



**SEMINARIUM**  
**dla uczczenia 110. rocznicy urodzin**  
**PAWŁA JANA NOWACKIEGO**  
**Warszawa, 20 maja 2015**

---

***Małe reaktory modułowe***

**Dr inż. A. Strupczewski, prof. nadzw. NCBJ**  
**Przewodniczący Komisji Bezpieczeństwa Jądrowego**  
**Narodowe Centrum Badań Jądrowych**

# SMR – Małe Reaktory Modułowe

---

- MAEA określa wielkość reaktora według jego mocy elektrycznej: mały <300MWe, średni 300-700MWe.
- Skrót SMR = Small Modular Reactors pierwotnie stosowano do 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.

# Czemu Prezydent Obama uznał SMRy za zielone źródła energii ?

---

- 19 marca 2015 r. prezydent USA polecił by część zapotrzebowania na energię dla agend rządowych była pokrywana z OZE i z reaktorów modułowych małej mocy – Small Modular Reactors – SMRs.
- W 2016 r. udział energii z tych źródeł ma wynieść 10%, a w 2025 r. 25%.
- Senat stanu Waszyngton wydał uchwałę kwalifikującą SMRy jako źródła czystej energii – obok wiatru i słońca.
- NuScale Power LLC wystąpi w 2016 r. do NRC o certyfikat na budowę SMRa. Czas na analizy NRC – 3 lata. Grant z DoE - \$226 million na wsparcie procesu licencjonowania.
- **Czemu USA wspierają tak energetykę jądrową?**

