



**Narodowe Centrum Badań Jądrowych**  
**National Centre for Nuclear Research**  
**Świerk**

# Małe Reaktory Modułowe SMR



# Małe Reaktory Modułowe SMR

K.Samul, A.Strupczewski, G.Wrochna  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

## Streszczenie

- Podejmując dyskusje o SMR należy mieć świadomość, że termin ten jest używany w trzech różnych znaczeniach: reaktor jako pojedynczy moduł, reaktor o konstrukcji modułowej, reaktor małej lub średniej mocy (M=Medium).
- Jedynymi technologiami SMR, które mają szanse na komercyjne wdrożenie w perspektywie 10-12 lat to LWR i HTR. SMR mogą mieć duże zastosowanie w odległych skupiskach ludzkich (USA i Rosja) lub do kogeneracji (Europa). Nie stanowią więc konkurencji, a cenne uzupełnienie floty dużych reaktorów pracujących w podstawie mocy.
- Obecnie nie istnieją komercyjnie dostępne rozwiązania, ale niedawna decyzja rządu USA o dofinansowaniu prac w tym kierunku i rosnąca konkurencja w innych krajach mogą znacznie przyspieszyć wdrożenie. Pierwszych prototypów należy się spodziewać najwcześniej na koniec 2021 roku, a pełnego wejścia na rynek po 2024-2026 r.
- W Polsce, wyboru konkretnej technologii SMR można by dokonać najwcześniej w 2022 r, a budowę rozpocząć ok. 2024-2026. Oznaczałoby to opóźnienie programu jądrowego o 8-10 lat, czyli w praktyce rezygnację z jego realizacji w chwili obecnej.
- Spełnienie założeń „Polityki energetycznej Polski do 2030 r.” wymagałoby wybudowania kilkudziesięciu SMR. Jest to ekonomicznie nieopłacalne i technicznie niemożliwe do zrealizowania.
- W Polsce SMR nie mogą stanowić alternatywy dla programu energetyki jądrowej w obecnym kształcie ale należy poważnie rozważyć możliwość ich zastosowania po 2030 roku do specjalnych zastosowań, związanych głównie z kogeneracją. Wcześniej można rozwijać programy badawcze, łącznie z budową w kraju reaktora badawczego czy prototypowego.

## Spis treści

Nomenklatura .....	2
Reaktory „bezobsługowe” .....	2
Małe reaktory konwencjonalne (LWR) o konstrukcji modułowej .....	2
Małe reaktory IV generacji (HTR, MSR, etc) .....	3
Zasadnicze zalety SMR .....	3
Potencjalne zastosowania SMR .....	4
Ekonomia SMR i bariery wejścia na rynek .....	5
Prognozy rozwoju SMR .....	6
Perspektywy rozwoju SMR w Polsce .....	7
<i>Załączniki:</i>	
A1. Najbardziej zaawansowane projekty SMR .....	9
A2. Projekt reaktora SMR firmy Westinghouse .....	11
A3. Projekt reaktora mPower firmy Babcock & Wilcox .....	15
B1. Zależność szacowanych nakładów inwestycyjnych od mocy i stanu zaawansowania projektu .....	17
B2. Zestawienie kosztów związanych z reaktorami SMR .....	20
B3. Porównanie nakładów na reaktory SMR i reaktory dużej mocy .....	21

## Nomenklatura

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) określa wielkość reaktora według jego mocy elektrycznej: mały (small) <300MWe, średni (medium) 300-700MWe. Skrót SMR i nazwę Small Modular Reactors pierwotnie stosowano wyłącznie do koncepcji małych reaktorów wytwarzanych w fabryce i dostarczanych na miejsce eksploatacji w postaci jednego „modułu”, z już załadowanym paliwem. Rozważano zarówno wykorzystanie pojedynczych modułów dla lokalnych odbiorców energii, jak i budowę elektrowni o dużej mocy (kilkaset MW) budowanej z „modułów” – reaktorów o małej mocy (kilkadziesiąt MW). Później pojęcie SMR zaczęto stosować także do reaktorów o konstrukcji modułowej, tzn. montowanych na placu budowy z gotowych elementów („modułów”) wytworzonych w fabryce. Trzecie znaczenie skrótu SMR jest stosowane przez MAEA na oznaczenie „Small and Medium sized Reactors”.

Ta niejednoznaczność nomenklatury jest powodem wielu nieporozumień. Do częstych błędów należy mieszanie charakterystyk tych różnych rodzin. Np.: SMR (w znaczeniu reaktor jako jeden moduł) mają wiele potencjalnych zalet, ale są dopiero we wczesnej fazie koncepcyjnej. Zaś SMR (w znaczeniu reaktorów o budowie modułowej) są bliższe realizacji, ale mają cechy bardzo zbliżone do reaktorów dużej mocy. W dyskusjach zaś słyszymy, że SMR mają określone zalety i SMR są bliskie realizacji. Obie części zdania są prawdziwe, ale każda dotyczy innej rodziny reaktorów.

## Reaktory „bezobsługowe”

Największe zainteresowanie medialne wzbudzają koncepcje reaktorów „bezobsługowych”. Zakładają one, że reaktor z już załadowanym paliwem dostarcza się gotowy na miejsce eksploatacji. W wykorzystaniu przypomina więc kieszonkową baterię elektryczną tyle, że o znacznie większej pojemności i większym napięciu. Prezentując takie koncepcje podkreśla się ich „prostotę i bezpieczeństwo”, wynikające z tego, że „tam nie ma się co popsuć”.

Taka koncepcja jest obecnie realizowalna w małej skali, gdy można zamienić energię jądrową na elektryczną za pośrednictwem reakcji chemicznych. Brak części mechanicznych gwarantuje wysoką niezawodność. Rozwiązania takie są w praktyce stosowane do zasilania niektórych sond kosmicznych. Całkowita moc takich źródeł jest jednak bardzo ograniczona. Nie znamy dziś sposobu efektywnego wygenerowania tą metodą większych mocy.

Jedyną sprawdzoną w praktyce metodą zamiany energii jądrowej na elektryczną w skali MW jest ciąg: energia jądrowa → cieplna → mechaniczna → elektryczna, realizowany za pomocą turbin i generatorów, podobnie jak w przypadku elektrowni konwencjonalnych (gazowych czy węglowych). Te ostatnie, pomimo znacznie mniejszych wymagań bezpieczeństwa, są dziś niezwykle skomplikowanymi urządzeniami. Elektrownie jądrowe, ze względu na większą gęstość mocy, niebezpieczeństwo utraty kontroli nad reakcją łańcuchową i konieczność odprowadzenia ciepła powyłączeniowego muszą być bardziej skomplikowane. „Bezobsługowość” jest tu więc absolutnie nieosiągalna.

Powyższe argumenty pokazują, że tego typu koncepcje należy raczej zaliczyć do gatunku science-fiction.

## Małe reaktory konwencjonalne (LWR) o konstrukcji modułowej

W energetyce jądrowej powszechnie stosuje się reaktory lekkowodne (LWR = Light Water Reaktor), w tym ciśnieniowe (PWR = Pressurized WR) i wrzące (Boiling WR). Ponad 400 jednostek o łącznym czasie eksploatacji kilkunastu tysięcy lat pozwoliło na zgromadzenie

olbrzymiego doświadczenia i opracowania wielu sprawdzonych rozwiązań technologicznych. Stąd także w obszarze małych reaktorów najbliższe realizacji wydają się reaktory LWR. Przykładem mogą być koreański SMART, mPower autorstwa Babcock&Wilcox oraz Westinghouse SMR. W styczniu 2012 roku rząd USA ogłosił konkurs, którego budżet wynosił 452 mln USD na pięcioletnie dofinansowanie jednego lub dwóch projektów w zakresie reaktorów SMR. Do konkursu zostały zgłoszone cztery projekty. W listopadzie 2012 jako najbardziej obiecujący wybrany został reaktor mPower.

### **Małe reaktory IV generacji (HTR, MSR, etc)**

Do kategorii SMR niektórzy zaliczają też bardziej nowatorskie rozwiązania realizujące ciąg: energia jądrowa → cieplna → mechaniczna → elektryczna. Należy do nich reaktor wysokotemperaturowy (HTR = High Temperature Reactor) chłodzony gazowym helem (stąd w USA oznaczany HTGR = High Temperature Gas Reactor). Ten typ reaktora uznawany jest jako szczególnie obiecujący do kogeneracji ciepła procesowego dla zastosowań przemysłowych. Prototyp pracował niegdyś w Julich, obecnie jeden działa w Japonii, kolejne budowane są w Chinach. W USA prace prowadzi konsorcjum NGNP (New Generation Nuclear Power), gdzie wiodącą rolę odgrywa amerykański oddział AREVA. W Europie prace studialne koordynuje Nuclear Cogeneration Working Group w ramach SNE-TP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform). Przebiegały one w ramach szeregu programów Euratom, jak EUROPAIRS i ARCHER, a obecnie NC2I-R koordynowanego przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Rozwinięciem tych prac jest polski program HTR-PL koordynowany przez AGH a finansowany przez NCBiR.

Do kategorii SMR zaliczane są również małe reaktory chłodzone ciekłym metalem (sodem, ołowiem, bizmutem), których przykładami może być projekt reaktora chłodzonego sodem PRISM rozwijany przez konsorcjum GE Hitachi i projekt reaktora, którego chłodziwem jest eutektyka ołowiano-bizmutowa AVBR-100 opracowany w Rosji.

Odrębną grupę stanowią reaktory na stopionych solach (MSR = Molten Salt Reactor) gdzie stopiony fluorek uranu jest jednocześnie paliwem i chłodziwem, np. projekt Fuji MSR realizowany przez Japońsko-Amerykańsko-Rosyjskie konsorcjum.

