

# REAKTORY JĄDROWE PRZYSZŁOŚCI I LIKWIDACJA PROBLEMU WYSOKOAKTYWNYCH ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH

Tomasz Denkiewicz

## Wprowadzenie

W Polsce jest czas debaty i waga się losy budowy elektrowni jądrowych. W tym kontekście warto zadać pytanie, jak wygląda sytuacja cywilnej elektroenergetyki jądrowej na świecie? Energetyka jądrowa, podobnie jak w przypadku innych technologii i choćby systemu nawigacji satelitarnej – GPS (ang. Global Positioning System), czy Internetu, z których obecnie korzystamy, ma początki związane z zastosowaniami wojskowymi. W dniu 8 grudnia 1953 r. prezydent Stanów Zjednoczonych Dwight Eisenhower wygłosił przemówienie zatytułowane „Atoms for Peace” (tłum. Atom dla Pokoju). Po tym wezwaniu w 1957 r. został uruchomiony pierwszy na świecie prototyp w pełni cywilnej elektrowni lekkowodnej PWR<sup>1</sup> – Shippingport Atomic Power Station. Równolegle, prywatna kompania General Electric (GE), przy wsparciu laboratoriów rządowych USA, prowadziła badania nad konstrukcją reaktora lekkowodnego typu BWR, którego pierwszy prototyp powstał w 1960 r. Pierwszą całkowicie komercyjną elektrownią jądrową była elektrownia Yankee Rowe PWR, która także została uruchomiona w 1960 r. W latach 70. w USA było dużo zamówień na budowę elektrowni jądrowych PWR i BWR, nastąpił szybki rozwój technologii i przyrost mocy elektrowni z 300, potem 600 do 1000 MWe<sup>2</sup>. Wystartowały programy jądrowe reaktorów chłodzonych wodą lekką we Francji, Japonii, Niemczech, Rosji, Szwecji. Anglia postawiła na reaktory chłodzone gazem.

Według danych na styczeń 2014 r., 11% produkowanej na świecie energii elektrycznej pochodzi z elektrowni jądrowych. Cywilne elektrownie jądrowe od początku ich historii pracują w 33 krajach. Obecnie<sup>3</sup> 430 reaktorów pracuje w 31 krajach. Całkowita zainstalowana moc wynosi 370 GWe<sup>4</sup>, kolejne 70 jednostek jest w trakcie budowy [1]. Sumarycznie, na całym świecie mamy doświadczenie 15 500 reaktorów lat pracy reaktorów jądrowych.

Obecnie energetyka jądrowa, razem z zakładami wydobywania, wzbogacania uranu, zakładami przerobu wypalonego paliwa, składowania materiałów promieniotwórczych, pochodzących od medycznej gałęzi przemysłu jądrowego, różnych zakładów technologicznych, a także oczywiście od zakładów energetycznych jądrowych, stanowi ogromną gałąź przemysłu.

Statystyki pokazują jak rynek energetyki jądrowej wygląda obecnie. A jakie są możliwe drogi rozwoju energetyki jądrowej? Spróbujmy, skupiając się jedynie na przemyśle jądrowym wykorzystującym reakcję rozszczepienia jądrowego jako źródło energii, odpowiedzieć choć w ograniczony sposób na tak zadane pytanie. Czy perspektywy rozwoju technologicznego energetyki jądrowej są już u skraju możliwości? Jaką przyszłość energetyki jądrowej rysują decydenci krajów z już rozwiniętą gałęzią przemysłu jądrowego, czy jest możliwa rewolucja wydajnościowa ze względu na wskaźnik EROI (ang. energy returned on energy invested) lub związana z bezpieczeństwem?

## Trzy generacje reaktorów jądrowych

Podziału reaktorów jądrowych można dokonywać ze względu na różne kryteria. Ze względu na kryterium rodzaju zachodzących w reaktorze reakcji jądrowych, używanego paliwa, chłodziwa, moderatora. Popularną klasyfikacją jest podział na generacje I, II, III i IV [4]. W ramach tego podziału ujęte są wszystkie rodzaje elektrowni jądrowych budowanych w celu produkcji energii elektrycznej, niezależnie od firmy, która je zaprojektowała, czy rodzaju samego reaktora. W tej klasyfikacji odzwierciedlona jest historia energetyki jądrowej i bardzo prawdopodobne, że jej przyszłość. Klasyfikacja ta uwzględnia także kilka istotnych cech związanych z bezpieczeństwem elektrowni jądrowych.

Generacja I: obejmuje wczesne reaktory z lat 50. i 60., które były prototypami dla reaktorów generacji II obejmującej reaktory w większości budowane w latach 1970 do 1990. Pierwotnie planowany czas ich pracy wynosił 40 lat. Generacja III, to reaktory, które stanowią jakby kolejne ogniwo ewolucyjne po reaktorach generacji II. Oznacza to, że nie stanowią one jakościowo nowych rozwiązań technologicznych, ale mają wiele usprawnień technologicznych komponentów znanych z poprzedniej generacji. Obecnie wyróżnia się też reaktory generacji III+. Wewnątrz społeczności związanej z przemysłem jądrowym krąży dwa rodzaje kryteriów, których spełnienie decyduje o tym czy dany reaktor jest klasyfikowany jako generacja III+. Jednym z kryteriów jest założenie na etapie projektu możliwości wystąpienia awarii ze stopieniem rdzenia

nia włącznie i posiadanie rozwiązań zapewniających, w takim przypadku, integralność obudowy zewnętrznej, którą stanowi właściwy budynek reaktora, jak to jest w przypadku obecnych konstrukcji typu PWR i BWR [5]. Według tego kryterium jako generację III+ można zaliczyć między innymi elektrownie: ABWR, ESBWR, EPR, WWER1000, AP1000<sup>6</sup>. Drugie, bardziej powszechne, funkcjonujące kryterium jest rozszerzeniem pierwszego, które dodatkowo zakłada, że reaktory powinny być wyposażone w pasywne systemy bezpieczeństwa, co oznacza, że przez określony czas (na przykład 72 godziny, jak w przypadku ABWR [6], ESBWR [7] czy AP1000 [8]), nie wymagają one ani żadnej ingerencji człowieka ani dostarczenia energii z zewnątrz w żadnej postaci, nawet w przypadku poważnej awarii, ze stopieniem rdzenia włącznie. Według takiego kryterium z wymienionych dotychczas reaktorów do generacji III+ zaliczają się: ABWR, ESBWR, AP1000. Obecnie klasyfikację wieńczy generacja IV, która szerzej jest opisana w dalszej części artykułu.