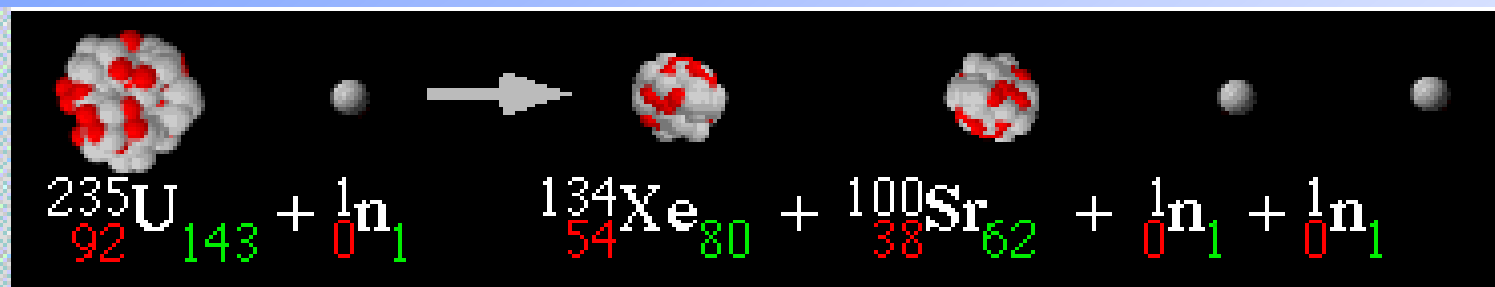


# Elektrownie jądrowe – to czyste niebo i woda, tania energia elektryczna i zachowanie węgla dla przyszłych pokoleń



EJ Loviisa w Finlandii  
Zdjęcie pokazane za  
zezwoeniem FORTUM

# Główne źródło zagrożenia w EJ – produkty rozszczepienia w paliwie jądrowym

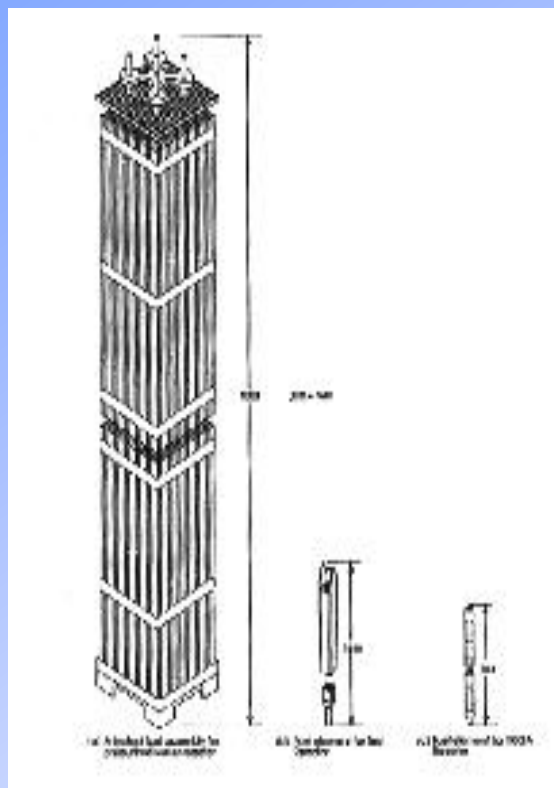


**Energia jądrowa daje energię – ale i radioaktywne produkty rozszczepienia.**

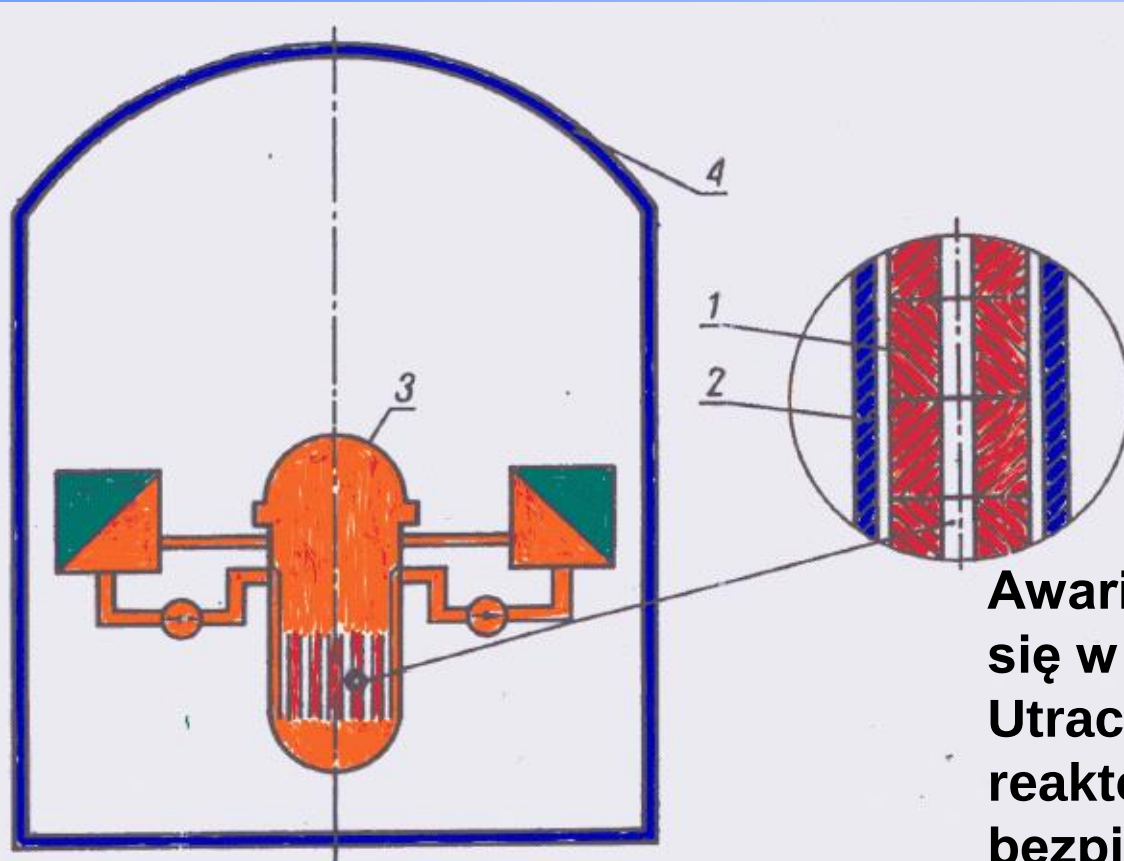
Paliwo – to pastylki  $\text{UO}_2$ , o średnicy 10 mm, tworzące pręty cylindryczne o wysokości 3-5 m i zamknięte w koszulki ze stopu cyrkonu, odporne na temperatury do  $1200^\circ\text{C}$ .  
Ciepło odbiera woda o temperaturze  $300 - 340^\circ\text{C}$

W temperaturach  $300-400^\circ\text{C}$  produkty rozszczepienia pozostają w całości w paliwie.

Jak długo paliwo jest chłodzone skutecznie wodą – nie ma istotnego zagrożenia radiologicznego poza EJ.



