



Materiał informacyjny

opracowany przez Departament Energii Jądrowej

Ministerstwa Energii

Maj 2017

MAŁE REAKTORY MODUŁOWE

– ALTERNATYWA DLA DUŻYCH OBIEKTÓW JĄDROWYCH CZY ICH UZUPEŁNIENIE?

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania blokami jądrowymi małej i średniej mocy, przeznaczonymi do produkcji energii elektrycznej i ciepła procesowego. Celem jest zmniejszenie kosztów inwestycji oraz dostarczenie energii elektrycznej do rejonów, gdzie budowa dużych sieci energetycznych jest utrudniona lub nieuzasadniona ekonomicznie. Rozpatrywane są różnorodne modele oparte o rozmaite technologie. Wśród nich dominują reaktory lekkowodne, bazujące na wieloletnich doświadczeniach z eksploatacji okrętów podwodnych o napędzie jądrowym.

Małe reaktory modułowe (*Small Modular Reactors - SMR*) są definiowane jako reaktory o mocy do 300 MWe, wytwarzane seryjnie w zakładach produkcyjnych i dostarczane w całości na miejsce docelowej eksploatacji. Pozwala to wykorzystać efekt ekonomiczny skali produkcji seryjnej oraz uzyskać relatywnie krótki czas budowy.

W zależności od lokalnych potrzeb, można tworzyć małe i większe kompleksy energetyczne. Spowodowane jest to głównie wzrostem kosztów kapitałowych występujących przy budowie dużych bloków jądrowych (o mocach powyżej 1 GWe) oraz koniecznością zapewnienia dostaw energii w małych sieciach energetycznych poniżej 4 GWe, a także w rejonach odległych lub niedostępnych (Arktyka, Alaska, Grenlandia, archipelagi wysp oceanicznych). Małe reaktory mogą występować pojedynczo lub w grupie wielu modułów oddawanych sukcesywnie do eksploatacji, przez co cała inwestycja staje się łatwiejsza do sfinansowania.

Dodatkowym czynnikiem leżącym u podstaw wzrostu zainteresowania reaktorami klasy SMR jest fakt, iż mogą one zastępować stopniowo demontowane, wyeksploatowane elektrownie węglowe, których moce zwykle nie przekraczają 500 MWe. W USA elektrownie węglowe wycofane z eksploatacji w latach 2010-12 posiadały moce średnio 97 MWe, a przewidziane do wyłączenia w latach 2015-25 odpowiednio 145 MWe.

W konstrukcjach SMR obecnie dominują cztery zasadnicze typy reaktorów:

- lekkowodne (PWR, BWR);
- prędkie chłodzone sodem, ołowiem lub eutektyką ołowiu z bizmutem (FNR/Na, Pb, Pb-Bi);
- wysokotemperaturowe grafitowe (HTGR);
- na stopione sole (MSR)

Najbardziej zaawansowane są projekty reaktorów lekkowodnych ciśnieniowych, które wykorzystują wieloletnie doświadczenia z eksploatacji reaktorów napędowych okrętów podwodnych. Reaktory prędkie cechuje prostota konstrukcji i długi okres pomiędzy



przeładunkiem paliwa. Reaktory wysokotemperaturowe i na stopione sole mogą być także wykorzystywane w kogeneracji do wytwarzania ciepła procesowego.

Rozwój reaktorów SMR odbywa się przy dużym zaangażowaniu prywatnych inwestorów i małych firm, co świadczy o zachodzącym procesie zmian w sposobie finansowania prac badawczo-rozwojowych w sektorze energetyki jądrowej. Następuje zwiększanie skali nakładów finansowych ponoszonych przez prywatnych inwestorów w stosunku do programów rządowych. Jednym z założycieli firmy *Terra Power*, która skonstruowała reaktor z falą bieżącą jest twórca *Microsoftu* – Bill Gates. Także budową reaktora SVBR-100 zajmuje się prywatna firma *AKME-engineering*. Kierują się one nie tylko względami ekonomicznymi, ale również zasadami zrównoważonego rozwoju na rzecz taniej, czystej i bezemisyjnej energii.