Bardzo istotna różnica, z punktu widzenia ogółu społeczności, występuje między generacjami II i III. Otóż granica ram czasowych, określających zasięg danej generacji, pokrywa się z granicą między dwiema różnymi szkołami podejścia do zagadnienia bezpieczeństwa obiektów jądrowych. W przypadku generacji II, na etapie projektowym, inżynierom i całemu społeczeństwu jądrowemu towarzyszyło przekonanie, że technologia jest bezpieczna i wystąpienie poważnego wypadku jądrowego, na co wskazywały szacunki, jest bardzo mało prawdopodobne. Tak mało prawdopodobne, że praktycznie niemożliwe. W związku z tym niezasadnione byłoby podnoszenie kosztów budowy elektrowni jądrowych przez wyposażanie je w systemy minimalizujące skutki poważnych wypadków jądrowych, których prawdopodobieństwo wystąpienia jest znikome. Pomimo małego szacunkowo prawdopodobieństwa wystąpienia poważnych wypadków, praktyka pokazała, że takie jednak się zdarzają. Czasami w wyniku zaniedbań, czy też naruszeń ustalonych procedur bezpieczeństwa w sposób tak karygodny, że niewyobrażalny – jak to miało miejsce w Czarnobylu na przykład [5,10]. Warto w tym miejscu nadmienić, że reaktory tego samego typu, jakie pracowały w Czarnobylu, RBMK, nadal są w użyciu na terenie Rosji – trzy bloki w Smoleńsku, 4 bloki w Sosnowym Borze w sąsiedztwie Petersburga i 4 bloki w Kursku.

Przykłady Czarnobyla (26 kwietnia 1986 r.), Three Mile Island 2 (TMI 2, 28 marca 1979 r.) i Fukushima (11 marca 2011 r.), pokazały, że poważny wypadek jądrowy, mimo że jest mało prawdopodobny, to nie jest niemożliwy. Wypadki jądrowe zawsze odbijają się szerokim echem i, mimo że na przykład w TMI 2 doszło do znikomych uwolnień substancji radioaktywnych, ok. 80 Ci<sup>7</sup> zostało uwolnionych w ciągu 30 dni od wypadku, a w najbliższym otoczeniu reaktora materiał radioaktywny jaki został znaleziony obejmował ok. 0,5 Ci<sup>8</sup> Cs137 i 0,1 Ci<sup>9</sup> Sr90 [5]. Innymi słowy, w najbliższym otoczeniu elektrowni, organizm człowieka otrzymał dawkę promieniowania trzykrotnie niższą niż przy standardowym prześwietleniu płuc. Jednak wypadek ten spowodował znaczne spowolnienie rozwoju energetyki jądrowej w Stanach Zjednoczonych. TMI 2 było dla energetyki jądrowej w USA tym, czym dla energetyki jądrowej w Europie był Czarnobyl. W 1979 r. liczba planowanych reaktorów zmalała w skali światowej w jednostkach zamówionej mocy elektrycznej o 8 GWe. Co prawda 8 nowych elektrowni zostało zaplanowanych, ale 14 wcześniej planowanych zostało anulowanych. W kolejnych latach w Stanach

Zjednoczonych Ameryki kontynuowano anulowanie wcześniej zaplanowanych inwestycji jądrowych [10].

Obecnie przemysł jądrowy kieruje się doktryną “nuclear accident somewhere is nuclear accident everywhere” (wypadek jądrowy gdzieś na świecie, jest wypadkiem jądrowym wszędzie). Pod nazwą reaktorów generacji III sklasyfikowane są elektrownie jądrowe, których konstrukcja jest następnym krokiem w ewolucji elektrowni II generacji. Nie stanowią one całkowicie nowego rozwiązania technologicznego od podstaw. Z racji swojej konstrukcji III generacja ma być bardziej ekonomiczna w eksploatacji, ale co najbardziej interesujące z punktu widzenia całego społeczeństwa, elektrownie te są wyposażone w systemy bezpieczeństwa dedykowane zapobieganiu i minimalizacji skutków poważnych wypadków jądrowych. Z jednej strony, sam fakt możliwości wystąpienia poważnego wypadku jądrowego, wysokie koszty ponoszone przez firmy w przypadku wystąpienia takiego wypadku i spowolnienie rozwoju z powodu ograniczenia inwestycji w energetykę jądrową po takim wydarzeniu, a z drugiej strony pojawiające się ustawodawcze obostrzenia ze strony rządów jądrowych państw i organizacji międzynarodowych, spowodowały zmianę w podejściu do kwestii bezpieczeństwa w kontekście możliwości wystąpienia poważnego wypadku jądrowego.