# Układ wielu barier - bezpieczeństwo zachowane w razie utraty dwóch, a nawet trzech z nich.



## Układ barier w EJ:

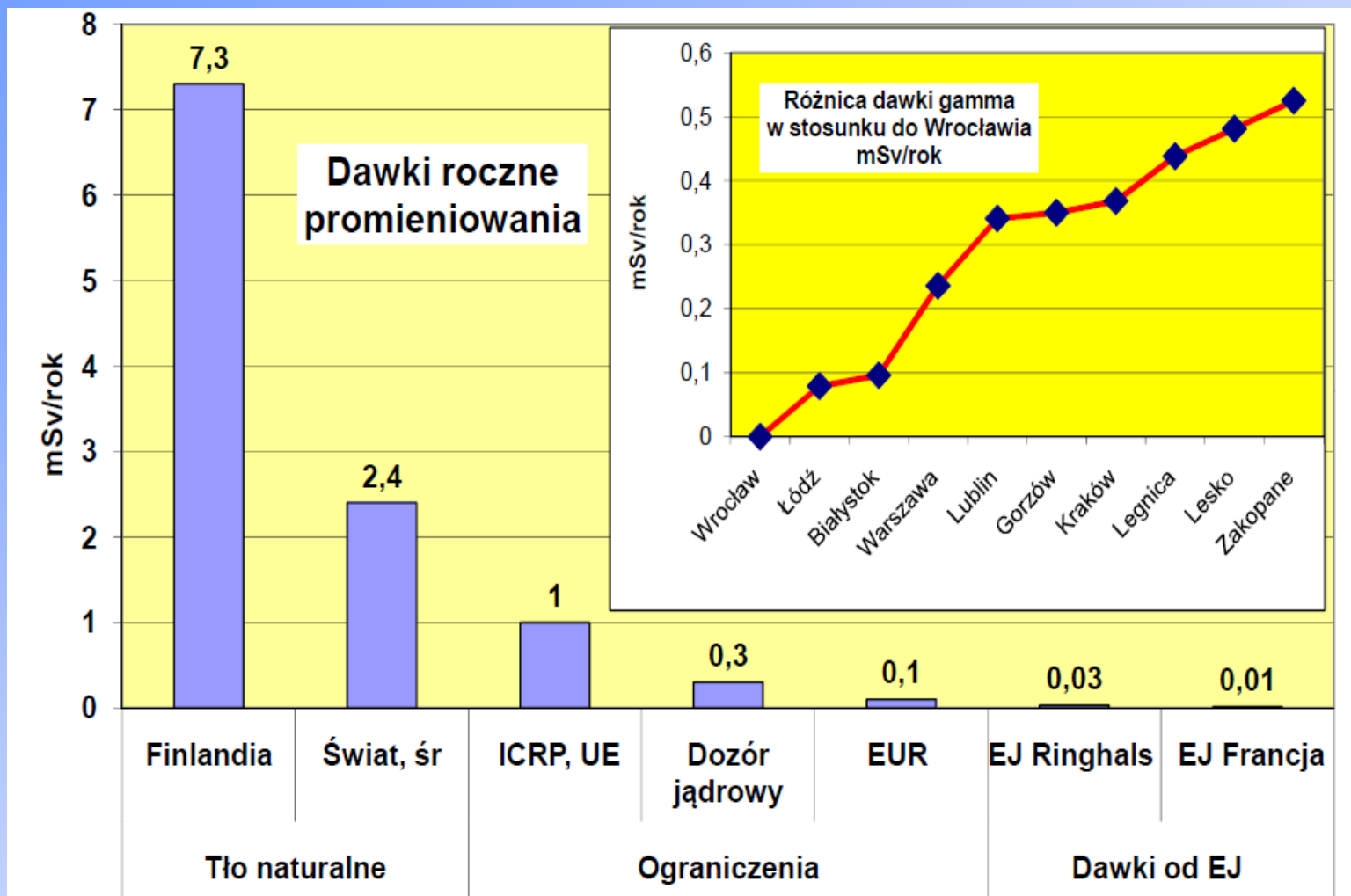
1. Pastyłki paliwowe,
2. Koszulka cyrkonowa,
3. Zbiornik reaktora,
4. Obudowa bezpieczeństwa

Awaria ze stopieniem rdzenia zdarzyła się w reaktorze PWR w TMI (USA). Utracono bariery 1 i 2, ale zbiornik reaktora (bariera 3) – i obudowa bezpieczeństwa (bariera 4) pozostały szczelne