### **Zasadnicze zalety SMR**

Wśród zalet SMR wymienia się często bezpieczeństwo i prostotę. Rzeczywiście, kwestie bezpieczeństwa są nieco łatwiejsze niż w wielkich reaktorach ze względu na mniejszą energię, która może się wydzielić w przypadku awarii. Jednak argument dotyczący prostoty jest złudny. Proste są koncepcje „na papierze”. Realne projekty mają stopień skomplikowania tylko niewiele mniejszy niż reaktory wielkie, co przekłada się na większy koszt systemów bezpieczeństwa w przeliczeniu na jednostkę mocy. W przypadku koncepcji reaktorów na lekka wodę, większość systemów zawiera podstawowe komponenty takie jak stabilizator ciśnienia, wytwornice pary wewnątrz zbiornika ciśnieniowego reaktora, co pozwala zmniejszyć ilość potrzebnych rurociągów. Wraz z redukcją ilości rurociągów spada prawdopodobieństwo zajścia awarii utraty chłodziwa (LOCA).

Małe reaktory niekoniecznie mogą okazać się bezpieczniejsze, jeśli weźmiemy pod uwagę bezpieczeństwo przeliczane na MW. Dostawcy małych reaktorów zakładają, że z gotowych jednostek da się stworzyć elektrownię, której całkowita moc będzie zależna od liczby postawionych modułów. Jeśli wziąć pod uwagę reaktor 1600 MW i elektrownię składającą się z 8 jednostek 200 MW to prawdopodobieństwo zajścia ciężkiej awarii w obu przypadkach jest bardzo zbliżone, chyba, że prawdopodobieństwo zajścia ciężkiej awarii w przypadku pojedynczego SMR byłoby dużo mniejsze. W przypadku kilku modułów

pracujących równolegle, operator ma za zadanie kontrolować pracę kilku reaktorów w tym samym czasie.

Ze względu na to że SMR dostarczane są jako gotowe moduły skracany jest czas budowy jednostki w terenie. Należy jednak pamiętać, że konieczne są rozległe prace wyprzedzające dla wyprodukowania elementów modułowych tego reaktora (budowa „fabryki reaktorów”), a to oznacza dodatkowy czas i koszty do poniesienia przed rozpoczęciem samej budowy.

Największą zaletą SMR jest stosunkowo niewielki koszt inwestycyjny jednego bloku, który jest trudną do pokonania barierą dla inwestujących w wielkie reaktory. Wadą jednak są wyższe koszty przypadające na jednostkę mocy, co omawiamy szerzej w załączniku B.

Ważną zaletą SMR jest możliwość instalowania blisko odbiorców, co obniża koszty sieci i przesyłu. Taka bliska lokalizacja stanowi jednak istotną zmianę w filozofii bezpieczeństwa jądrowego, która dotychczas wymagała lokalizowania reaktorów daleko od ośrodków zaludnienia. Zezwolenie na lokalizację obok miast będzie wymagało pogłębionych analiz ze strony dozoru jądrowego, a to oznacza wydłużenia procesu licencjonowania SMR.

## Potencjalne zastosowania SMR

Autorzy tekstów opisujących reaktory SMR zgodnie stwierdzają, że ze względu na ich wysokie koszty ich stosowanie jest ekonomicznie uzasadnione tylko

- w lokalizacjach położonych daleko od sieci przesyłowej, np. na dalekiej północy w Rosji lub w USA,
- w krajach rozwiniętych jako jednostki uzupełniające niewielki wzrost potrzeb energetycznych w poszczególnych regionach energetycznych,
- jako lokalne źródła ciepła dla przemysłu, miejskich sieci ciepłowniczych, odsalania wody morskiej,
- w krajach o małej łącznej mocy sieci, gdzie duże bloki trudno stosować ze względu na równowagę sieci.

Reaktory SMR nie stanowią konkurencji dla reaktorów dużej mocy mających pracować jako podstawowe elementy systemu energetycznego.

W USA i Rosji rozwija się koncepcje SMR w celu zasilania w energię elektryczną niewielkich skupisk ludzkich oddalonych od istniejących sieci przesyłowych.

W niewielkich krajach, takich jak Litwa, reaktor o mocy rzędu 1000 MW stanowiłby zbyt duży ułamek mocy krajowej, co groziłoby destabilizacją systemu w przypadku konieczności wyłączenia. Przykładowo w Armenii jeden działający tam reaktor typu VVER 440 w 2011 roku wyprodukował 33% energii elektrycznej w tym kraju. Na rok 2020 planowane jest wybudowanie kolejnego reaktora VVER o mocy 1000 MW. Kilka SMR'ów stworzyłoby system droższy, ale stabilniejszy.

W większych krajach o stosunkowo dużej gęstości zaludnienia (takich jak Polska) SMR'y rozważane są przede wszystkim do zastosowań kogeneracyjnych. Wyższy koszt produkcji energii elektrycznej wynikający z czynnika skali jest tu kompensowany zyskiem z wykorzystania ciepła. HTR o temperaturze w obiegu wtórnym rzędu 600°C i więcej stanowią atrakcyjne źródło ciepła procesowego np. dla fabryk chemicznych. Małe LWR mogą być wykorzystane do zasilania miejskich sieci ciepłowniczych lub klimatyzacji, a także do odsalania wody morskiej.

Nieporozumieniem jest rozważanie możliwości zastąpienia dużych reaktorów przez SMR w podstawie mocy. Nawet w energetyce węglowej budowa bloków 100 czy 200 MW jest dziś mało opłacalna, ze względu na część kosztów, która nie skaluje się z mocą. W energetyce jądrowej ten nieskalowalny składnik jest jeszcze większy ze względu na bardziej złożone

systemy sterowania, zwielokrotnione systemy zabezpieczeń, obudowę bezpieczeństwa (która musi wytrzymać uderzenie samolotu) itp.

## **Ekonomia SMR i bariery wejścia na rynek**

Wspomniany wyżej czynnik skali powoduje, że SMRy nie znalazły jeszcze powszechnego zastosowania. Owszem, na świecie pracuje ponad 100 reaktorów małej i średniej mocy, ale są to głównie reaktory wybudowane 30-60 lat temu. Produkcja i eksploatacja SMRów może być opłacalna jedynie po wdrożeniu modelu produkcji seryjnej. Przeniesienie większości czynności konstrukcyjnych z placu budowy do fabryki upraszcza logistykę i przyspiesza prace. Wprowadzenie produkcji seryjnej znakomicie zwiększa efektywność.

Pod względem biznesowym model rynku SMR jest podobny do rynku dużych samolotów pasażerskich:

- duży koszt inwestycji i długi czas jej zwrotu,
- trudne i kosztowne kwestie bezpieczeństwa, które ma najwyższy priorytet,
- skala potrzeb rządu kilku dla małego, a kilkuset dla dużego kraju.

Rynek SMR jest jednak o tyle trudniejszy, że nie ma możliwości stopniowego rozwoju bazy produkcyjnej (od małych do dużych samolotów). Ceną za mały koszt inwestycji u odbiorcy reaktora jest wysoki koszt inwestycji w fabrykę reaktorów u producenta. Stanowi to bardzo poważną barierę wejścia na rynek.

Drugą barierą jest kwestia licencjonowania. Wypracowane dotychczas przez dozory jądrowe procedury licencjonowania dużych reaktorów nie są adekwatne do SMR. Koszty licencjonowania pierwszych SMR będą więc istotnie większe, gdyż muszą pokryć także komponent związany z opracowaniem nowych procedur. Tymczasem inwestor nie zaryzykuje wkładu finansowego w reaktor, co do którego nie ma pewności, że uzyska licencję. Z kolei producent nie sfinansuje licencjonowania bez zamówienia od inwestora w portfelu. Mamy do czynienia z błędnym kołem, które może przerwać tylko wsparcie z pieniędzy publicznych. Takie rozumowanie stało za decyzją USA wydania 452 mln \$ na dopracowanie projektu wybranego SMR i 50 mln \$ na przygotowanie dozoru do jego licencjonowania.

**Tabela 1. Podsumowanie zalet i barier dla rozwoju reaktorów SMR**

(wg. „Global Trends, Prospects and Challenges for Innovative SMRs Deployment”, M. Hadid Subkki, MAEA)

	<b>Zalety</b>	<b>Bariery</b>
<b>Zagadnienia technologiczne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skrócenie czasu budowy reaktora (modularyzacja);</li> <li>• Potencjał dla zwiększenia bezpieczeństwa i niezawodności;</li> <li>• Uproszczenia projektowe;</li> <li>• Możliwość wykorzystania do celów związanych nie tylko z produkcją energii elektrycznej;</li> <li>• Zastąpienie starzejących się elektrowni konwencjonalnych, ograniczenia emisji gazów cieplarnianych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Licencjonowanie (ze względu na zastosowanie nowych rozwiązań jeszcze niestosowanych);</li> <li>• Nowe rozwiązania nieoparte na technologii reaktorów lekkowodnych;</li> <li>• Efektywność pracy reaktora.</li> <li>• Znaczenie czynnika ludzkiego przy kontrolowaniu elektrowni złożonych z wielu reaktorów SMR;</li> <li>• Implementacja wniosków wyciągniętych z awarii w Fukushima w projekcie i bezpieczeństwie reaktorów;</li> </ul>

	Zalety	Bariery
Aspekty nie technologiczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dopasowanie do małych systemów elektroenergetycznych;</li> <li>• Dopasowanie do rosnącego zapotrzebowania na energię przez dostawianie kolejnych modułów;</li> <li>• Elastyczność lokalizacyjna;</li> <li>• Zmniejszenie strefy wyłączenia;</li> <li>• Obniżenie potrzebnego kapitału;</li> <li>• Łatwiejsze finansowanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konkurencyjność ekonomiczna;</li> <li>• Oszacowanie kosztów pierwszego SMR;</li> <li>• Wymagania i infrastruktura regulacyjna (w krajach, które posiadają już elektro-wnie jądrowe, jak i w krajach, które dopiero zaczynają program jądrowy);</li> <li>• Dostępność projektów dla krajów, które zaczynają program jądrowy;</li> <li>• Implementacja wniosków wyciągniętych z awarii w Fukushima dotyczących kwestii instytucjonalnych i akceptacji opinii publicznej</li> </ul>

## Prognozy rozwoju SMR

MAEA wydała szereg opracowań dotyczących SMR, ale rozumianych w znaczeniu „Small & Middle sized” a nie „Small Modular”. Utrudnia to analizę jej stanowiska. Projekt reaktora IRIS rozwijany pod patronatem MAEA został zarzucony.

