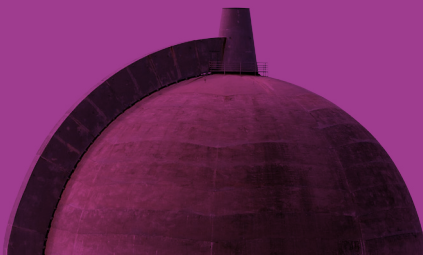


Reaktory jądrowe IV Generacji

Program jądrowy w Stanach Zjednoczonych

PROGRAM POLSKIEJ ENERGETYKI JĄDROWEJ
ANALIZY I OPRACOWANIA





OBUDOWA REAKTORA

Szczelna i odporna na oddziaływania
zewnątrzne obudowa bezpieczeństwa
reaktora.

Reaktory jądrowe IV Generacji

Międzynarodowe Forum Reaktorów IV Generacji

Program rozwoju reaktorów jądrowych IV Generacji koordynowany jest przez Międzynarodowe Forum Reaktorów IV Generacji (Generation IV International Forum, GIF). Forum to jest dobrowolnym zrzeszeniem krajów prowadzących prace badawczo-rozwojowe i wdrożenia w celu rozwoju nowych jądrowych systemów energetycznych. Systemy IV Generacji mają być systemami zrównoważonymi, dostarczającymi energię po konkurencyjnych cenach, przy optymalnym wykorzystaniu surowców oraz o wysokim poziomie bezpieczeństwa, niezawodności i odporności na proliferację¹. Do tej pory skupiano się na rozwoju sprawdzonych konstrukcji - takich jak reaktory wodne ciśnieniowe bądź reaktory wodne wrzące i poprawie bezpieczeństwa ich pracy (tzw. zaawansowane reaktory ewolucyjne). Rozwiązania będące obiektem prac nowo powołanej organizacji miały iść krok dalej. Ich założenia konstrukcyjne miały wykluczać możliwość stopienia się rdzenia oraz uwolnienia produktów rozszczepienia poza budynek reaktora, przy jednoczesnym znacznym zwiększeniu sprawności energetycznej oraz konkurencyjności ekonomicznej wobec konwencjonalnych źródeł energii.

Forum GIF utworzone zostało w roku 2001 i liczy obecnie 14

członków. Dokument założycielski tzw. kartę GIF (GIF Charter) podpisało w lipcu 2001 r. 9 członków: Argentyna, Brazylia, Kanada, Francja, Japonia, Republika Korei, Republika Południowej Afryki, Stany Zjednoczone i Wlk. Brytania. Następnie do GIF (2002 r.) przystąpiła Szwajcaria (2003 r.), Euratom oraz Chiny (2006 r.) i Rosja (2006 r.). W kwietniu 2016 r. do GIF przystąpiła Australia. Argentyna, Brazylia oraz Wlk. Brytania posiadają status tzw. państw nieaktywnych bowiem nie podpisały w 2005 r. porozumienia Framework Agreement for International Collaboration on Research and Development of Generation IV (FA), które ustanawia system organizacyjny GIF i uszczegóławia dalszą współpracę państw założycielskich oraz ich zobowiązanie do prowadzenia prac badawczych. W roku 2015 porozumienie to zostało przedłużone na kolejne 10 lat, co świadczy o dużym zainteresowaniu państw członkowskich rozwojem nowych technologii jądrowych.

Forum GIF zdefiniowało cztery główne cele dla rozwoju systemów jądrowych IV Generacji:

- **zrównoważony rozwój**

- niezakłócone dostawy paliwa jądrowego
- minimalizacja i prawidłowe postępowanie z odpadami promieniotwórczymi

- **bezpieczeństwo i niezawodność**

- bardzo niskie prawdopodobieństwo uszkodzenia rdzenia reaktora i stopienia paliwa

- eliminacja konieczności zewnętrznych działań na wypadek awarii

- **konkurencyjność ekonomiczna**

- całkowite koszty uzyskania energii elektrycznej niższe niż w innych systemach energetycznych

- ryzyko finansowe porównywalne z innymi projektami energetycznymi

- **odporność na proliferację materiałów jądrowych i ochrona fizyczna obiektów jądrowych**

- trudność i nieatrakcyjność działań w celu uzyskania materiałów jądrowych do celów militarnych

- wzmocniona ochrona fizyczna przeciwko potencjalnym atakom terrorystycznym

Członkowie Forum Generacji IV wybrali do dalszych badań sześć systemów energetycznych, które mogą spełniać powyższe cele i które są najbardziej obiecujące pod względem możliwości ich wdrożenia. Są to:

- Reaktor prędkiej chłodzony sodem – SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor)
- Reaktor prędkiej chłodzony ołowiem – LFR (Lead-Cooled Fast Reactor)
- Reaktor chłodzony stopionymi solami – MSR (Molten Salt Reactor)
- Reaktor prędkiej chłodzony gazem – GFR (Gas-Cooled Fast Reactor)
- Reaktor wysokotemperaturowy

Grafika 1.

Dotychczasowy i przyszły rozwój różnych generacji energetycznych reaktorów jądrowych.

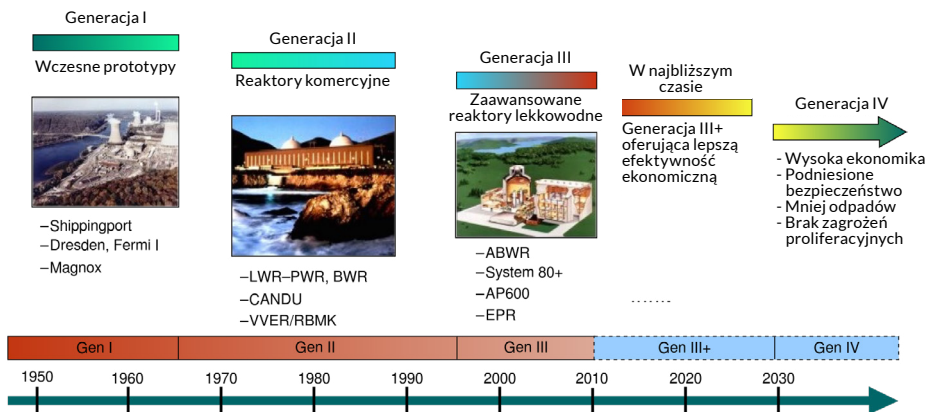


Tabela 1.

Zaangażowanie poszczególnych państw należących do Forum GIF w konkretne projekty reaktorów IV Gen.

System = Technologia	CA	CN	EU	FR	JP	KR	RU	CH	US	ZA
SFR		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
VHTR		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
SCWR	✓		✓		✓		✓			
GFR			✓	✓	✓			✓		
LFR			P		P		P			
MSR			P	P			P			

✓ - sygnatariusze porozumień technologicznych
P - sygnatariusze Listów Intencyjnych

- VHTR (Very-High-Temperature Reactor)

- Nadkrytyczny reaktor wodny
- SCWR (Supercritical-Water-Cooled Reactor)

Wybrane systemy oparte są na różnorodnych technologiach cyklu paliwowego, ich konstrukcje obejmują widma neutronów, zarówno termicznych, jak i prędkich oraz cykl paliwowy otwarty i zamknięty. Cztery z nich stanowią reaktory prędkie a pozostałe dwa są systemami ter-

micznymi lub epitermicznymi. Tylko jeden jest chłodzony wodą, dwa helem, a pozostałe wykorzystują do chłodzenia sól, ołów/bizmut i sole fluoru. Ostatnie trzy rodzaje działają przy niskim ciśnieniu w układzie chłodzenia reaktora, co znacznie zwiększa bezpieczeństwo ich pracy. Zakres temperatury wynosi od 510°C do 1000°C co oznacza, że wszystkie pracują w wyższych temperaturach niż reaktory eksploatowane obecnie (do 330°C), w szczególności cztery z nich mogą

być przeznaczone do produkcji wodoru. Reaktory posiadają moce od bardzo małych (150 MWe) do bardzo dużych (1500 MWe), dodatkowo reaktory chłodzone ołowiem dostępne są jako „baterie jądrowe” o mocy 50-150 MWe z rdzeniem działającym 15-20 lat bez wymiany paliwa w postaci wymiennej kasety lub całego modułu reaktora. Mogą być one przeznaczone do rozproszonej produkcji elektryczności i odsalania wody.

Większość z wybranych tech-

nologii wykorzystuje zamknięty cykl paliwowy w celu maksymalizacji wykorzystania bazy surowcowej (efektywniejsze wykorzystanie energii zawartej w uranie) oraz minimalizacji ilości odpadów, które mają być gromadzone i przechowywane w składowiskach, a także znacznego skrócenia okresu ich koniecznej izolacji od środowiska.

Dla zapewnienia odporności systemów na proliferację reaktory prędkie nie są konstruowane jako typowe reaktory powielające (fast breeders) tzn. nie posiadają płaszcza paliworodnego, w którym produkowany jest pluton-239. Zamiast tego pluton wytwarzany jest w rdzeniu, gdzie stopień wypalenia paliwa jest wysoki i zawartość innych izotopów plutonu również pozostaje wysoka, co gwarantuje nieprzydatność takiego paliwa do konstrukcji ładunku jądrowego. Ponadto nowa elektrometalurgiczna technologia przerobu paliwa umożliwi recykling paliwa bez wydzielania (separacji) plutonu.

W zależności od stopnia zaawansowania prac badawczych rozpoczęcie komercyjnej eksploatacji

pierwszych systemów IV Gen. spodziewane jest w latach 2030-2040.

Blisko związany z programem reaktorów Gen. IV jest program jądrowy realizowany przez Indie, które nie są członkiem GIF. Kraj ten rozwija swoją oryginalną technologię wykorzystywania toru jako paliwa jądrowego. W trzystopniowym programie rozwinięto pierwszy etap – opracowano i zbudowano reaktory ciężkowodne ciśnieniowe (PHWR) zasilane naturalnym (niewzbogaconym) uranem służące do produkcji plutonu. Następnie reaktory prędkie wykorzystają paliwo plutonowe do wytwarzania rozszczepialnego izotopu U-233 z toru (Th-232) i w ostatniej fazie zaawansowane systemy reaktorów będą zasilane U-233. Zużyte paliwo będzie przerabiane w celu odzysku i ponownego użycia materiałów rozszczepialnych. Jako dwie opcje dla trzeciej fazy przyjmuje się projekty zaawansowanego reaktora ciężkowodnego (Advanced Heavy Water Reactor) i reaktora podkrytycznego sterowanego akceleratorem (Accelerator-Driven Systems). Pomyślna

realizacja tego programu pozwoli Indiom w przyszłości wykorzystać rodzime znaczne zasoby toru do produkcji energii elektrycznej.

Innym projektem związanym z GIF są prace poświęcone badaniu możliwości użycia paliwa zawierającego aktywnowce do zasilania reaktorów prędkich. Są one realizowane jako część programu rozwoju reaktorów sodowych. W ramach amerykańskiej inicjatywy rozwoju zaawansowanego cyklu paliwowego (US Advanced Fuel Cycle Initiative, AFCI) koordynowanej przez Departament Energii USA (US DOE) realizowany jest projekt (The Global Actinide Cycle International Demonstration, GACID), w który oprócz US DOE zaangażowana jest francuska komisja energii jądrowej (CEA) oraz japońska agencja energii jądrowej (JAEA). W pierwszym etapie zademonstrowane zostanie paliwo zawierające mniejsze aktywnowce²⁾, przewidziane do zasilania japońskiego reaktora Monju.

1. Proliferacja (rozprzestrzenianie) - wykorzystanie materiałów i urządzeń jądrowych do produkcji broni jądrowej niezgodnie z postanowieniami międzynarodowego Układu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej (NPT).
2. Aktywnowce (An) - grupa pierwiastków chemicznych wydzielona z układu okresowego. Ich nieoficjalny wspólny symbol to An. Grupa ta liczy 15 metali: aktyn (Ac), tor (Th), protaktyn (Pa), uran (U), neptun (Np.), pluton (Pu), ameryk (Am), kiur (Cm), berkel (Bk), kaliforn (Cf), einstein (Es), ferm (Fm), mendelew (Md), nobel (No), lorens (Lr).

Wszystkie aktywnowce są promieniotwórcze. Praktycznie tylko tor, protaktyn i uran występują w skorupie ziemskiej, ponieważ ich okres połowicznego zaniku jest rzędu wieku Ziemi. Śladowe ilości neptunu i plutonu można znaleźć w rudach uranu. Są one prawdopodobnie produktem oddziaływania prędkich neutronów pochodzących z promieniowania kosmicznego na jądra uranu. Aktywnowce położone w układzie okresowym za uranem to tzw. transuranowce (TRU). Mniejsze (mniejszościowe, pomniejsze) aktywnowce (Minor Actinides - MA)

- pierwiastki z grupy aktywnowców z wyłączeniem uranu i plutonu, które nazywane są głównymi aktywnowcami (Major Actinides). Do najważniejszych z nich należą: neptun-237, ameryk-241, 243, kiur-242 do 248 i kaliforn-249 do 252. MA powstają w trakcie pracy reaktora w wyniku kolejnych wychwytywów neutronów przez uran zawarty w paliwie jądrowym oraz innych rozpadów promieniotwórczych. Pluton oraz mniejsze aktywnowce głównie odpowiadają za podwyższoną radioaktywność wypalonego paliwa oraz wydzielane ciepło w okresie od 300 do 20 tys. lat.

Technologie reaktorów IV Generacji

Reaktor prędkie chłodzony gazem (GFR)

Schemat 1.

System GFR stanowi reaktor prędkie wysokotemperaturowy chłodzony helem pracujący w cyklu zamkniętym. Łączy on zalety reaktora prędkiego pod względem możliwości powielania paliwa i zagwarantowania długoletnich dostaw uranu oraz minimalizacji ilości i radiotoksyczności odpadów promieniotwórczych (poprzez wielokrotny przerób wypalonego paliwa i spalanie długożyciowych aktywności) z zaletami systemów wysokotemperaturowych (wysoka sprawność termodynamiczna i możliwość wykorzystania ciepła w procesach przemysłowych np. do produkcji wodoru, podobnie jak w reaktorze VHTR).

System GFR wykorzystuje podobny proces przerobu paliwa, jak w systemie reaktorów SFR oraz ma budowę podobną do reaktora VHTR. Rozwój tego systemu oparty jest więc o technologie opracowane dla reaktorów wysokotemperaturowych w zakresie struktury rdzenia, materiałów konstrukcyjnych i systemu odbioru ciepła.

Reaktorem bazowym (referencyjnym) dla tego systemu jest reaktor o mocy 2400 MWt chłodzony helem z rdzeniem zamkniętym w stalowym zbiorniku ciśnieniowym. Konfiguracja rdzenia ma być oparta o zestawy paliwowe w po-

staci szpilek lub płytek w osłonie ceramicznej lub w postaci bloków pryzmatycznych, które pozwalają na lepszą cyrkulację gazu chłodzącego. Jako paliwo badane są węgliki lub azotki uranu i plutonu, natomiast w charakterze osłon wykorzystywane będzie włókno węglowo-krzemowe (UPuC/SiC). Odbiór ciepła z reaktora może następować bezpośrednio (podobnie jak w reaktorze BWR) w zamkniętym cyklu turbiny gazowej (w cyklu Braytona) lub za pomocą jednego lub dwóch obiegów pośrednich (jak w reaktorze PWR), które zapewniają większą elastyczność wyboru gazu roboczego napędzającego turbinę. Przewidywana temperatura helu na wyjściu z rdzenia będzie rzędu 850°C.