Mimo bardzo małego prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z uszkodzeniem rdzenia jakiegokolwiek rodzaju w nowych konstrukcjach ( $1,7 \times 10^{-8}$ /rok pracy reaktora ES BWR [7],  $1,6 \times 10^{-7}$ /rok pracy reaktora ABWR [6],  $5,1 \times 10^{-7}$ /rok pracy reaktora AP1000 [8],  $6,1 \times 10^{-7}$ /rok pracy reaktora EPR [9]), dla elektrowni generacji III już na etapie projektowym zakłada się możliwość wystąpienia poważnego wypadku jądrowego. Na myśl nasuwa się analogia tej sytuacji do rynku motoryzacyjnego – obecne reaktory to samochody wyposażone w pasy i poduszki powietrzne, podczas gdy reaktory poprzedniej generacji nie miały takiego wyposażenia. Specjaliści przekonywali, że reaktory II generacji są całkowicie bezpieczne, że poważne wypadki nie mogą się wydarzyć, a miały miejsce. Jak rozumieć twierdzenie, że generacja III jest całkowicie bezpieczna? Dlaczego społeczeństwo miało by w to uwierzyć? Odpowiedzią jest właśnie powyższe wytłumaczenie jakościowej różnicy w podejściu do konstrukcji obiektów jądrowych. Na etapie planowania, wzięte są pod uwagę nawet teoretycznie niemożliwe zdarzenia, poważne wypadki jądrowe włącznie ze stopieniem całego rdzenia. Mimo znikomo małego prawdopodobieństwa ich wystąpienia, tak małego, że można uznać wystąpienie takiego wypadku za niemożliwe, elektrownie jądrowe są wyposażone w systemy mające na celu nie tylko im zapobiegać, ale też minimalizować skutki ich ewentualnego wystąpienia.

#### Generacja IV

Osobnym rozdziałem w opowiadaniu o energetyce jądrowej, gdyby ktoś takie napisał, mógłby być rozdział o elektrowniach generacji IV. W roku 2000 zaczęła się historia Międzynarodowego Forum Generacji IV (ang. Generation IV International Forum, w skrócie GIF). Biuro Energii Jądrowej Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych zwołało przedstawicieli rządowych dziewięciu krajów<sup>8</sup> i tak rozpoczęły się rozmowy na temat rozpoczęcia współpracy w celu budowy elektrowni jądrowych IV generacji na skalę przemysłową. Wskrócie, cechy jakimi powinny się charakteryzować elektrownie

nie IV generacji według założeń GIF to: zapewnienie trwałego udziału energetyki jądrowej w miksie energetycznym, opłacalność ekonomiczna nie mniejsza niż dla innych źródeł energii, zapewnienie nieproliferaacji, bezpieczeństwa i niezawodności oraz zapewnienie minimalizacji ilości i zarządzania odpadami jądrowymi, zwłaszcza w perspektywie długoterminowej [4]. Na tym Forum, w którym obecnie uczestniczy 13 krajów (dołączyły Szwajcaria, Chiny, Rosja i organizacja Euroatom), powstała popularna dzisiaj klasyfikacja elektrowni jądrowych ze względu na generację.

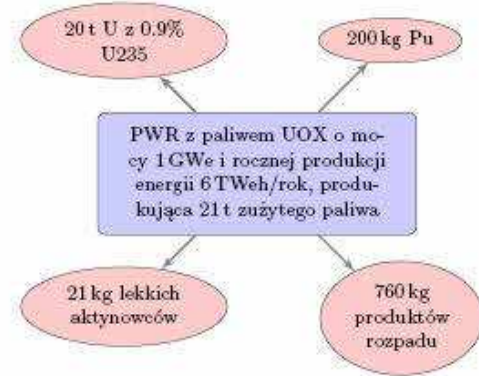
Warto w tym miejscu nadmienić, że historia GIF sięga nie tak daleko, ale historia samych reaktorów generacji IV jest znacznie dłuższa. Podczas prac Forum wytypowano, jako najbardziej obiecujących, sześć różnych technologii: SFR, VHTR, GFR, MSR, SCWR, LFR<sup>®</sup>. Badania nad tymi technologiami były prowadzone znacznie wcześniej niż powstało Forum. Reaktory opierające się na takich samych technologiach, na jakich mają operać się pracujące w przyszłości na skalę przemysłową reaktory IV generacji były już budowane i pracowały we Francji, Indiach, Japonii, Rosji, USA i w Wielkiej Brytanii. Co jest ciekawym w tym kontekście, w USA, pierwszym reaktorem zbudowanym w celu zademonstrowania możliwości produkowania energii elektrycznej przez reaktory jądrowe był reaktor na neutrony prędkie EBR1, który w trakcie swojej pracy produkował więcej materiału rozszczepianego niż go zużywał. I tak, pod koniec 1951 r., pierwszą jądrową elektrownią na świecie produkującą energię elektryczną, była elektrownia, której działanie jednocześnie po raz pierwszy potwierdziło w praktyce hipotezę, postawioną przez Enrico Fermiego, o możliwości działania reaktora jądrowego, który będzie produkował materiał rozszczepialny przydatny do produkcji energii, w tempie szybszym niż będzie go sam zużywał [14].

Z punktu widzenia odbiorcy energii elektrycznej, traktując zagadnienia ekonomiczności, bezpieczeństwa i nieproliferaacji jako oczywiste i będące celem stanowiącym wspólny mianownik dla wszystkich technologii jądrowych, są dwie główne motywacje, będące nową jakością do prowadzenia badań nad elektrowniami IV generacji i przemawiające za jak najszybszym wprowadzeniem ich na rynek na skalę przemysłową. Jedną z nich jest możliwość prowadzenia gospodarki odpadami promieniotwórczymi, umożliwiającej ich redukcję. Skutkowaloby to w praktyce likwidacją problemu długożyciowych wysokoaktywnych odpadów, które są produktem pracy obecnie funkcjonujących reaktorów jądrowych produkujących prąd elektryczny.