OECD Nuclear Energy Agency w liczącym prawie 50 stron opracowaniu „Technology Roadmap” (wydanie 2010) na SMR poświęca niecałą stronę. Przegląd rozważanych na świecie koncepcji kwituje dość pesymistycznym stwierdzeniem: „*great majority of nuclear capacity by 2050 will be provided by larger scale plants*”.

W Europie, plany rozwoju nowych technologii w energetyce jądrowej wyznacza Platforma Technologiczna Zrównoważonej Energetyki Jądrowej (SNE-TP) zrzeszająca producentów reaktorów, operatorów elektrowni, dozory jądrowe i organizacje badawcze. W opublikowanej w styczniu 2013 Strategic Research and Innovation Agenda” o SMR mówi się jedynie w kontekście kogeneracji. Wymienianym tu z nazwy typem SMR jest HTR, który jest podawany jako najpoważniejszy kandydat do zastosowań kogeneracyjnych.

Prace nad doskonaleniem reaktorów SMR są obecnie prowadzone w kilku wiodących krajach, ale w żadnym z nich nie wydano jeszcze pozwolenia budowę. W listopadzie 2012 r. firma Babcock and Wilcox otrzymała od Department of Energy grant w wysokości 452 mln USD na pięcioletnie prace badawczo-rozwojowe dla reaktora mPower o mocy 180 MWe. Prace te będą trwały do końca 2016 roku, prawdopodobnie równoległe z procesem licencjonowania. Po ich zakończeniu może być wydana licencja na budowę prototypu. Dotychczasowe doświadczenie z prace komisji dozoru jądrowego wskazuje, że licencjonowanie nowego typu reaktora to proces długotrwały, rzędu pięciu lat. Przy optymistycznym założeniu, że w przypadku reaktora mPower proces licencjonowania będzie krótki i zakończy się jednocześnie z zakończeniem badań, cykl przygotowania produkcji elementów modułowych i budowy samego reaktora będzie trwał około 6 lat. Jeśli przygotowania do produkcji przemysłowej modułów zostaną wdrożone wcześniej, jeszcze przed udzieleniem licencji, to czas potrzebny na doprowadzenie do uruchomienia reaktora prototypowego można będzie nieco skrócić. Jednak uruchomienie prototypowego reaktora w 2021 roku, jak zapowiada producent, byłoby dużym sukcesem. Bardziej realnie należy oczekiwać uruchomienia tego reaktora w 2022 roku. Na prawdziwie seryjną i w pełni komercyjnie opłacalną produkcję SMR trzeba będzie czekać jeszcze kilka lat dłużej, przy sprzyjającym otoczeniu ekonomicznym i politycznym.



Tymczasem 11.03.2013 przedstawiciel Departamentu Energii USA Peter Lyons powiedział, że rząd USA rozważy jeszcze wsparcie projektów mniej zaawansowanych niż Babcock&Wilcox gdyż „wymóg uruchomienia prototypu przed rokiem 2022 obciążałby projekty zbyt dużym ryzykiem technologicznym i planistycznym”.

Nie należy jednak zapominać, że nawet po zakończonym sukcesem wdrożeniu SMRy nie będą konkurencją dla dużych jednostek, gdyż ich przewaga uwidoczni się jedynie w specyficznych zastosowaniach, dyskutowanych wyżej.

## **Perspektywy rozwoju SMR w Polsce**

### **SMR w podstawie mocy**

„Polityka energetyczna Polski do roku 2030” zakłada wybudowanie do roku 2030 reaktorów jądrowych o łącznej mocy elektrycznej 6000 MW. Gdyby oprzeć to na technologii SMR konieczne byłoby zbudowanie kilkudziesięciu reaktorów. Ekonomiczną nieopłacalność takiego przedsięwzięcia dyskutujemy w załączniku B. Poniżej rozważamy techniczną możliwość jego realizacji.

**Tabela 2. Liczba reaktorów danego typu potrzebna do realizacji założeń „Polityki energetycznej Polski do 2030 roku”**

reaktor	moc	liczba reaktorów na 6000 MW
EPR	1600 MWe	4
AP1000	1000 MWe	6
mPower	160 MWe	38
NuScale	45 MWe	134

Według zasady przyjętej w polskiej energetyce jądrowej, Polska może zdecydować się na budowanie tylko takiego typu reaktora, który został już zbudowany w innym kraju i dla którego dysponujemy doświadczeniem eksploatacyjnym. Wymagania te spełniają reaktory III generacji, których rozwiązania są oparte na reaktorach II generacji i na długotrwałych badaniach doświadczalnych. Natomiast SMRy to reaktory nowego typu, dlatego trzeba poczekać z ich wyborem do chwili uzyskania doświadczeń z ich budowy i eksploatacji. Jeden cykl paliwowy w reaktorze mPower trwa 4 lata. Dopiero po zdobyciu doświadczenia przynajmniej z jednego cyklu eksploatacji – a więc w 2024-2026 roku - można będzie mówić o oferowaniu go do masowej produkcji. Warunkową decyzję o wyborze technologii można ewentualnie podjąć w kilka miesięcy po uruchomieniu prototypu, a więc w 2022 roku, tak by decyzja o rozpoczęciu budowy była podjęta z uwzględnieniem doświadczeń pełnego cyklu paliwowego, czyli ok. 2024-2026.

Opłacalność przedsięwzięcia poprawiłaby produkcja elementów modułowych w kraju, zwłaszcza ze względu na dużą liczbę potrzebnych reaktorów. Gdyby elementy te miał wykonywać przemysł polski, to trzeba byłoby doliczyć dalsze lata na opanowanie produkcji elementów modułowych. Nie jest to wcale łatwe – znana firma amerykańska Shaw, współpracująca od wielu lat z firmą Westinghouse, miała poważne trudności z zapewnieniem jakości przy produkcji elementów modułowych AP1000. Spowodowało to wielomiesięczne opóźnienia. Licząc optymistycznie 6 lat na uruchomienie produkcji i budowę reaktora, uruchomienia pierwszego bloku można oczekiwać ok. 2030-2032 roku.

Zatem realizacja założeń „Polityki energetycznej Polski do 2030” nie jest technicznie możliwa przy wykorzystaniu SMR.

### **SMR w zastosowaniach specjalnych**

W Polsce istnieje zapotrzebowanie na SMR głównie w zakresie produkcji ciepła. HTR mogłyby być wykorzystane do zasilania dużych zakładów przemysłowych, zwłaszcza chemicznych, zaś LWR – do zasilania dużych sieci ciepłowniczych. Warto przy tym zauważyć, że w Polsce już istnieją rozbudowane sieci ciepłownicze w wielu miastach, jedne z większych na świecie.

Produkcja ciepła z SMR pozwoliłaby zmniejszyć import ropy i gazu, a tym samym zwiększyć bezpieczeństwo energetyczne kraju. Przyjmując założenie, iż chcemy skorzystać ze sprawdzonej już technologii, należy jednak pamiętać, że będzie ona dostępna dopiero po 2022 roku. Oznacza to możliwość uruchomienia pierwszego komercyjnego SMR w Polsce najwcześniej ok. 2030 roku.

Z kolei zważywszy na stosunkowo dużą skalę zapotrzebowania (pamiętając, że nasz kraj jest jednym z większych w UE) warto rozważyć silne zaangażowanie w prace nad rozwojem tej technologii. Już obecnie polskie instytucje naukowe mocno angażują się w program HTR i są postrzegane w UE jako potencjalni liderzy nowych programów badawczych w tym zakresie. Budowa w Polsce reaktora badawczego czy prototypowego byłaby uwieńczeniem tych starań i mogłaby stanowić podstawę do rozwoju nowej specjalności polskiego przemysłu. Przedsięwzięcie takie mogłoby być sfinansowane w dużej mierze z funduszy strukturalnych UE przy stosunkowo niewielkim wkładzie finansowym polskiego przemysłu i minimalnym wsparciu budżetowym. Prace nad takim projektem znacznie wzmocniłyby zaplecze badawcze i kompetencje wytwórcze w kraju, co stanowiłoby ogromne wsparcie dla programu polskiej energetyki jądrowej.

## Załącznik A. Wiodące koncepcje reaktorów SMR

### A1. Najbardziej zaawansowane projekty SMR

W przypadku komercyjnych zastosowań reaktorów niewątpliwie prym wiodą reaktory lekkowodne (LWR), typu ciśnieniowego (PWR – Pressurized Water Reactor) i wrzącego (BWR – Boiling Water Reactor). Ich znaczna liczba i czas działania pozwoliły na zebranie doświadczenia, które następnie zostało wykorzystane przy projektowaniu nowych rozwiązań i wyselekcjonowaniu tych najbardziej niezawodnych. Większość z tych systemów zostało użytych przy projektowaniu reaktorów SMR. Z tych powodów najbardziej prawdopodobne będzie wybudowanie pierwszego nowoczesnego, demonstratora małego reaktora modułowego opartego o technologię reaktorów lekkowodnych. Dane z Tabela A1.1 zdają się potwierdzać to stwierdzenie. Ponad połowa zaawansowanych projektów to reaktory lekkowodne.

