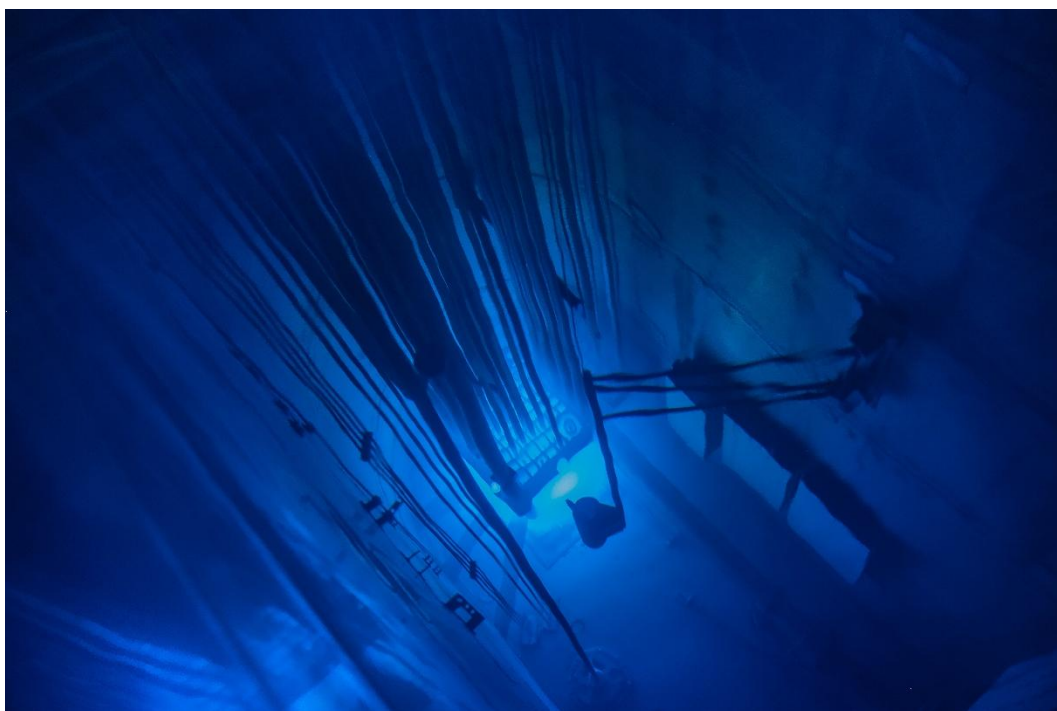


Trendy w wykorzystaniu badawczych reaktorów jądrowych na przykładzie reaktorów OPAL, KJRR oraz PALLAS



W przestrzeni publicznej pojawia się coraz więcej informacji dotyczących budowy w Polsce wielkoskalowych reaktorów jądrowych, jak i małych reaktorów modułowych. Jednak, oprócz energetycznych reaktorów jądrowych wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej, ważną rolę pełnią reaktory badawcze. W Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Otwocku, od wielu lat pracuje badawczy reaktor jądrowy MARIA, wykorzystywany głównie do wytwarzania radioizotopów do celów medycznych.

Wstęp

W niniejszej analizie przedstawione zostały trzy reaktory badawcze będące w budowie lub w eksploatacji, w różnych rejonach świata: OPAL w Australii [1], KJRR w Korei Południowej [2] oraz PALLAS w Niderlandach [3]. Reaktory te zostały wybrane w celu analizy uzasadnienia ich budowy w krajach wysokorozwiniętych, co może stanowić przesłankę dla polskich decydentów o rozpoczęciu prac koncepcyjnych dotyczących ewentualnego zastąpienia reaktora MARIA [4] lub budowy nowego reaktora oraz infrastruktury towarzyszącej, jako alternatywy dla reaktora MARIA. Przewidziany pozostały czas eksploatacji reaktora MARIA to około 20 lat [5], a całociowy proces prowadzący do uruchomienia nowego reaktora badawczego oszacowany w niniejszej analizie to około 15-19 lat. Zależność ta bezpośrednio wskazuje na rychłą potrzebę rozpoczęcia prac koncepcyjnych związanych z budową nowego reaktora badawczego w Polsce. Analiza ma również na celu identyfikację głównych trendów w budowie infrastruktury naukowo-komercyjnej związanej z funkcjonowaniem reaktorów badawczych. Kryteria wyboru reaktorów do analizy bazowały na: miejscu ich budowy – kraje wysokorozwinięte, stabilne gospodarczo; typie reaktora – reaktory wielofunkcyjne typu basenowego; czasie podjęcia decyzji o budowie – decyzja o budowie została podjęta nie później niż przed 30 laty; oraz na transparentności w dostępie do wiarygodnych informacji na temat reaktora.

Reaktory badawcze

Reaktory badawcze mogą pełnić wiele funkcji w zależności od ich konstrukcji, jak i wykorzystania podczas eksploatacji. Są one głównie wykorzystywane do produkcji radioizotopów w celach medycznych (np. scyntygrafia) i przemysłowych (np. radiografia), neutronowego domieszkowania krzemu do produkcji wysokiej jakości materiału półprzewodnikowego, badań materiałowych oraz celów edukacyjno-szkoleniowych. Warto zauważyć, że wiele spośród reaktorów badawczych może być równocześnie wykorzystywanych do wszystkich wymienionych aktywności, na co pozwala ich uniwersalna budowa. Reaktory badawcze charakteryzują się unikalnymi cechami konstrukcyjnymi pozwalającymi na napromienianie materiałów w precyzyjnie dopasowanym widmie i strumieniu neutronów, co pozwala na prowadzenie zaawansowanych prac naukowych, jak i komercyjnych. Dodatkowo reaktory badawcze, ze

względem na swoją wielofunkcyjność i elastyczność pracy, pełnią ważną rolę dla energetyki jądrowej, gdyż pozwalają testować nowe materiały (np. paliwo jądrowe, materiały strukturalne) oraz systemy i urządzenia, przewidziane do wykorzystania w energetycznych reaktorach jądrowych. Testowanie odbywa się w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy energetycznych reaktorów jądrowych i nie może być przeprowadzone w innych urządzeniach, co jest jednym z niepodważalnych atutów reaktorów badawczych.