Reaktor wysokotemperaturowy (VHTR)

Schemat 2.

Projekt reaktora wysokotemperaturowego (Very-High-Temperature Reactor, VHTR) wykorzystuje rdzeń z moderatorem grafitowym oraz hel jako chłodziwo. Pracuje w cyklu otwartym z jednokrotnym cyklem paliwa uranowego. Konstrukcja tego typu reaktora zakłada temperaturę na wyjściu ok. 1000 °C. Tak wysoka temperatura umożliwia wykorzystanie ciepła procesowego czy produkcję wodoru w cyklu termochemicznym (cykl jodowo-siarkowy).

Reaktor chłodzony wodą w stanie nadkrytycznym (SCWR)

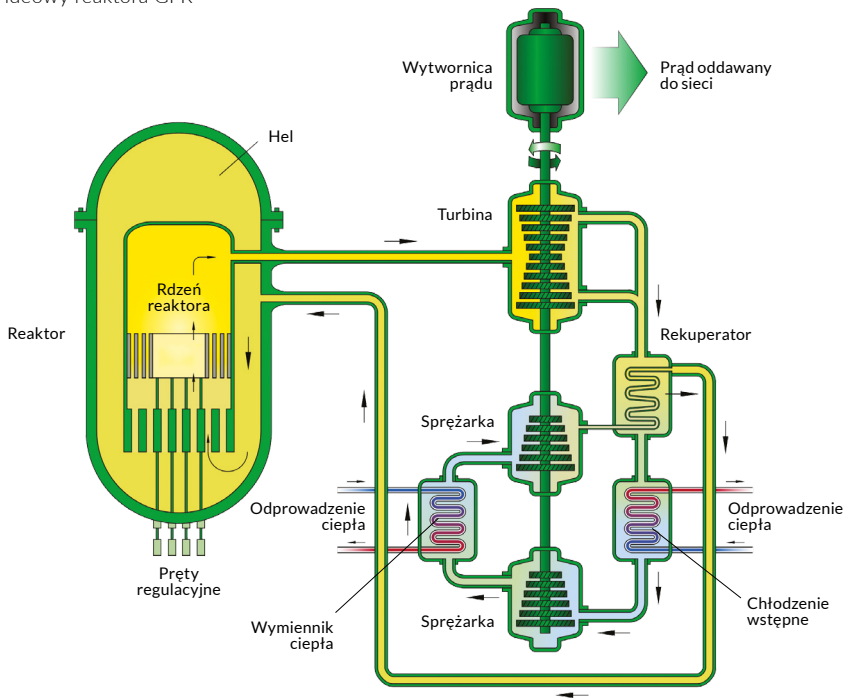
Schemat 3.

Reaktor z wodą nadkrytyczną (Supercritical-Water-Cooled Reactor, SCWR) wykorzystuje wodę w stanie nadkrytycznym (odnośnie do punktu krytycznego wody – 374°C i 22 MPa, a nie krytycznej masy paliwa nuklearnego) jako moderatora neutronów oraz chłodziwa. Przypomina reaktor lekkowodny (LWR), ale panuje w nim wyższe ciśnienie i temperatura, posiada przy tym bezpośredni obieg pierwotny, podobnie jak reaktor wodny wrzący (BWR). Woda jest zawsze w stanie gazowym. Reaktory typu SCWR jako systemy nuklearne są obiecujące ze względu na ich wysoką sprawność cieplną (~45% w stosunku do ~33% dla obecnie stosowanych LWR) i znaczne uproszczenie konstrukcji.

Głównym zamierzeniem SCWR jest wytwarzanie taniej energii elektrycznej. Projekt oparty jest na dwóch sprawdzonych technologiach: reaktorów LWR, które są najczęściej używanymi reaktorami energetycznymi na świecie oraz na kotłach opalanych paliwami kopalnymi z wodą w stanie nadkrytycznym, których duża liczba jest również używana na całym świecie.

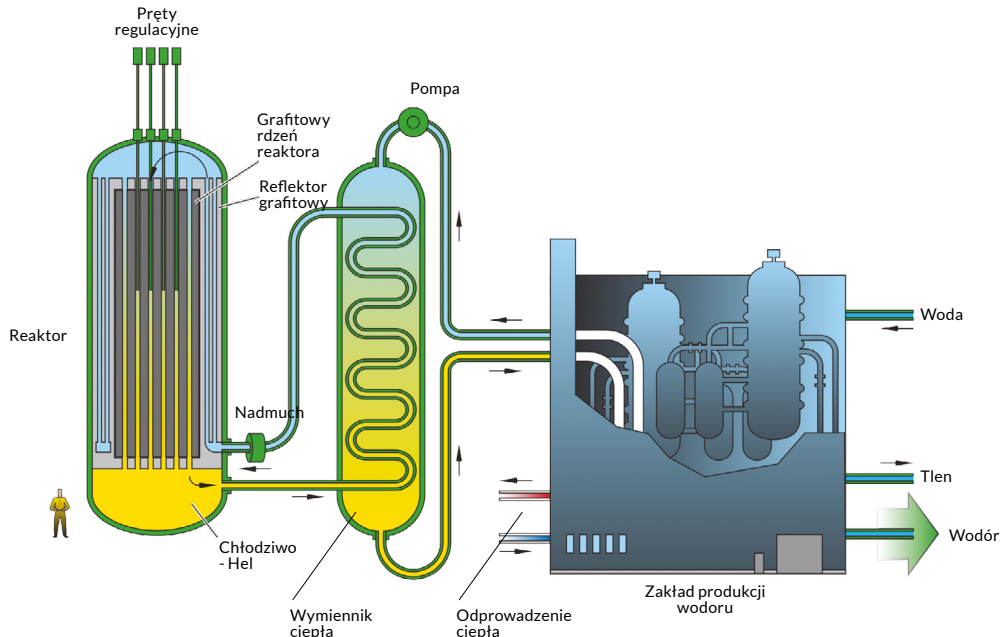
Schemat 1.

Schemat ideowy reaktora GFR



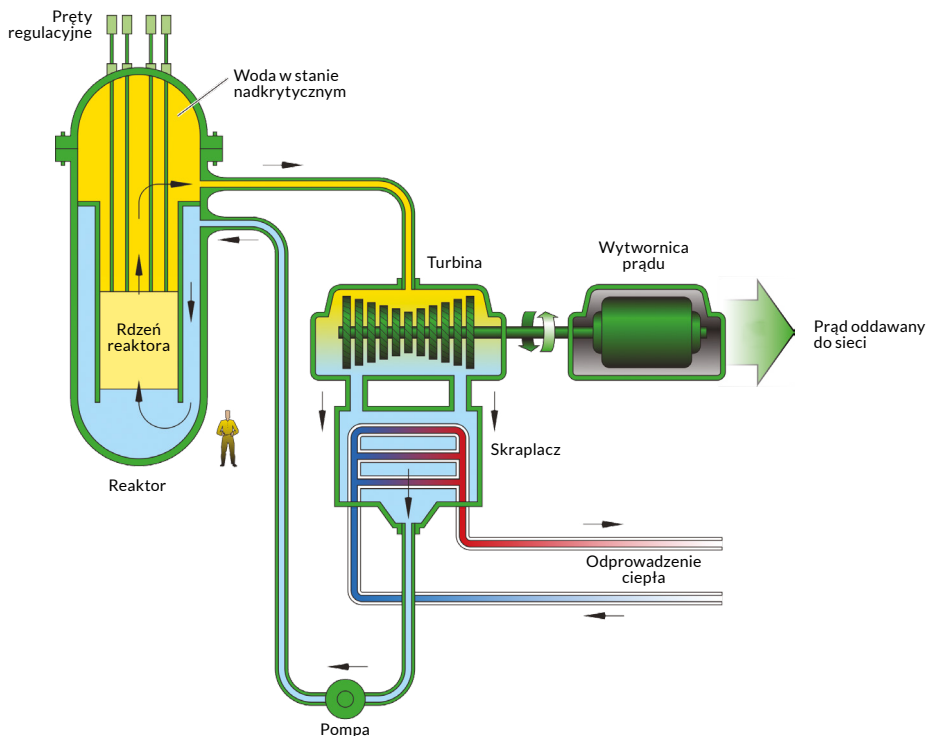
Schemat 2.

Reaktor wysokotemperaturowy (VHTR)



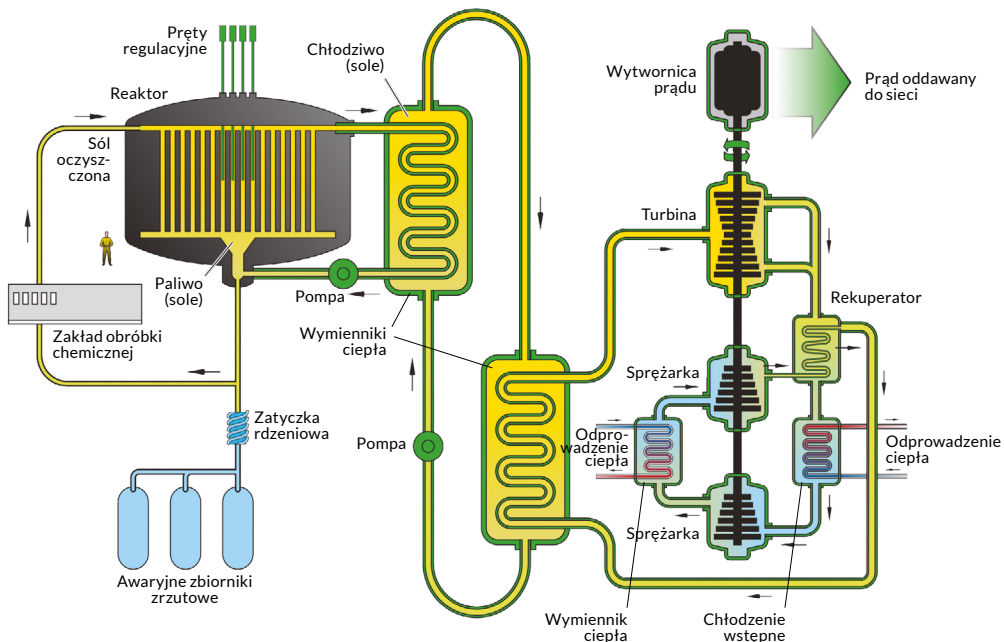
Schemat 3.

Reaktor chłodzony wodą w stanie nadkrytycznym (SCWR)



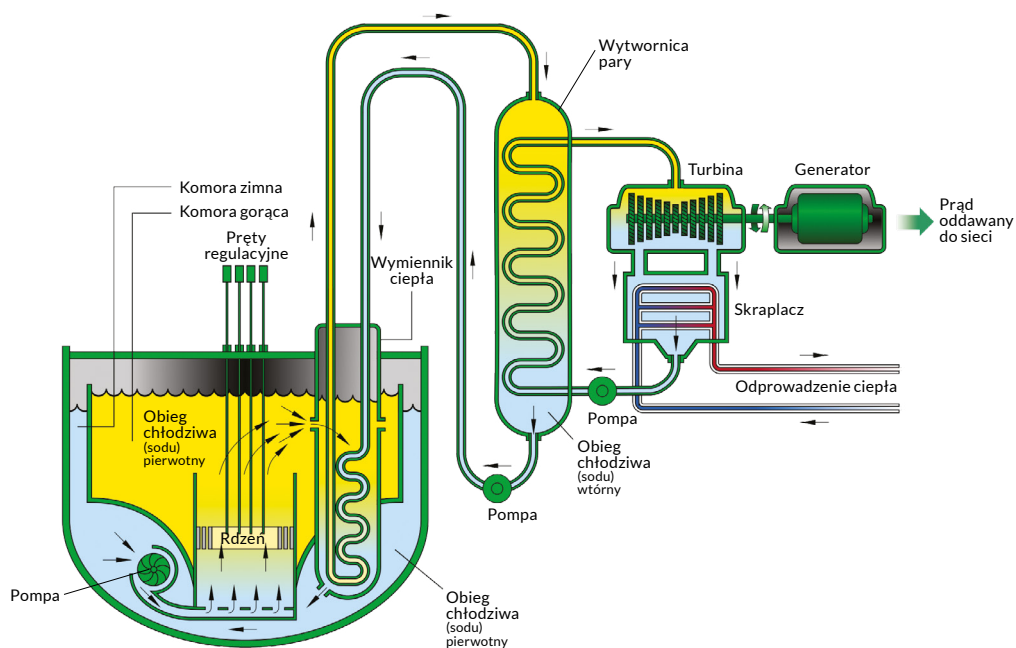
Schemat 4.

Reaktor chłodzony stopionymi solami (MSR)



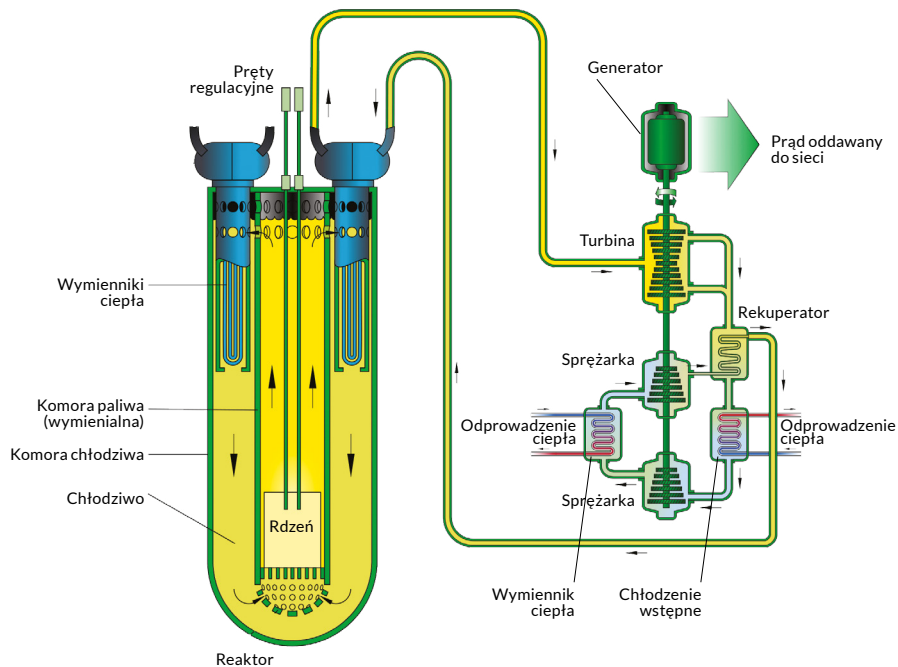
Schemat 5.

Reaktor prędkie chłodzony sodem (SFR)



Schemat 6.

Reaktor prędkie chłodzony ołowiem (LFR)



Reaktor chłodzony stopionymi solami (MSR)

Schemat 4.