**Tabela A1.1 Najbardziej zaawansowane projekty SMR [wg. World Nuclear Association]**

Nazwa	Moc	Typ <sup>1</sup>	Projektant
<b>KLT-40S</b>	35 MWe	PWR	OKBM, Rosja
<b>VK-300</b>	300 MWe	BWR	Atomenergoproekt, Rosja
<b>CAREM</b>	27-100 MWe	PWR	CNEA & INVAP, Rosja
<b>IRIS</b>	100-335 MWe	PWR	Westinghouse-led, international
<b>Westinghouse SMR</b>	200 MWe	PWR	Westinghouse, USA
<b>mPower</b>	150-180 MWe	PWR	Babcock & Wilcox + Bechtel, USA
<b>SMR-160</b>	160 MWe	PWR	Holtec, USA
<b>SMART</b>	100 MWe	PWR	KAERI, South Korea
<b>NuScale</b>	45 MWe	PWR	NuScale Power + Fluor, USA
<b>ACP100</b>	100 MWe	PWR	CNNC & Guodian, Chiny
<b>HTR-PM</b>	2x105 MWe	HTR	INET & Huaneng, Chiny
<b>EM2</b>	240 MWe	HTR	General Atomics (USA)
<b>SC-HTGR (Antares)</b>	250 MWe	HTR	Areva
<b>BREST</b>	300 MWe	FNR	RDIPE, Rosja
<b>SVBR-100</b>	100 MWe	FNR	AKME-engineering (Rosatom/En+), Rosja
<b>Gen4 module</b>	25 MWe	FNR	Gen4 (Hyperion), USA
<b>Prism</b>	311 MWe	FNR	GE-Hitachi, USA
<b>FUJI</b>	100 MWe	MSR	ITHMSO, Japonia-Rosja-USA








Większość projektów SMR LWR zakłada, że elementy obiegu pierwotnego typowego dużego reaktora PWR, tj. wytwornice pary, stabilizator ciśnienia, będą zamknięte w ciśnieniowym zbiorniku reaktora (wyjątek stanowią projekty KLT, VBER i Holtec SMR, których wytwornice pary znajdują się poza zbiornikiem ciśnieniowym reaktora). Taka konfiguracja jednostki sprawia, że maleje długość wykorzystanych rurociągów, co obniża zajęcie awarii związanej z utratą chłodziwa, na wypadek której projektowane są systemy dużych elektrowni jądrowych.

<sup>1</sup> Wyjaśnienie skrótów użytych w tabeli: **PWR** (Pressurized Water Reactor) - Reaktor Wodny Ciśnieniowy; **HTR** (High Temperature Reactor) - Reaktor Wysoko Temperaturowy; **FNR** (Fast Neutron Reactor) - Reaktor na neutrony prędkie; **MSR** (Molten Salt Reactor) - Reaktor na stopione sole.

Krótką charakterystykę stanu zaawansowania wiodących obecnie koncepcji reaktorów SMR podaje Tabela A1.2.

**Tabela A1.2 Stan zaawansowania wiodących koncepcji reaktorów SMR**

(wg. "Global Trends, Prospects and Challenges for Innovative SMRs Deployment", M. Hadid Subkki, MAEA)

Kraj	Projekt	Stan zaawansowania projektów SMR
	SMART	W lipcu 2012 r. Koreńska Komisja Bezpieczeństwa i Ochrony Jądrowej zatwierdziła projekt reaktora SMART o mocy 100 MWe. Jest to pierwszy reaktor SMR PWR który uzyskał certyfikację.
	NuScale mPower Westinghouse- SMR HI-SMUR	W listopadzie 2012 r. Departament Energii Stanów Zjednoczonych spośród czterech projektów wybrał mPower firmy Babcock&Wilcom i przeznaczył 425 mln \$ na jego rozwój.
	KLT-40s SVBR-100 SHELF	Dwa moduły reaktorów KLT-40 montowane jako napęd na statkach – bliskie ukończenia. Reaktory SVBR chłodzone eutektyką ołowiano-bismutową, będą uruchomione około 2018 roku. Rozpoczęte prace nad koncepcją reaktora PWR SMR osadzonego na dnie morskim.
	Flexblue	Firma DCNS pracuje nad koncepcją reaktora SMR o mocy 50-250 MWe osadzanego na dnie morskim na głębokości 60-100 m. i w odległości 5-15 km od brzegu.
	CAREM-25	Prace nad wyborem lokalizacji dla reaktora CAREM-25 rozpoczęły się we wrześniu 2011. Budowa demonstratora rozpocznie się wkrótce.
	4S	Toshiba zgłosiła projekt reaktora 4S do certyfikacji przez Amerykański Dozór Jądrowy (NRC), aby ubiegać się o możliwość budowy jednostki na Alasce i w krajach rozpoczynających program jądrowy
	HTR-PM ACP-100	Dwa moduły reaktorów HTR-PM są w trakcie budowy. Firma CNNC pracuje nad projektem reaktora ACP-100

## **A2. Projekt reaktora SMR firmy Westinghouse**

Opracowanie zostało przygotowane w oparciu o materiały dostępne na stronach:

- <http://www.westinghousenuclear.com/smr/index.htm>
- <http://www.iaea.org/>
- <http://www.nrc.gov/>

### **A2.1 Ogólny opis jednostki.**

Mały reaktor modułowy projektowany przez firmę Westinghouse jest to reaktor typu PWR o mocy elektrycznej 225 MWe. Wykorzystane systemy bazują na rozwiązaniach, które zostały użyte przy projektowaniu reaktora AP 1000. Cały układ pierwotny zamknięty został w szczelnym zbiorniku reaktora. Poszczególne elementy obiegu przedstawione są na Rys. A2.1.

### **A2.2 Rdzeń reaktora.**

Pręty paliwowe ułożone są w kasetach 17 x 17. W rdzeniu znajduje się ich 89, co zapewnia moc termiczną reaktora równą 800 MW<sub>th</sub>. Temperatura wody na wlocie do rdzenia wynosi około 294 °C, a wylotowa około 323 °C. Aktywna część ma długość około 2.4m. Paliwem jest wzbogacony uran (< 5%). Konstruktorzy zakładają, że czas pracy reaktora bez wymiany paliwa będzie wynosił około 24 miesięcy.

### **A2.3 Pręty kontrolne i ich mechanizmy.**

Pręty kontrolne zostały zaprojektowane na podstawie sprawdzonych rozwiązań stosowanych w dużych reaktorach. Umieszczone są w środku zbiornika ciśnieniowego reaktora. Podczas działania reaktora utrzymywane są za pomocą elektromagnesów. W przypadku braku zasilania w energię elektryczną elektromagnesy zwalniają pręty kontrolne, które pod wpływem grawitacji wpadają do rdzenia, wygaszając reakcje łańcuchowe zachodzące w jego wnętrzu.

### **A2.4 Stabilizator ciśnienia**

Stabilizator ciśnienia jest urządzeniem, które zapewnia stałe ciśnienie panujące w układzie pierwotnym reaktora. W przypadku dużych reaktorów jądrowych stanowi on oddzielny element podłączony do gorącej gałęzi obiegu pierwotnego. W przypadku reaktorów SMR jest umiejscowiony wewnątrz zbiornika ciśnieniowego, nad wytwornicą pary, od której został oddzielony stalową przegrodą (Rys. A2.2). Stabilizator ciśnienia jest wyposażony w pręty podgrzewane elektrycznie, oraz system zraszaczy.

### **A2.5 Wytwornica pary**

W przypadku dużych reaktorów typu PWR wytwornica pary stanowi oddzielny element obiegu pierwotnego. W jej wnętrzu znajduje się wymiennik ciepła, w którym woda płynąca z kondensatora zamieniana jest w parę kosztem odebranego ciepła z chłodziwa. Następnie para nasycona trafia do separatora, gdzie woda oddzielana jest od pary w sposób mechaniczny. Te same procesy zachodzą w reaktorach SMR z tą różnicą, że wytwornica pary i separator pary stanowią dwa oddzielne elementy, z czego pierwszy umieszczony jest w zbiorniku ciśnieniowym reaktora (Rys. A2.1, punkt 3), a drugi znajduje się poza obudową bezpieczeństwa reaktora.

### **A2.6 Pompy obiegu pierwotnego**

W reaktorze firmy Westinghouse przepływ wymuszony jest za pomocą 8 pomp zamontowanych horyzontalnie do zbiornika ciśnieniowego reaktora.

## **A2.7 Obudowa bezpieczeństwa**

Obudowa bezpieczeństwa pokazana została na Rys. A2.4. Jej wymiary to: wysokość około 27.1 m i średnica około 9.8 m. W jej wnętrzu zostały umieszczone dwa zbiorniki i 4 dodatkowe wymienniki ciepła z mieszaniną wody i kwasu borowego. Proporcje reaktora można zobaczyć na Rys. A2.5 gdzie kontury obudowy bezpieczeństwa reaktora SMR (czerwone) zostały przedstawione na planie reaktora AP 1000.

## **A2.8 Awaria w reaktorze SMR firmy Westinghouse**

Reaktor firmy Westinghouse został wyposażony w pasywne systemy bezpieczeństwa, tj. systemy, których działanie zostało oparte o zjawiska zachodzące w przyrodzie, nie potrzebują interwencji człowieka jak i doprowadzenia energii z zewnątrz. Dzięki małym wymiarom i co za tym idzie małej mocy, pasywne systemy zabezpieczeń są bardziej efektywne w przypadku odprowadzania ciepła z reaktora.

W przypadku awarii związanej z utratą chłodziwa, następuje natychmiastowe wsunięcie prętów kontrolnych do rdzenia i wygaszenie reakcji łańcuchowych zachodzących w paliwie. Ze względu na obecność produktów rozpadu w rdzeniu nadal generowana jest energia która musi zostać odebrana przez chłodziwo w postaci ciepła. Ciepło te nazywane jest ciepłem powyłłączeniowym<sup>2</sup> i stanowi niewielki procent całkowitego ciepła wydzielanego podczas normalnej pracy reaktora.

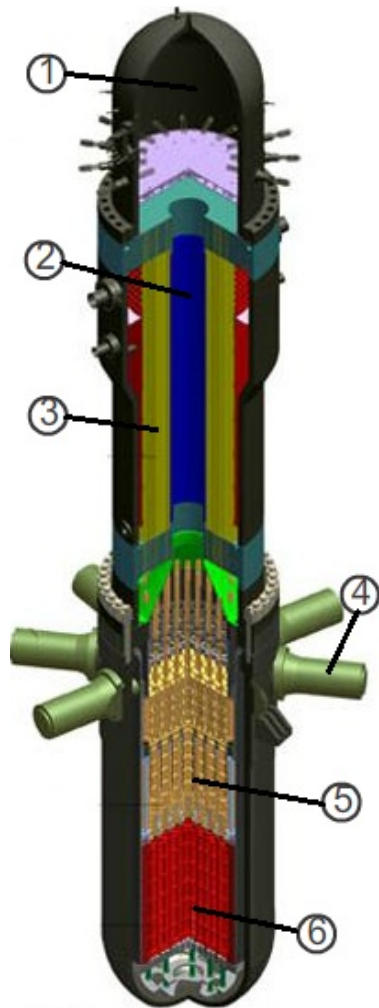
Naturalna cyrkulacja zapewnia odbiór ciepła powyłłączeniowego z chłodziwa za pomocą wytwornicy pary jak to jest pokazane na Rys. A2.6. Wraz z obniżającym się poziomem wody w zbiorniku ciśnieniowym reaktora, wytwornice pary nie są w stanie odebrać całego ciepła. W związku z tym uruchomione zostają dodatkowe cztery wymienniki ciepła umieszczone w obudowie bezpieczeństwa. Pod wpływem grawitacji mieszanina wody z kwasem borowym wpływa do reaktora. Jest to dodatkowy mechanizm zatrzymujący reakcje rozszczepienia zachodzące w rdzeniu reaktora<sup>3</sup> i stanowi uzupełnienie wody chłodzącej. Odebrana energia z chłodziwa przekazywana jest wodzie kierowanej do zewnętrznego zbiornika (Rys. A2.7).