Warto zwrócić również uwagę na powszechnie stosowaną nomenklaturę. Samo określenie reaktora jako „reaktora badawczego” niekoniecznie odnosi się do jego funkcji powiązanej ściśle z badaniami naukowymi, lecz do jego wykorzystania do celów innych niż komercyjna produkcja energii elektrycznej lub napęd jednostek pływających. Tego typu nomenklatura używana jest przez MAEA (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej), co w szerszym kontekście może wprowadzać nieścisłości w definicji reaktorów badawczych [6]. Należy również rozróżnić reaktory wykorzystywane do prowadzenia badań naukowych od reaktorów demonstracyjnych, czyli prototypów reaktorów komercyjnych. Głównym celem budowy i eksploatacji reaktorów badawczych jest wykorzystanie reaktora do dedykowanej działalności naukowo-produkcyjno-szkoleniowej. Reaktory demonstracyjne natomiast służą do sprawdzania nowej technologii reaktora w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, lecz na mniejszą skalę, co stanowi ostateczne potwierdzenie bezpieczeństwa opracowanej technologii.

Statystyka

Obecnie na świecie pracuje 228 reaktorów badawczych w 54 krajach, w budowie jest kolejne 12 reaktorów w 11 krajach, a planowanych jest 11 reaktorów w 9 krajach. Biorąc pod uwagę reaktory badawcze będące w eksploatacji najwięcej z nich pracuje w Rosji - 54, USA - 48 oraz w Chinach - 17. W krajach europejskich obecnie pracują 32 badawcze reaktory jądrowe, najwięcej w Niemczech - 5 i Włoszech - 5. Liczba reaktorów badawczych starszych niż 40 lat wynosi 166, co stanowi ogółem 72% wszystkich reaktorów badawczych będących w eksploatacji [7]. Reaktory badawcze zazwyczaj projektowane są na okres 50 lat eksploatacji, zatem gros z nich w najbliższym czasie będzie wymagał zastąpienia lub głębokiej modernizacji w celu wydłużenia resursów.

Przedstawiona statystyka uwzględnia każdy typ reaktora badawczego zgodnie z definicją MAEA, bez względu na tryb jego wykorzystania, czy konstrukcję. Tym samym, w statystyce zawierają się również tzw. zestawy podkrytyczne, w których samopodtrzymująca się reakcja łańcuchowa nie jest osiągana, czy reaktory małej mocy często używane do aktywności edukacyjno-szkoleniowych, których wykorzystanie do innych celów jest ograniczone. Co ciekawe, na świecie w okresie ostatnich 25 lat zostały uruchomione tylko 22 badawcze reaktory jądrowe niezależnie od typu, w tym tylko 5 reaktorów o mocy powyżej 1MWth typu basenowego lub basenowo-zbiornikowego. Dwa reaktory spośród nich zostały uruchomione w Chinach – CARR (China Advanced Research Reactor) i CMRR (China Mianyang Research Reactor), jeden w Indiach – Apsara-U (Apsara-Upgraded), jeden w Jordanii – JRTR (Jordan Research and Training Reactor) oraz jeden w Australii – OPAL (Open Pool Australian Lightwater reactor).

Polski reaktor jądrowy MARIA o mocy 30 MWth uruchomiony został 18 grudnia 1974 roku. Na przestrzeni lat został on w pełni zmodernizowany do wymaganych standardów bezpieczeństwa zgodnie z obecnymi regulacjami prawnymi. Jest on głównie wykorzystywany do produkcji radioizotopów w celach medycznych - pokrywa około 10-15% światowego zapotrzebowania na izotop molibdenu ^{99}Mo . Konfiguracja rdzenia reaktora i dostępność pionowych jak i poziomych kanałów aktywacyjnych do napromieniania próbek materiałowych daje potencjalnie perspektywę wykorzystania reaktora przez społeczność naukową do zaawansowanych prac badawczych wspierających wdrożenie energetyki jądrowej w Polsce.

Reaktor OPAL

Jednym z przykładów wielofunkcyjnych badawczych reaktorów jądrowych typu basenowego jest reaktor OPAL, zlokalizowany w Lucas Heights na obrzeżach Sydney, w ramach infrastruktury badawczej organizacji ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation). Warto zauważyć, że jest to jedyny reaktor jądrowy w Australii, która oficjalnie na poziomie federalnym, jak i stanowym zabroniła budowy reaktorów jądrowych oraz wybranej infrastruktury jądrowego cyklu paliwowego [8]. Mimo tego, że kraj nie posiada innych reaktorów badawczych, ani energetycznych, pełni on ważną rolę dla

światowego przemysłu jądrowego ze względu na duże zasoby uranu jak i prowadzenie zaawansowanych badań naukowych w dziedzinie energetyki jądrowej.