**Awaria w TMI nie spowodowała żadnych szkód zdrowotnych**



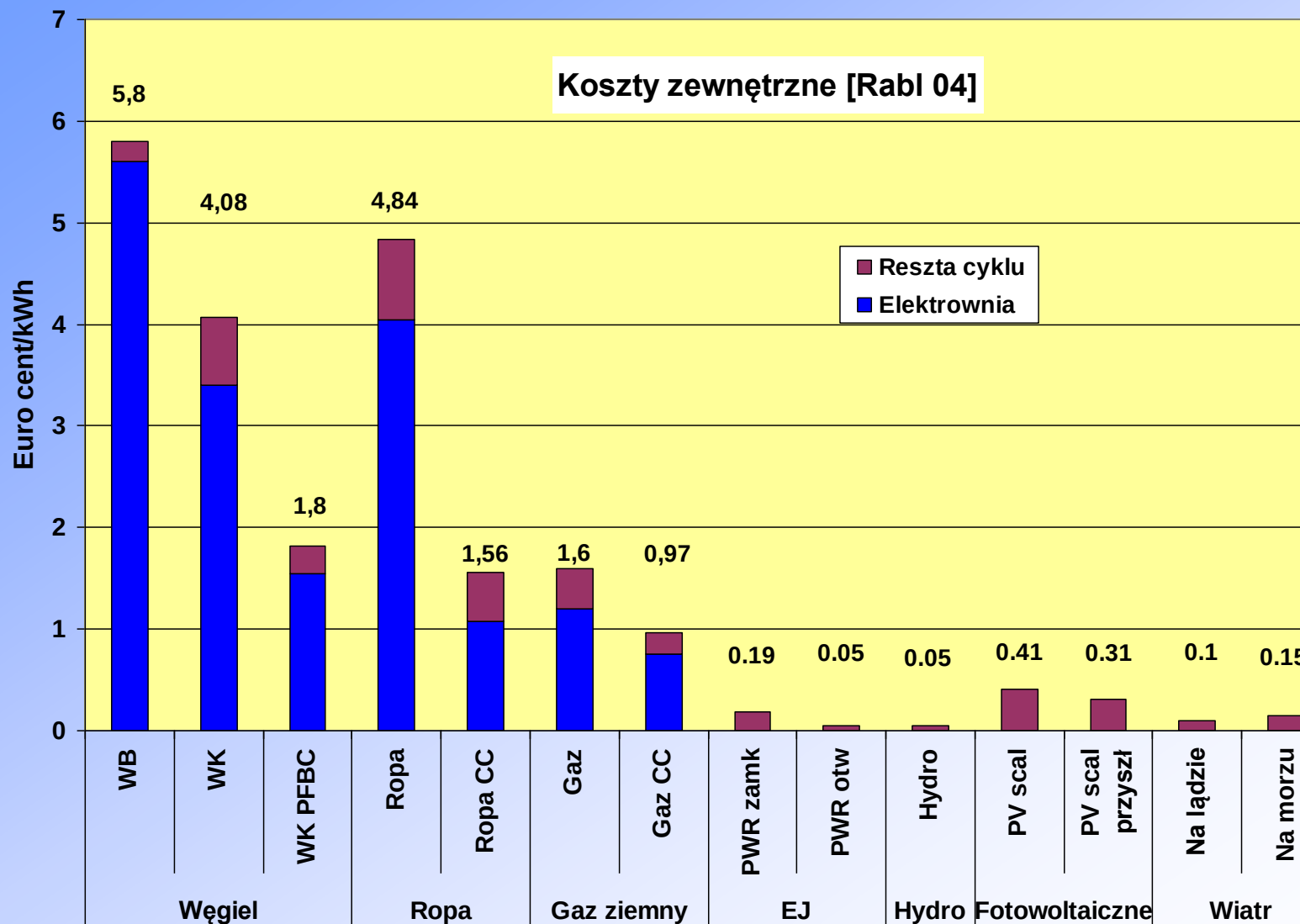
# Dawki od elektrowni jądrowych mniejsze niż różnice tła promieniowania naturalnego



Dawka od EJ  
– 0,01  
mSv/rok

Różnica tła  
promienio-  
wania między  
Krakowem a  
Wrocławiem-  
0,39 mSv/rok