W przypadku gdy poziom wody w rdzeniu jest bardzo niski następuje pasywne uzupełnienie wody z dwóch kolejnych zbiorników znajdujących się w obudowie bezpieczeństwa reaktora (Rys. A2.8). Para wodna która tworzy się we wnętrzu obudowy bezpieczeństwa unosi się do góry gdzie poprzez wymianę ciepła z zewnętrznym zbiornikiem jest ochładzana i kondensowana na ściankach obudowy. Obudowa bezpieczeństwa i system pierwotny reaktora połączone są poprzez zawór, który zostaje otwarty podczas awarii. Woda w basenie otaczającym reaktor jest stale uzupełniana z pobliskiego, dużego zbiornika, który w razie potrzeby może być napełniony z zewnątrz (rys. A.9). Pasywne systemy zostały zaprojektowane tak, aby zapewnić ciągłe chłodzenie rdzenia przez 7 dni.

---

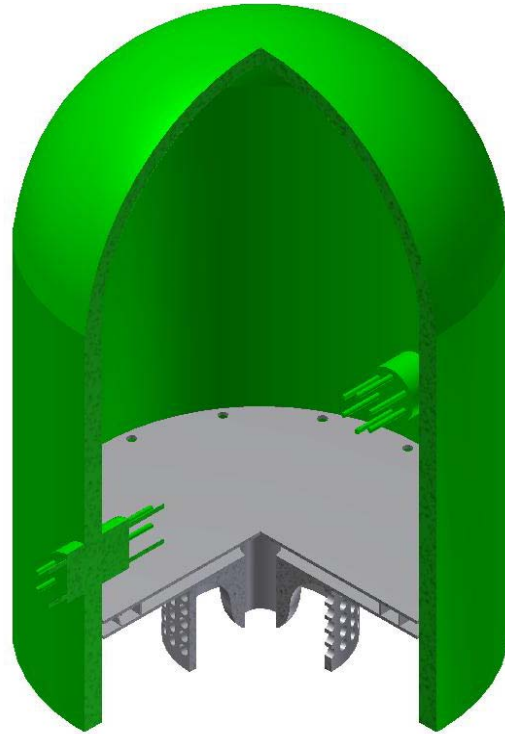
<sup>2</sup> Ciepło powyłłączeniowe wydziela się również w przypadku normalnego wyłączenia reaktora.

<sup>3</sup> Bor jest bardzo dobrym pochłaniaczem neutronów.



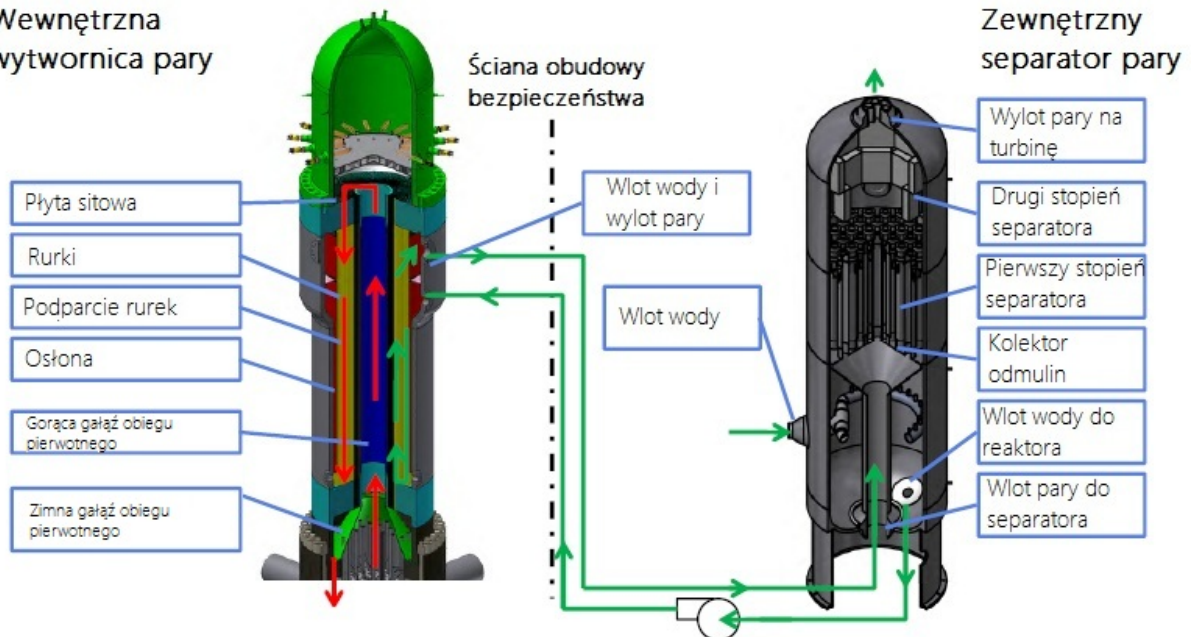
Rys. A2.1 Zbiornik reaktora SMR projektu firmy Westinghouse

1 - stabilizator ciśnienia, 2 - rurociąg gorącej wody doprowadzający podgrzane chłodziwo do wytwornicy pary (3), 4 - pompy wody chłodzącej wymuszającej przepływ chłodziwa w obiegu pierwotnym, 5 - układ prętów kontrolnych wraz z ich mechanizmami, 6 - rdzeń reaktora.



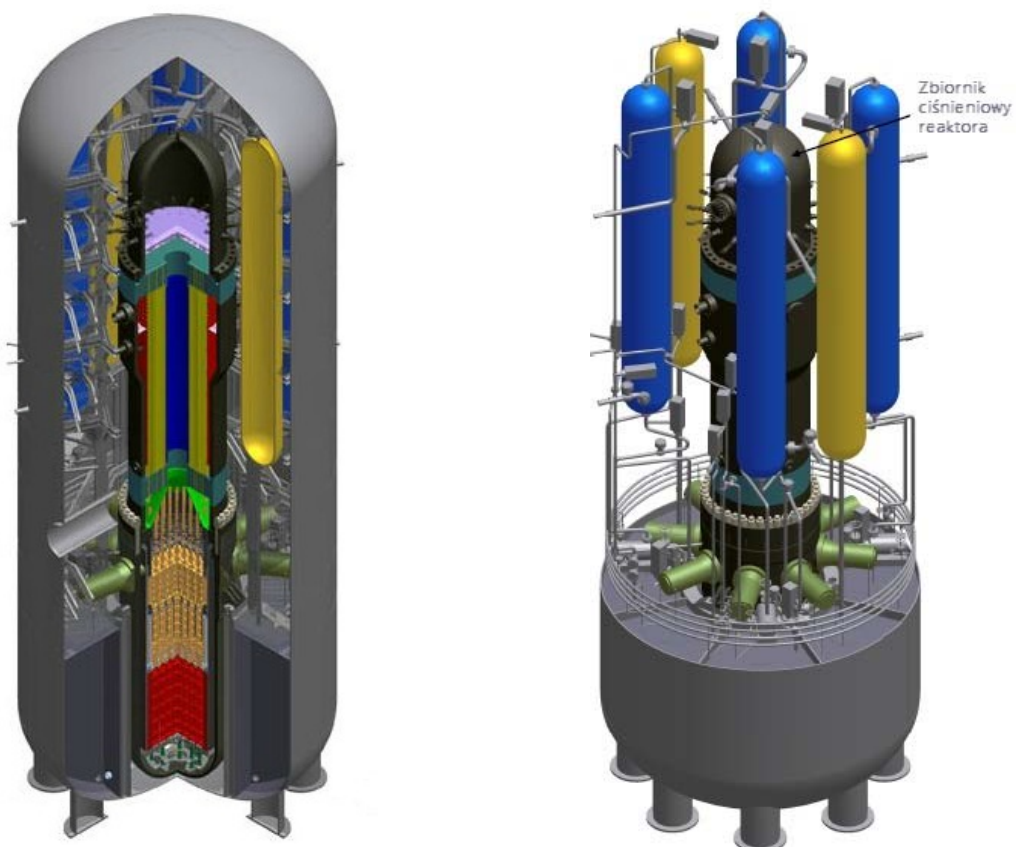
Rys. A2.2 Stabilizator ciśnienia projektu firmy Westinghouse