Plany budowy reaktora badawczego zostały zainicjowane w 1991 roku, co było związane z potrzebą zastąpienia poprzedniego reaktora HIFAR (High Flux Australian Reactor) ze względu na jego planowane wyłączenie z eksploatacji po 49 latach pracy (26 stycznia 1958 – 30 stycznia 2007). Ostateczna decyzja o budowie została podjęta w 1997 roku, a kontrakt na budowę pod klucz został podpisany w czerwcu 2000 roku z argentyńską firmą INVAP, posiadającą duże doświadczenie w realizacji projektów reaktorów badawczych. Prace budowlane zostały zlecone australijskim firmą John Holland Construction and Engineering oraz Evans Deakin Industries Limited. Budowa reaktora rozpoczęła się 1 kwietnia 2002 roku, a został on uruchomiony (pierwsza krytyczność) 12 sierpnia 2006 roku, co daje całkowity czas budowy wraz z procedurami rozruchowymi, wynoszący około 52 miesiące. Tym samym cały proces od podjęcia decyzji o budowie nowego reaktora, do jego uruchomienia trwał około 15-16 lat. Koszty budowy reaktora szacuje się na około 475 milionów dolarów australijskich [9], co po aktualnym kursie wymiany daje około 320 milionów dolarów amerykańskich.

Reaktor posiada moc 20 MW_{th} i pracuje w cyklach wynoszących 30-35 dni po których następuje przerwa technologiczna na wymianę paliwa wynosząca około 2 dni – wymianie podlegają trzy kasety paliwowe. Rdzeń reaktora składa się z 16 kaset paliwowych zawierających nisko wzbogacony uran (19.75 % izotopu ²³⁵U) w formie paliwa płytowego U₃Si₂-Al. Jest on zaaranżowany w matrycę kaset paliwowych 4x4, ułożonych w cztery klastry o kształcie kwadratowym, po 4 kasety każdy. W reaktorze wykorzystuje się kasety paliwowe zawierające 484 gramy ²³⁵U oraz wypalający się absorber w formie kadmu. Masa rozszczepialnego izotopu uranu ²³⁵U w rdzeniu wynosi około 6 kg, w zależności od jego konfiguracji i etapu cyklu paliwowego. Wysokość pojedynczej kasety paliwowej wynosi około 105 cm, wysokość paliwa około 60 cm, a wymiary kasety około 8x8 cm. Pomiędzy kasetami znajduje się przestrzeń na operowanie pięcioma prętami kontrolnymi tworzącymi razem kształt krzyżowy (cztery symetryczne, zewnętrzne, prostokątne płyty i środkowy pręt w kształcie krzyża), wykonanymi z hafnu i stopów cyrkonu. Reaktor chłodzony i moderowany jest lekką wodą, lecz jego reflektor neutronów składa się z cyrkonowego zbiornika wypełnionego ciężką wodą. Rozmiar rdzenia wynosi około 35x35 cm, średnica zbiornika reflektora 260 cm, a jego wysokość 122 cm [10]. Rdzeń reaktora

umieszczony jest w basenie pod warstwą lekkiej wody wynoszącą około 13 m. Przewidywany czas eksploatacji reaktora wynosi 60 lat.

Głównym celem pracy przedmiotowego reaktora jest produkcja radioizotopów niezbędnych w diagnostyce medycznej, leczeniu chorób nowotworowych, jak i wykorzystywanych w przemyśle. Reaktor zapewnia około 80% radioizotopów wykorzystywanych w celach medycznych w Australii, jak i pokrywa około 9% światowego zapotrzebowania na izotop molibdenu ^{99}Mo . Zapewnia on również wiązki neutronów do badań materiałowych z wykorzystaniem neutronowej analizy aktywacyjnej. Jedną z ciekawszych możliwości wykorzystania reaktora jest neutronowe domieszkowanie kryształów krzemu w celu produkcji wysokiej jakości materiału półprzewodnikowego wykorzystywanego w zaawansowanej elektronice (Neutron Transmutation Doping). Maksymalna produkcja może wynosić około 60 ton domieszkowanego krzemu w skali roku. Reaktor posiada niezbędną infrastrukturę do prowadzenia ww. aktywności w postaci około 80 kanałów pionowych i 5 kanałów poziomych zapewniających możliwość napromieniania próbek materiałowych w dowolnym strumieniu neutronów termicznych lub prędkich [11]. Warto zauważyć, że reaktor stanowi podstawowe urządzenie zapewniające neutrony do szeregu aktywności naukowo-komercyjnych prowadzonych w powiązanej infrastrukturze badawczej np. w zakładzie wytwarzania molibdenu do celów medycznych (^{99}Mo Manufacturing Facility), czy w centrum rozpraszania neutronów (Australian Centre for Neutron Scattering), gdzie prowadzone są zaawansowane badania materiałowe. Na uwagę zasługuje również bardzo duża transparentność organizacji ANSTO dotycząca charakteru prowadzonych prac badawczych, dostępnej infrastruktury badawczej oraz trybu jej wykorzystania przez społeczność naukową.