Nowoczesne reaktory małej mocy do zastosowań energetycznych i specjalnych mają mieć prostą, zintegrowaną konstrukcję, być wytwarzane seryjnie w fabrykach i posiadać krótki czas oraz niskie koszty budowy. Ponadto będą posiadać pasywne cechy bezpieczeństwa wynikające z praw przyrody (grawitacja, konwekcja). Wiele z nich zaprojektowano do umieszczenia w gruncie, przez co zwiększono ich odporność na zagrożenie terrorystyczne i proliferacyjne. Promień strefy niebezpiecznej wokół takich obiektów jądrowych nie będzie przekraczać 300 m.

Potencjał reaktorów SMR tkwi głównie w następujących czynnikach:

- Małe rozmiary i konstrukcja modułowa umożliwiają ich produkowanie w specjalistycznych fabrykach w warunkach zapewniających spełnienie wysokich norm technicznych i jakości produkcji;
- Możliwość instalacji kolejnych identycznych bloków w jednej lokalizacji znacznie obniża obciążenie finansowe inwestycji, a także umożliwia dopasowanie do bieżącego lokalnego popytu na energię i elastyczne reagowanie na jego wzrost;
- Małe rozmiary i pasywne cechy bezpieczeństwa predestynują je dla państw posiadających nieduże sieci energetyczne i niewielkie doświadczenie we wdrażaniu energetyki jądrowej;
- Rozmiary obiektu, prostota, kompaktowość i integralność konstrukcji oraz wykorzystywanie wrodzonych, pasywnych systemów bezpieczeństwa pozwoli na ograniczenie stosowania skomplikowanych i zwielokrotnionych układów awaryjnych. Prowadzi to do mniejszych kosztów budowy w porównaniu z dużymi blokami energetycznymi;
- Ekonomika serii produkcyjnej pozwoli na dalszą redukcję kosztów wytwarzania;
- Możliwość umieszczenia bloku jądrowego pod powierzchnią ziemi lub pod wodą zwiększa jego odporność na zagrożenia naturalne (trzęsienia ziemi, tsunami) oraz zewnętrzne (upadek samolotu, terroryzm, nieprolifracja);
- Mniejsze wymagania w zakresie dostępu do wody chłodzącej umożliwiają rozmieszczanie obiektów blisko potencjalnego odbiorcy, nie tylko na wybrzeżu, ale także w głębi lądu, w rejonach odległych i niedostępnych do zasilania w energię lub do różnych projektów wydobywczych (kopalń, szybów gazowych i naftowych);
- Różnorodność technologii i uzyskiwane temperatury czynnika chłodzącego umożliwiają projektowanie obiektów nie tylko do celów energetycznych. Mogą być stosowane także do odsalania wody, ogrzewania, procesów chemicznych (w tym do produkcji wodoru) oraz do likwidacji odpadów promieniotwórczych;
- Możliwość usunięcia obiektu w całości po zakończeniu jego eksploatacji lub demontaż na miejscu.