Wewnętrzna wytwornica pary

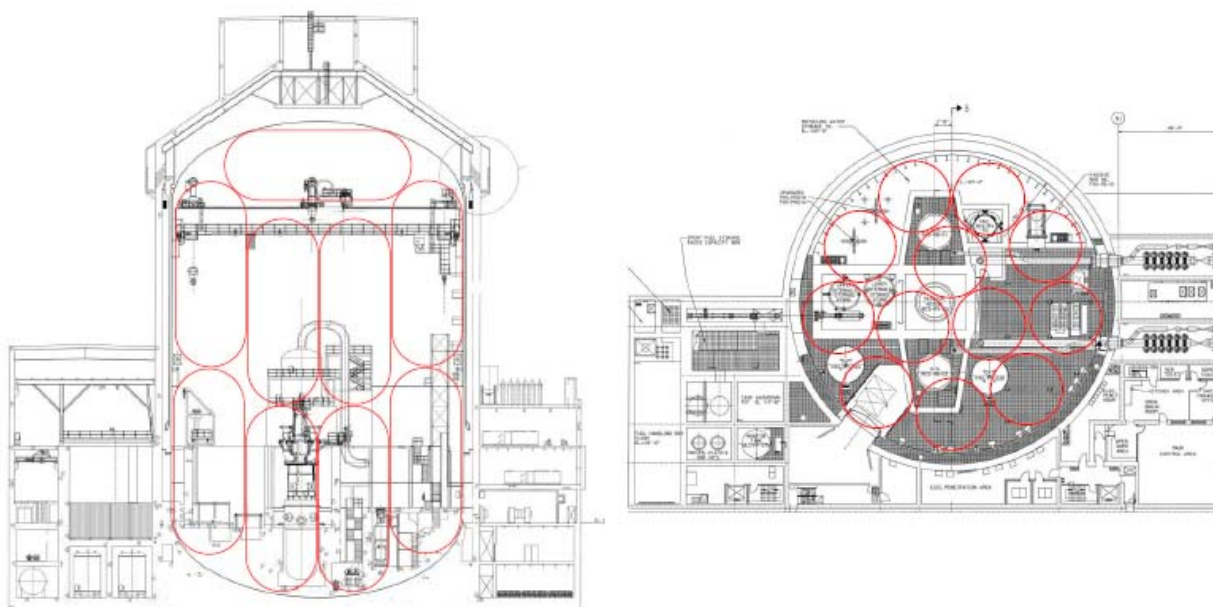


Rys. A2.3 Wytwornica pary reaktora SMR wraz z zewnętrznym separatorem pary projektu firmy Westinghouse.



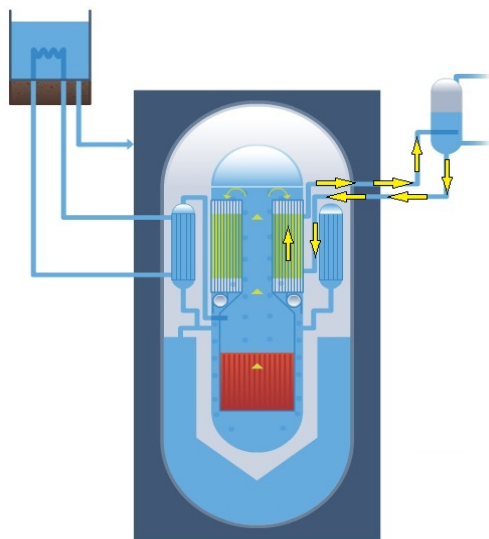


**Rys. A2.4 Obudowa bezpieczeństwa reaktora SMR projektu firmy Westinghouse**

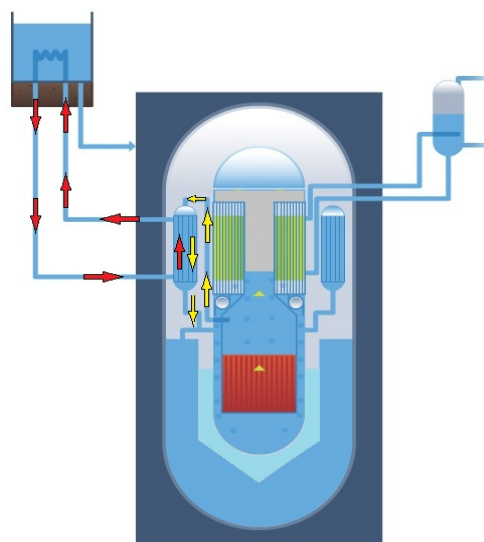


**Rys. A2.5 Umieszczenie obudowy bezpieczeństwa reaktora SMR na planie reaktora AP 1000. Oba reaktory zaprojektowane zostały przez firmę Westinghouse.**

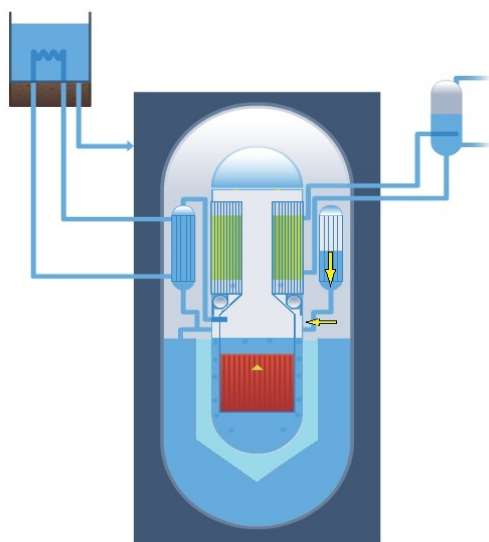




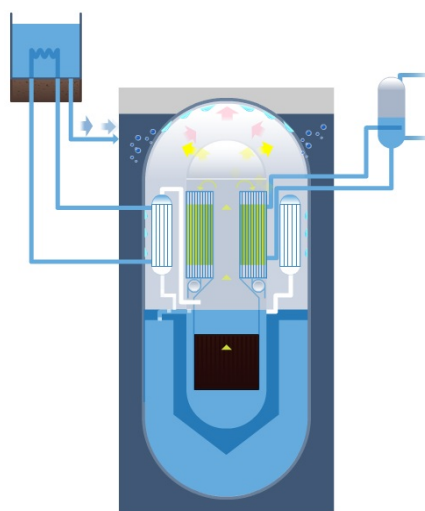
Rys. A2.6 Odbiór ciepła powyłaczeniowego



Rys. A2.7 Długotrwały odbiór ciepła powyłaczeniowego.



Rys. A2.8 Pasywne uzupełnienie wody



Rys. A2.9 Pasywne chłodzenie obudowy bezpieczeństwa

### A3. Projekt reaktora mPower firmy Babcock & Wilcox

Reaktor mPower jest to projekt, który wygrał konkurs o dofinansowanie badań i prac nad rozwojem najbardziej obiecującej koncepcji reaktorów SMR, dlatego krótko zostanie przybliżona jego konstrukcja.

Jednostka została zaprojektowana przez firmę Babcock & Wilcox. Jest to lekkowodny reaktor typu PWR o mocy termicznej 530 MWt. Czas pracy przewidziany jest na 60 lat.

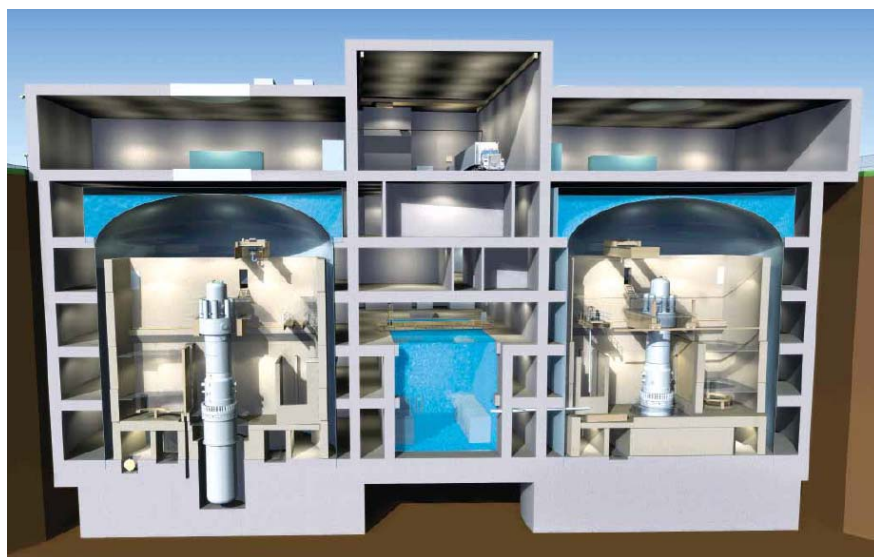
Obudowa bezpieczeństwa reaktora wykonana jest ze stali i znajduje się pod ziemią. Konfiguracja elektrowni dla dwóch jednostek została przedstawiona na Rys. A3.1

Reaktor posiada wiele systemów i rozwiązań podobnych do tych zastosowanych w SMR zaprojektowanym przez firmę Westinghouse. Elementy obiegu pierwotnego reaktora zostały umieszczone wewnątrz zbiornika ciśnieniowego reaktora, którego wysokość i średnica wynoszą odpowiednio 25.3 m i 3.96 m. Rdzeń reaktora składa się 69 kaset paliwowych o konfiguracji 17 x 17 zawierających paliwo uranowe o wzbogaceniu mniejszym niż 5%. Kontrola mocy reaktora odbywa się za pomocą 69 prętów kontrolnych. Reaktor może

pracować minimum 4 lata bez wymiany paliwa. Cyrkulacja chłodziwa w obiegu zapewniona jest przez 8 pomp wewnętrznych z silnikami umieszczonymi na zewnątrz zbiornika ciśnieniowego. Pompy zamontowane są horyzontalnie. Woda na wlocie do rdzenia ma temperaturę około 297 °C, a na wyjściu z rdzenia - około 320 °C. Ciśnienie panujące w obiegu to 14.31 MPa. Wytwornica pary, tak jak w poprzedniej konstrukcji znajduje się wewnątrz zbiornika ciśnieniowego. Moc elektryczna waha się w zależności od rodzaju użytego kondensatora. Dla kondensatora powietrznego wynosi 155 MWe, a dla kondensatora wodnego 180 MWe. Ciśnieniowy zbiornik reaktora został przedstawiony na Rys A3.2. Numerem 1 oznaczony jest stabilizator ciśnienia. Numer 2 pokazuje rozmieszczenie pomp chłodziwa układu pierwotnego. Wytwornicy pary przypisany jest numer 3. Wylot pary i wlot wody świeżej to numer 4. Pręty kontrolne wraz z mechanizmami (numer 5) znajdują się nad rdzeniem o numerze 7.

Reaktor został wyposażony w pasywne systemy zabezpieczeń. Baterie prądu stałego są w stanie zapewnić zasilanie najważniejszych systemów przez 72 h. W przypadku ciężkiej awarii, gdzie może dojść do wydzielania się wodoru, obudowa bezpieczeństwa została wyposażona w pasywne rekombinatory wodoru.

