (*Experimental Breeder Reactor II*) w Idaho stosujący tzw. „pool design”, czyli wymienniki ciepła obwodu pierwotnego i pompy były umieszczone w kadzi reaktora co zapewniało pasywne bezpieczeństwo (odstawienie reaktora w przypadku całkowitego przerwania wymuszonego chłodzenia rdzenia i niefunkcjonowania systemów wyłączania awaryjnego). Przeprowadzone w kwietniu 1986 r. testy całkowicie potwierdziły założenia konstrukcyjne. Katastrofa w Czarnobylu, która wydarzyła się w tym samym miesiącu, przyćmiła jednak ten wielki sukces amerykańskiej technologii jądrowej. EBR II pracował bezpiecznie przez 30 lat, napędzając generator elektryczny o mocy 20 MW. Przetwarzanie paliwa odbywało się na terenie elektrowni metodą elektrolityczną. EBR II był prototypem tzw. *Integral Fast Reactor*, ale program ten został w 1994 r. wstrzymany przez Kongres USA i reaktor wycofano z ruchu.

Jak do tej pory reaktory prędkie nie są ekonomicznie opłacalne. Na przykład francuski Phenix (o mocy 233 MWe) od 1973 do 2009 r. osiągnął współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej 40%, a Superphenix (o mocy 1200 MWe) od 1984 do 1998 r. tylko 7,79% wg danych IAEA. Superphenix nie produkował zasadniczo energii elektrycznej od 1988 r. co miało jednak związek z sytuacją polityczną wokół energetyki jądrowej. Autor artykułu nie zna współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej radzieckiego reaktora BN-350 (Bystryj Reaktor) w Aktau, który służył do produkcji energii elektrycznej (moc turbiny wynosiła 130 MW) i odsalania wody z Morza Kaspijskiego dostarczając 80 tys. ton słodkiej wody na dobę. Sumaryczna moc cieplna (para) i elektryczna przeliczona na megawaty dawała 350 MWe stąd nazwa BN-350.

Pewną redukcję aktywności zużytego paliwa z reaktorów lekkowodnych PWR można uzyskać wykorzystując istniejącą technologię ciężkowodną CANDU (od 0,9% U-235 i 0,6% izotopów plutonu do 0,23% U-235 i 0,27% plutonu). Zastosowały to Chiny w elektrowni Qinshan III, ale oczywiście dopiero reaktory prędkie oferują możliwość skrócenia okresu rozpadu odpadów o kilka rzędów wielkości.

W rozwój reaktorów prędkich i powielających najwięcej inwestują obecnie: Rosja, Japonia, Korea Płd., Francja i Indie. Indie są zainteresowane obiegiem torowym chcąc wykorzystać swoje ogromne zasoby tego paliwa. W Kanadzie ani w USA żadna organizacja posiadająca moc decyzyjną i inwestycyjną nie jest zainteresowana wdrożeniem tej technologii.

Energetyka jądrowa ma wielu przeciwników opierających się na mniej lub bardziej racjonalnych przesłankach. Firmy eksploatujące złoża ropy naftowej i gazu ziemnego od szeregu lat wspierały ruchy ekologiczne w ich żądaniach inwestowania w elektrownie słoneczne i wiatrowe. Te pierwsze są na tyle drogie, że ich udział w zasilaniu sieci nie przekracza kilku procent (na przykład w Niemczech), natomiast te drugie pracują nie więcej niż przez 20% czasu (uśrednione w ciągu roku), co wymaga wspomagania przez gazowe bloki energetyczne,

które można stosunkowo szybko uruchomić i odstawić. Elektrownie słoneczne i wiatrowe nie są więc odpowiedzią na ograniczenie emisji dwutlenku węgla; na wymaganą skalę może to uczynić wyłącznie energetyka jądrowa. Tyle, że ta ostatnia ma koszty inwestycyjne bez porównania wyższe niż elektrownie gazowo-parowe.

W dniach 11-22 listopada 2013 r. w Warszawie odbył się kolejny szczyt klimatyczny ONZ – COP19 (*Conferences of the Parties*) połączony ze spotkaniem stron protokołu z Kyoto. Pomimo, że Polska konsekwentnie, choć dość powoli, zmierza do wdrożenia energetyki jądrowej, w programie tego szczytu nie znaleziono miejsca na pokaz doskonałego filmu dokumentalnego „Pandora's Promise”. Przedstawia on historię wielu działaczy ruchów ekologicznych, którzy doszli do wniosku, że skuteczne przeciwdziałanie efektowi cieplarnianemu nie jest możliwe bez rozwoju energetyki jądrowej. Film pokazuje także opisany poprzednio test pasywnego bezpieczeństwa reaktora EBR II w kwietniu 1986 r.

Literatura

- [0] Why Throw It Away? Productive Use of Nuclear Spent Fuel By Dr P. Ottensmeyer <http://southamptonontario.org/2013/07/09/why-bury-it-a-productive-use-for-used-nuclear-fuel-presentation-by-dr-peter-ottensmeyer/>.
- [1] Fast Reactor Technology: A path to Long-Term Energy Sustainability; Position Statement 74, November 2005.
- [2] Fast Neutron Reactors; World Nuclear Association; <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/>.
- [3] Liquid metal Fast Breeder Reactors by Eduard Khodarev, IAEA Bulletin Vol 20 No6.
- [4] Research Report 8 by Thomas B. Cochran, Harold A. Feiveson, Walt Patterson, Gennadi Pshakin, M.V. Ramana, Mycle Schneider, Tatsujiro Suzuki, Frank von Hippel (International Panel of Fissile Materials): Fast Breeder Reactor Programs: History and Status <http://fissilematerials.org/library/rr08.pdf>.
- [5] PRISM <http://gehitachiprism.com/>.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Breeder_reactor.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Fast-neutron_reactor.

Dariusz Witold Kulczyński,
Professional Engineer,
Kanada

Autor wyraża podziękowanie dla Elżbiety Zalewskiej i dra inż. Andrzeja Mikulskiego za korektę artykułu.

mgr inż. Dariusz Witold Kulczyński jest absolwentem VI L.O. im. Tadeusza Reytana. Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1977 r. Od 1981 r. przebywa w Kanadzie, gdzie pracuje w pionie technicznym elektrowni jądrowych z ciężkowodnymi reaktorami CANDU. O energetyce jądrowej pisał w artykułach opublikowanych w „Wiadomościach Elektrotechnicznych”, „Gazecie Wyborczej”, „Postępiech Techniki Jądrowej”, biuletynie „Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna”, witrynie CIRE i w „Nuclear Engineering International (UK)”.

Autor artykułu przez 6 lat pracował w wydziale szkolenia i w elektrowni jądrowej NPD w Rolphton, a przez kolejne 26 lat w elektrowni Darlington. Należy do osób czynnie włączających się w dyskusje o energetyce jądrowej w Polsce. Wygłosił w Polsce szereg wykładów; był m.in. prelegentem na konferencji NOT „Rozwój energetyki atomowej w Polsce” w grudniu 2007 r. i na II Kongresie Energetyki Jądrowej na Politechnice Warszawskiej 22-24 maja 2012 r. Dwukrotnie wygłaszał także referaty na Konferencjach Gospodarczych Polonii (2004 i 2012 r.).