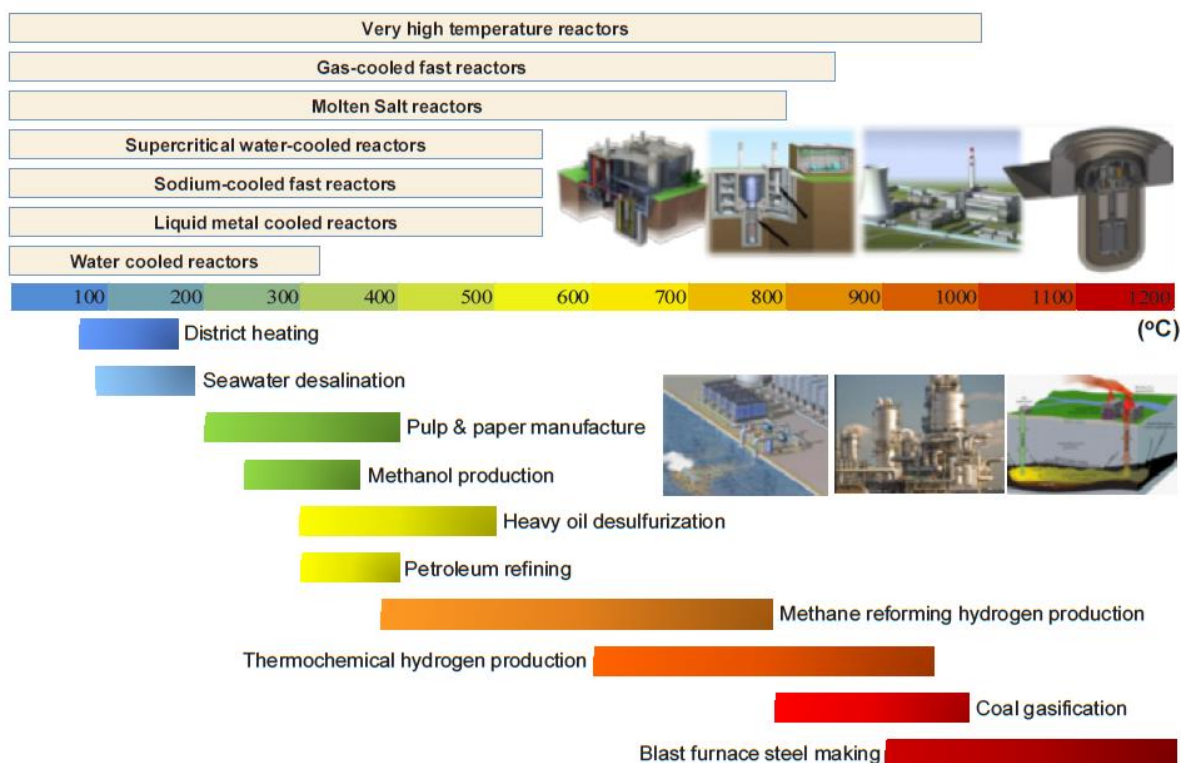
Po dziesięcioleciach budowy dużych obiektów jądrowych wiele państw rozważa obecnie możliwość uruchomienia małych reaktorów - tańszych i łatwiejszych do zbudowania, które pozwolą znacząco zmniejszyć obciążenie finansowe inwestycji i elastycznie projektować bilans energetyczny danego kraju. Wysokie koszty dużej elektrowni jądrowej są jednym z argumentów, dla których wstrzymywane są decyzje o rozpoczęciu jej budowy. Budowa SMR może być rozwiązaniem tego problemu. Reaktory takie można budować obok siebie i dalej rozbudowywać infrastrukturę, odzyskując już część nakładów z inwestycji i czerpiąc moc z działających modułów. **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.**

	Państwo	Konstruktor	Model	Moc [MWe]	Typ
Działające					
1.	Chiny, Pakistan	CNNC	CNP-300	300	PWR
2.	Indie	NPCIL	PHWR-220	220	PHWR
3.	Rosja	Teploelectroproekt	EGP-6	11	LWGR
W budowie <i>(przewidywany termin uruchomienia 2020-25)</i>					
1.	Chiny	CGN	ACPR50S	60	PWR
2.		INET, CNEC&Huaneng	HTR-PM, HTR-200	2x105	HTR
3.	Argentyna	CNEA&INVAP	CAREM-25	27	PWR
4.	Rosja	OKBM	KLT-40S	35	PWR
Projekty zaawansowane <i>(przewidywany termin uruchomienia po roku 2020)</i>					
1.	Chiny	NPIC/CNNC	ACP-100	100	PWR
2.	Kanada	Terrestrial Energy	Integral MSR	192	MSR
3.	Korea Płd.	KAERI	SMART	100	PWR
4.	Rosja	OKBM	VBER-300	300	PWR
5.		NIKIET	BREST-OD-300	300	FNR(Pb)
6.		AKME-engineering	SVBR-100	100	FNR(Pb-Bi)
7.	USA	NuScale Power & Fluor	NuScale	50	PWR
8.		Holtec	SMR-160	160	PWR
9.		GE-Hitachi	Prism	311	FNR(Na)
10.		ARC	ARC-100	100	FNR(Na)
Projekty w fazie koncepcyjnej <i>(przewidywany termin uruchomienia po 2030)</i>					
1.	Chiny	SNERDI	CAP150	150	PWR
2.		CGN	ACPR100	140	PWR
3.		SINAP	TMSR-SF	100	MSR
4.	Francja	DCNS	Flexblue	50-250	PWR
5.	Indie	BARC	AHWR-300LEU	300	PHWR
6.	Japonia	Mitsubishi Heavy Ind.	IMR	350	PWR
7.	Kanada	Northern Nuclear	Leadir-PS100	36	Gr/Pb
8.		StarCore	StarCore HTR	20	HTR