Reaktory ze stopionymi solami (Molten Salt Reactor, MSR) stanowią rodzaj reaktorów jądrowych, w których czynnikiem chłodzącym są stopione sole (w sensie rodzaju związków chemicznych). Zostało przedstawionych wiele projektów tego typu reaktora i zbudowano kilka prototypów. Wczesne koncepcje (i wiele obecnych) zakładały rozpuszczenie paliwa jądrowego w stopionej soli fluorkowej jako tetrafluorek uranu (UF_4). Ciecz ta ma osiągać masę krytyczną przez wpłynięcie do grafitowego rdzenia, który jednocześnie służyłby za moderator neutronów. Wiele obecnych koncepcji polega na paliwie rozproszonym w matrycy grafitowej ze stopioną solą zapewniającą niskie ciśnienie i wysoką temperaturę chłodzenia.

W reaktorze chłodzonym stopionymi solami paliwo uranowe bądź torowe przepływa rozpuszczone w solach fluorków (sodu, litu, lub berylu) przez kanały w grafitowym rdzeniu moderatora. Ponieważ paliwo ma postać cieczy, można usuwać z niego na bieżąco produkty rozszczepienia, jednocześnie uzupełniając w niej poziom uranu czy plutonu. Tym samym nie ma potrzeby produkcji, składowania i transportu specjalnych elementów paliwowych, a wysokoaktywne pro-

dukty reakcji są w pełni przetwarzane. W porównaniu do reaktorów z paliwem stałym, reaktory chłodzone ciekłymi solami nie generują wysokoaktywnego wypalonego paliwa reaktorowego, które trzeba potem przechowywać. Dzięki użyciu mieszaniny pod postacią cieczy, rozłożenie paliwa w rdzeniu jest zawsze równomierne. Własności tej konstrukcji stanowią także o jej wysokiej konkurencyjności ekonomicznej.

Reaktor prędkości chłodzony sodem (SFR)

Schemat 5.

Reaktor chłodzony sodem (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR) wykorzystuje ciekły sód jako chłodziwo. Jako paliwo może wykorzystywać uraz zubożony. Pracuje w cyklu zamkniętym.

Cele stawiane SFR to zwiększenie efektywności wykorzystania uranu przez powielanie plutonu i wyeliminowanie konieczności wywozu produktów rozszczepienia jądra atomowego poza obiekt. Projekt zakłada niemoderowany rdzeń pracujący na neutronach prędkich, zaprojektowany, aby zapewnić możliwość przerobu dowolnego pierwiastka transuranowego (i w niektórych przypadkach użycia go jako paliwa). Oprócz korzyści z usunięcia długożyciowych nuklidów transuranowych z cyklu paliwowego, w przypadku prze-

grzania reaktora paliwo jądrowe rozszerza się termicznie i reakcja łańcuchowa automatycznie się zatrzymuje. W ten sposób reaktor ten z zasady działania staje się pasywnie bezpiecznym.

Reaktor prędkości chłodzony ołowiem (LFR)

Schemat 6.

Reaktor prędkości chłodzony ołowiem (Lead-cooled Fast Reactor, LFR) charakteryzuje się widmem neutronów prędkich oraz ołowiem lub eutektyką ołów-bismut (Lead-bismuth eutectic, LBE) jako ciekłym metalem chłodzącym rdzeń. Pracuje w zamkniętym cyklu paliwowym. Rozpatrywana jest budowa w formie prefabrykowanego rdzenia o długim okresie czasu pomiędzy wymianą paliwa, o mocy elektrycznej od 50 MWe do 150 MWe, system modułowy o mocy modułu od 300 MWe do 400 MWe oraz duża instalacja monolityczna elektrowni o mocy 1200 MWe. Paliwo jest w postaci metalicznej lub azotków i zawiera materiał paliworodny oraz transuranowce. LFR jest chłodzony dzięki naturalnej konwekcji z temperaturą chłodziwa na wyjściu ok. 500°C, ewentualnie do 800°C przy użyciu zaawansowanych materiałów. Wyższa temperatura pozwala na produkcję wodoru za pomocą procesów termochemicznych.

Tabela 2.

Podstawowe charakterystyki reaktorów IV Gen.

Technologia	widmo neutronów (prędkie/termiczne)	chłodziwo	temperatura (°C)	ciśnienie*	paliwo	cykl paliwowy	moc (MWe)	zastosowanie
GFR	prędkie	hel	850	wysokie*	U-238+	zamknięty	1200	elektryczność & produkcja wodoru
LFR	prędkie	ołów lub eutektyka Pb-Bi	480-570	niskie	U-238+	zamknięty	300-1200	elektryczność & produkcja wodoru
MSR	prędkie	sole fluorowe	700-800	niskie	UF	zamknięty	1000	elektryczność & produkcja wodoru
MSR AHTR	termiczne	sole fluorowe	750-1000	niskie	UO ₂	otwarty	1000-1500	produkcja wodoru
SFR	prędkie	sód	500-550	niskie	U-238 & MOX	zamknięty	50-150 600-1500	elektryczność
SWCR	termiczne lub prędkie	woda	510-625	bardzo wysokie	UO ₂	otwarty (termiczne) zamknięty (prędkie)	300-700 1000-1500	elektryczność
VHTR	termiczne	hel	900-1000	wysokie	UO ₂	otwarty	250-300	elektryczność & produkcja wodoru

* ciśnienie wysokie = 7-15 MPa
+ = z dodatkiem U-235 lub Pu-239

Zalety i wady reaktorów IV Generacji

W stosunku do obecnie stosowanej technologii elektrowni jądrowych korzyści zastosowania reaktorów IV Gen. obejmują:

- odpady jądrowe, których aktywność znacznie maleje w ciągu dekad zamiast mileniów,
- 100-300 razy większy uzysk energii z takiej samej ilości paliwa jądrowego,
- możliwość wykorzystania odpadów jądrowych do produkcji energii elektrycznej (co jest możliwe również w wielu użytkowanych reaktorach wcześniejszych generacji przy zastosowaniu zamkniętego cyklu paliwowego),
- zwiększone bezpieczeństwo użytkowania.

Wspólną wadą jakiegokolwiek nowej technologii reaktorowej jest możliwe początkowe zwiększenie ryzyka użytkowania, gdy operatorzy reaktora posiadają jeszcze niewielkie doświadczenie z nową technologią. Wytwarzanie, budowa, eksploatacja i utrzymanie nowych

reaktorów zmierzy się ze stromą krzywą uczenia się: zaawansowane technologie będą miały zwiększone ryzyko wypadków i błędów.

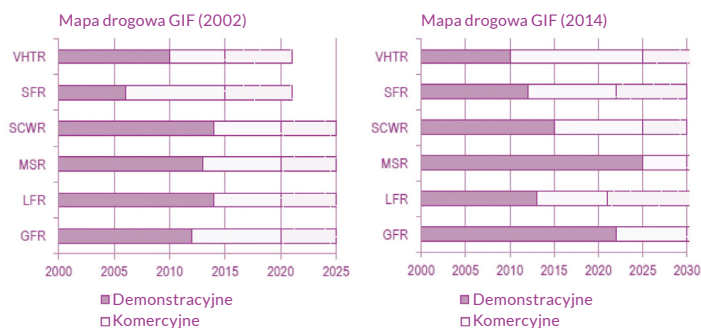
Państwa uczestniczą w tym programie ze względu na zerowe emisje CO₂, możliwość jednoczesnego użycia oraz powielenia paliwa jądrowego, zwiększone aspekty bezpieczeństwa oraz redukcję kosztów wybudowania i uruchomienia tego typu elektrowni, w porównaniu do dotychczas wdrażanych projektów. Jednak biorąc pod uwagę poziom skomplikowania nowej technologii i wysokie ryzyko związane z brakiem doświadczenia w jej eksploatacji należy spodziewać się, że ramy czasowe projektu będą przekraczać te zakładane na początku. Gdy już wszelkie bariery technologiczno-kadrowe zostaną pokonane, wciąż aktualne pozostaną aspekty polityczne, ekonomiczne oraz ocena opinii publicznej, które w takich projektach mogą niewątpliwie przesądzić o ich finalnym powodzeniu.

Energetyka jądrowa po raz kolejny przechodzi swój renesans, tym razem oferując rozwiązania bardziej skomplikowane, ale efektywniejsze oraz bezpieczniejsze.

Reaktory IV Generacji są przyjazne środowisku naturalnemu ze względu na wydłużony cykl paliwowy (z perspektywą jego zamknięcia) oraz możliwość wykorzystania w nich jako paliwa wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych powstających podczas eksploatacji elektrowni jądrowych poprzednich generacjach. W przyszłości należy być przygotowanym na sytuację, w której zasoby dostępnego na świecie uranu będą coraz mniejsze i będzie on coraz droższy. Oznacza to konieczność zwrotu ku ulepszonym technologiom jądrowym, które umożliwią zwiększenie wydajności energetycznej z 33 proc. do ok. 45-50 proc. Projekty reaktorów znajdują się dopiero w fazie prac badawczych, a ich komercyjne uruchomienie przewidywane jest na połowę bieżącego stulecia.

Wykres 1.

Perspektywa czasowa realizacji poszczególnych projektów reaktorów IV Gen.



Program jądrowy w Stanach Zjednoczonych

Stany Zjednoczone są największym na świecie producentem energii jądrowej i dysponują największą flotą reaktorów. Eksploatują 100 reaktorów energetycznych o całkowitej mocy 100,21 GWe, które dostarczają ok. 19,5% krajowej produkcji energii elektrycznej, w budowie znajdują się 4 bloki, a kolejnych 6 jest planowanych.

Niskie ceny gazu utrzymujące się od roku 2009 stawiają pod znakiem zapytania ekonomiczne uzasadnienie dla niektórych bloków jądrowych działających obecnie i przewidzianych do budowy.

Zmiany w polityce rządu, jakie zaszły od lat 90. przyczyniły się do znacznego wzrostu zdolności do produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych. Rząd i przemysł ściśle współpracują na rzecz szybkiego uzyskiwania zezwoleń na budowę nowych reaktorów i licencji na nowe konstrukcje.

1. Bilans energetyczny

Krajowa produkcja energii elektrycznej w 2014 r. wyniosła 4094 TWh, z czego 1582 TWh wyprodukowano w elektrowniach węglowych (38,6%), 1138 TWh w gazowych (27,8%), 797 TWh w jądrowych (19,5%), 259 TWh pochodziło z hydroelektrowni (6,3%) i 279 TWh (6,8%) z OZE. Udział energii jądrowej w bilansie energetycznym utrzymuje się na stałym poziomie i w roku 2015 wyniósł 19,5% (798 TWh). [1]

Współczynnik obciążenia bloków amerykańskich od roku 2001 stale utrzymuje się na poziomie powyżej 90%, w latach 70. wynosił 50%, 70% w 1991 r. i przekroczył 90% w roku 2002. W roku 2015 osiągnął rekordowy wynik 92,2%.

Obecnie w eksploatacji znajduje się 100 reaktorów, a ich całkowita moc wynosi 100,208 GWe. Prawie wszystkie wybudowane zostały

w latach 1967-1990. Do roku 2013 nie rozpoczęto budowy żadnego nowego reaktora. Spowodowane to było konkurencyjnością ekonomiczną elektrowni gazowych (gaz łupkowy) oraz brakiem poparcia społeczeństwa dla technologii jądrowej po awarii EJ Three Mile Island w roku 1979. Aktualnie w budowie znajdują się 4 reaktory (w czerwcu 2016 r. włączono do sieci EJ Watts Bar 2, której budowę wznowiono w 2007 r.) i do roku 2020 nie więcej niż 4 reaktory zostaną włączone do sieci energetycznej.

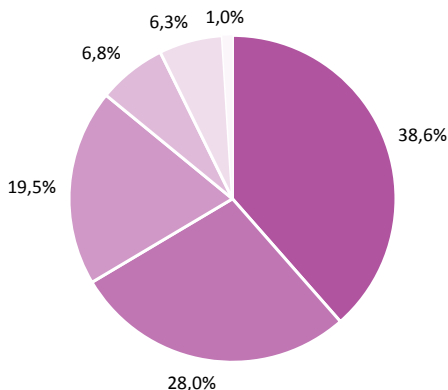
Przewiduje się, że węgiel pozostanie największym źródłem produkcji energii elektrycznej do roku 2035, chociaż do 2020 r. zamknięte zostaną elektrownie węglowe o sumarycznej mocy ok. 49 GWe, w wyniku ograniczeń ekologicznych i ich

niskiej efektywności oraz stałego spadku cen paliwa gazowego w stosunku do cen węgla. W roku 2014 USA zwiększyły zdolności wytwórcze w elektrowniach o 15,45 GWe, z czego 7,9 GWe oparte było o gaz (prawie wyłącznie w technologii CCGT¹). Dominacja tej technologii wynika z niskich cen gazu, ograniczeń dla emisji węgla i potrzeby zapewnienia mocy rezerwowej dla odnawialnych źródeł energii.

Aby zachować 20% udział energii jądrowej w bilansie energetycznym Stanów Zjednoczonych przy założeniu, że eksploatowane obecnie reaktory jądrowe zostaną wyłączone po 60 latach pracy, do roku 2030 konieczne będzie uruchomienie 22 GWe nowych mocy w elektrowniach jądrowych i 55 GWe do roku 2035.

Wykres 1.

Bilans energetyczny US w 2014 r.



12
1. Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) - układ elektrowni gazowo-parowej z turbiną gazową. Stanowi połączenie układu otwartego turbiny gazowej z układem turbiny parowej. Cechuje go bardzo wysoka sprawność,

sięgająca nawet 60%.
2. Była to trzecia z kolei elektrownia jądrowa uruchomiona na świecie. Pierwsza elektrownia na skalę eksperymentalną o mocy 5 MWe została włączona do sieci 27 czerwca

1954 roku w Obinińsku na terenie byłego ZSRR. Drugą elektrownię o mocy 50 MWe uruchomiono w roku 1956 w Calder Hall (UK).

2.

Energetyka jądrowa

Stany Zjednoczone były państwem pionierskim w dziedzinie rozwoju energetyki jądrowej. Podczas demonstracyjnego pokazu zorganizowanego 20 grudnia 1951 r. przez Argonne National Laboratory (ANL) zaświecono pierwsze cztery żarówki małej mocy, zasilane prądem elektrycznym wytworzonym przy pomocy reaktora jądrowego EBR-1, zlokalizowanego w National Reactor Testing Station w Idaho Falls. Reaktor EBR-1 był prototypem reaktorów chłodzonych ciekłym metalem.

W grudniu 1957 r. uruchomiono w Shippingport² pierwszą na świecie elektrownię jądrową, wyposażoną w reaktor wodny ciśnieniowy (PWR) o mocy 60 MWe. Firma Westinghouse zaprojektowała i zbudowała pierwszą, w pełni komercyjną elektrownię jądrową z reaktorem PWR o mocy 250 MWe w Yankee Rowe, która pracowała w latach 1960-1992. Równocześnie został opracowany przez ANL reaktor wodny wrzący (BWR) i pierwszy komercyjny reaktor tego typu Dresden 1 o mocy 250 MWe został w roku 1960 uruchomiony przez firmę General Electric.

W końcu lat 1960. rozpoczęto budowę reaktorów PWR i BWR o mocach ponad 1000 MWe, które

pozostają dotychczas w eksploatacji. Zdecydowana większość z nich została zbudowana w latach 1970. i 1980.