Firma Babcock & Wilcox spodziewa się złożenia dokumentów w celu otrzymania certyfikacji przez Amerykański Dozór Jądrowy w 4 kwartale 2013 roku. Cztery pierwsze reaktory tego typu mają być wybudowane do końca 2021 roku.



**Rys. A3.1 Konfiguracja elektrowni z dwoma reaktorami mPower firmy Babcock & Wilcox**

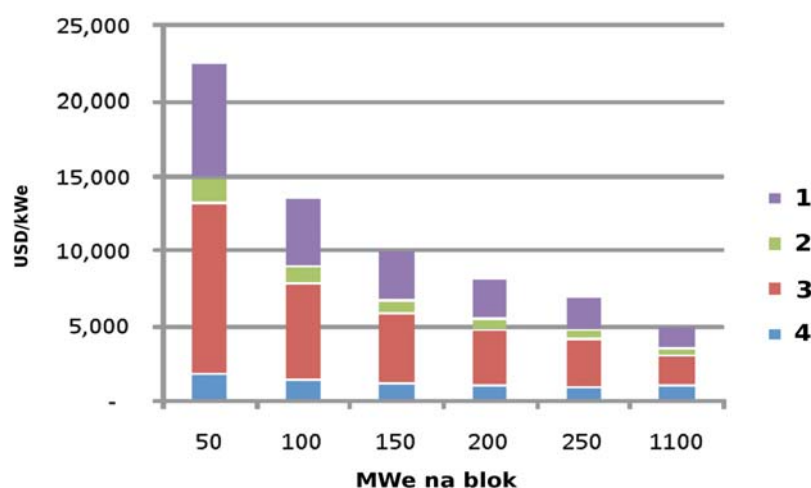


**Rys. A3.2 Zbiornik reaktora mPower firmy Babcock & Wilcox**

## Załącznik B. Koszty wytwarzania energii w SMR

### B1. Zależność szacowanych nakładów inwestycyjnych od mocy i stanu zaawansowania projektu

Podstawowym problemem nierozzerwalnie związanym z małą mocą reaktorów SMR są wysokie nakłady inwestycyjne przypadające na jednostkę mocy. Budowane w latach 70-tych reaktory o średniej mocy 200-440 MWe ustąpiły miejsca dużym blokom właśnie ze względu na oszczędności wynikające ze zwiększonej mocy reaktora. Najbardziej dobitnym przykładem były losy reaktora AP600 opracowanego przez firmę Westinghouse i sprawdzonego wszechstronnie już w latach 90-tych, który mimo oczywistych zalet z punktu widzenia bezpieczeństwa nigdy nie został zbudowany ze względu na wysoki koszt przypadający na jeden MW mocy. Dlatego firma Westinghouse opracowała reaktor AP1000, oparty na tych samych rozwiązaniach, co reaktor AP600, ale dysponujący mocą 1100 MW i dzięki temu znacznie tańszy. Ten właśnie reaktor jest budowany w Chinach i w USA i stał się podstawą ofert firmy Westinghouse. Pokazany na Rys. B.1 wykres przedstawia typowe zależności jednostkowych nakładów inwestycyjnych od mocy reaktorów. Został on opracowany przez kierownictwo firmy Shaw, współpracującej w firmą Westinghouse i propagującej budowę reaktorów SMR.



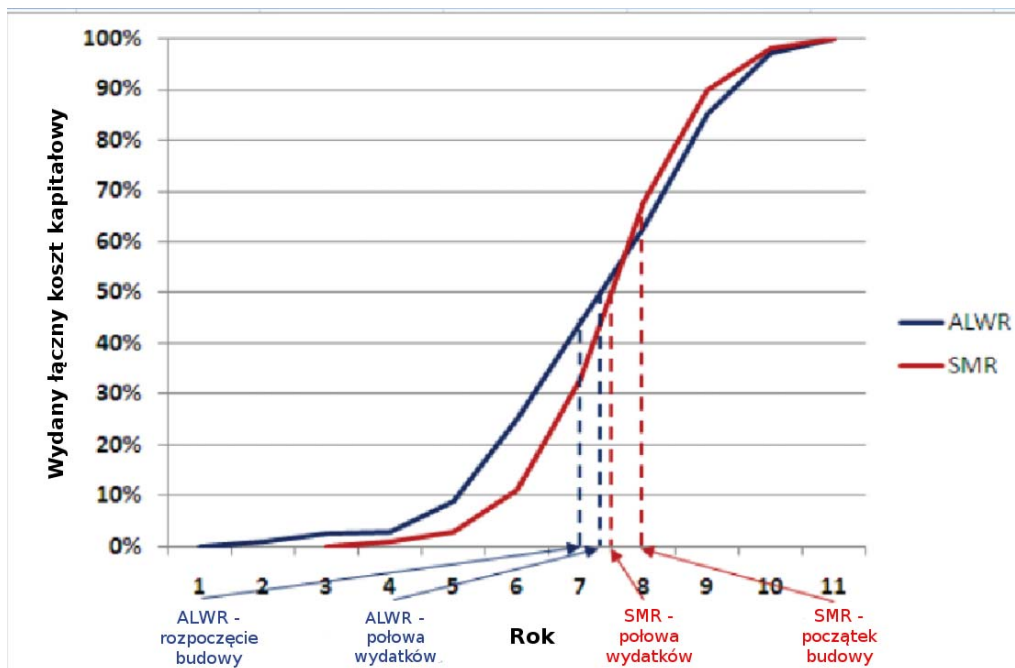
**Rys. B.1 Zależność nakładów jednostkowych od mocy reaktora.**

Kolory oznaczają koszty 1– inwestora, 2- elektryczne, 3- mechaniczne, 4- budowlane.

Rysunek zaczerpnięty z [SMR Commercial Viability for Traditional and Non-Traditional Nuclear Markets, Reiner Kuhr, Shaw Corp. 2012]

W świetle powyższych informacji o losach reaktora AP600 i krzywej pokazanej na Rys. B.1 wydaje się nieprawdopodobne, by zmniejszenie mocy reaktora AP600 do 200 MWe mogło przynieść obniżkę nakładów inwestycyjnych na jednostkę mocy.

Zwolennicy reaktorów SMR twierdzą, że dzięki zmniejszeniu ich mocy i rozmiarów skraca się czas ich budowy, co powoduje obniżenie kosztów odsetek od kredytu zaciąganego na budowę reaktora. Firma Shaw zwraca uwagę, że koszty oprocentowania podczas budowy (*Interest During Construction - IDC*) można obniżyć dzięki krótszemu okresowi budowy, ale wzrośnie czas przygotowania budowy ze względu na konieczność przygotowania i realizacji produkcji zestawów modułarnych w zbudowanych do tego celu zakładach. Łączne oprocentowanie kapitału pozostanie niemal bez zmian, jak widać na Rys. B.2 zaczerpniętym także z raportu firmy Shaw.



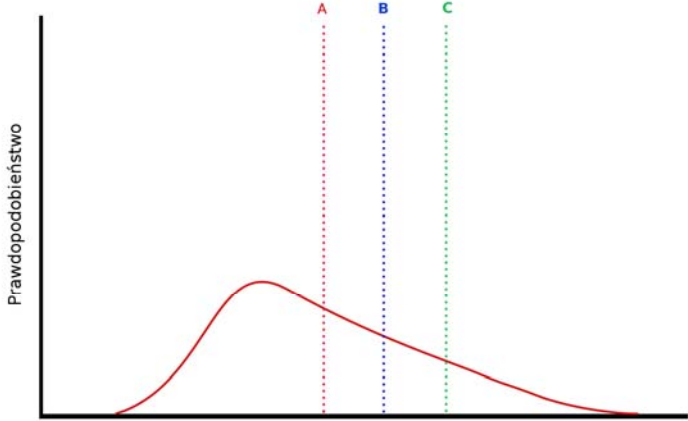
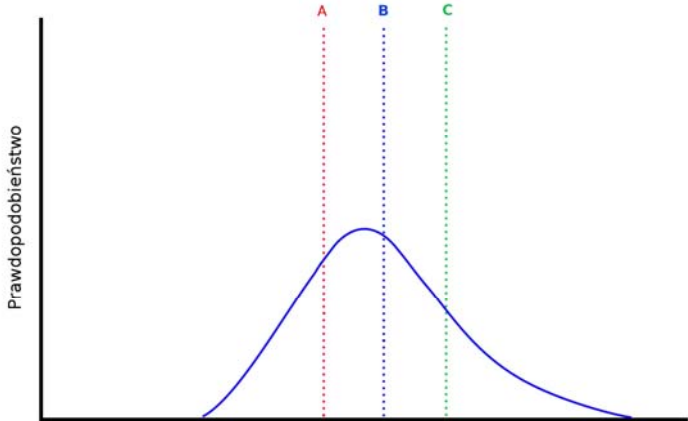
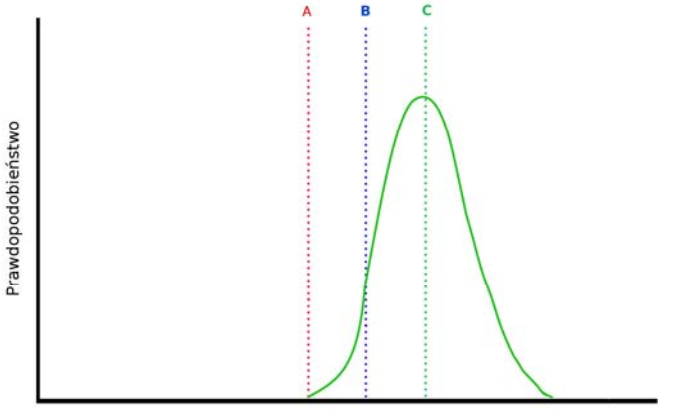
**Rys. B.2 Wydatki na przygotowanie produkcji modułów reaktora SMR i na jego budowę są podobne jak wydatki na ALWR - udoskonalony reaktor wodny III generacji.**

Wszystkie publikacje dotyczące reaktorów SMR podkreślają, że koszty ich są jeszcze nieznanne. Jest to zgodne z doświadczeniem z budowy innych elektrowni jądrowych. Przy rozpatrywaniu dostępnych obecnie szacunków należy pamiętać, że początkowe oceny kosztów z etapu projektowania są zwykle bardziej korzystne niż koszty ostateczne. Ilustrują to dobrze rysunki B.3a, B.3b, B.3c, w których na osi poziomej podane są wielkości kosztów jednostkowych, a na osi pionowej prawdopodobieństwo ich wystąpienia zgodnie z krzywą prawdopodobieństwa, zmieniającą swój kształt w miarę uściślenia danych.