Reaktor KJRR

Dnia 28 kwietnia 2023 roku rozpoczęła się budowa koreańskiego reaktora badawczego KJRR (Ki-Jang Research Reactor) o mocy 15 MWth [12]. Reaktor powstaje w rejonie Busan w pobliżu elektrowni jądrowej Kori w miejscowości Kijang-gun. Pierwowzorem reaktora jest działający od lutego 1995 roku reaktor badawczy HANARO (High-Flux Advanced Neutron Application Reactor) oraz jordański reaktor JRTR, uruchomiony w kwietniu 2016 roku. Drugi z reaktorów stanowi owocny przykład eksportu koreańskiej technologii

jądrowej do Jordani – kraju budującego kompetencje w zakresie wykorzystania badawczych reaktorów jądrowych i przyszłościowo wdrożenia energetyki jądrowej. Motywację do budowy nowego reaktora badawczego w Korei stanowiła potrzeba zwiększenia produkcji radioizotopów do celów przemysłowych i medycznych, jak i zwiększanie zdolności neutronowego domieszkowania krzemu. Uruchomienie reaktora KJRR ma zapewnić pełną samowystarczalność w produkcji radioizotopów, głównie molibdenu ^{99}Mo , na rynek wewnętrzny, jak i rozbudować jego możliwości eksportowe, pokrywając docelowo 20% globalnego zapotrzebowania. Sam reaktor ma stanowić potwierdzenie wysokich kompetencji koreańskiego przemysłu jądrowego i posłużyć jako demonstrator technologii dla potencjalnych klientów eksportowych.

Decyzja o budowie nowego reaktora została podjęta 1 kwietnia 2012 roku. Koordynatorem projektu, jak i dostawcą technologii jest KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute), a jego wykonawcami konsorcjum kilku firm koreańskich z firmą Daewoo Engineering & Construction jako liderem. Ukończenie budowy przewidywane jest na początek 2027 roku, a pierwsza krytyczność do końca tego samego roku. Tym samym, budowa reaktora wraz z testami rozruchowymi przewidziana jest na około 56 miesięcy, a całkowity czas od podjęcia decyzji inwestycyjnej do uruchomienia reaktora szacunkowo będzie wynosił około 15-16 lat. Planowany czas eksploatacji reaktora wynosi 50 lat, a koszty jego budowy szacuje się na około 575 milionów dolarów amerykańskich [13].

Reaktor jest typu basenowego oraz pracuje na nisko wzbogacanym paliwie uranowym, zawierającym 19.75% izotopu ^{235}U . Jest on chłodzony i moderowany lekką wodą, jak i otoczony reflektorem neutronów składającym się z grafitu i berylu oraz częściowo aluminium. Zróżnicowanie materiałów otaczających rdzeń zdezeterminowane jest wymogami odpowiedniego kształtowania strumienia i spektrum neutronów w dostępnych kanałach aktywacyjnych. Roczny czas pracy reaktora przewidywany jest na 300 dni w cyklach około 37.5-50 dni. Paliwo reaktora stanowią kasety paliwowe zawierające płyty wykonane z U-7Mo/Al-5Si . Rdzeń reaktora posiada kształt prostokątny stanowiący matrycę 7x9 elementów, składającą się z 63 wewnętrznych pozycji o wymiarach około 7.5x7.5 cm. Zawiera on 22 kasety paliwowe, w tym 16 kaset standardowych oraz 6 kaset połączonych z prętami kontrolnymi wykonanymi z hafnu [14]. Operowanie prętami kontrolnymi równocześnie zmienia osiową pozycję kaset paliwowych, co zapewnia dodatkowy system bezpieczeństwa poprzez wysunięcie kaset paliwowych

poza rdzeń reaktora. Wysokość paliwa w kasecie wynosi około 60 cm, całkowita wysokość kasety standardowej około 100 cm, a kasety mobilnej 76 cm. Masa rozszczepialnego izotopu uranu ^{235}U w kasecie paliwowej wynosi około 618 g, a tym samym w rdzeniu znajduje się około 13.6 kg ^{235}U . Większość pozycji w rdzeniu reaktora zajmowane jest przez 29 elementów reflektora neutronów otaczających kasty paliwowe, wykonanych głównie z berylu.

Reaktor wyposażony jest w dużą liczbę kanałów aktywacyjnych pozwalających na produkcję radioizotopów, neutronowe domieszkowanie krzemu oraz inne badania związane z analizą aktywacyjną i rozpraszaniem neutronów. Do głównych systemów wewnątrz rdzenia należy system transferu hydraulicznego HTS (Hydraulic Transfer System), sześć pozycji do produkcji ^{99}Mo w tarczach uranowych oraz pięć pozycji zawierających kanały do napromieniania neutronowego. Poza rdzeniem znajdują się dwa systemy transferu pneumatycznego PTS (Pneumatic Transfer System), sześć pozycji do neutronowego domieszkowania krzemu (wydajność maksymalna 150 ton/rok) oraz infrastruktura towarzysząca, niezbędna do prac naukowych i komercyjnych. Dodatkowo w kompleksie reaktora planowana jest budowa infrastruktury niezbędnej do produkcji izotopu molibdenu ^{99}Mo – FMPF (Fission Moly Production Facility), produkcji radioizotopów – RIPF (Radio Isotope Production Facility), oraz jednostka odpowiedzialna za zagospodarowanie odpadów jądrowych – RWTF (Rad-Waste Treatment Facility). Warto wspomnieć, że podczas projektowania reaktora zostały opracowane trzy główne innowacje technologiczne [15]: system prętów kontrolnych umieszczonych poniżej rdzenia reaktora, nowy rodzaj kasety paliwowej z paliwem U-7Mo/Al-5Si oraz nowy typ kanałów aktywacyjnych o ściętych krawędziach.

Reaktor KJRR posiada unikalny rdzeń zaprojektowany do prowadzenia działalności naukowo-komercyjnej, szczególnie w kontekście zastosowania wielu materiałów pozwalających kształtować strumień i spektrum neutronów. Rdzeń jest technicznie skomplikowany, ale posiada dużą możliwość rekonfiguracji w celu prowadzenia dedykowanej działalności, co świadczy o uniwersalnym charakterze reaktora jako zaawansowanej infrastruktury badawczej.