9.	RPA	PBMR	PBMR	165	HTR
10.	Rosja	NIKIET	VK-300	300	BWR
11.		OKBM	ABV-6M	6	PWR
12.		RDIFE	UNITHERM	5-10	PWR
13.		NIKIET	SHELF	6	PWR
14.	Szwecja	LeadCold	Sealer	3	FNR(Pb)
15.	UK	Urenco	U-Battery	4	HTR
16.		Moltex	Moltex SSR	150	MSR/FNR
17.			Moltex SSR Global	40	MSR
18.	USA	General Atomics	EM2	240	HTR/FNR
19.		Westinghouse	Westinghouse SMR	225	PWR
20.		BWXT	mPower	195	PWR
21.		X-energy	Xe-100	75	HTR
22.		Gen4 (Hyperion)	Gen4 module	25	FNR(Pb-Bi)
23.		Southern Co	MCFR	?	MSR/FNR
24.		UC Berkeley	PB-FHR	100	MSR
25.		Martingale	Thorcon MSR	250	MSR

Tab.1. Przegląd technologii SMR na świecie



Rys.1. Technologie SMR do zastosowań specjalnych



Małe reaktory modułowe dostarczające zarówno energię elektryczną, jak i ciepło na potrzeby procesów technologicznych, mają jedną przewagę nad dotychczasową koncepcją budowy dużych bloków energetycznych - wymagają mniejszych nakładów inwestycyjnych.

Poważnymi barierami wejścia SMR-ów na rynek są wysokie koszty budowy fabryki modułów i kwestia licencjonowania nowych reaktorów. Obecne procedury licencjonowania dotyczą dużych bloków i muszą być dostosowane do małych jednostek. Dlatego w związku z koniecznością wypracowania nowych procedur, koszty licencjonowania będą znacząco wyższe niż obecnie. Wzrośnie także czas wydawania licencji, niezbędny do wyszkolenia ekspertów dozoru.

Nowe technologie SMR, a także implementacja poznanych i sprawdzonych systemów w małej skali, budzi zainteresowanie wielu krajów na całym świecie. Argentyna, Chiny, Francja, Indie, Japonia, Kanada, Korea Płd., Rosja, RPA, UK i USA rozwijają liczne projekty i dążą do ich komercjalizacji. Jednak większość z projektów SMR znajduje się obecnie zaledwie w fazie koncepcyjnej i będzie możliwa do realizacji dopiero po 2030 r.

STANY ZJEDNOCZONE

W Stanach Zjednoczonych 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 ten 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.

Pierwszą firmą odnoszącą sukcesy na polu SMR jest amerykańska NuScale, która pod koniec grudnia 2016 r. przedstawiła do oceny przez NRC projekt reaktora PWR o mocy 50 MWe w celu uzyskania licencji na jego budowę. Przewiduje się, że proces ten potrwa ok. 40 miesięcy. Pierwsza komercyjna elektrownia składająca się z 12 reaktorów NuScale ma zostać zbudowana w ciągu 10 lat w pobliżu m. Columbia w stanie Waszyngton na terenie należącym do laboratorium *Idaho National Laboratory (INL)*. Jej właścicielem będzie firma *Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS)*, a operatorem *Energy Northwest*. Kierownictwo koncernu przewiduje, że do roku 2035 moc zainstalowana w SMR będzie wynosić na świecie 55-75 GWe – ekwiwalent ponad 1000 modułów NuScale.

CHINY

Chiny realizują obecnie najbardziej zaawansowany projekt reaktora modułowego małej mocy. Jest nim reaktor wysokotemperaturowy HTR-PM o mocy 105 MWe chłodzony helem z rdzeniem usypanym zasilany paliwem ceramicznym typu Triso. W oparciu o dwa bliźniacze reaktory tego typu ma zostać uruchomiona w m. Shidaowan w prowincji Shandong elektrownia jądrowa o mocy 210 MWe. **Elektrownia będzie pierwszym w świecie tego typu obiektem uruchomionym na skalę komercyjną.** Prace budowlane rozpoczęte w grudniu 2012 r. są obecnie na ukończeniu. Stan pierwszej krytyczności (rozpoczęcie reakcji łańcuchowej) ma zostać osiągnięty w listopadzie 2017 roku.