#### Gospodarka wypalonym paliwem jądrowym

Struktura odpadów promieniotwórczych powstających w wyniku pracy typowej elektrowni jądrowej lekkowodnej o mocy 1000 MWe, pracującej przez rok z paliwem jądrowym w postaci tlenków uranu, przedstawiona jest na rys. 1. Odpady można sklasyfikować ze względu na ich trwałość jako: bardzo krótkożyciowe (ang. very short-lived (VSL)), krótkożyciowe (ang. short-lived (SL)), długożyciowe (ang. long-lived (LL)). Ze względu na wydzielaną przez nie moc promieniowania podział jest następujący [12,13]:

- VLL (ang. very low level) – bardzo niskoaktywne: złom, gruz i inne odpadki głównie powstałe w wyniku demontażu, pozostałości górniczych, odpady po niektórych aktywnościach badawczych i oczyszczaniu skażonych miejsc;



Rys 1. Rocznie 58 francuskich reaktorów produkuje ok. 12 t plutonu, 1,2 t lekkich aktywności i 3,5 t produktów rozpadu [12]. UOX oznacza paliwo jądrowe składające się z tlenków uranu, a Pu to symbol pierwiastka chemicznego pluton

- LL (ang. low level) – niskoaktywne: uszczelki, tury, rękawice, zalane betonem odpady, wyprodukowane podczas pracy elektrowni jądrowych, oczyszczalni i laboratoriów badawczych;
- IL (ang. intermediate level) – średnioaktywne: uszczelki, rozpuszczalniki, koncentraty, materiały generatorów pary dysze, okładziny z elektrowni jądrowych i oczyszczalni;
- HL (ang. high level) – wysokoaktywne: produkty rozszczepień, aktywności mniejszościowe z wypalonego paliwa;

Objętość wszystkich odpadów wyprodukowanych do tychczas i prognoza sumy złożonych odpadów w latach 2020 i 2030 wyprodukowanych, dla przykładu, przez gospodarkę Francji, w której ok. 80% energii elektrycznej jest produkowanej przez 58 reaktorów jądrowych, znajduje się w tabeli 1 [12]. Czas, jaki jest potrzebny, aby promieniotwórcze odpady osiągnęły moc promieniowania rzędu naturalnie występujących złóż uranu, zależy od sposobu postępowania z wypalonym paliwem. W cyklu paliwowym otwartym, kiedy w składowanym paliwie znajduje się Pu (pluton), lekkie aktywności i produkty rozpadu, potrzeba na ich rozpad ok. 250 000 lat. Oprócz plutonu największym problemem są aktywności. Jeżeli w trakcie przerobu paliwa odzyskamy z niego pluton i zostawimy aktywności i produkty rozpadu, to takie paliwo osiąga aktywność występujących w naturze rud uranu po 10 000 lat. Jeżeli z kolei odzyskamy z paliwa pluton i aktywności to składowane będą tylko produkty rozpadu i wystarczy czas rzędu 300 lat [4].

Spółeczność wykazująca się wysokim poziomem odpowiedzialności cywilnej, rozpatruje produkcję promieniotwórczych odpadów jako duży problem. Wprowadzenie do obiegu reaktorów IV generacji ma pozwolić na wyeliminowanie z przemysłu energetyki jądrowej problemu wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Odzyskany pluton z wypalonego paliwa może służyć albo jako paliwo jądrowe dla reaktorów IV generacji, albo jako surowiec do paliwa typu MOX<sup>10</sup> dla obecnie pracujących elektrowni typu LWR. Z kolei w reaktorach IV generacji z prędkimi neutronami, nie spowolnionymi po rozszczepieniu jak to jest na przykład w reaktorach moderowanych wodą, możliwa jest transmutacja lekkich

Tabela 1. Skumulowana objętość promieniotwórczych odpadów wyprodukowanych przez przemysł francuski do roku 2007 i prognoza na przyszłe lata podana w m<sup>3</sup>

	Wytworzone dotychczas odpady (2007)	Prognozowana objętość (2020)	Prognozowana objętość (2030)
HL	2 290	3 680	5 060
ILL	41 800	47 000	51 000
LLIL	82 500	114 600	151 900
LILSL	792 700	1 009 700	1 174 200
VLL	231 700	629 200	869 300
Suma	1 151 000	1 804 000	2 251 000

Wyjaśnienie: Odpady wygenerowane przez 3 głównych producentów: EDF, AREVA, CEA dają 99,9% wkładu do radioaktywności wszystkich odpadów. Zakłady te produkują także ok. 80% objętości odpadów nisko i średnioaktywnych. Poza tym na terenie Francji znajduje się ok. 1100 zakładów, z których pochodzą odpady promieniotwórcze: szpitale, uniwersytety i laboratoria, przemysł.

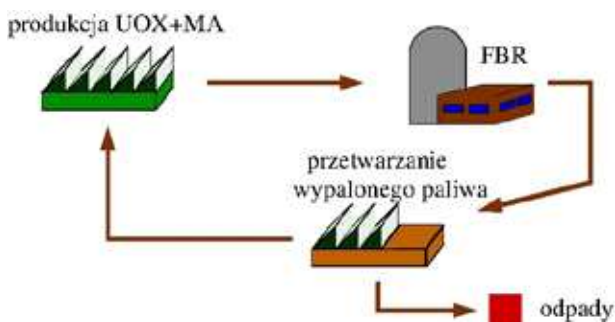
aktywność stanowiący największy problem. Aktywność umieszczona w takim strumieniu wysokoenergetycznych neutronów przechodzą kolejne transmutacje dając ostatecznie jądra, które są stabilne.