Reaktor PALLAS

Kolejnym przykładem budowanego obecnie badawczego reaktora jądrowego jest reaktor PALLAS powstający w Niderlandach, w miejscowości Petten, w ramach kampusu EHC (Energy & Health Campus). Ma on zastąpić pracujący od 9 listopada 1961 roku wysokostrumieniowy reaktor badawczy HFR (High Flux Reactor). Główną motywacją do budowy nowego reaktora badawczego była potrzeba zapewnienia ciągłej dostawy radioizotopów wykorzystywanych w medycynie na rynek lokalny i zagraniczny, głównie izotopu molibdenu ^{99}Mo . Planowane wyłączenie z eksploatacji reaktora HFR może w przyszłości zaburzyć proces produkcyjny i uzależnić Niderlandy od zagranicznych dostawców. Obecnie reaktor HFR pokrywa około 25-30% światowej produkcji izotopu molibdenu ^{99}Mo .

Plany zastąpienia reaktora HFR zostały zapoczątkowane w 2002 roku, jednak dopiero w roku 2012 została podjęta ostateczna decyzja o budowie ugruntowana oficjalnym poparciem rządu Niderlandów dla inwestycji. Prace przygotowawcze na placu budowy rozpoczęły się w 2021 roku, a za oficjalną datę rozpoczęcia budowy uważa się 29 września 2025 roku, kiedy rozpoczęły się prace budowlane nad częścią jądrową reaktora [16]. Reaktor ma osiągnąć pierwszą krytyczność 1 kwietnia 2031 roku. W tym samym roku ma zostać wyłączony z eksploatacji reaktor HFR, co zapewni płynną produkcję radioizotopów do celów medycznych. Całkowite koszty projektu szacuje się na około 2.4 miliarda euro, co daje po obecnym kursie około 2.85 miliarda dolarów amerykańskich [17]. Całkowity czas budowy wraz z testami rozruchowymi planowany jest na około 66 miesięcy, a całkowity czas procesu inwestycyjnego, od podjęcia wiążącej decyzji o budowie do uruchomienia reaktora będzie, wynosił około 19 lat. Czas eksploatacji reaktora przewidziany jest na 50 lat.

Technologia reaktora została zapewniona przez firmę ICHOS której właścicielem jest argentyńska firma INVAP, a za jego budowę odpowiada hiszpańska firma FCC Construcción. Reaktor posiada wiele cech wspólnych z australijskim reaktorem OPAL np. podobne ułożenie basenu reaktora i basenu serwisowego, zastosowanie zbiornika z ciężką wodą jako reflektora neutronów, takie sam rodzaj kaset paliwowych oraz podobną konstrukcję płytowych prętów kontrolnych. Reaktor PALLAS jest reaktorem typu basenowego o mocy 25MWth. Rdzeń reaktora składa się z matrycy 5x4, co daje łącznie 20

pozycji na jego elementy. Może on zawierać do 20 kaset paliwowych typu płytowego a maksymalnie dwie z nich mogą być zastąpione elementami z kanałami aktywacyjnymi przeznaczonymi do napromieniania neutronowego. W rdzeniu znajduje się również 6 prętów kontrolnych wykonanych z hafnu, w kształcie płyt ułożonych równolegle pomiędzy rzędami kaset paliwowych, po trzy obok siebie. Paliwem reaktora jest nisko wzbogacony uran w formie U_3Si_2-Al , podobnie jak w reaktorze OPAL. Również kasety paliwowe posiadają tę samą konstrukcję tzn. wymiary około 8x8 cm, wysokość całkowita około 105 cm, a wysokość paliwa około 60 cm. Masa rozszczepialnego izotopu uranu ^{235}U w rdzeniu maksymalnie wynosi około 9.7 kg [18]. Roczny przewidziany czas pracy reaktora ma wynosić 300 dni, w cyklach po około 43 dni.

Jednym z głównych założeń wykorzystania reaktora jest testowanie technologii przewidzianych do wdrożenia w reaktorach SMR (Small Modular Reactor) oraz reaktorach IV Generacji, głównie, testy materiałów strukturalnych, alternatywnych chłodziw oraz innowacyjnych paliw jądrowych. Większość infrastruktury dedykowanej do prac naukowo-komercyjnych znajduje się w zbiorniku reflektora, naokoło rdzenia, tzn. 14 pozycji do napromieniania tarcz uranowych w celu produkcji molibdenu ^{99}Mo oraz 15 kanałów aktywacyjnych przeznaczonych do napromieniania materiałów w różnym strumieniu neutronów, w zależności od potrzeb prowadzonej aktywności badawczej. Dodatkowo, w zbiorniku reflektora znajduje się matryca berylowa pozwalająca na umieszczanie kilku osobnych eksperymentów, a tym samym prowadzenie zaawansowanych prac badawczych np. nad chłodziwami opartymi o ciekłe sole. W ramach infrastruktury towarzyszącej powstaje również centrum medycyny nuklearnej NHC (Nuclear Health Center) oraz nowe laboratoria wyposażone w komory gorące do testów post-aktywacyjnych próbek materiałowych. Warto zaznaczyć, że niedaleko budowanego reaktora znajduje się już zaawansowana infrastruktura wykorzystywana do obsługi reaktora HFR np. zakład produkcji molibdenu, laboratoria wyposażone w komory gorące, laboratoria dedykowane badaniom nad aktywnościami, czy jednostki odpowiedzialne za dekontaminację i zagospodarowanie odpadów jądrowych. Tym samym reaktor PALLAS w sposób naturalny stanie się kluczowym uzupełnieniem kompleksu.