Koszty w chwili rozpoczęcia budowy (C) są dużo wyższe, niż koszty szacowane w fazie koncepcyjnej (A). Doświadczenie wykazuje, że w toku budowy koszty okazują się jeszcze większe niż szacowane na jej początku. Do tego dochodzi problem dewaluacji pieniądza, wskutek czego koszty w dolarach z 2020 roku są większe, niż koszty szacowane w dolarach z roku 2013, choćby nie uległy one zmianie w dolarach o określonej wartości, np. USD2013. Firmy w USA podają zwykle koszty budowy w dolarach z przewidywanego roku zakończenia budowy, bo to stanowi podstawę do określenia ceny energii elektrycznej płaconej przez odbiorców. Natomiast szacunki kosztów reaktorów SMR podawane są w walucie bieżącej, bo rok zakończenia ich budowy jest zupełnie nieokreślony.

Koszty eksploatacyjne przypadające na jednostkę wytwarzanej energii są z natury wyższe w reaktorach SMR niż w reaktorach dużej mocy.

Powyższe względy powodują, że nie należy sugerować się optymistycznymi zapowiedziami twórców reaktorów SMR jakoby miały one tańsze na jednostkę mocy od reaktorów klasy 1000-1500 MWe. Bardziej szczegółowo rozważamy tę kwestię poniżej.

 <p>Rys. B.3a Szacowane nakłady inwestycyjne – faza A</p>	<p><b>Faza koncepcji (A):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zakończone opracowanie projektu</li> <li>• Koszty przeskalowane z innych projektów (bez analiz ilościowych)</li> <li>• Główni dostawcy przedstawili oceny budżetowe</li> </ul>
 <p>Rys. B3.b Szacowane nakłady inwestycyjne - faza B</p>	<p><b>Faza wstępna (B)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zakończone opracowanie projektu technicznego</li> <li>• Uwzględnione specyficzne cechy projektu (opracowane niektóre zależności ilościowe)</li> <li>• Ostateczne oceny ze strony głównych dostawców</li> </ul>
 <p>Rys. B3.c Szacowane nakłady inwestycyjne - faza C</p>	<p><b>Projekt roboczy (C)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gotowość rozpoczęcia budowy</li> <li>• Opracowana większość zależności ilościowych</li> <li>• Kupione duże elementy wyposażenia</li> </ul>

## B2. Zestawienie kosztów związanych z reaktorami SMR

Tabela B2.1 Zestawienie kosztów związanych z reaktorami SMR wg studium EPIC<sup>4</sup>.  
Założono oprocentowanie kapitału WACC 5,2%/rok, współczynnik wykorzystania mocy 90%

SMR o mocy 100 MWe każdy	koszty 6 SMR	koszty 3 SMR
Moc elektryczna netto	600 MWe	300MWe
Nakłady bezpośrednie	2,837 mln \$	1,808 mln \$
Nakłady pośrednie (10% nakładów bezpośrednich)	284 mln \$	181 mln \$
Koszt pierwszego rdzenia	93 mln \$	93 mln \$
Koszty prac rozwojowych	100 mln \$	100 mln \$
Koszty inwestora	200 mln \$	200 mln \$
<b>Nakłady bez oprocentowania kapitału i inflacji</b>	<b>3,515 mln \$</b>	<b>2,382 mln \$</b>
Rezerwa	35 %	35 %
Całkowite nakłady bez oprocentowania i inflacji	4,745 mln \$	3,215 mln \$
Całkowite nakłady bez oprocentowania i inflacji na jednostkę mocy	7,908 \$/kW	10,717 \$/kW
Oprocentowanie podczas budowy %	8.69 %	8.69 %
<b>Całkowite nakłady inwestycyjne \$ M</b>	<b>5,050 mln \$</b>	<b>3,422 mln \$</b>
Składowa kosztów inwestycyjnych i prac rozwojowych uśredniona w ciągu życia	66.09 \$/MWh	89.58 \$/MWh
Uśrednione w ciągu życia koszty eksploatacyjne	16.54 \$/MWh	25.49 \$/MWh
Uśrednione w ciągu życia koszty paliwowe	8.53 \$/MWh	8.53 \$/MWh
<b>Uśrednione w ciągu życia koszty wytwarzania energii (2011\$)</b>	<b>91.17 \$/MWh</b>	<b>123.60 \$/MWh</b>

Uwaga: Koszty podane w tabeli będą wyższe dla reaktorów budowanych w Polsce ze względu na różnicę stóp procentowych:

W studium ARE<sup>5</sup> przyjęto WACC = 7.5%, Założono 7-letni okres finansowania budowy z rozkładem:

rok	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
	2.5%	5.0%	10.0%	20.0%	25.0%	20.0%	17.5%

co przy WACC\* 7.5% daje IDC# w wysokości 26.0%.

**Zaś w studium EPIC przyjęto WACC = 5.2%.** Aby móc porównywać koszty dla SMR i dla reaktorów dużej mocy należy przeliczyć koszty dla SMR przy stopie procentowej 7.5%

Po przyjęciu 7.5% zamiast 5.2% otrzymamy IDC w wysokości  $1.66 \times 0.075 = 0.125$  a więc dla całkowitych nakładów bez oprocentowania i inflacji wynoszących dla wariantu z budową 3 reaktorów SMR o mocy 100 MW każdy 3.215 M USD otrzymamy narzut IDC równy 401 M USD, razem 3.616 M USD

Składowa kosztów inwestycyjnych wyniesie więc  $89.58 \times 3.616/3.422 = 94.6$  USD/MWh i koszty wytwarzania energii 128 USD/MWh.

Podobnie wzrosną koszty dla wariantu z 6 reaktorami SMR.

<sup>4</sup> EPIC Energy Policy Institute at Chicago, Robert Rosner, Stephen Goldberg, Joseph S. Hezir: „Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S. Listopad 2011

<sup>5</sup> ARE Aktualizacja Prognozy zapotrzebowania na paliwa i energię do roku 2030 Warszawa, wrzesień 2011



### B3. Porównanie nakładów na reaktory SMR i reaktory dużej mocy

W publikacji „Economic Comparison of Different Size Nuclear Reactors” M. D. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff, P. Trucco, M. E. Ricotti, G. Locatelli” pokazano, że efekt skali wynikający z kosztów słabo zależnych od mocy reaktora, może być częściowo skompensowany efektami wynikającymi z masowej produkcji i ulokowania wielu reaktorów w jednym miejscu. Autorzy porównują elektrownie z czterema reaktorami SMR o mocy 335 MWe każdy, z elektrownią wyposażoną w jeden hipotetyczny reaktor o mocy 1340 MWe.

Moc 335 MWe odpowiada projektowi IRIS, który został zarzucony. Dlatego poniżej, obok rezultatów z cytowanej pracy, pokazujemy odpowiednie współczynniki dla reaktora o mocy 167 MWe, zbliżonego do projektu mPower firmy Babcock & Wilcox. Czynniki ekonomii skali liczymy wg. wzoru  $(\text{moc}_{\text{SMR}}/\text{moc}_{\text{duży}})^{-0.38}$  podanego w pracy. Umieszczenie dwukrotnie większej lub mniejszej liczby reaktorów w jednej lokalizacji można uwzględnić biorąc odpowiednio kwadrat lub pierwiastek współczynnika lokalizacji i współczynnika doświadczenia.

Elektrownie z jednym reaktorem 1340 MWe są jednak mało realistyczne. W praktyce zwykle umieszcza się dwa lub trzy duże reaktory w jednej lokalizacji. Z kolei mało praktyczne wydaje się umieszczenie 8 czy 16 SMR w jednej elektrowni. Aby wykorzystać podstawową zaletę SMR, jaką jest umiejscowienie bliżej odbiorców, należy instalować mniejszą liczbę SMR w jednej lokalizacji. Poniżej podajemy przykładowe porównanie dwóch reaktorów 1340 MWe w jednej lokalizacji z szesnastoma reaktorami 167 MWe w czterech lokalizacjach.

Postulowane przez autorów cytowanej pracy 17%-owa redukcja kosztów związana z prostotą konstrukcji wydaje się zbyt optymistycznym założeniem. W naszej analizie założyliśmy 7% redukcji ze względu na mniejszą ilość rurociągów itp. Jednak redukcja niektórych systemów bezpieczeństwa nie jest możliwa do zaakceptowania, zwłaszcza po doświadczeniach z Fukushima.

**Tabela B3.1 Porównanie kosztów SMR i dużych reaktorów**

<b>SMR</b>	335 MWe 4 w 1 lokalizacji	167 MWe 8 w 1 lokalizacji	167 MWe 16 w 4 lokalizacjach
<b>Duży reaktor</b>	1340 MWe 1 w 1 lokalizacji	1340 MWe 1 w 1 lokalizacji	1340 MWe 2 w 1 lokalizacji
Ekonomia skali	1.70	2.21	2.21
Wspólna lokalizacja	0.86	0.74	0.93
Zdobywanie doświadczenia	0.92	0.85	0.96
Krótszy czas budowy SMR	0.94	0.94	0.94
Prostota konstrukcji	0.93	0.93	0.93
<b>Wypadkowy czynnik skali</b>	<b>1.18</b>	<b>1.21</b>	<b>1.72</b>

Powyższe rozważania wskazują że przy zastąpieniu jednego dużego reaktora kilkoma małymi efekt ekonomii skali można częściowo skompensować efektami seryjnej produkcji i wspólnej lokalizacji. Ciągłe jednak wersja SMR pozostaje ok. 20% droższa. Jednak bardziej realistyczne porównanie zakładające 2-3 duże reaktory w jednej elektrowni i większe rozproszenie SMR pokazuje, że w zależności od konfiguracji wersja SMR będzie 1.5-2.0 razy droższa (1.72 w pokazanym przykładzie).