Prowadzone są badania nad dwoma sposobami transmutacji, jednorodnym i aktywność, które mają ulec transmutacji są wymieszane z podstawowym paliwem reaktora. Iniejednorodnym i aktywność są oddzielone od paliwa i znajdują się w specjalnych komórkach przeznaczonych na aktywność, które mają ulec transmutacji [11]. Zostały także przebadane dwa sposoby zarządzania cyklem paliwowym. Pierwszy to wielokrotny recykling polegający na tym, że wszystkie aktywność na koniec każdego cyklu paliwowego reaktora trafiają ponownie do kolejnego cyklu (rys. 2). W tym przypadku jedynie straty materiału radioaktywnego powstałe podczas procesu odzysku stanowią odpady całego cyklu. Tutaj możliwe są dwa sposoby funkcjonowania przemysłu jądrowego: z funkcjonującymi elektrowniami tylko IV generacji (rys. 2) oraz z koegzystującymi elektrowniami trzeciej i czwartej generacji (rys. 3).

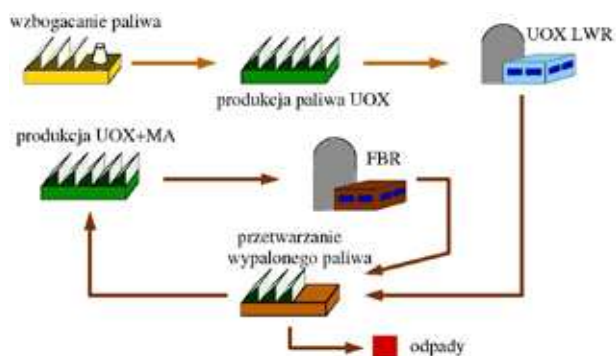
Drugim sposobem jest jednokrotny recykling podczas którego aktywność ulegają transmutacji podczas cyklu, w którym jest osiągnięty wysoki stopień wypalenia paliwa. Prowadzi się także badania nad metodami recyklingu i transmutacji paliwa w reaktorach LWR, co jak wynika z badań, jest to dużo mniej efektywne. Dobrze jest mieć świadomość, że technologia unieszkodliwiania odpadów promieniotwórczych jest opracowana, i jej skuteczność została zademonstrowana. Obecnie na świecie pracują dwa reaktory typu FBR, które produkują ener-

gię elektryczną: w Chinach o mocy 20 MWe i w Rosji o mocy 600 MWe [2]. W sumie mamy doświadczenie setek reaktorów i lat pracy reaktorów prędkich, dla których współczynnik konwersji jest większy od jedności. Obecnie prace nad zaawansowanymi technologiami SFR są kontynuowane w ramach badań nad generacją IV reaktorów i pozostaje kwestia wprowadzenia takiej technologii na skalę przemysłową. Cały czas trwa debata polityczna w sprawie reaktorów IV generacji. Głównymi zagrożeniami są realna możliwość zapewnienia nieprolifracji oraz ekonomicznej opłacalności [15].

Dotychczasowym i jednocześnie najbliższym realizacji, pomysłem na obchodzenie się z długożyciowymi odpadami promieniotwórczymi jest tworzenie głębokich składowisk geologicznych. Krajami, w których ten proces jest najbardziej zaawansowany są Finlandia, Francja i Szwecja, gdzie czas rozpoczęcia pracy składowisk jest zaplanowany na lata 2020-2025 [2]. Problemem jest wysoki koszt związany z trudnością pogodzenia dwóch cech głębokich składowisk geologicznych, bezpiecznego ulokowania odpadów na setki tysięcy lat, przy jednoczesnym mało kosztownym dostępie do zmagazynowanych odpadów. Obecnie nie ma nisko kosztowego sposobu utylizacji wysokoaktywnych odpadów na skalę przemysłową. Jednak postęp technologiczny jest bardzo szybki, może w najbliższych latach okazać się, że odpady będą przydatne do pewnego rodzaju przemysłu, który je wykorzysta i zutylizuje. W perspektywie są chociażby reaktory IV generacji. Warto nadmienić, że istnieją także projekty innych systemów, na przykład Accelerator Driven Systems (ADS) (tłum. systemy ste-



Rys 2. Schemat funkcjonowania przemysłu jądrowego z uruchomionymi elektrowniami IV generacji bez współistnienia elektrowni II i III generacji. Odpady stanowią jedynie produkty rozpadu, które osiągają poziom promieniowania naturalnych źródeł uranu po ok. 300 latach



Rys 3. Schemat funkcjonowania przemysłu jądrowego w przypadku koegzystencji elektrowni III i IV generacji. Odpady stanowią jedynie produkty rozpadu, które osiągają poziom promieniowania naturalnych źródeł uranu po ok. 300 latach

rowane akceleratorem), w których istnieje możliwość utylizacji takich odpadów, jednak obecnie nadal są one w fazie testów, a ich pierwsze prototypy są dopiero planowane i ich lista jest krótka, to jest w Europie projekt MYRRHA i w Chinach CADS. Kolejnym argumentem za rozwojem reaktorów IV generacji na skalę przemysłową jest zapewnienie trwałego udziału energetyki jądrowej w miksie energetycznym dzięki oszczędzeniu zużycia dostępnych zasobów uranu w przyrodzie.

#### Zasoby uranu

Zidentyfikowane światowe zasoby uranu to 5327200 ton<sup>11</sup>. Przy obecnym poziomie zużycia uranu zasoby te wystarczą tylko na 100 lat. Do tego suma prawdopodobnych i przewidywanych zasobów uranu to ok. 10429100 ton [16]. W oparciu o szacowane prognozy zapotrzebowania na energię jądrową opracowane przez WEC (World Energy Council) i Międzynarodowy Instytut Analiz Systemów Sposobnych, grupa ekspertów pracujących w ramach organizacji GIF opracowała prognozy zużycia światowych zasobów uranu w kilku wariantach systemów pracy elektrowni jądrowych [4].