Reaktor PALLAS w dużej mierze może być uważany za konstrukcję hybrydową posiadającą cechy reaktora NOAK (Next Of A Kind) oraz FOAK (First Of A Kind). Jego projekt częściowo bazuje na projekcie reaktora OPAL i został wykonany przez tę samą argentyńską firmę

INVAP, lecz posiada charakterystyczne cechy konstrukcyjne dostosowane do specyficznych warunków jego wykorzystania. Jest to bardzo istotny fakt, ponieważ podczas budowy reaktora PALLAS może być wykorzystane doświadczenie zdobyte podczas budowy reaktora OPAL. Dodatkowo, wprowadzenie zmian w projekcie reaktora świadczy o realnej możliwości uwzględnienia wymogów zamawiającego, a nie wymusza na nim inwestowania w produkt seryjny, niekoniecznie zoptymalizowany pod przewidziane wykorzystanie.

Wnioski i Rekomendacje

Realny czas budowy reaktora badawczego oszacowany w niniejszej analizie wynosi około 4-6 lat, a pełen czas inwestycji 15-19 lat. Warto jednak zaznaczyć, że miarodajnym wskaźnikiem jest czas budowy, a nie całkowity czas prowadzenia inwestycji, gdyż może on być zdeterminowany innymi względami niż chęć jak najszybszego uruchomienia reaktora. Koszty budowy reaktorów badawczych są znacznie zróżnicowane – wahają się pomiędzy około 320 milionów, a 2.85 miliarda dolarów amerykańskich. Dane dotyczące kosztów są danymi podawanymi oficjalnie w komunikatach instytucji odpowiedzialnych za inwestycję, lecz nie są one miarodajne, gdyż nie są poparte danymi uwzględniającymi rozbić kosztów na poszczególne części inwestycji (np. nie precyzują czy zawierają budowę całej infrastruktury czy tylko reaktora, itp.) oraz nie pokazują parametrów finansowych użytych do ich obliczenia, uniemożliwiając ich rzetelne porównanie.

Niniejsza analiza przybliży nowe trendy w budowie reaktorów badawczych, które mogą być wykorzystane podczas prac koncepcyjnych nad budową nowego reaktora badawczego w Polsce. Analizie poddano trzy reaktory typu basenowego jako najbardziej zbliżone profilem eksploatacji do potencjalnego następcy reaktora MARIA. Analiza pokazuje bezpośrednio, że:

a) Główną aktywnością przewidzianą dla wszystkich trzech opisanych reaktorów jest produkcja radioizotopów w celach medycznych, głównie izotopu molibdenu ^{99}Mo , na zaspokojenie rynku wewnętrznego oraz w celach eksportowych. Nowy reaktor badawczy w Polsce powinien również skupiać się na tym obszarze ze względu na konieczność zabezpieczanie krajowego zapotrzebowania na radioizotopy wykorzystywane do produkcji radio-farmaceutyków, niezbędne w Polskim systemie ochrony zdrowia. Z czysto komercyjnego punktu widzenia produkcja również powinna skupić się na rynkach

eksportowych w celu finansowego zbilansowania obsługi niezbędnej infrastruktury. W odróżnieniu do stanu obecnego, nowa infrastruktura powinna pokrywać cały cykl produkcyjny radio farmaceutyków, a nie tylko jego wybrane części, co wymaga budowy zaawansowanej infrastruktury towarzyszącej.

b) Drugą aktywnością przewidzianą do wdrożenia w rozpatrywanych reaktorach jest neutronowe domieszkowanie krzemu, jednak przewidywana jest ona na dużą skalę tylko w reaktorach OPAL i KJRR. Nowy reaktor również powinien być wyposażony w infrastrukturę niezbędną do neutronowego domieszkowania krzemu. Krajowa produkcja półprzewodników tą metoda pozwoli Polsce na ustanowienie własnych możliwości produkcji wysokiej jakości półprzewodników wykorzystywanych np. w przemyśle wojskowym lub energetycznym. Produkcja taka również komercyjnie może być przeznaczona na eksport jako produkt wysokomarżowy. Aby było to możliwe, infrastruktura niezbędna do dalszej obróbki wyprodukowanego materiału półprzewodnikowego powinna znajdować się w Polsce tworząc lokalny ekosystem.

c) Każdy z opisanych reaktorów posiada minimum jedno unikalne docelowe wykorzystanie dedykowane do danej konstrukcji, tzn. reaktor OPAL – wykorzystanie wiązek neutronów do zaawansowanych badań naukowych związanych z analizą aktywacyjną ; reaktor KJRR – demonstracja innowacyjnych rozwiązań opracowanych w Korei w celu eksportu technologii reaktora do klientów zagranicznych ; reaktor PALLAS – dedykowana infrastruktura badawcza pozwalająca na testowanie materiałów i systemów przewidzianych do użycia w reaktora SMR i reaktorach IV Generacji. Nowy olski reaktor badawczy również powinien mieć minimum jedną unikalną opcję wykorzystania, niedostępną w innych reaktorach w celu monopolizacji rynku poprzez świadczenie wyjątkowych usług np. związanych z możliwością testowania paliwa jądrowego w symulowanych warunkach ciężkich awarii.

d) Reaktory badawcze w każdym z przypadków stanowią główną infrastrukturę, na około której tworzony jest ekosystem podmiotów zależnych, wykorzystujących możliwości reaktora, tzn. budowa nowego reaktora badawczego powinna być zawsze skojarzona z budową dodatkowej infrastruktury wykorzystującej maksymalnie jego potencjał w obszarze naukowym, technologicznym jak i produkcyjnym. W przypadku koncepcji zastąpienia reaktora MARIA, głównym celem nie powinna być jedynie budowa nowego reaktora badawczego, ale budowa całkiem nowego kompleksu badawczego (np. doliny jądrowej), którego głównym urządzeniem badawczym jest reaktor.