Reaktor HTR-PM ma stanowić podstawę do rozwoju większych reaktorów tego typu. Przyszły reaktor planowany do budowy w m. Ruijin w prowincji Jiangxi o mocy 600 MWe będzie składał się z trzech modułów HTR-PM. Obecnie prowadzone są prace nad zwiększeniem mocy modułu i wykorzystaniem do jego zasilania paliwa z zawartością toru.

W roku 2006 rząd w Pekinie umieścił małe, wysokotemperaturowe reaktory chłodzone gazem wśród priorytetów w dziedzinie nauki i technologii na okres najbliższych 15 lat. Celem jest w pierwszej kolejności zbadanie możliwości produkcji energii, a następnie skojarzonej produkcji wodoru na skalę przemysłową. Docelowo planuje się uruchomienie produkcji seryjnej reaktorów HTR stosowanych zarówno do produkcji energii elektrycznej, jak i w procesach chemicznych oraz wejście Chin z tą technologią na rynki światowe. W styczniu 2016 r. Chiny podpisały już porozumienie ramowe w sprawie budowy reaktora HTR w Arabii Saudyjskiej.

Chiny prowadzą także zaawansowane prace nad reaktorami na stopione sole. *China Academy of Sciences* (CAS) w styczniu 2011 r. uruchomiła program badawczo-rozwojowy w zakresie rozwoju technologii reaktorów pracujących na paliwie wykorzystującym stopione sole toru (Th-MSR lub TMSR). W ramach tego projektu powstało w Szanghaju centrum badawcze TMSR *Research Centre* zlokalizowane w *Shanghai Institute of Nuclear Applied Physics* (SINAP), gdzie budowany jest prototypowy reaktor MSR o mocy 5 MWe zaliczany do systemu reaktorów czwartej generacji (GIF). Jest on także znany jako reaktor wysokotemperaturowy chłodzony solami fluoru (FHR) lub zaawansowany reaktor wysokotemperaturowy (AHTR). Ma być oddany do użytku w roku 2020. W ośrodku tym powstaje także reaktor podkrytyczny o mocy 2 MWe pobudzany akceleratorem (ADS) do badań nad zamkniętym cyklem uranowo-torowym. W chińskim projekcie rozwoju reaktorów na stopione sole aktywnie uczestniczy również Departament Energii USA (*Oak Ridge NL*, gdzie technologia takich reaktorów została opracowana już w latach 1960.) oraz australijska organizacja badań naukowych ANSTO. Zdaniem naukowców amerykańskich Chiny poczyniły w ostatnim okresie znaczne postępy w badaniach nad tą technologią i zdecydowanie wysunęły się na czoło światowej stawki.

ROSJA

Obecnie Rosja finalizuje prace nad pierwszą z elektrowni, budowanych w ramach szerokiego projektu pływających elektrowni jądrowych, które mają dostarczać prąd elektryczny w odległych, niedostępnych regionach kraju. Elektrownia ma kształt pływającej platformy (barki) o długości 144,4 m, szerokości 30 m i wyporności 21500 DWT. Na pokładzie zainstalowane zostaną dwa reaktory jądrowe typu KTL-40S, każdy o mocy elektrycznej 35 MWe (150 MWt). Reaktory te były dotychczas stosowane do napędu północnej floty lodołamaczy atomowych. Elektrownia po niewielkiej adaptacji może także służyć do przemysłowego odsalania wody morskiej z wydajnością 240 000 m³ wody na dobę. Założenia konstrukcyjne przewidują, iż ma być ona eksploatowana przez 38 lat (3 cykle po 12 lat) z przerwami na remont po każdym cyklu. Elektrownie przewidziane są do rozmieszczenia w odległych, niedostępnych rejonach Płn.-Wsch. Rosji i w strefie arktycznej, gdzie utrudnione jest przesyłanie energii, a budowa konwencjonalnej elektrowni byłaby nieopłacalna ekonomicznie. Planowana jest budowa kolejnych 6 elektrowni w przeciągu następnych 10 lat. Pierwsza elektrownia przeznaczona jest do zaopatrywania w energię elektryczną m. Piewiek na Płw. Czukockim. Będą one wykorzystane również przez Gazprom do zabezpieczenia wydobycia z pól gazowych na Płw. Kolskim i Jamalskim. Następne przewidziane są do rozmieszczenia w pobliżu Jakucji i w rejonie Płw. Tajmyr. Zakupem podobnych pływających elektrowni zainteresowanych jest wiele państw, w tym: Chiny, Indonezja, Malezja, Algieria, Namibia i Argentyna. Najdalej w swoich propozycjach idą Chiny - w lipcu 2014 r. *China's CNNC New Energy* podpisała z *Rusatom Overseas* porozumienie o wspólnej budowie