W przypadku elektrowni pracujących w cyklu paliwowym otwartym (tzn. takim, w którym paliwo jądrowe ulega wypaleniu w reaktorze jednorazowo, po czym trafia do zakładów przerobu zużytego paliwa w celu jego składowania) w latach 2060-2070 przemysł jądrowy sięgnąłby po prawdopodobne/przewidywane zasoby uranu, a w roku 2100 zużycie uranu wzrosło by do 40-50 mln. ton (suma uranu zużytego od początku istnienia energetyki jądrowej). W przypadku uruchomienia na skalę przemysłową elektrowni IV generacji w roku 2050, domniemane zasoby uranu potrzebne byłyby w okolicach 2070 r. i w roku 2100 całkowite zużycie zaczęłoby się stabilizować na poziomie między 20-30 mln. ton.

Wprowadzenie elektrowni jądrowych IV generacji pozwoliłoby na zamknięcie cyklu paliwowego. Według prognoz wprowadzenie do obiegu na skalę przemysłową reaktorów IV generacji w roku 2030 spowodowałoby brak konieczności sięgania po zasoby uranu, które w chwili obecnej są spekulacyjne. Zatem w okolicach 2080 r. całkowite światowe zużycie zasobów uranu zatrzymałoby się między 10-20 mln. ton.

Obecnie na świecie funkcjonują dwie strategie gospodarki wypalonym paliwem jądrowym. Pierwsza to cykl otwarty – taki model funkcjonuje na przykład w USA, gdzie głównym argumentem, przemawiającym za tym modelem, jest argument ekonomiczny. Stany Zjednoczone posiadają dostęp do dużych złóż uranu, a przerób zużytego paliwa jądrowego w celu częściowego ponownego wykorzystania jest bardziej kosztowny niż jego składowanie. Drugi model cyklu paliwowego zamkniętego polega na co najmniej jednokrotnym odzyskaniu z wypalonego paliwa niewypalonych atomów U235, U238 i wytworzonego w paliwie w trakcie pracy reaktorów P239, który ponownie służy wytworzeniu paliwa do elektrowni, tak zwanego paliwa MOX. Jaki jest argument za takim modelem gospodarki odpadami z elektrowni jądrowych? Jeden element paliwowy, który zawiera 500 kg uranu przed napromieniowaniem, po wykorzystaniu w reaktorze zawiera ok. 480 kg uranu, ok. 5 kg plutonu, które mogą być odzyskane oraz ok. 15 kg produktów rozpadu, co stanowi ok. 3% całości elementu paliwowego. Trudno oprzeć się stwierdzeniu, że wypalone paliwo jądrowe z reaktora nie jest odpadem. Taki model funkcjonuje we Francji.

Wprowadzenie na skalę przemysłową reaktorów IV generacji jest jedną z dróg, która może pozwolić na zapewnienie trwałego udziału przemysłu jądrowego w miksie energetycznym przez oszczędzenie naturalnych zasobów uranu na Ziemi i wprowadzenie modelu zamkniętego cyklu paliwowego w całym przemyśle jądrowym. Reaktory IV generacji charakteryzują się czynnikiem konwersji<sup>12</sup>  $c > 1$ , co oznacza, że w trakcie swojej pracy produkują więcej materiału rozszczepialnego niż go zużywają. Typowe, obecnie pracujące reaktory lekkowodne, mają współczynniki konwersji rzędu  $c_f \sim 0,6 - 0,8$ .

#### Reaktory jądrowe przyszłości

Jeżeli istnieją technologie produkcji energii, które obecnie są na takim etapie rozwoju, że ciężko jest już szukać możliwości wzrostu ich efektywności oraz znaczącego technologicznego usprawnienia a co za tym idzie wzrostu cenowej konkurencyjności wyprodukowanego w oparciu o te technologie prądu elektrycznego, to energetyka jądrowa na pewno do nich nie należy. Wobecnie rozpowszechnione i funkcjonujące technologie istniejącej technologii istnieje duży margines łatwości osiągalnej poprawy efektywności poprzez postęp technologiczny. W cyklu otwartym reaktory III generacji (przy wypaleniu paliwa rzędu 50 GWd/t)<sup>13</sup> używają obecnie jedynie ok. 0,5% części naturalnego uranu, który jest wydobywany z rud uranowych i wzbogacany do zawartości U235 w paliwie jądrowym rzędu 4-5%<sup>14</sup>. Poprawa efektywności do 1% pozwoliłaby na zaoszczędzenie zasobów uranu i efektywne dwukrotne ich zwiększenie. Ewentualna poprawa wypalenia do 2% daje już czterokrotnie więcej zasobów dla zaspokojenia potrzeb energetyki w stosunku do chwili obecnej. Potencjał tkwi choćby w usprawnieniach technologicznych umożliwiających osiąganie większych poziomów wypalenia paliwa oraz podnoszenie współczynnika konwersji poprzez manipulację charakterystyką widma energetycznego neutronów, czy też geometrią paliwa jądrowego. Zmianę jakościową przynieść może rozwój na skalę przemysłową reaktorów IV generacji szerzej opisanych w tym artykule.

Istnieje także miejsce na całkowicie nowe technologiczne koncepcje oparte na pozyskiwaniu energii z rozszczepienia jąder atomowych. Nie można wykluczyć pojawienia się jeszcze innych, nowych rozwiązań technologicznych. Pozwalając sobie na pewną dozę fantazji, nie tak nieuzasadnioną jak się okaże pod koniec tego rozdziału, napiszę, że może istnieją już jakieś rewolucyjne rozwiązania, które dotychczas czekają w ukryciu po to, żeby nie zostały przed opatentowaniem czy realizacją wykradzione przez konkurencję. Jedną ze znanych (już od lat 50) propozycji reaktora IV generacji, ale opartej na innych rozwiązaniach technologicznych niż realizowane dotychczas, jest Travelling Wave Reactor (tłum. reaktor przemieszczającej się fali) [17]. W takim reaktorze paliwem mogą być na przykład albo naturalne lub zubożone zasoby U238<sup>15</sup> albo wypalone paliwo z reaktorów lekkowodnych. Inaczej niż w działających dotąd reaktorach, reakcje rozszczepienia i konwersji materiału nierozszczepialnego w jądra rozszczepialne zachodzą nie w całym rdzeniu, ale w jego ograniczonym obszarze, który z czasem się przemieszcza. Reaktor taki mógłby pracować bez przerwy i bez wymiany paliwa przez kilkadziesiąt lat. Obecnie ocenia się, że taki reaktor byłby bardzo trudny do praktycznej realizacji i do likwidacji po zakończeniu jego działania [18].