e) Reaktory badawcze stanowią infrastrukturę naukowo-komercyjną do której powinien być określony jawny i transparentny tryb dostępu dla lokalnej i międzynarodowej społeczności naukowej, jak i podmiotów komercyjnych np. w formie konkursu grantowego na wykorzystanie reaktora i jego infrastruktury. Dodatkowo jednostka odpowiedzialna za eksploatację reaktora powinna dysponować infrastrukturą na najwyższym światowym poziomie, aby swobodnie konkurować z innymi ośrodkami badawczymi o podobnym profilu i przyciągnąć najwyższej klasy specjalistów. W przypadku rozpatrywanych reaktorów warunki te wydają się spełnione, szczególnie w przypadku już eksploatowanego reaktora OPAL. Nowy reaktor potencjalnie planowany w Polsce powinien bezwzględnie spełniać te warunki. Obecnie tryb dostępu dla społeczności naukowej czy podmiotów komercyjnych do reaktora MARIA oraz powiązanej infrastruktury jest mało transparentny w kontekście ścieżek i procedur dostępowych.

f) Dodatkowo, nowy reaktor oraz powiązana infrastruktura badawcza powinna służyć do szkolenia przyszłych kadr na rzecz rozwoju energetyki jądrowej, co ma kluczowe znaczenie w Polsce. Co prawda, w przypadku reaktorów badawczych szkolenia związane z ingerencją w eksploatację reaktora są niemożliwe, ale szkolenia dotyczące działania reaktora, jego konstrukcji, jego wykorzystania oraz eksperymenty w infrastrukturze towarzyszącej są jak najbardziej wykonalne (np. związane z analizą aktywacyjną, ochroną radiologiczną, detekcją promieniowania itp.)

Podsumowanie

Opracowana analiza w sposób jednoznaczny wskazuje na szybką potrzebę rozpoczęcia prac koncepcyjnych nad nowym reaktorem badawczym, który w przyszłości zastąpi reaktor badawczy MARIA pracujący w Narodowym Centrum Badań Jądrowych. Budowa nowego innowacyjnego reaktora jądrowego pozwoli na utrzymanie dotychczasowych, jak i rozwój nowych kompetencji w dziedzinie energetyki jądrowej, co ma kluczowe znaczenie w dobie budowy w Polsce pierwszej elektrowni jądrowej. Dodatkowo, miarodajnym wskaźnikiem potencjału naukowo-rozwojowego danego kraju jest posiadanie zaawansowanej technologicznie infrastruktury, takiej jak, nowoczesny, wielofunkcyjny reaktor badawczy. Nowy reaktor nie tylko pozwoli na prowadzenie badań naukowych na najwyższym międzynarodowym poziomie, ale również na szereg prac komercyjnych, co bezpośrednio

stworzy most pomiędzy nauką a przemysłem. Ważnym aspektem budowy nowego reaktora jest równoczesna budowa infrastruktury towarzyszącej pozwalającej na maksymalizację jego wykorzystania. Potencjalne powstanie w Polsce „doliny jądrowej”, której sercem będzie nowy reaktor badawczy uplasuje Kraj w gronie liderów w zakresie innowacyjnych badań naukowych oraz prac rozwojowych, których efekty mają bezpośredni, pozytywny wpływ na rozwój wielu zaawansowanych technologicznie gałęzi gospodarki narodowej.

Autor: *Mikołaj Oettingen*

Senior Research Fellow Fundacji im. Kazimierza Pułaskiego; Profesor na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie

Bibliografia

- [1]** Australian Nuclear Science and Technology Organisation, OPAL multi-purpose reactor, <https://www.ansto.gov.au/facilities/opal-multi-purpose-reactor>, dostęp 03.02.2026
- [2]** Kye Hong Lee, Seong Hoon Kim, Jeong-Soo Ryu, Dong Wook Lee, Min Hwan Kim, "The Progress of Kijang Research Reactor Project", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Changwon, Korea, October 24-25, 2024
- [3]** NRG PALLAS, PALLAS-reactor, <https://www.nrgpallas.com/pallas-programme/pallas-reactor>, dostęp 03.02.2026
- [4]** Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Reaktor MARIA, <https://www.ncbj.gov.pl/reaktor-maria>, dostęp 03.02.2026, dostęp 03.02.2026
- [5]** TVP Info, MARIA może ruszyć. Polska znów ma działający reaktor jądrowy, 01.08.2025, <https://www.tvp.info/88124618/reaktor-maria-z-nowym-zezwoleniem-polska-zachowuje-kluczowa-infrastruktura-jadrowa>, dostęp 03.02.2026
- [6]** International Atomic Energy Agency, Research Reactors, <https://www.iaea.org/topics/research-reactors>, dostęp 03.02.2026
- [7]** International Atomic Energy Agency, Research Reactor Database, <https://www.iaea.org/resources/databases/research-reactor-database-rrdb>, dostęp 03.02.2026
- [8]** Clyton Utz, A nuclear powered Australia?, Lexology, Australia, 05.03.2025, <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=59353c90-3a52-4345-8b1c-2f630db367b7>, dostęp 03.02.2026
- [9]** Parliament of Australia, Senate Standing Committee on Economics, Answers to questions on notice, Australia2-3.06.2028, https://www.aph.gov.au/~media/Estimates/Live/economics_ctte/estimates/bud_0809/IISR/answers/bi100.ashx, dostęp 03.02.2026
- [10]** George Braoudakis, OPAL nuclear reactor: reactor specification, In International Atomic Energy Agency (IAEA), Research reactor benchmarking database: Facility specification and experimental data, Technical Reports Series No. 480. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2015