i eksploatacji pływających elektrowni. W przyszłości planowana jest budowa kolejnych pływających elektrowni wyposażonych w reaktory VBER-300 lub RITM-200 o mocach 200-400 MWe, stosowanych dotychczas przez rosyjską marynarkę do napędu floty atomowych okrętów nawodnych i podwodnych.

Do eksploatacji zasobów Arktyki walnie przyczynia się także flota atomowych lodolamaczy napędzanych reaktorami jądrowymi RITM-200 o mocy 175 MWt, generującymi moc użyteczną 60 MW. Lodolamacze te kruszą lód o grubości do 3 m, zapewniając tym samym całoroczną żeglugę przez Przejście Północno-Wschodnie. W marcu 2017 r. rosyjskie spółki wydobywcze ARMZ i VostokCoal zawarły z Atomflot porozumienie o współpracy przy eksploatacji rejonu Arktyki.

W ramach jednego z projektów innowacyjnych „*Прорыв*” na terenie kombinatu SCC w m. Siewiersk/Tomsk ma zostać zbudowany eksperymentalny reaktor prędkości BREST-OD-300 (*Bystry Reaktor so Svintsovym Teplonositelem*) o mocy 300 MWe chłodzony ciekłym ołowiem, zaprojektowany przez biuro konstrukcyjne NIKIET. Głównym celem tego programu jest zademonstrowanie możliwości zamknięcia cyklu paliwowego w oparciu o reaktor prędkości. Reaktor będzie zawierał 20,6 ton paliwa o zwiększonej gęstości (*dense fuel*), wyprodukowanego na bazie azotków uranu i plutonu. Pozbawiony ma być płaszcza uranowego (materiału paliworodnego) wokół rdzenia, przez co będzie posiadał zwiększoną odporność na proliferację (nie będzie w nim możliwości produkcji plutonu). Reaktory tego typu mają w przyszłości zastąpić reaktory energetyczne BN-600 i 800. Reaktor ten będzie prekursorem serii dużych komercyjnych reaktorów o mocy 1200 MWe, które będą znacznie efektywniej wykorzystywać energię zgromadzoną w paliwie jądrowym i wypalać pierwiastki długożyciowe (pomniejsze aktywnowce) zgromadzone w odpadach promieniotwórczych.

W instytucie NIIAR (RIAR) w Dimitrowgradzie planowana jest budowa reaktora prędkiego SVBR-100 (*Lead-Bismuth Fast Reactor*) o mocy 75-100 MWe chłodzonego eutektyką ołowiano-bizmutową. Jest to projekt reaktora zintegrowanego, z generatorem pary znajdującym się w tym samym basenie reaktora co jego rdzeń, przystosowanego do różnorodnego paliwa. Blok ma być budowany w całości w fabryce i przewożony do miejsca przeznaczenia (wymiary obiektu: 4,5 m – średnica i 7,5 m – wysokość) a następnie montowany w zbiorniku z wodą, która zapewnia pasywny odbiór ciepła i stanowi osłonę biologiczną. Wymiana paliwa ma odbywać się co 7-8 lat. Jako reaktor wielofunkcyjny może on produkować prąd elektryczny, ciepło lub służyć do odsalania wody. Ocenia się, że elektrownia składająca się z 16 takich modułów będzie dostarczać energię elektryczną po najniższych kosztach spośród dostępnych w Rosji technologii, gwarantując jednocześnie wysoki poziom bezpieczeństwa i odporności na proliferację. Do realizacji tego projektu *Rosatom* utworzył w 2009 r. wraz z prywatnym przedsiębiorstwem *En+Group* spółkę *AKME-engineering*. Produkcja seryjna takich reaktorów ma ruszyć w roku 2024.