Stanowi jednak przykład, że alternatywne rozwiązania technologiczne są możliwe.

Bardzo ciekawą propozycją nowego rozwiązania jest Dual Fluid Reactor (DFR) opatentowany w 2012 r. przez Instytut Fizyki Jądrowej Ciężkiego Jądrowego w Berlinie [19]. DFR jest połączeniem koncepcji reaktora MSR i LFR. Paliwo w reaktorze DFR jest w postaci ciekłych soli, natomiast chłodziwem jest ciekły ołów. Spektrum neutronów jest twardsze niż w znanych dotąd rozwiązaniach z prędkimi neutronami. To pozwala na całkowitą efektywną transmutację aktynowców, transurów i produktów rozpadu tak, że ostatecznie materiał wypalony wymaga składowania jedynie przez 300 lat. Jako paliwo mogą być użyte wszystkie naturalnie występujące rozszczepialne pierwiastki. Dzięki temu, że reaktor taki charakteryzuje się dużą gęstością mocy i nie wymaga utrzymywania zakładów przerobu i wzbogacania paliwa, koszt produkcji energii elektrycznej stanowiłby 20-30% kosztów produkcji w obecnych elektrowniach węglowych. Bardzo istotne jest to, że reaktor ten jest całkowicie bezpieczny z zasady, ponieważ w żadnych warunkach nominalnych, ani w żadnej sytuacji awaryjnej nie może stać się nadkrytyczny. Kolejną jego cechą jest praca w bardzo wysokich temperaturach, rzędu 1000°C, co daje dodatkowe możliwości wykorzystania ciepła do różnych zastosowań chemicznych, takich jak na przykład produkcja paliw, czy do odsalania wody. Podsumowując, reaktor DFR jest nową koncepcją reaktora, którego realizacja rozwiązałaby wszystkie dotychczasowe problemy energetyki jądrowej, w tym przede wszystkim kwestie bezpieczeństwa i odpadów promieniotwórczych, będąc jednocześnie rozwiązaniem konkurencyjnym ekonomicznie.

#### Post scriptum

Obszerna gałąź przemysłu jaką jest energetyka jądrowa cały czas się rozwija i ewoluuje, bez przerwy trwają prace nad usprawnieniami obecnie działających na skalę przemysłową technologii. Proponowane nowe technologie zrealizowane już w praktyce w skali badawczej, jak elektrownie IV generacji, czy powstające nowatorskie projekty, takie jak wspomniany wyżej Dual Fluid Reactor dają realną nadzieję na trwały udział energetyki jądrowej w mixie energetycznym w przyszłości i likwidację problemu wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych. Przy czym należy oczywiście pamiętać, że praktyka pokazuje, że od czasu pojawienia się projektu nowej technologii, reaktora jądrowego, na kartce papieru, do wprowadzenia jej na skalę przemysłową potrzeba kilkadziesiąt lat.

Wierzę, że odpowiedzi na pytania ze wstępu tego artykułu jasno rysują się w jego treści i zakończeniu. Warto także znaleźć odpowiedź na kolejne pytanie, które pozostawiam czytelnikowi. Czy warto uczestniczyć w procesie rozwoju przemysłu jądrowego i czerpać z niego korzyści w postaci choćby taniej energii elektrycznej na długie lata?

Autor pragnie serdecznie podziękować Panu Andrzejowi Mikulskiemu, za wnikliwą recenzję, która pozwoliła znacząco podnieść wartość artykułu.

dr Tomasz Denkwicz  
Uniwersytet Szczeciński,  
Instytut Fizyki,  
Szczecin

#### Literatura

- [1] [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org), Nuclear Power in the World Today, 01.02.2014
- [2] IAEA, International Status and Prospects for Nuclear Power, 2012
- [3] <http://www.iaea.org/pris/>, IAEA (PRIS) Power Reactor Information System, 01.2014
- [4] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, GIF, December 2002
- [5] SARNET Lecture Notes on Nuclear Reactor Severe Accident Phenomenology, B.R. Sengupta, et al., CEA Cadarache, 2008
- [6] ABWR Design Control Document, Rev. 4, GE Nuclear Energy, 2007
- [7] ESBWR Design Control Document, GE Nuclear Energy, 2009
- [8] AP1000 European Design Control Document (EPSC GW GL700), Westinghouse Electric Company LLC, 2009
- [9] AREVA Design Control Document Rev. 3, 2009
- [10] History of the International Atomic Energy Agency: the first forty years, David Fischer, IAEA, Vienna, Austria, 1997
- [11] L. Buiron, F. Varaine, D. Lorenzo, H. Palancher, B. Valentin, "Minor Actinides Transmutation in SFR Depleted Uranium Radial Blanket, Neutronic and Thermal Hydraulic Evaluation," Proc. of Global'07 - Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems, Boise, Idaho, September 9-13, 2007, (2007); R. Ferrer, S. Bays, M. Pope, Evaluation of Homogeneous Options: Effects of Minor Actinide Exclusion from Single and Double Tier Recycle in Sodium Fast Reactors, INL/EXT-08-14034 (2008); Samuel Bays i inni, Minor Actinide Recycle in Sodium Cooled Fast Reactors Using Heterogeneous Targets Advances in Nuclear Fuel Management IV, Idaho 2009; L. Buiron, CEA DEN, Cadarache Center France, Nuclear Engineering Training in France in the frame of the "Train the trainers" program / Poland within the period October-December 2010 at CEA/Sadlay (91191 Gif-sur-Yvette Cedex)
- [12] <http://www.andra.fr>, Waste quantities, 01.2014
- [13] IAEA Safety Standards, Classification of Radioactive Waste, Classification of Radioactive Waste, IAEA, Vienna 2009
- [14] Nuclear News, volume 44, number 12, American Nuclear Society, 11/2001
- [15] Fast Breeder Reactor Programs: History and Status, A research report of the International Panel on Fissile Materials, February 2010
- [16] Uranium 2011: Resources, Production and Demand, OECD/NEA, IAEA, 2011
- [17] M.J. Driscoll, B. Atencio, D.D. Lanning, "An Evaluation of the Breed/Burn Fast Reactor Concept", MITNE-229 (Dec. 1979); H. Sekimoto, K. Ryu, and Y. Yoshimura, "CANDLE The New Burnup Strategy", Nuclear Science and Engineering, 139, 1-12 (2001)
- [18] [http://en.wikipedia.org/wiki/Traveling\\_wave\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Traveling_wave_reactor)
- [19] Instytut Fizyki jądrowej ciężkiego jądrowego, <http://festkoerper.kernphysik.de>, Berlin, 09.2013