Rozwój energetyki jądrowej napotkał na znaczny opór ze strony społeczeństwa po awarii w EJ Three Mile Island w roku 1979 r. pomimo, iż wypadek w tej elektrowni wykazał skuteczność zasad bezpieczeństwa przyjmowanych w projektach reaktorów zachodnich, bowiem w wyniku tej awarii nikt nie został narażony na szkodliwe promieniowanie jonizujące. W efekcie wiele projektów elektrowni jądrowych zostało zawieszonych lub odwołanych.

Obecnie w Stanach Zjednoczonych eksploatowanych jest 100 reaktorów energetycznych w 61 elektrowniach o sumarycznej zainstalowanej mocy elektrycznej 100,208 GWe. Są to głównie bloki typu PWR II i III Gen oraz BWR, oddane do eksploatacji w latach 1960 do 1985:

- 66 reaktorów PWR;
- 34 reaktory BWR.

W Stanach Zjednoczonych obecnie w budowie znajdują się 4 reaktory energetyczne AP-1000 w 2 elektrowniach o sumarycznej projektowanej mocy 5 GWe.

Dalsze plany rozwoju energetyki jądrowej zakładają budowę w latach

2016-2028 kolejnych 6 reaktorów energetycznych o sumarycznej projektowanej mocy 7,71 GWe.

Średni wiek amerykańskich reaktorów energetycznych przekroczył 35 lat. Oznacza to, że niektóre technologie stosowane w elektrowniach jądrowych mają nawet po 50 lat i są przestarzałe. Największym wyzwaniem, przed jakim stoi amerykański przemysł jądrowy jest konieczność wymiany zużytych części i wprowadzenie nowoczesnych technologii. Dzięki prowadzeniu prac remontowych i modernizacyjnych projektowany 40-letni okres eksploatacji tych reaktorów jest sukcesywnie przedłużany o kolejne 20 lat.

Rządowa agencja Nuclear Regulatory Commission (NRC), która pełni rolę krajowego Dozoru Jądrowego, do lutego 2016 roku przedłużyła do 60 lat zezwolenie na pracę 83 reaktorów, a dla 11 jest w trakcie rozpatrywania takich wniosków. Przedłużenie okresu eksploatacji reaktora związane jest głównie z koniecznością wymiany wytwornic pary, pokryw zbiorników reaktorów oraz modernizacji systemów kontrolnych elektrowni, a także oceny procesu starzenia systemów bezpieczeństwa pasywnego.

2. W wydany w sierpniu 2015 r. dokumencie Clean Power Plan EPA zobowiązała wszystkie stany do redukcji CO₂ do 2030 r. o 32% w stosunku do roku

2005. Wypełnienie tych warunków nie będzie możliwe bez utrzymania udziału energetyki jądrowej w produkcji elektryczności przynajmniej na obecnym poziomie.

Tabela 1.

Wykaz reaktorów energetycznych eksploatowanych w US

Lp.	Elektrownia	Stan	Typ reaktora	Moc zainstalowana (netto) MWe
1.	Arkansas Nuclear One 1-2	Arkansas	2xPWR	834, 986
2.	Beaver Valley 1-2	Pennsylvania	2xPWR	920, 914
3.	Braidwood 1-2	Illinois	2xPWR	1178, 1152
4.	Browns Ferry 1-3	Alabama	3xBWR	1101, 1104, 1105
5.	Brunswick 1-2	North Carolina	2xBWR	938, 932
6.	Byron 1-2	Illinois	2xPWR	1164, 1136
7.	Callaway	Missouri	PWR	1193
8.	Calvert Cliffs 1-2	Maryland	2xPWR	866, 842
9.	Catawba 1-2	South Carolina	2xPWR	1140, 1150
10.	Clinton	Illinois	BWR	1065
11.	Columbia 2	Washington	BWR	1137
12.	Comanche Peak 1-2	Texas	2xPWR	1205, 1195
13.	Cooper	Nebraska	BWR	764
14.	Davis Besse	Ohio	PWR	894
15.	Diablo Canyon 1-2	California	PWR	1122, 1118
16.	Donald C. Cook 1-2	Michigan	2xPWR	1009, 1060
17.	Dresden 2-3	Illinois	2xBWR	884, 895
18.	Duane Arnold	Iowa	BWR	601
19.	Edwin I. Hatch 1-2	Georgia	2xBWR	876, 883
20.	Fermi 2	Michigan	BWR	1124
21.	Fort Calhoun*	Nebraska	PWR	479
22.	Ginna	New York	PWR	582
23.	Grand Gulf 1	Mississippi	BWR	1409
24.	H.B. Robinson 2	South Carolina	PWR	741
25.	Hope Creek 1	New Jersey	BWR	1172
26.	Indian Point 2-3	New York	2xPWR	1020, 1041
27.	James A. Fitzpatrick	New York	BWR	852
28.	Joseph M. Farley 1-2	Alabama	2xPWR	874, 883
29.	La Salle 1-2	Illinois	2xBWR	1135, 1136
30.	Limerick 1-2	Pennsylvania	2xBWR	1120, 1122

Lp.	Elektrownia	Stan	Typ reaktora	Moc zainstalowana (netto) MWe
31.	McGuire 1-2	North Carolina	2xPWR	1139, 1158
32.	Millstone 2-3	Connecticut	2xPWR	898, 1225
33.	Monticello	Minnesota	BWR	671
34.	Nine Mile Point 1-2	New York	2xBWR	636, 1301
35.	North Anna 1-2	Virginia	2xPWR	948, 944
36.	Oconee 1-3	South Carolina	3xPWR	847, 848, 859
37.	Oyster Creek 1	New Jersey	BWR	610
38.	Palisades	Michigan	PWR	789
39.	Palo Verde 1-3	Arizona	3xPWR	1311, 1314, 1312
40.	Peach Bottom 2-3	Pennsylvania	2xBWR	1259, 1283
41.	Perry 1	Ohio	BWR	1240
42.	Pilgrim 1	Massachusetts	BWR	678
43.	Point Beach 1-2	Wisconsin	2xPWR	596, 597
44.	Prairie Island 1-2	Minnesota	2xPWR	521, 519
45.	Quad Cities 1-2	Illinois	2xBWR	908, 911
46.	River Bend 1	Louisiana	BWR	969
47.	Salem 1-2	New Jersey	2xPWR	1170, 1158
48.	Seabrook 1	New Hampshire	PWR	1246
49.	Sequoyah 1-2	Tennessee	2xPWR	1152, 1126
50.	Shearon Harris 1	North Carolina	PWR	928
51.	South Texas Project 1-2	Texas	2xPWR	1280, 1280
52.	St. Lucie 1-2	Florida	2xPWR	981, 987
53.	Surry 1-2	Virginia	2xPWR	838, 838
54.	Susquehanna 1-2	Pennsylvania	2xBWR	1260, 1260
55.	Three Mile Island 1	Pennsylvania	PWR	803
56.	Turkey Point 3-4	Florida	2xPWR	802, 802
57.	V.C. Summer	South Carolina	PWR	971
58.	Vogtle 1-2	Georgia	2xPWR	1150, 1152
59.	Waterford 3	Louisiana	PWR	1164
60.	Watts Bar 1-2	Tennessee	PWR	1123, 1218
61.	Wolf Creek 1	Kansas	PWR	1175
W sumie 100 reaktorów				100,208 GWe

*EJ Fort Calhoun zostanie wyłączona do końca 2016 r.

Tabela 2.

Wykaz reaktorów energetycznych budowanych w US

Lp.	Elektrownia	Typ reaktora	Moc projektowana (brutto) MWe	Rozpoczęcie budowy	Planowane oddanie do eksploatacji
1.	Vogtle 3-4	AP-1000	2x1250	3/2013, 11/2013	2019,20
2.	Summer 2-3	AP-1000	2x1250	3/2013, 11/2013	2019, 20
Razem: 5 w budowie			Moc projektowana: 6,22 GWe		

Tabela 3.

Wykaz reaktorów energetycznych planowanych do budowy w US

Lp.	Elektrownia	Typ reaktora	Moc projektowana (brutto) MWe	Pozwolenie na budowę	Przewidywane oddanie do eksploatacji
1.	Wiliam States Lee 1-2	AP-1000	2x1250	12/2007	2024, 2026
2.	Turkey Point 1-2	AP-1000	2x1250	6/2009	2027, 2028
3.	South Texas Project 1-2	ABWR	2x1356	9/2007	2020.
Razem: 6 planowanych reaktorów			Moc projektowana: 7,71 GWe		

3.

Nowe technologie reaktorowe

Rozwój energetyki jądrowej w US jest uwarunkowany zarówno geopolitycznie jak i ekonomicznie, redukuje bowiem zależność państwa od importu ropy i gazu oraz pozwala zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych nakazaną przez rządową agencję ochrony środowiska Environmental Protection Agency (EPA)³. Także koszty operacyjne w istniejących w USA instalacjach jądrowych są bardzo konkurencyjne w stosunku do innych źródeł energii. W 2012 r. wynosiły one 2,4 ¢/kWh w porównaniu do gazu 3,4 ¢/kWh i węgla 3,3 ¢/kWh.

Rząd Stanów Zjednoczonych ściśle współpracuje z przemysłem jądrowym w celu zwiększenia zdolności wytwórczych w elektrowniach jądrowych. W tym celu NRC prowadzi certyfikację projektów zaawansowanych reaktorów Gen. III. Oznacza to, że po wydaniu takiego certyfikatu technicznego (design certification) ważnego przez 15 lat, dany typ reaktora może być budowany w dowolnym miejscu na terenie USA po spełnieniu konkretnych warunków lokalizacyjnych niezbędnych do uzyskania zezwolenia na budowę.

Obecnie taki certyfikat posiadają następujące typy zaawansowanych

reaktorów energetycznych:

- ABWR – zaawansowany reaktor z wodą wrzącą (BWR) firmy GE Hitachi o mocy 1300-1500 MWe. Kilkanaście takich reaktorów pracuje w Japonii. Dwa reaktory tego typu planowane są do budowy w EJ South Texas Project.
- AP1000 – zaawansowany reaktor pasywny z wodą pod ciśnieniem (PWR) firmy Westinghouse o mocy 1200-1300 MWe. Jest to pierwszy reaktor Gen. III+, w technologii modułowej i czasie budowy 36 miesięcy. Cztery reaktory tego typu budowane są w Chinach i cztery w USA.
- ESBWR – ekonomiczny uproszczony reaktor z wodą wrzącą (BWR) firmy GE Hitachi o mocy 1600 MWe. Jest to rozwinięta uproszczona wersja ABWR wyposażona w pasywne systemy bezpieczeństwa. Reaktory tego typu proponowane są do budowy w kilku lokalizacjach na terenie Stanów Zjednoczonych.

W trakcie procesu certyfikacji NRC znajdują się następujące typy reaktorów:

- US-APWR – zaawansowany reaktor z wodą pod ciśnieniem

(PWR) firmy Mitsubishi o mocy 1700 MWe. Niemal identyczny reaktor EU-APWR posiada certyfikat bezpieczeństwa wydany przez UE w październiku 2014 r.

- APR-1400 – zaawansowany reaktor z wodą pod ciśnieniem (PWR) konstrukcji koreańskiej o mocy 1455 MWe. Reaktory tego typu budowane są w Republice Korei i Zjednoczonych Emiratach Arabskich.
- WWER-1200 – zaawansowany reaktor z wodą pod ciśnieniem (PWR) konstrukcji rosyjskiej o mocy 1150 MWe budowany obecnie w dwóch lokalizacjach na terenie Rosji.
- projekty reaktorów modułowych małej mocy (small modular reactors, SMR) następujących typów:
 - mPower – firmy Babcock & Wilcox o mocy 180 MWe;
 - SMR-160 – firmy Holtec o mocy 160 MWe;
 - NuScale – firmy NuScale Power o mocy 45 MWe
 - Xe-100 – firmy X-energy o mocy 50 MWe
 - SVBR-100 – firmy AKME-Engineering o mocy 100 MWe.

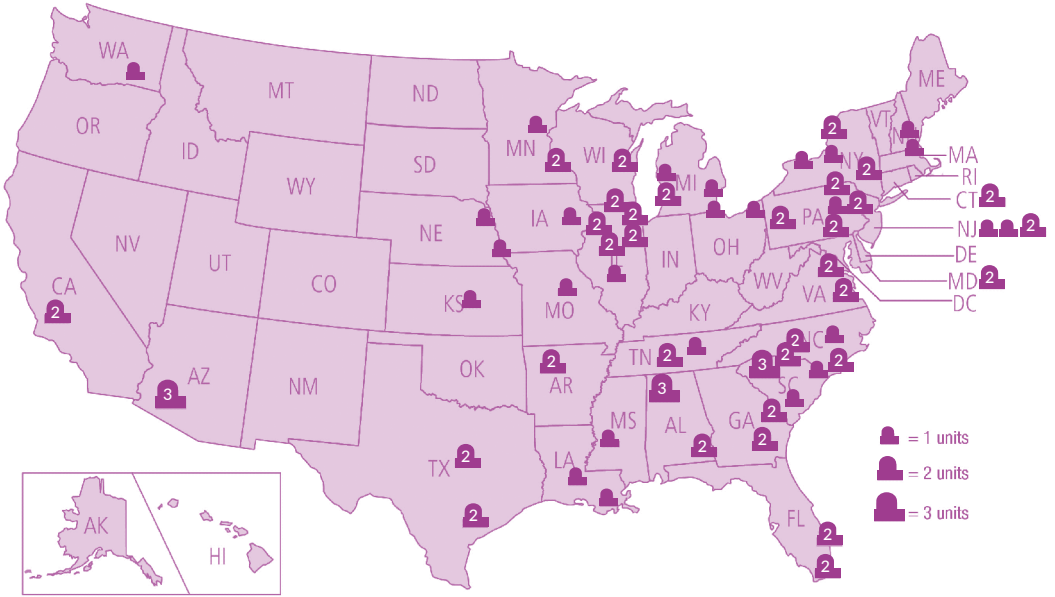
3. SMR są reaktorami o mocach nie przekraczających 300 MWe, zaprojektowanymi w technologii modułowej, budowanymi w zakładzie produkcyjnym (fabryce), co umożliwi ich produkcję seryjną i znaczne skrócenie czasu oddawania do użytku. Na miejsce przyszłej eksploatacji

przywożone byłyby już załadowane paliwem i praktycznie gotowe do użycia. DOE przewiduje, że jeśli uda się w ciągu najbliższej dekady wprowadzić SMR na skalę komercyjną, to odegrają one bardzo ważną rolę w rozwiązywaniu problemów bezpieczeństwa energetycznego, wysokich kosztów

inwestycji jądrowych oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych. DOE obecnie wspiera przygotowania do przeglądu pierwszego projektu SMR, opracowanego przez NuScale, który został złożony do NRC w celu uzyskania certyfikatu technicznego.

Mapa 1.

Rozmieszczenie elektrowni jądrowych w USA



4.