WIELKA BRYTANIA

W czerwcu 2014 r. rząd w Londynie zlecił przygotowanie raportu na temat perspektyw zastosowania w energetyce modułowych reaktorów jądrowych. Oprócz postępów w realizacji programu energetyki jądrowej opartej o jednostki dużej mocy rząd bada również możliwy wkład SMR w brytyjski bilans energetyczny oraz szanse, jakie stwarzałoby to dla brytyjskich przedsiębiorstw. W raporcie opracowanym przez *National Nuclear Laboratory* (NNL) stwierdza się, że UK ma możliwość odzyskania „przywództwa technologicznego” w obszarze rozwoju źródeł niskoemisyjnych poprzez inwestycje w technologię reaktorów SMR. Jako potencjalnie możliwe do wdrożenia w UK rozważane są następujące typy reaktorów: ACP100 (CNNC),



mPower (BWXT); Westinghouse SMR (*Westinghouse*) i NuScale (*NuScale Power & Fluor*). W marcu 2016 r. Department of Energy & Climate Change (DEECC) wezwał zainteresowanych dostawców technologii do składania swoich propozycji budowy reaktorów SMR w UK. W oparciu o te projekty w najbliższym czasie ma zostać ogłoszona „mapa drogowa” dla rozwoju energetyki jądrowej bazującej na reaktorach tego typu.

Koncern GE-Hitachi wystąpił także z propozycją budowy w zakładach przerobu paliwa w Sellafield dwóch reaktorów prędkich PRISM, za pomocą których mógłby zostać przeprowadzony proces likwidacji zgromadzonego tam plutonu (ok. 123 ton), pochodzącego z przerobu paliwa oraz ze zbytecznych zapasów militarnych.

KANADA

Ministerstwo Energii kanadyjskiej prowincji Ontario planuje zastąpić reaktorami SMR (reaktor IntegralMSR firmy *Terrestrial Energy*) lokalne elektrownie wykorzystujące olej napędowy do zasilania agregatów prądotwórczych. Potencjalnymi odbiorcami energii z tych reaktorów byłyby odległe skupiska ludności, kopalnie oraz zakłady wydobywcze gazu i ropy naftowej oraz inne obiekty rządowe znajdujące się w północnych rejonach Kanady, gdzie 80% energii wytwarzane jest w generatorach napędzanych silnikami Diesla. W regionie tym znajduje się ponad 200 rozproszonych osiedli, które zamieszkuje ponad 200 000 ludności. Zaopatrzenie dla tych regionów dostarczane jest wyłącznie drogą kołową, często niedostępną w okresie silnych mrozów.

KOREA PŁD.

Republika Korei realizuje program budowy reaktora energetycznego modułowego małej mocy przeznaczonego do produkcji energii elektrycznej i odsalania wody. Reaktor demonstracyjny SMART (*System-integrated Modular Advanced Reactor*) o mocy do 100 MWe i wydajności do 40 000 m³ wody/dzień ma zostać uruchomiony w 2017 roku. W marcu 2015 r. Korea i Arabia Saudyjska podpisały porozumienie ramowe w sprawie budowy co najmniej dwóch reaktorów SMART w ośrodku badań jądrowych i energii odnawialnej *Saudi Arabia's King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy* (KA-CARE) w Rijadzie. Oba państwa będą prowadzić badania nad możliwością budowy reaktorów tego typu w Arabii Saudyjskiej. Porozumienie zakłada również wspólne działania promocyjne tego reaktora w państwach trzecich na Bliskim Wschodzie.

POLSKA

Bezpieczeństwo jądrowe jest najwyższym priorytetem polskiego programu jądrowego, więc budowane w przyszłości reaktory będą należeć do najbezpieczniejszych dostępnych obecnie obiektów generacji III+. Zagwarantowane jest to w ustawie Prawo atomowe, która w Art. 36b stanowi, iż w projekcie i procesie budowy obiektu jądrowego nie stosuje się rozwiązań i technologii, które nie zostały sprawdzone w praktyce w obiektach jądrowych lub za pomocą prób, badań oraz analiz. Ponadto w Art. 36c określa się warunki, jakie musi spełnić projekt takiego obiektu, aby zagwarantować jego bezpieczną eksploatację (w tym sekwencję poziomów bezpieczeństwa - tzw. system „obrony w głąb”).