## Przypisy:

- 1 objaśnienia wybranych skrótów znajdują się w tabeli 2.
- 2 MWe – megawatów mocy elektrycznej.
- 3 Stan na styczeń 2014 r.
- 4 GWe – gigawatów mocy elektrycznej
- 5 Podana lista nie wyczerpuje wszystkich projektów elektrowni spełniających omawiane kryterium. Obejmuje typy elektrowni, które, do końca 2012 r., w oficjalnych wypowiedziach, przedstawicieli firm je autoryzujących, były wskazywane jako projekty, które potencjalnie mogą być zgłoszone w ofercie dla Polski.
- 6 Dla reaktorów II generacji prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia rdzenia jest rzędu 10<sup>-5</sup>/ rok pracy reaktora. Oznacza to, że statystycznie na świecie przy pracujących 500 reaktorach będzie się zdarzał jeden incydent uszkodzenia rdzenia na 200 lat.
- 7 1Ci jest jednostką aktywności promieniotwórczej odpowiadającą aktywności jednego grama radu 226, 1Ci = 3,7×10<sup>10</sup> rozpadów/s.
- 8 Argentyna, Brazylia, Francja, Japonia, Kanada, Południowa Afryka, Południowa Korea, Stany Zjednoczone, Wielka Brytania.
- 9 Zob. Tabela 2.
- 10 MOX (ang. mixed oxide) oznacza paliwo, które jest mieszaniną tlenków uranu i plutonu.
- 11 Stan na 1 stycznia 2011 r. Szacuje się, że zidentyfikowane zasoby uranu mogą jeszcze wzrosnąć, choćby z tego powodu, że zliczane są tylko zasoby, które zostały zgłoszone przez kraje. Nie wszystkie kraje od razu zgłaszają wykryte zasoby. Od 2009 do 2011 r. zidentyfikowane zasoby uranu wzrosły o 12%.
- 12 Liczba – stosunek wytworzonego w trakcie pracy reaktora nowego materiału rozszczepialnego w zużytych paliwie do materiału rozszczepialnego wypalonego w świeżym paliwie.
- 13 Wypalenie paliwa podane jako całkowita ilość energii uwolnionej z paliwa w ciągu dnia na jednostkę masy 1 t, mierzona po całkowitym czasie pracy reaktora na danym paliwie.
- 14 Naturalne złoża uranu zawierają 0,71% izotopu U235 resztę stanowi izotop U238. W paliwie jądrowym reaktorów komercyjnych LWR zawartość U235 wynosi ok. 3-5%. Proces zwiększania procentowej zawartości U235 nazywany jest wzbogacaniem paliwa jądrowego.
- 15 W trakcie wzbogacania uranu w izotop U235, pozostaje ruda uranu o mniejszej, niż naturalna, zawartości izotopu U235. Takie zasoby uranu nazywamy zubożonymi.

Tabela 2. Tabela z objaśnieniami wybranych skrótów użytych w tekście artykułu.

Nazwa	Krótką Charakterystyka
LWR	ang. light water reactor; reaktor lekkowodny
PWR	ang. pressurized water reactor; reaktor wodny ciśnieniowy
BWR	ang. boiling water reactor; reaktor wodny wrzący
ESBWR	ang. economic simplified boiling water reactor; ekonomiczny uproszczony reaktor wrzący
ABWR	ang. advanced boiling water reactor; zaawansowany reaktor wrzący
AP1000	ang. advanced pressurized 1000; zaawansowany reaktor ciśnieniowy
EPR	ang. european or economic pressurized reactor; europejski albo ekonomiczny reaktor ciśnieniowy
WWER	ros. wodno-wodianoj energetičeskij reaktor; wodno-wodny reaktor energetyczny
FBR	ang. fast breeder reactor; reaktor na neutrony prędkie
SCWR	ang. supercritical water reactor; reaktor chłodzony wodą o parametrach nadkrytycznych
SFR	ang. sodium cooled fast reactor; reaktor prędkie chłodzony sodem
GFR	ang. gas cooled fast reaktor; reaktor prędkie chłodzony gazem
MSR	ang. molten salt reactor; reaktor chłodzony stopionymi solami
LFR	ang. lead cooled fast reactor; reaktor prędkie chłodzony ołowiem
VHTR	ang. very high temperature reactor; reaktor wysokotemperaturowy