Programy badawczo-rozwojowe w dziedzinie energii jądrowej

Po 20-letnim okresie stagnacji rząd Stanów Zjednoczonych zaczął przeznaczać duże fundusze na prace badawczo-rozwojowe w zakresie nowych technologii reaktorowych, które mają odbudować wiodącą pozycję USA w dziedzinie energii jądrowej. Zaangażowanie rządu w energię jądrową pozostaje wyższe niż w jakiegokolwiek innym dział gospodarki.

Politykę rządu w dziedzinie energii jądrowej koordynuje utworzony w roku 1977 Departament Energii (Department of Energy, DOE). Jego zakres odpowiedzialności obejmuje m.in. wyznaczanie kierunków i finansowanie programów energetycznych (nie tylko jądrowych, ale też w obszarze paliw kopalnych, hydroelektrowni oraz OZE). Kieruje on także (często za pomocą kontraktów w sektorze prywatnym) siecią 21 rządowych laboratoriów rozmieszczonych na terytorium kraju (z największym Idaho National Laboratory, INL). Oprócz odpowiedzialności za cywilny sektor energii jądrowej nadzoruje on także zastosowania militarne energii jądrowej poprzez National Nuclear Security Administration (NNSA), będące częścią DOE. Większość programów federalnych dotyczących cywilnych zastosowań energii jądrowej jest prowadzona przez Biuro Energii Jądrowej DOE – DOE's Office of Nuclear Energy.

Do priorytetowych projektów rządowych należą następujące programy i inicjatywy:

4.1.

Inicjatywa na rzecz zaawansowanego cyklu paliwowego (Advance Fuel Cycle Initiative - AFCI).

Program ten ma na celu opracowanie nowych technologii dotyczących cyklu paliwowego, które umożliwią bezpieczne zarządzanie wysokoaktywnymi odpadami promieniotwórczymi oraz doprowadzą do uniknięcia produkcji plutonu w instalacjach cywilnych, bardziej efektywnego wykorzystywania energii zawartej w paliwie jądrowym i opracowania nowych cykli paliwowych dla elektrowni jądrowych następnej generacji.

Prace badawcze prowadzone w ramach AFCI obejmują opracowanie nowych technologii do separacji składników wypalonego paliwa (głównie pochodne procesu UREX) i transmutacji najbardziej radiotoksycznych izotopów (pluton oraz pomniejsze aktywnowce: kiur, ameryk i neptun) do mniej groźnych pierwiastków, które można bezpiecznie składować lub przerabiać na paliwo do reaktorów prędkich.

4.2.

Reaktory IV generacji (Generation IV Nuclear Systems Initiative - Gen IV).

Inicjatywa ta ma na celu rozwijanie

nowych systemów reaktorów, które mogą być uruchomione w ciągu przyszłych 20 lat. DOE wspiera badania nad sześcioma projektami reaktorów nowej generacji:

- reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem (VHTR);
- reaktor chłodzony wodą w stanie nadkrytycznym (SCWR);
- reaktor na stopione sole (MSR);
- reaktor prędko chłodzony gazem (GFR);
- reaktor prędko chłodzony ołowiem (LFR) oraz
- reaktor prędko chłodzony sodem (SFR).

W ramach tej inicjatywy wysoki priorytet nadany jest pracom nad reaktorem wysokotemperaturowym VHTR, który został wybrany jako reaktor referencyjny do budowy elektrowni jądrowej nowej (następnej) generacji. Reaktory tego typu mogą być w przyszłości wykorzystywane do produkcji zarówno elektryczności jak i wodoru na dużą skalę, lecz nie będą mieć takich zdolności do wypalania przerobionego paliwa z reaktorów termicznych, jakie posiadają reaktory prędkie.

4.3.

Reaktory modułowe małej mocy (Small Modular Reactors - SMR).

Program ten zakłada opracowanie i uzyskanie certyfikatu technicznego NRC dla jednego lub dwóch reaktorów lekkowodnych małej

mocy o budowie modułowej oraz przyspieszenie ich komercyjnego zastosowania w oparciu o zasadę podziału kosztów z przemysłem (cost-share basis). Na jego realizację DOE ma przeznaczyć w latach 2012-2017 452 mln USD.

Opracowany dla DOE w roku 2011 przez University of Chicago Energy Policy Institute (EPIC) raport stwierdza, że rozwój reaktorów małej mocy może stworzyć okazję dla USA do odzyskania części światowego rynku technologii jądrowych, utraconego w ciągu ostatnich kilkunastu lat, na rzecz firm z innych krajów, które w tym czasie rozwinęły na pełną skalę produkcję i eksport reaktorów energetycznych. Pomimo, iż niezbędne do pełnej analizy szczegółowe dane techniczne i kalkulacje finansowe były wykonane zaledwie w 10-20% i żadna z firm amerykańskich nie wyszła jeszcze poza fazę planowania inwestycji, to mimo wszystko we wnioskach stwierdza się, że SMR-y mogą znacznie złagodzić ryzyko finansowe związane z budową dużych elektrowni jądrowych (1 GWe) i potencjalnie konkurować z innymi źródłami energii⁴.

O wsparcie finansowe DOE w zakresie programu uruchomienia SMR ubiegało się sześć firm amerykańskich: Westinghouse, Babcock & Wilcox, Holtec, NuScale Power, General Atomics i Hybrid Power Technology. Pierwszą transzę, wynoszącą 111 mln USD w roku 2012 otrzymał projekt reaktora mPower o mocy 180 MWe firmy B & W. Został on w roku 2014 przejęty od B & W przez firmę BWX Technologies Inc.

Drugą transzę w wysokości 217 mln USD otrzymał w roku 2013 projekt reaktora NuScale o mocy 45 MWe opracowanego przez firmę NuScale Power. Reaktor demonstracyjny ma być uruchomiony do roku 2024 w należącym do DOE Idaho National Laboratory (INL). Będzie on następnie rozbudowany

do komercyjnej elektrowni zawodowej składającej się z 12 modułów (540-600 MWe), zbudowanej w pobliżu m. Columbia w stanie Waszyngton, która ma kosztować ok. 3 mld USD (5000 USD/kW).

Dodatkowo w marcu 2012 r. DOE zawarł porozumienie z trzema firmami, wyrażającymi zainteresowanie prowadzeniem prac nad wdrożeniem technologii SMR: Hyperion z projektem reaktora prędkiego o mocy 25 MWe, Holtec z reaktorem PWR o mocy 140 MWe i NuScale Power ze wspomnianym wyżej reaktorem PWR o mocy 45 MWe.

Firmy budujące oraz potencjalni użytkownicy małych reaktorów modułowych 27 stycznia 2016 r. podpisali porozumienie ramowe w sprawie utworzenia konsorcjum SMR Smart mającego na celu przyspieszenie komercjalizacji projektów SMR.

W skład konsorcjum weszły takie firmy jak: BWX Technologies Inc, Duke Energy, Energy Northwest, Holtec, NuScale, PSEG Nuclear, Southern Co, SCANA i Tennessee Valley Authority (TVA). Organizacja ma reprezentować zrzeszone firmy w relacjach z amerykańskim Dozorem Jądrowym (NRC) i Kongresem w sprawach dotyczących SMR. Projekt te wspierany jest także przez Nuclear Energy Institute (NEI).

Działalność konsorcjum SMR Smart skupiona będzie głównie na projektach opartych na sprawdzonych reaktorach lekkowodnych. W kręgu zainteresowania zrzeszonych firm są kraje, których sieci energetyczne są niedostosowane do budowy dużych bloków jądrowych, a którym zależy na dostępie do niezawodnej i bezemisyjnej energii elektrycznej.

4.4. Produkcja wodoru (Nuclear Hydrogen Initiative - NHI).

Program ten zakłada opracowanie metody produkcji wodoru na skalę przemysłową przy zastosowaniu

ciepła procesowego uzyskanego z energii jądrowej. Do tego celu posłużą mają reaktory wysokotemperaturowe chłodzone gazem (HTR).

W ramach projektu na Uniwersytecie Tekszańskim w kampusie Andrews ma powstać reaktor wysokotemperaturowy chłodzony helem Modular Helium Reactor (MHR) zaprojektowany przez General Atomics przy współpracy z Sandia National Laboratory. Koszt programu szacowany jest na 500 mln \$.

4.5. Elektrownia jądrowa następnej (nowej) generacji (Next generation Nuclear Plant - NGNP).

Program budowy elektrowni jądrowej następnej (nowej) generacji zakłada zbudowanie do roku 2021 prototypowego reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego gazem (HTR) i skojarzonej z nim instalacji do produkcji energii elektrycznej bądź wodoru. W dokumencie rządowym The Energy Policy Act z 2005 r. wyznaczono Idaho National Laboratory na lidera projektu budowy NGNP oraz w celu zaangażowania sektora prywatnego do jego finansowania ustanowiono międzynarodowe konsorcjum NGNP Industry Alliance, które obejmuje większość dostawców reaktorów i ich przyszłych potencjalnych użytkowników.

W lutym 2012 r. konsorcjum wybrało reaktor SC-HTGR konstrukcji Arevy, jako optymalny projekt dla przyszłej elektrowni. W roku 2014 r. doszło do porozumienia pomiędzy NGNP Industry Alliance i europejską inicjatywą European Nuclear Cogeneration Industrial Initiative (NC2I) w sprawie wspólnych działań na rzecz komercjalizacji technologii HTR. Laboratorium INL jest zaangażowane w prace badawcze mające na celu ustalenie możliwości integracji modułowych reaktorów wysokotemperaturowych z procesami chemicznymi i przemysłowymi

Tabela 4.

Zaawansowane technologie SMR w USA

Nazwa	Moc [MWe]	Typ	Konstrukcja
NuScale	45	integral PWR	NuScale Power + Fluor
Westinghouse SMR	225	integral PWR	Westinghouse
mPower	180	integral PWR	Babcock & Wilcox + Bechtel
SMR-160	160	PWR	Holtec
Prism	311	FNR chłodzony sodem	GE-Hitachi

Tabela 5.

Technologie SMR w fazie projektowej w USA

Nazwa	Moc [MWe]	Typ	Konstrukcja
EM2	240	HTR, FNR	General Atomics
Xe-100	48	HTR	X-energy
Gen4 module	25	FNR	Gen4 (Hyperion)
STAR-LM,H2 SSTAR	175	FNR chłodzony ołowiem i bizmutem	Argonne National Laboratory
ARC-100	100	FNR chłodzony sodem	Idaho National Laboratory
4s	10, 50	FNR chłodzony sodem	Toshiba, Westinghouse
MCFR	?	MSR/FNR	Southern Co
PB-FHR	100	MSR	UC Berkeley
ThorCon MSR	250	MSR	Martingale



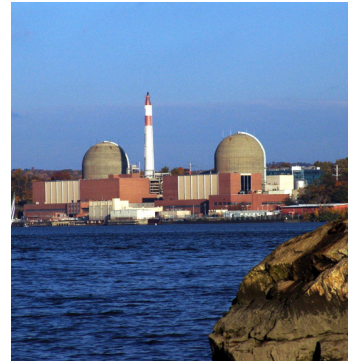
Fotografia 1.

Clinton Power Station
NRC File Photo copyright ENergy Nuclear (cc)



Fotografia 2.

Diablo Canyon Nuclear Power Plant
NRC File Photo copyright ENergy Nuclear (cc)



Fotografia 3.

Indian Point Nuclear Generating
NRC File Photo copyright ENergy Nuclear (cc)



Fotografia 4.

Big Rock Point NRC
NRC File Photo copyright ENergy Nuclear (cc)



Fotografia 5.

Callaway Plant NRC
NRC File Photo copyright ENergy Nuclear (cc)



Fotografia 6.

La Crosse NRC
NRC File Photo copyright ENergy Nuclear (cc)



Fotografia 7.

Three Mile Island, NRC File Photo
copyright ENergy Nuclear (cc)

oraz opłacalności ekonomicznej takich przedsięwzięć.

4.6.

Reaktory na stopione sole (Molten Salt Reactors)

Koncepcja reaktorów chłodzonych stopionymi solami opracowana została w latach 1960. w Oak Ridge National Laboratory jako część programu Manhattan. Celem tych badań było skonstruowanie reaktora zdolnego wytwarzać więcej paliwa niż sam zużywa (powielającego). Ponieważ w późniejszych latach okazało się, że uranu na Ziemi jest pod dostatkiem projekty reaktorów powielających stopniowo porzucono.

Obecnie dostrzega się powrót do badań nad takimi reaktorami z uwagi na zainteresowanie państw możliwością użycia w nich toru jako materiału paliworodnego (do produkcji rozszczepialnego U-233) oraz wypalania zużytego paliwa z reaktorów lekkowodnych. Światowym liderem w badaniach nad reaktorami na stopione sole są obecnie Chiny, niemniej jednak w chińskim projekcie aktywnie uczestniczy również Departament Energii (Oak Ridge NL), który w 2011 r. podpisał porozumienie ramowe o współpracy z China Academy of Sciences (CAS).

W Stanach Zjednoczonych konsorcjum obejmujące UC Berkeley, ORNL i Westinghouse opracowuje projekt reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego solami fluoru Fluoride High-temperature Reactor (FHR) znanego także jako zaawansowany reaktor wysokotemperaturowy (AHTR)⁵. Podobny konstrukcyjnie do reaktora chłodzonego gazem (HTR) pracuje on pod niższym ciśnieniem (poniżej 1 atmosfery), w wyższej temperaturze (750-1000°C) i zapewnia lepszy odbiór ciepła niż hel. Projekt ten przewiduje budowę reaktora

o mocy 100 MWe o budowie modułowej.

Departament Energii wspiera projekty reaktorów na stopione sole i w lutym 2016 r. wybrał dwa projekty, które uzyskały wsparcie finansowe. Są to: zaawansowany reaktor wysokotemperaturowy z rdzeniem usypanym chłodzony gazem (HTGR) Xe-100 firmy X-energy oraz reaktor prędkości chłodzony stopionymi solami (MCFR) firmy Southern Company Services. Kwota przeznaczona na wsparcie prac badawczych wynosi 80 mln. USD. Projekty zostały wybrane w drodze konkursu w ramach ogłoszonej w listopadzie 2015 r. kolejnej inicjatywy DOE - Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN).

Firma X-energy współpracuje przy konstrukcji reaktora Xe-100 z BWX Technology, Oregon State University, Teledyne-Brown Engineering, SGL Group, Idaho National Laboratory i Oak Ridge National Laboratory. Reaktor ten z uwagi na swoje małe rozmiary i zaawansowane cechy bezpieczeństwa przewidziany jest do instalacji w gęsto zaludnionych obszarach.

Firma Southern Company Services współpracuje przy pracach nad reaktorem MCFR z TerraPower, Electric Power Research Institute, Vanderbilt University i Oak Ridge National Laboratory.

Oba projekty znajdują się w kręgu zainteresowań DOE, bowiem wpisują się w politykę Stanów Zjednoczonych przechodzenia na niskoemisyjne systemy energetyczne (transitions to a low-carbon energy).

4.7.

Wzbogacanie uranu za pomocą lasera

Wzbogacanie laserowe uranu (Laser Isotope Separation, LIS) wykorzystuje zjawisko absorpcji fali świetlnej o różnej długości przez różne izotopy pierwiastka

i polega na naświetlaniu mieszaniny izotopów uranu promieniem lasera o takiej długości, która powoduje wzbudzenie jedynie izotopu U-235. Istnieją dwie odmiany tej metody: atomowa (Atomic Vapor Laser Isotope Separation, AVLIS) i cząsteczkowa (Molecular Laser Isotope Separation, MLIS).