Z uwagi na powyższe, w chwili obecnej reaktory klasy SMR nie mogą być uwzględnione w programie wdrożenia energetyki jądrowej, bowiem reaktory takie jeszcze nie istnieją. Wszystkie obecnie proponowane technologie SMR łączy jedna cecha. Choć oparte są w wielu przypadkach o znane i sprawdzone rozwiązania technologiczne, w tej formie dotąd nie zostały nigdzie zrealizowane. Przed wdrożeniem czeka je jeszcze proces licencjonowania, co może okazać się sprawą skomplikowaną, z uwagi na fakt, iż organy dozоровe nie mają jeszcze wystarczającego doświadczenia (i często kompetencji) w prowadzeniu analiz bezpieczeństwa takich reaktorów. Większość z projektów SMR znajduje się obecnie zaledwie w fazie koncepcyjnej. Budowa małych



reaktorów modułowych uzasadniona będzie tylko w lokalizacjach o niedostatecznie rozwiniętej infrastrukturze energetycznej, położonych z dala od sieci przesyłowych (np. na dalekiej północy w Rosji lub w USA i Kanadzie), w krajach rozwiniętych (jako jednostki uzupełniające niewielki wzrost potrzeb energetycznych w poszczególnych regionach energetycznych), w krajach o małej łącznej mocy sieci (gdzie duże bloki trudno stosować ze względu na równowagę sieci) lub jako lokalne źródła ciepła (dla przemysłu, miejskich sieci ciepłowniczych) czy do odsalania wody morskiej. **Reaktory SMR nie stanowią konkurencji dla reaktorów dużej mocy mających pracować jako podstawowe elementy systemu energetycznego, lecz mogą być ich uzupełnieniem.**

W Polsce SMR nie mogą stanowić alternatywy dla programu energetyki jądrowej w obecnym kształcie. Można natomiast rozważyć możliwość ich budowy po 2030 roku do specjalnych zastosowań, związanych głównie z kogeneracją. Wcześniej należy rozwijać programy badawcze związane z nowymi innowacyjnymi technologiami reaktorowymi, włącznie z budową w kraju prototypowego reaktora.

W tym kierunku zmierza podjęta inicjatywa budowy reaktora wysokotemperaturowego małej mocy, który oprócz energii elektrycznej mógłby dostarczać ciepła procesowego dla dużych zakładów przemysłowych, zmniejszając tym samym zużycie gazu ziemnego (dostarczanego obecnie głównie z Rosji). W ramach tego projektu w lipcu 2016 r. Minister Energii powołał zespół doradczy, którego zadaniem jest analiza i przygotowanie warunków do wdrożenia wysokotemperaturowych reaktorów jądrowych.

Tematyka reaktorów wysokotemperaturowych jest również realizowana w ramach prac badawczych prowadzonych przez NCBJ, które jest liderem międzynarodowego projektu *Nuclear Cogeneration Industrial Initiative - Task Force* (NC2I-TF). Celem organizacji, jest inicjowanie i koordynowanie prac nad wykorzystaniem reaktorów jądrowych do wytwarzania ciepła dla przemysłu i innych zastosowań nieenergetycznych. Polscy naukowcy ściśle współpracują z partnerami zagranicznymi, czego wyrazem jest podpisanie przez NCBJ umów o współpracy - z brytyjskim konsorcjum U-Battery (maj 2016 r.) i amerykańską firmą X-Energy (luty 2017 r.). Naukowcy z centrum rozważają budowę w Otwocku-Świerku nowego badawczego reaktora jądrowego – reaktora wysokotemperaturowego (HTGR) o mocy cieplnej 10 MW, wytwarzającego 4 MW mocy elektrycznej. Ostateczna decyzja o finansowaniu powinna zapaść do końca 2018 r., co pozwoliłoby na zakończenie budowy około 2025 roku.

Ponadto NCBJ jest koordynatorem prac badawczo-rozwojowych reaktorów wysokotemperaturowych prowadzonych w ramach europejsko-amerykańskiej współpracy „GEMINI+”. Jest to jeden z pięciu zwycięskich projektów zgłoszonych przez centrum w konkursie Komisji Europejskiej Horyzont 2020 w obszarze EURATOM.