[11] Kith Mendis, John W. Bennett, Jamie Schulz, The utilisation of Australia's research reactor OPAL, Australian Nuclear Science & Technology Organisation (ANSTO), IAEA-TM-38728, Kirrawee DC, New South Wales, Australia, 2010

[12] Jeong-Soo Ryu, Sungwook Ha, Minhwan Kim, Construction Status of Ki-Jang Research Reactor (KJRR) in Korea", Full Paper Transactions, SMiRT 28, Toronto, Canada, 10-15.08.2025,<https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/749f957f-be8b-4e2e-8b6f-065ce229af27/content>, dostęp 03.02.2026

[13] World Nuclear News, Korea starts construction of new research reactor, 03.05.2023,<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Korea-starts-construction-of-new-research-reactor>, dostęp 03.02.2026

[14] Chul Gyo Seo, Hong Chul Kim, Ho Jin Park, and Hee Taek Chae, Innovative Design Concepts for the KIJANG Research Reactor, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Gwangju, Korea, May 30-31, 2013

[15] C. Park, B. C. Lee, J. S. Ryu, and Y. K. Kim, Overall Design Features and Key Technology Development for KJRR, Korea Atomic Energy Research Institute, https://www.kns.org/files/pre_paper/34/15A-%EB%B0%95%EC%B2%A0I.pdf, dostęp 03.02.2026

[16] Nuclear Engineering International, "PALLAS reactor foundation takes shape", 15.04.2025,<https://www.neimagazine.com/news/pallas-reactor-takes-shape/?cf-view>,dostęp 03.02.2026

[17] NRG Pallas, About PALLAS Programme, <https://www.nrgpallas.com/pallas-programme/about-the-programme>, dostęp 03.02.2026

[18] Steven Knol, Research Capabilities in PALLAS, KIVI bezoek PALLAS, 20.06.2025 https://kivi.nl/_Resources/Persistent/4/b/a/3/4ba3005895eb6f06f79abc4b9ffa8cc93de1fb67/PALLAS%20Research%20Capabilities%20-%20KIVI%2020-6-2025.pdf, dostęp 03.02.2026

Fundacja im. Kazimierza Pułaskiego (FKP) jest jednym z czołowym polskich think-tanków, który od prawie 20 lat specjalizuje się w polityce zagranicznej i bezpieczeństwie międzynarodowym.

Głównym obszarem aktywności Fundacji Pułaskiego jest dostarczanie analiz opisujących i wyjaśniających wydarzenia międzynarodowe, identyfikujących trendy w środowisku międzynarodowym oraz zawierających implementowane rekomendacje i rozwiązania dla decydentów rządowych i sektora prywatnego. Fundacja w swoich badaniach koncentruje się głównie na dwóch obszarach geograficznych: transatlantyckim oraz przestrzeni postsowieckiej.

Fundacja Pułaskiego skupia ponad 50 ekspertów i jest wydawcą analiz w cyklach: Komentarz Pułaskiego, Pułaski Policy Paper oraz Raport Pułaskiego. Od 2005 roku Fundacja przyznaje nagrodę Rycerz Wolności dla wybitnych postaci, które przyczyniają się do promowania wartości przyświecających generałowi Kazimierzowi Pułaskiemu tj. wolności, sprawiedliwości oraz demokracji. Jest też inicjatorem oraz organizatorem największego w regionie wydarzenia z zakresu bezpieczeństwa międzynarodowego – Warsaw Security Forum. Od 2017 roku prowadzi również polski oddział międzynarodowej sieci networkingowej Women in International Security Poland (WIIS Poland).

W 2022 roku, w odpowiedzi na inwazję Rosji na Ukrainę, wraz z grupą aktywistów ukraińskich, Fundacja im. Kazimierza Pułaskiego była współzałożycielem Międzynarodowego Centrum na rzecz Zwycięstwa Ukrainy (ICUV). Centrum ma na celu projektowanie i wdrażanie oddolnych, międzynarodowych kampanii rzeczniczych wspierających ukraiński wysiłek wojenny, odbudowę powojenną kraju, jak i rozliczenie rosyjskich zbrodni wojennych.

FKP od lat z powodzeniem utrzymuje swoją pozycję we wpływowym rankingu Global Go To Think Tank Index prowadzonym przez University of Philadelphia. W 2020 roku, Fundacja znalazła się na 1 miejscu listy think tanków w Polsce w kategorii Top Defense and National Security. Ponadto, FKP zajęła 2 miejsce wśród wszystkich polskich think tanków oraz ogólnie 22 miejsce w kategorii Top Think Tanks 2020 w Europie Środkowo-Wschodniej. Fundacja im. Kazimierza Pułaskiego jest laureatem nagrody "Think Tank Awards 2017" w

kategorii „Best EU International Affairs think tank” przyznawaną przez brytyjski magazyn „Prospect”.

Fundacja Pułaskiego posiada status organizacji partnerskiej Rady Europy.

Dbając o najwyższy standard i jakość prowadzonych działań oraz ceniąc rzetelność pracy analitycznej, Fundacja im. Kazimierza Pułaskiego zobowiązuje swoich pracowników i współpracowników do przestrzegania Europejskiego Kodeksu Postępowania w Zakresie Rzetelności Badawczej z 2023 roku.