W metodzie AVLIS światło lasera powoduje fotojonizację poszczególnych atomów uranu znajdujących się w parach (gazie) uranu metalicznego. Za pomocą światła lasera o pewnej częstotliwości z atomu może zostać wybitý pojedynczy elektron i nastąpi jego jonizacja. Odpowiednio dobierając częstotliwość światła można w ten sposób zjonizować izotop U-235 nie powodując jonizacji U-238. Dodatnio naładowane jony U-235 zostają następnie gromadzone na ujemnie naładowanej elektrodzie – następuje separacja izotopów uranu, czyli jego wzbogacenie (w U-235)⁶.

W metodzie MLIS światło lasera powoduje fotodysocjację cząsteczki gazu UF_6 (oderwanie jednego atomu fluoru) do postaci jonu UF_5^+ , który jest ciałem stałym. Podobnie jak w metodzie atomowej dobierając odpowiednio częstotliwość światła lasera można w ten sposób przeprowadzić do postaci UF_5^+ jedynie cząsteczki UF_6 zawierające U-235 nie naruszając struktury cząsteczkowej gazu UF_6 zawierającego izotop U-238. Wypadające z gazu jony UF_5^+ są następnie filtrowane (gromadzone jako proszek na filtrze) i następuje w ten sposób separacja izotopów U-235 i U-238.

W latach ubiegłych wiele państw starało się opanować technologie laserowe do wzbogacania uranu, lecz z uwagi na konieczność budowy zaawansowanych systemów laserowych nie wyszły one z etapu badań laboratoryjnych i zostały zaniechane. Obecnie jedynym procesem, który zakończył

się sukcesem i przeszedł z fazy pilotażowej do budowy zakładów komercyjnych jest proces molekularny SILEX (ang. Separation of Istopess by Laser EXcitation). Został opracowany przez australijskich naukowców M. Goldsworthy'ego i H. Struve'a, którzy w 1994 r. przedstawili jego zasady i założyli firmę Silex Systems Ltd (SSL) w celu wykorzystania zaprezentowanej technologii do wzbogacania uranu. W 2006 r. licencję na stosowanie metody SILEX zakupił koncern GE. W latach 2007 i 2008 dołączyły do niego firmy Hitachi i Cameco i utworzono wspólne przedsięwzięcie Global Laser Enrichment (GLE). W 2010 r. pomyślnie zakończono pilotażowy program wdrażania technologii SILEX do wzbogacania uranu, uruchomiony w zakładach Global Nuclear Fuels (GNF) w Wilmington (North Carolina, USA). Koncern planuje przeprowadzenie powyższego projektu w dwóch etapach. Po zakończeniu programu testowego i uzyskaniu zdolności do wzbogacania uranu do 5 % ²³⁵U ma nastąpić uruchomienie zakładów wzbogacania uranu na skalę przemysłową. Szacunkowy koszt ich wybudowania ocenia się na 1 mld USD. W październiku 2012 r. GLE uzyskało od amerykańskiej komisji dozoru jądrowego (NRC) zgodę na uruchomienie komercyjnego zakładu wzbogacania uranu metodą SILEX o wydajności do 6

mln SWU/rok. Koncern rozważa dwie możliwości lokalizacji takich zakładów – rozbudowę istniejącej instalacji w Wilmington albo budowę zakładów Paducah Laser Enrichment Facility (PLEF) w Paducah, (Kentucky, USA), gdzie byłby wzbogacany odpad (115.000 ton DU) zgromadzony w mieszczących się tam w przeszłości, zamkniętych zakładach wzbogacania uranu metodą dyfuzji gazowej, który zawiera 0,34% U-235.

Szczegóły technologii SILEX chronione są tajemnicą zarówno przemysłową, jak i związaną z możliwością jej wykorzystania do celów militarnych. Wszyscy zatrudnieni przy jej stosowaniu muszą mieć certyfikat dostępu do informacji niejawnych wydany przez Departament Energii (DOE) na poziomie „Q” (najwyższy z możliwych) i muszą być obywatelami USA.

Idea separacji izotopów uranu za pomocą technologii SILEX oparta jest na zastosowaniu lasera gazowego CO₂ o długości fali 10,8 μm do wzbudzania cząsteczek gazu UF₆. Impulsy świetlne tego lasera są dostrajane do długości fali 16 μm i następnie służą do oświetlenia gazu nośnego zawierającego UF₆, rozprężanego w bardzo niskiej temperaturze z dyszy z prędkością naddźwiękową. Impuls świetlny z lasera penetruje gaz, powodując wzrost energii drgań (wzbudzenie) tylko tych cząsteczek UF₆, które

zawierają U-235. Wzbudzone cząsteczki w wyniku oddziaływania z cząsteczkami gazu nośnika odrzucane są w kierunku granicy strumienia gazu, skąd mogą zostać odpompowane. Następuje w ten sposób separacja dwóch strumieni gazu UF₆: zawierający U-235 (wzbogacony) i U-238 (zubożony, DU).

Technologia SILEX jest bardzo atrakcyjna pod względem komercyjnym i konkurencyjna w stosunku do metody wirówek gazowych. Wydajność wzbogacania jest na tyle duża, że wystarczą trzy stopnie w kaskadzie, aby uzyskać wzbogacenie 5% U-235. Zużywane jest przy tym ok. 20% mniej energii elektrycznej w stosunku do metody wirówkowej. Ponadto urządzenia do wzbogacania zajmują mniejszą powierzchnię oraz zapewniają niższą emisję substancji szkodliwych dla otoczenia. Komercyjne wprowadzenie tej technologii pozwoli znacznie obniżyć koszt paliwa jądrowego, co będzie miało zasadnicze znaczenie dla dalszego rozwoju energetyki jądrowej.

Technologia wzbogacania laserowego może być wykorzystywana w przyszłości także do redukcji znacznych zapasów zubożonego uranu zgromadzonych jako odpad w zakładach wzbogacania uranu, który może zastąpić uran naturalny wydobywany z kopalń.⁷

5. Mieszanina stopionych soli (zwykle fluorki litu, berylu i cyrkonu) jako chłodziwem jest bardziej efektywna do usuwania ciepła z rdzenia reaktora niż sprężony hel, pozwalając tym samym na zmniejszenie rozmiarów rdzenia i redukcję ilości pomp i rurociągów w stosunku do reaktorów z helem jako chłodziwem.

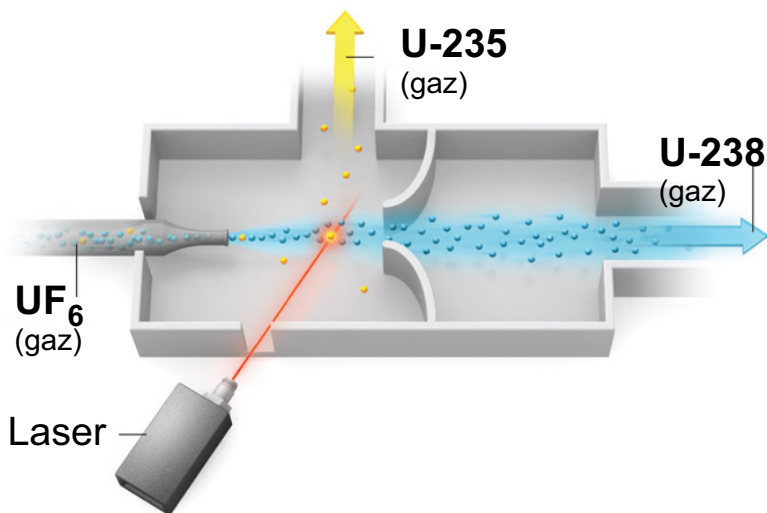
6. Za pomocą technologii AVLIS można również dokonywać separacji izotopów plutonu.

7. Ponowne wzbogacanie (re-enrichment) zubożonego uranu (DU) pozwala zmniejszyć zapotrzebowanie na uran naturalny niezbędny do produkcji uranu wzbogaconego. Na świecie dotychczas zgromadzono ok.

1,3 mln ton DU, który wciąż zawiera ok. 0,3-0,4 % ²³⁵U. Wykorzystując nadwyżkę zdolności zakładów wzbogacania uranu można te zapasy ponownie wzbogacać do poziomu uranu naturalnego (0,7% ²³⁵U), pozostawiając w odpadach zaledwie 0,1 % ²³⁵U.

Schemat 1.

Schemat ideowy separacji izotopowej z użyciem lasera



5.

Jądrowy cykl paliwowy

Stany Zjednoczone realizują politykę otwartego jądrowego cyklu paliwowego bez przerobu wypalonego paliwa. Krajowa produkcja paliwa jądrowego jest niewystarczająca w stosunku do potrzeb energetyki jądrowej. Planowana jest rozbudowa nowego zakładu wzbogacania. Obecnie prawie cała ilość uranu dla reaktorów komercyjnych pochodzi z importu – krajowa produkcja pokrywa jedynie 10% zapotrzebowania na paliwo uranowe.

5.1.

Wydobycie i produkcja uranu

USA posiadają znaczne ilości rud uranu. Zasoby rozpoznane⁸ (ang. Known Recoverable Resources) na ich terytorium przy koszcie wydobycia nie przekraczającym 130 USD/kgU wynoszą ogółem 207400 tU [7], co stanowi ok. 4 % zasobów światowych (5,9 mln tU).

W latach 1950-80 Stany Zjednoczone wydobywały znaczne ilości uranu (16800 tU w roku 1980) z ponad 250 kopalń. Obecnie wydobycie uranu prowadzone jest na małą skalę przez niewiele firm wydobywczych i energetyka jądrowa w USA pozyskuje ten surowiec głównie poprzez jego import z Kanady, Kazachstanu i Australii. Dodatkowym źródłem uranu jest także wysokowzbogacony (HEU) uran klasy zbrojeniowej pochodzący z redukowanych zapasów wojskowych, który jest następnie rozcieńczany

do zastosowań energetycznych.⁹

Wydobycie uranu prowadzone jest przede wszystkim w stanie Wyoming (Wyoming's Powder River Basin) oraz w stanach Utah, Nebraska i Teksas. W roku 2015 wyniosło ono 1256 tU, co pozwoliło pokryć jedynie 6% krajowego zapotrzebowania.

W roku 2015 amerykańskie koncerny energetyczne zakupiły 25909 ton koncentratu uranowego (U_3O_8), z czego 24364 ton (94%) pochodziło ze źródeł zagranicznych: Kanada – 7682 t (29%), Kazachstan – 4773 t (18%), Australia – 4409 t (17%), Rosja – 4136 t (16%) oraz z Namibii, Uzbekistanu, Nigru i RPA. [5]

5.2.

Konwersja uranu

Jedynym zakładem konwersji uranu w USA są zakłady Honeywell Metropolis Works (MTW) zlokalizowane w pobliżu m. Metropolis, IL nad rzeką Ohio. Zostały one zbudowane w latach 50. XX w. na potrzeby programu broni jądrowej, a produkcję cywilną rozpoczęto w latach 60. Obecnie posiadają zdolność do produkcji 17600 tU (w postaci UF_6) rocznie, a do roku 2020 ma ona wzrosnąć do 23000 tU. Wyłącznym dostawcą UF_6 produkowanego w tych zakładach jest firma ConverDyn.

5.3.

Wzbogacanie uranu

Stany Zjednoczone posiadają jeden

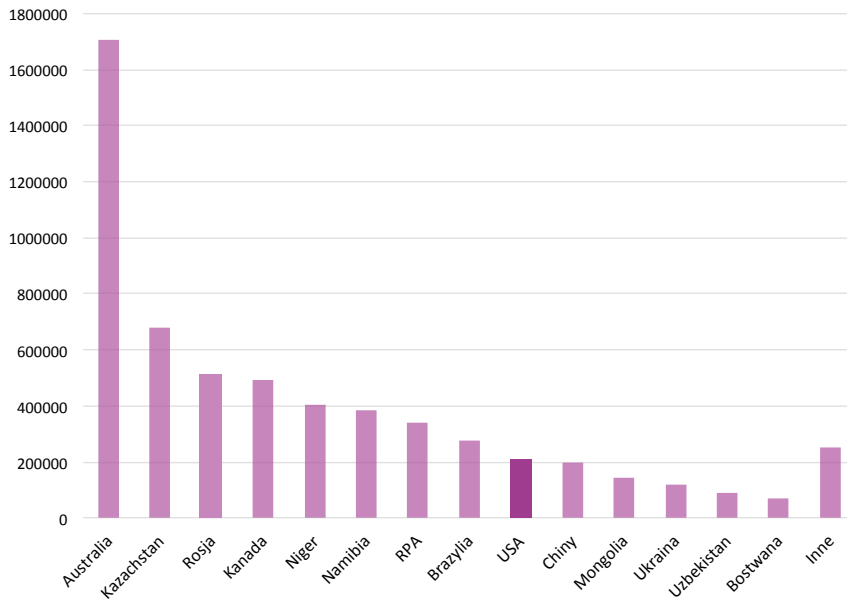
zakład wzbogacania uranu zlokalizowany w m. Eunice, NM, którego właścicielem jest międzynarodowy koncern Urenco USA (UUSA). W zakładach tych stosowane są wirówki gazowe 5 i 6 generacji typu TC-12, TC-12+ i TC-21 wykorzystywane również w innych zakładach tego koncernu w Europie. Obecnie wydajność zakładów wynosi 3,7 mln SWU¹⁰, co pokrywa zaledwie ok. 28% krajowego zapotrzebowania na tę usługę (13 mln. SWU w roku 2014). Pozostałe zapotrzebowanie pokrywane jest ze źródeł zagranicznych (w tym z Chin i Rosji).

Zakłady w Eunice są stale rozbudowywane i mają osiągnąć wydajność 5,7 mln SWU w roku 2022. Dalsze plany rozwoju przewidują docelowo pokrycie 60% krajowego zapotrzebowania na wzbogacanie uranu poprzez uzyskanie zdolności 10 mln SWU. Ponadto zakłady Urenco USA planują w przyszłości wykorzystywać, w charakterze wsadu, odpady z dotychczasowych procesów wzbogacania, a także podjąć współpracę z Korea Electric Power Corporation (KEPCO) przy rozbudowie swoich obiektów.

W przeszłości USA dysponowały znacznymi zdolnościami wzbogacania, które znajdowały się w posiadaniu przedsiębiorstwa United States Enrichment Corporation (USEC). Dysponowało ono dwoma zakładami wzbogacania zlokalizowanymi w m. Paducah, Ky i Portsmouth,

Wykres 2.

Rozpoznane światowe zasoby uranu [tU] o koszcie wydobycia < 130 USD/kgU [2]



Wykres 3.

Wydobyte uranu na świecie w 2015 r. w tU [3]

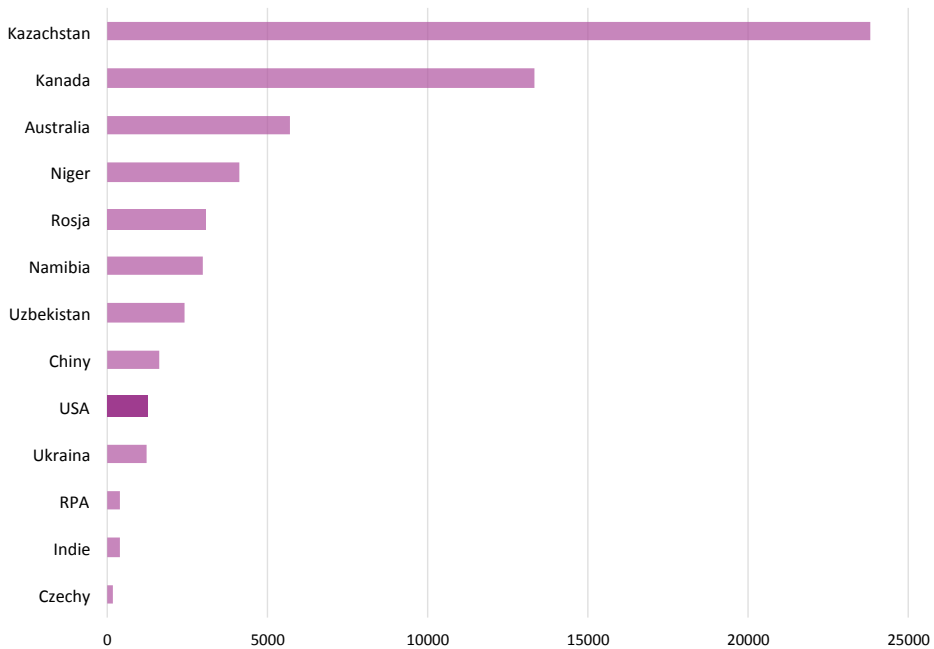


Tabela 6.

Produkcja uranu w Stanach Zjednoczonych [4]

Przedsiębiorstwo	Projekt wydobywczy, stan	Metoda wydobywania	Wydobycie [tU]		
			2013	2014	2015
Cameco	Smith Ranch – Highland, WY	ISL	646	815	556
Cameco	Crow Butte, NE	ISL	272	227	152
Uranium One	Willow Creek, WY	ISL	362	217	45
EFRC	Nichols Ranch, WY	ISL	0	77	105
Ur-Energy	Lost Creek, WY	ISL	51	211	280
UEC	Hobson – La Palangana, TX	ISL		10	4
EFRC	White Mesa, WY	górnicza	388	362	114
Razem:			1796	1919	1256

Tabela 7.

Zdolności USA w zakresie wzbogacania uranu [4]

Firma Lokalizacja	Typ	Status	Wydajność (mln SWU/rok)	Rozpoczęcie pracy	Produkcja przemys- łowa
Urenco/LES Eunice	Wirówki Urenco	Działający w rozbudowie	3.7 - 5,7 - 10	2010	2015
USEC Piketon	American Centrifuge	Budowa przerwana	3.8	2010 planowano, obecnie wstrzymana	
Areva Idaho Falls	Wirówki Urenco	Inwestycja wstrzymana	3.0 - 6.6	?	
GEH/GLE Wilmington	Laser	Propozycja	3.5 - 6.0	?	
GEH/GLE Paducah	Laser	Propozycja	0.5-1.0	2018	

Ohio, które wykorzystywały energochłonną technologię dyfuzji gazowej. Zakłady w Paducah, o wydajności 8 mln SWU jako ostatnie zostały zamknięte w maju 2013 roku po ponad 60 latach działania. Firma USEC dysponowała również technologią zaawansowanych wirówek gazowych 6 generacji American Centrifuge Technology (ACT), która została opracowana w Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Wirówki typu AC-100 planowano rozmieścić w zakładach American Centrifuge Plant (ACP) w m. Piketon, Ohio. Pilotażowa kaskada tych wirówek została uruchomiona w marcu 2010 r.

Spadek cen usług wzbogacania uranu, jaki nastąpił po awarii w Fukushima w 2011 r. spowodował bankructwo firmy USEC, która ogłosiła upadłość w roku 2013. W wyniku tego bankructwa Stany Zjednoczone utraciły zdolność wzbogacania uranu na skalę przemysłową. Po restrukturyzacji długów w październiku 2014 r. powstała nowa korporacja Centrus Energy Corporation (CEC), która przejęła aktywa USEC, w tym technologię ACT. Na początku 2016 r. zakończono trzyletni test niezawodnościowy kaskady 120 wirówek AC-100 rozmieszczonych w Piketon i następnie zakład pilotowy został zamknięty. Obecnie firma w ograniczonym zakresie współpracuje z US DOE nad rozwojem technologii wzbogacania uranu za pomocą wirówek gazowych, w celu odzyskania zdolności niezbędnych do zachowania bezpieczeństwa narodowego i dla celów komercyjnych, w ośrodku badawczym w Oak Ridge, TE.

Stany Zjednoczone dużą uwagę przykładają także do badań nad rozwojem technologii laserowych do wzbogacania uranu. Obiecująca pod tym względem jest technologia SILEX, która rozwijana jest przy wsparciu DOE przez firmę GE-HI-

tachi (GEH) i nosi nazwę handlową Global Laser Enrichment (GLE). Firma GEH obecnie eksploatuje testową instalację GLE w zakładach Global Nuclear Fuel (GNF) w Wilmington, NC i zamierza zbudować zakłady GLE w Paducah. Celem tej inwestycji byłoby wzbogacanie odpadów zubożonego uranu, które zgromadzono w czasie pracy instalacji stosującej metodę dyfuzji gazowej. Odpady te zawierają 0,34% U-235 i mają być wzbogacane do poziomu uranu naturalnego 0,7% U-235. Pozwoli to w dłuższej perspektywie zastąpić uran pochodzący z kopalń i ograniczyć tym samym jego wydobycie.

Próby wejścia na rynek amerykański podejmował w latach 2007-2013 francuski koncern Areva, który w roku 2011 otrzymał od NRC zezwolenie na budowę zakładu wzbogacania uranu Eagle Rock Enrichment Facility (EREF) w Idaho Falls. Prace konstrukcyjne miały rozpocząć się w roku 2012 i zakończyć w roku 2014, a docelową zdolność 6,6 mln SWU planowano uzyskać w roku 2018. Jednak Areva ogłosiła w roku 2013, że poszukuje dodatkowego inwestora i wstrzymuje projekt na czas nieokreślony.

Duży udział na amerykańskim rynku usług wzbogacania uranu posiada rosyjski koncern Tenex. Dostarczał on w latach 1994-2013 ok. 5,5 mln SWU/rok w ramach programu likwidacji nadmiaru uranu klasy zbrojeniowej Megatons to Megawatts (M2M). W marcu 2011 r. Tenex zawarł kolejną umowę z USEC na dostawy 21 mln SWU w formie LEU w latach 2013-2022 za kwotę 2,8 mld \$. Została ona w roku 2015 przedłużona do roku 2026. Od roku 2009 Tenex zawiera dodatkowo także indywidualne umowy z poszczególnymi operatorami elektrowni jądrowych na dostawy usługi wzbogacania.

5.4.

Dekonwersja uranu

Dekonwersja zubożonego uranu (DUF_6), pozostającego jako produkt uboczny w procesie wzbogacania, jest w Stanach Zjednoczonych prowadzona na niewielką skalę. Traktowany jest on często jako bezużyteczny odpad i dotychczas zgromadzono tam ponad 700000 ton zubożonego UF_6 .

W latach 2002-2011 przedsiębiorstwo Uranium Disposition Services LLC (UDS) będące konsorcjum firm Areva, EnergySolutions i Burns & Roe w ramach kontraktu finansowanego przez DOE zbudowało dwa zakłady dekonwersji uranu: w Portsmouth, Ohio o wydajności 13500 tU/rok i Paducah, Ky o wydajności 18000 tU/rok. Wykorzystywano w nich technologię Arevy, która stosowana jest także w jej zakładach w Richland, Wa i Lingen, Niemcy. Oba zakłady eksploatowane są przez konsorcjum Babcock & Wilcox Conversion Services, które wygrało w 2010 r. pięcioletni przetarg na konwersję uranu, finansowany przez DOE. Wydajność obu zakładów wynosi ok. 20000 tU/rok.

W grudniu 2009 r. firma International Isotopes (INIS) złożyła propozycję budowy zakładu konwersji DUF_6 oraz odzysku fluoru, zlokalizowanego w pobliżu m. Hobbs, NM. Zakłady te miały prowadzić działalność w oparciu o surowiec pochodzący z zakładów wzbogacania Urenco USA (UUSA) znajdujących się w pobliżu miejscowości Eunice. Początkowo planowana wydajność zakładów wynosiła 3600 tU/rok i miała wzrosnąć do 6950 tU/rok w roku 2016, lecz w roku 2015 firma INIS wstrzymała działalność na czas nieokreślony, aż do momentu, gdy wydajność wzbogacania w zakładach UUSA wzrośnie na tyle, że proces konwersji stanie się opłacalny.

Oprócz wspomnianych projektów

UUSA zawarło porozumienie na dekonwersję DUF₆ z koncernem Areva, który eksploatuje niewielki zakład dekonwersji w swoich zakładach produkcji paliwa w Richland, Wa.

5.5.

Produkcja paliwa jądowego

Produkcja paliwa uranowego dla elektrowni jądowych odbywa się w pięciu zakładach będących własnością czterech koncernów międzynarodowych:

- Areva w Lynchburg, VA i Richland, WA;
- B&W Nuclear Operations Group w Lynchburg, VA;
- Global Nuclear Fuel-Americas w Wilmington, NC;
- Westinghouse Electric Company w Columbia, SC.

Dodatkowo firma CBI-Areva MOX Services w ramach realizacji programu likwidacji nadwyżki plutonu klasy zbrojeniowej (Plutonium Disposition Program) buduje zakłady produkcji paliwa MOX (MFFF) w pobliżu Aiken w okolicy Savannah River Site, SC należącym do DOE. Konstrukcja tych zakładów podobna jest do zakładów Melox zlokalizowanych w ośrodku badań jądowych Marcoule we Francji. Zakłady MFFF, których właścicielem będzie rządowa agencja National Nuclear Security Administration (NNSA) mają mieć zdolność przerobu 3,5 tPu/rok (150 zestawów paliwa MOX). Budowa zakładów rozpoczęta w roku 2007 miała początkowo zakończyć się w roku 2016 i pierwsze zestawy paliwa MOX przeznaczone do zasilania reaktorów BWR i PWR planowano wyprodukować w roku 2018, jednak z uwagi na zmiany w projekcie i rosnące koszty inwestycji termin uruchomienia produkcji przesunięto na rok 2019. Dodatkowo na początku 2016 r. DOE próbowało przerwać program likwidacji plutonu za pomocą paliwa MOX zastępując

go technologią obniżania zawartości Pu-239 (downblending), aby mógł być następnie ostatecznie przechowywany w składowisku odpadów promieniotwórczych Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) w Nowym Meksyku. Ponieważ wymagałoby to renegocjacji porozumienia z Rosją w sprawie pozbycia się plutonu, decyzja o wstrzymaniu programu produkcji paliwa MOX ostatecznie nie zapadła, a Stany Zjednoczone wypełniły swoje zobowiązania, lecz dokonają oceny innych alternatywnych metod likwidacji zbędnych zapasów plutonu¹¹. W międzyczasie firma CBI-Areva MOX Services kontynuuje budowę zakładów MFFF i zaawansowanie prac w roku 2016 ocenia się na 70%. Paliwo MOX wyprodukowane w zakładach MFFF planowane jest do zasilania reaktorów w EJ Catawba i McGuire.

W maju 2013 r. Areva podpisała umowę z amerykańskim operatorem elektrowni jądowych Exelon na produkcję paliwa jądowego typu Atrium™ 11 dla elektrowni Dresden i Quad w stanie Illinois. Umowa przewiduje również kontynuowanie produkcji paliwa dla elektrowni w Three Mile Island w stanie Pensylwania. Na mocy zawartego porozumienia, począwszy od 2016 r. Areva ma dostarczyć 12 załadunków do czterech bloków zlokalizowanych w Dresden i Quad. Grupa zaopatrzy także elektrownię Three Mile Island w 6 kolejnych wsadów oraz zapewni na jej terenie dalsze świadczenie usług inżynierskich. Paliwo będzie produkowane w zakładach Richland, w stanie Waszyngton.

W lipcu 2014 r. sześciu amerykańskich operatorów jądowych powołało techniczną radę doradczą w zakresie wdrażania nowej generacji zespołów paliwowych GAIA, zaprojektowanych przez firmę Areva dla reaktorów wodnych ciśnieniowych. Operatorzy ci,

włącznie z Dominion, Duke Energy, Exelon i PSEG chcą działać na rzecz wprowadzania innowacji technicznych oraz popularyzowania nowej generacji paliwa na rynku amerykańskim. Paliwo tego typu od 2012 r. jest stosowane z powodzeniem w EJ Ringhals w Szwecji. Wprowadzenie paliwa GAIA spowoduje podniesienie bezpieczeństwa i obniżenie kosztów eksploatacji bloków jądowych. Innowacyjna konstrukcja paliwa zapewni wyższy stopień wypalenia dzięki zwiększonej odporności na niszczenie warstwy wierzchniej przez korozję (fretting), lepszemu działaniu w wysokiej temperaturze i zwiększonej tolerancji na trzęsienie ziemi. Konstrukcja posiada również zaawansowaną koszulkę paliwową, która będzie spełniała mające wejść w życie zmiany w zakresie amerykańskich wymagań regulacyjnych.

W lipcu 2016 r. rosyjski koncern paliwowy TVEL zawarł porozumienie z GE-Hitachi (GEH) i Global Nuclear Fuel-Americas (GNF-A) w sprawie wykorzystania swojego paliwa typu TVS-Kwadrat w amerykańskich reaktorach typu PWR. Utworzone konsorcjum tych firm ma zapewnić przeprowadzenie testów nowego paliwa i uzyskanie od NRC niezbędnej licencji na jego stosowanie. Ma być ono początkowo produkowane w zakładach TVEL Elektrostal pod Moskwą, a następnie wytwarzane wspólnie z GNF-A w Wilmington, NC. [6]

5.6.

Przerób wypalonego paliwa

Stany Zjednoczone przyjęły politykę otwartego cyklu paliwowego i w roku 1997 realizując program przeciwdziałania rozprzestrzenianiu się (prolifracji) broni jądowej wprowadziły zakaz przerobu wypalonego paliwa. W przeszłości Stany Zjednoczone dysponowały pewnymi zdolnościami do przerobu wypalonego paliwa w ramach pro-

gramu militarnego oraz zbudowały trzy cywilne zakłady przerobu w West Valley, NY, Morris, IL i Barnwell, SC. Zostały one zamknięte zgodnie z polityką nieproliferycyjną rządu i są obecnie demontowane. Jedynym ośrodkiem, który zachował zdolność do przerobu wypalonego paliwa jądrowego jest obecnie zakład H-Canyon znajdujący się w kompleksie Savannah River, należącym do DOE.

Od roku 2011 przerabiane jest w nim paliwo wysokowzbożone (HEU), pochodzące z reaktorów badawczych znajdujących się na terytorium USA i w innych państwach, które zostały przystosowane do pracy na paliwie niskowzbożonym (LEU) lub zamknięte w ramach programu ograniczania stosowania uranu wysokowzbożonego Global Threat Reduction Initiative (GTRI).

Od roku 2002 zachodzą pewne zmiany w polityce energetycznej USA zwiększające prawdopodobieństwo wznowienia procesu przerobu wypalonego paliwa. W tym kierunku zmierza program rozwoju zaawansowanego cyklu paliwowego Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) kierowany przez DOE. Zakłada on użycie w przyszłości reaktorów prędkich do niszczenia (wypalania) izotopów długożyciowych znajdujących się w odpadach promieniotwórczych. Będą one pracować w cyklu zamkniętym i mają być zasilane paliwem pochodzącym z przerobu wypalonego paliwa. Głównymi argumentami przemawiającymi za wznowieniem przerobu paliwa jest możliwość zmniejszenia ilości odpadów promieniotwórczych i uniknięcie potrzeby zwiększenia pojemności planowanego składowiska w Yucca Mountain oraz odzyskiwanie energii zawartej w wypalonym paliwie. W działania na rzecz wznowienia przerobu paliwa zaangażowane są również organizacje pozarządowe

takie jak: American Nuclear Society i Nuclear Energy Institute, które wyrażają opinie, iż przemysł jądrowy USA potrzebuje planu przerobu wypalonego paliwa, aby zmniejszyć radiotoksyczność wytwarzanych i zgromadzonych dotychczas odpadów promieniotwórczych, tak aby w relatywnie krótkim czasie powróciła ona do poziomu rudy uranu.

Rozwój nowych technologii przerobu wypalonego paliwa i odpadów promieniotwórczych stał się głównym elementem rządowej inicjatywy z roku 2006 w sprawie globalnego partnerstwa państw Global Nuclear Energy Partnership (GNEP), mającej na celu zmniejszenie ryzyka proliferacji jądrowej. W ramach tego partnerstwa Stany Zjednoczone i inne państwa posiadające zaawansowany przemysł jądrowy (Chiny, Francja, Japonia i Rosja) mają rozwijać takie technologie przerobu wypalonego paliwa, które będą odporne na możliwość nielegalnego ich wykorzystania do budowy broni jądrowej (proliferation-resistant). Ponadto będą dostarczać państwom rozwijającym energetykę jądrową paliwo do reaktorów pod warunkiem, że zobowiążą się one do nieangażowania się w proces wzbogacania uranu i przerób wypalonego paliwa (tzw. technologie wrażliwe). W roku 2009 DOE wstrzymał finansowania tej inicjatywy i skoncentrował się na wspieraniu badań w ramach programu AFCI.¹²

Nowe zaawansowane technologie przerobu paliwa mają uniemożliwić wykorzystanie odzyskiwanych materiałów rozszczepialnych do budowy broni jądrowej, w szczególności mają zapobiegać gromadzeniu czystego plutonu¹³. W tym celu procesy przerobu projektowane są w taki sposób, aby pluton był odzyskiwany z domieszką uranu lub razem z innymi aktywnocami (neptun, ameryk, i kiur), czyniąc go przez to nieprzydatnym do zastosowań militarnych. Do takich procesów

należą technologie NUEX i UREX+ opracowane przez Argonne National Laboratory oraz COEX i GANEX – stosowane przez Arewę¹⁴. Dalszy rozwój technologii przerobu paliwa wiąże się z koniecznością budowy zakładów produkcji nowego rodzaju paliwa wykorzystującego materiały promieniotwórcze uzyskane z recyklingu oraz zaawansowanych reaktorów (prędkich lub sterowanych akceleratorem), w których paliwo to będzie mogło być wykorzystane.

W ostatnim okresie coraz większe zainteresowanie wzbudza technologia pirometalurgicznego przetwarzania paliwa (ang. pyroprocessing). Wykorzystuje ona szereg wysokotemperaturowych procesów elektrochemicznych do przerobu paliwa (tzw. suchy proces). Technologia ta była przedmiotem badań już w latach 60. XX w. w ramach prac nad produkcją paliwa do reaktorów powielających. Obecnie nastąpił powrót do tej koncepcji w związku z koniecznością optymalizacji sposobu zarządzania odpadami promieniotwórczymi.

Najbardziej zaawansowany projekt opracowała w 2002 r. firma Argonne West (Idaho, USA). Obecnie w państwach rozwijających energetykę jądrową (USA, Japonia, Rosja, Indie, Chiny) trwają prace nad możliwością zastosowania tej technologii na skalę przemysłową. Także KE w 2008 r. uruchomiła program badań nad jej wykorzystaniem do recyklingu aktywnoców (ACSEPT).

W roku 2010 Korea Płd. nawiązała współpracę ze Stanami Zjednoczonymi w zakresie wykorzystania pyroprocessingu do przerobu paliwa i rozpoczęła budowę, za zgodą MAEA, specjalistycznego laboratorium Advanced Spent Fuel Conditioning Process Facility (ACPF)¹⁵ do badań nad tą technologią. Laboratorium ukończono w 2011 r. i w kolejnym etapie przewiduje się

powstanie pilotażowego zakładu przerobu wypalonego paliwa Korea Advanced Pyroprocessing Facility (KAPF), w którym ma rozpocząć się próbny proces przerobu z wykorzystaniem powyższej metody na skalę przemysłową.

5.7. Likwidacja obiektów jądrowych

Do roku 2015 w Stanach Zjednoczonych zamknięto 35 prototypowych i komercyjnych reaktorów energetycznych. Spośród nich 12 zostało już całkowicie zdemontowanych, a teren przekazano do użytkowania bez żadnych ograniczeń (opcja Decon¹⁴). Pozostałe znajdują się w różnych fazach rozbiórki, lub w oczekiwaniu na jej rozpoczęcie, co pozwala firmom energetycznym na gromadzenie odpowiednich funduszy na ten cel. Wg raportu NRC z 2013 r. operatorzy EJ zgromadzili dotąd 45,7 mld \$, co jest kwotą wystarczającą na pokrycie kosztów demontażu wszystkich elektrowni planowanych do wyłączenia.

5.8. Gospodarka odpadami promieniotwórczymi

W zakresie postępowania z odpadami promieniotwórczymi Stany Zjednoczone od 1977 r. stosują politykę zakazu przerobu wypalonego paliwa i traktowania go jako wysokoaktywnego odpadu promieniotwórczego (HLW), przy czym zgodnie z Nuclear Waste Policy Act z 1982 r. rząd federalny od roku 1998 odpowiedzialny jest za ostateczne składowanie takich odpadów w głębokich formacjach geologicznych. W roku 1987 na takie miejsce składowania wyznaczono masyw górski Yucca Mountain w Nowadzie. W roku 2008, po wieloletnim okresie opóźnień i nieudanych próbach uzyskania akceptacji Kongresu USA, DOE przedstawił wniosek do NRC o wydanie zezwolenia na

budowę składowiska. Projekt ten jest badany pod względem zachowania bezpieczeństwa jądrowego i ochrony środowiska, napotyka na opór zarówno ze strony władz federalnych¹⁷ jak i stanu Nevada oraz opinii publicznej i wciąż nie uzyskał ostatecznej aprobaty NRC.

Ponieważ proces tworzenia centralnego składowiska odpadów wysokoaktywnych wciąż znajduje się w fazie uzyskiwania pozwolenia na budowę, wypalone paliwo przechowywane jest w tymczasowych mokrych przechowalnikach znajdujących się na terenie poszczególnych elektrowni. Rocznie rozładowywane jest 2000-2400 ton zużytego paliwa i dotychczas zgromadzono 72000 ton paliwa w 74 lokalizacjach na obszarze 34 stanów. Z uwagi na ograniczoną pojemność takich przechowalników paliwo przenoszone jest sukcesywnie do przechowalników suchych (23000 ton w 2015 r.).

Wielu producentów energii elektrycznej pożywa rząd federalny za niewywiązywanie się z obowiązku odbierania zużytego paliwa i sądy przyznają im odszkodowania za konieczność przechowywania tego paliwa. DOE szacuje wysokość zobowiązań rządu na 23,7 mld \$ (do września 2015 r. wypłacono 5,3 mld \$).

Stany Zjednoczone posiadają także pewne ilości odpadów wysokoaktywnych pochodzących z programu militarne, które są przechowywane w Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) mieszczącym się w pobliżu m. Carlsbad, NM. Do roku 2013 zgromadzono tam ok. 85000 m³ odpadów. Składowisko to początkowo planowane do zamknięcia w roku 2030 ma być czynne do 2055 roku.

W zakresie odpadów niskoaktywnych (LLW) na terytorium USA działa kilka przedsiębiorstw, które posiadają licencje NRC na przecho-

wywanie tego rodzaju odpadów.

Należą do nich m.in.:

- Waste Control Specialists – zarządza składowiskiem Texas Compact Facility w Andrews County, NM;
- Energy Solution – zarządza składowiskami w Clive, Utah i Barnwell, SC oraz w Bear Creek, Tennessee;
- American Ecology Corp – zarządza składowiskiem w Richland, Waszyngton.

8. Zasoby rozpoznane (zidentyfikowane) obejmują zasoby racjonalnie pewne (ang. Reasonably Assured Resources - RAR) i zasoby przypuszczalne (ang. Inferred Resources - IR).

9. W roku 1993 zawarto porozumienie pomiędzy USA i Rosją o przekształceniu broni jądrowej w paliwo do produkcji energii elektrycznej znane pod nazwą Megatons to Megawatts (M2M). Rosja zadeklarowała zmniejszenie o 500 ton swoich zasobów militarnego HEU (ekwiwalent ok. 20 tys. ładunków), natomiast USA o 210 ton. W ramach tego projektu amerykańska firma USEC Inc podpisała 20 – letnią umowę z rosyjskim przedsiębiorstwem Tenex na import HEU pochodzącego ze zdemontowanych głowic jądrowych. Realizacja powyższego projektu pozwoliła otrzymać 15 tys. ton LEU dla celów energetyki jądrowej, co jest równoważne 140-150 tys. ton uranu naturalnego wydobywanego z kopalń. Porozumienie wygasło w 2013 r. i strona rosyjska nie wyraziła zainteresowania jego przedłużeniem.

10. Wydajność procesu wzbogacania mierzy się w jednostkach pracy rozdzielania (Separative Work Unit - SWU). Jest to złożona funkcja ilości przetworzonego uranu i uzyskanego stopnia jego wzbogacenia oraz poziomu zubożenia odpadów. Ma ona wymiar masy i wyraża się w kg SWU. Przedstawia ona ilość energii używanej do wzbogacenia do pewnego poziomu danej ilości uranu wyrażonej w kg. Przyjmuje się, że do wyprodukowania rocznego zapasu

paliwa dla typowego lekkowodnego reaktora energetycznego o mocy 1 GWe wymagane jest ok. 140 000 kg SWU.

11. Agencja NNSA w raporcie z 2014 r. oprócz tych dwóch opcji rozważała również możliwość pozbycia się nadmiarowego plutonu poprzez jego wypalenie w reaktorach prędkich, zatopienie go w materiale ceramicznym lub szkłe i ostateczne składowanie na terenie Idaho National Laboratory albo jego bezpośrednie składowanie w szczelnie zamkniętych głębokich odwiertach geologicznych na głębokości poniżej 2 km.

12. W czerwcu 2010 r. partnerstwo GNEP zostało przekształcone w nową międzynarodową inicjatywę polityczną International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC), której celem jest wspieranie rozwoju energetyki jądrowej z zachowaniem wysokich standardów w zakresie bezpieczeństwa, ochrony fizycznej i nieprolifracji. W 2015 r. sekretariat techniczny IFNEC przeniesiono z DOE do agencji NEA OECD.

13. Dotychczas przez ponad pół wieku do przerobu wypalonego paliwa powszechnie stosowana była metoda PUREX (Plutonium-Uranium extraction proces), która umożliwia odzyskiwanie oddzielnie uranu i plutonu. Część materiału promieniotwórczego została zużyta do produkcji paliwa MOX, niemniej jednak na świecie zgromadzono ponad 240 ton niewykorzystanego plutonu reaktorowego (Reactor Grade Plutonium - RGPu). Pluton

ten nie jest odpowiedni i zbyt niedogodny do budowy ładunku jądrowego, lecz mimo to traktowany jest jako znaczne zagrożenie proliferacyjne [7].

14. W roku 2013 Areva opracowała plan budowy w Morris, IL kompleksu zawierającego zakłady przerobu paliwa i produkcji paliwa MOX jednak NRC nie podjęła prac nad opracowaniem regulacji prawnych niezbędnych do uruchomienia takiego przedsięwzięcia.

15. Laboratorium to wchodzi w skład koreańskiego instytutu energii jądrowej KAERI i mieści się w dużym kompleksie ośrodków badawczych zlokalizowanym w m. Daejeon.

16. W USA oprócz opcji natychmiastowej likwidacji EJ (Decon) istnieje jeszcze strategia Safstor, która zakłada demontaż EJ dopiero po okresie, w którym aktywność materiałów promieniotwórczych ulegnie znacznemu zmniejszeniu oraz strategia Entomb gdzie EJ pozostaje wyłączona i demontaż jest możliwy dopiero, gdy poziom promieniowania obniży się do poziomu dopuszczalnego dla nieograniczonego wykorzystania zajmowanego terenu.

17. Administracja Prezydenta Obamy w roku 2009 obcięła większość funduszy na jego realizację i ogłosiła przerwanie projektu. Dopiero werdykt federalnego sądu apelacyjnego z roku 2013 nakazał NRC kontynuację procesu wydawania licencji na budowę składowiska.

6. Zagadnienia nieproliferacyjne

Stany Zjednoczone są jednym z 5 państw nuklearnych w rozumieniu Układu o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej (NPT), które ratyfikowało Układ NPT w 1968 r. Zgodnie z Porozumieniem o Systemie Zabezpieczeń NPT (safeguards) podpisanym z Międzynarodową Agencją Energii Atomowej (MAEA) w 1972 r. wszystkie cywilne obiekty jądrowe znajdują się pod nadzorem Agencji i są wykorzystywane wyłącznie do celów pokojowych. W 1998 r. został podpisany Protokół Dodatkowy do tego porozumienia zwiększający uprawnienia inspekcyjne MAEA.

USA aktywnie działa na arenie międzynarodowej w zakresie przeciwdziałania rozprzestrzenianiu się broni jądrowej i bierze udział w systemie kontroli eksportu materiałów jądrowych poprzez uczestniczenie w inicjatywach takich jak: Komitet Zanggera i Grupa Dostawców Jądrowych.

Źródła

Reaktory Jądrowe IV generacji

[1] Generation IV Nuclear Reactors, WNA, August 2016

[2] Annual Report 2014, GIF

[3] Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, January 2014

Program jądrowy w Stanach Zjednoczonych

[1] Country profile: Nuclear Power in the USA, WNA, June 2016

[2] Uranium 2014: Resources, Production and Demand, OECD/NEA-IAEA, 2014

[3] World Uranium Mining Production, WNA, May 2016

[4] US Nuclear Fuel Cycle, WNA, May 2016

[5] 2015 Uranium Marketing Annual Report, EIA, May 2016

[6] Alliance brings Russian fuel to US market, WNN, 24 May 2016

[7] Global Fissile Material Report 2015, IPFM, December 2015



MINISTERSTWO ENERGII