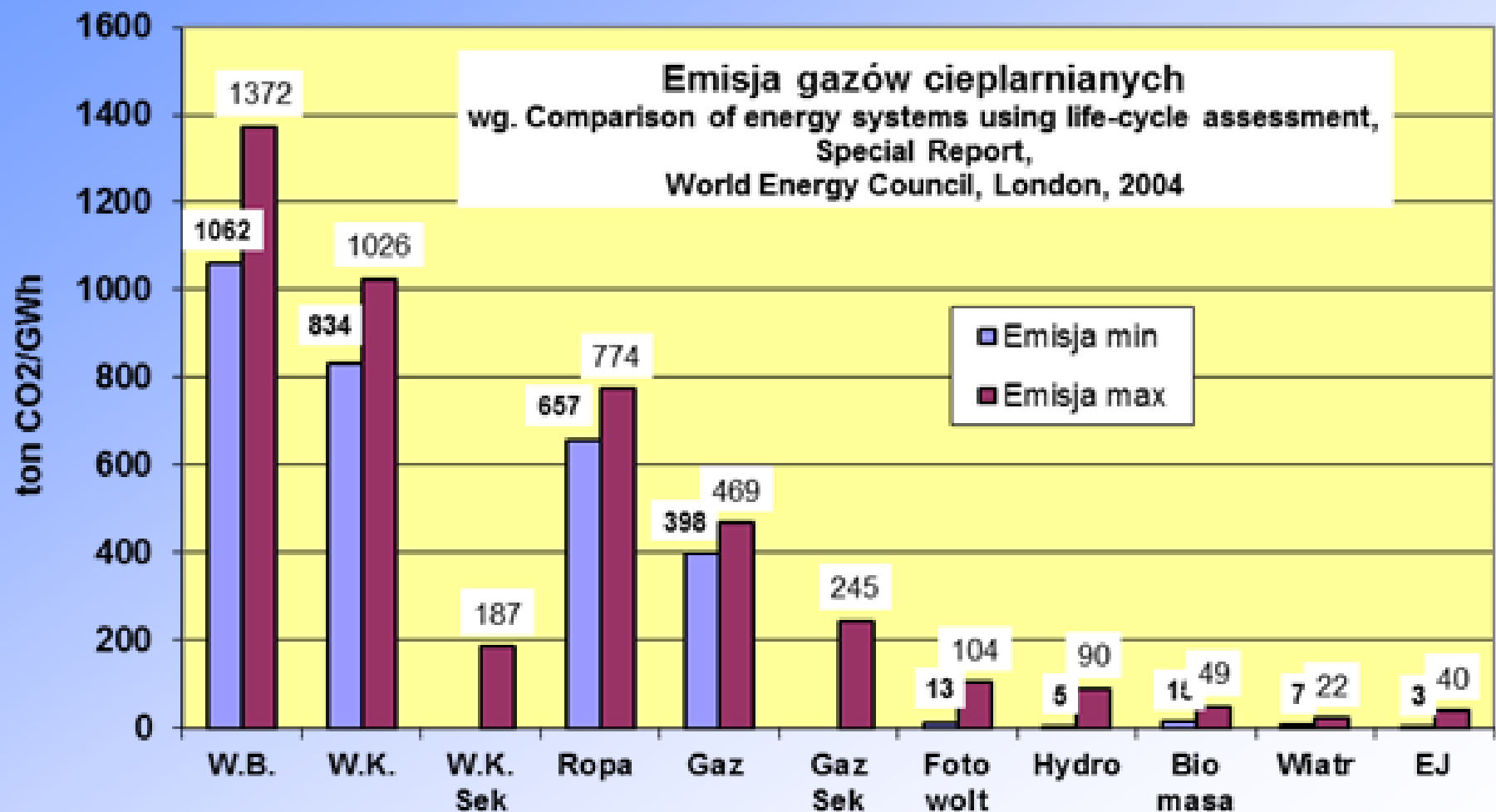
# Szkody na zdrowiu i inne koszty zewnętrzne dla typowej lokalizacji w UE-15: najniższe dla EJ



PFBC-  
spalanie w  
złożu  
fluidalnym pod  
ciśnieniem,  
CC- cykl  
kombino-  
wany,  
PWR otw.  
– cykl  
paliwowy  
otwarty,  
PWR zamk.  
- cykl  
paliwowy  
zamknięty



# Wg World Energy Council, IPCC, IAEA EJ to najlepsze źródło niskoemisyjne



# Energetyka jądrowa pozwala uniknąć emisji ponad dwóch miliardów ton CO<sub>2</sub> rocznie

---

- Każde 22 tony uranu wykorzystanego jako paliwo w EJ zaoszczędza milion ton CO<sub>2</sub>, które spowodowałoby spalanie węgla.
- Gdybyśmy zamknąć wszystkie EJ w UE i zastąpić je elektrowniami o istniejącej strukturze wytwarzania energii elektrycznej (poza hydroelektrowniami, których mocy nie można tak łatwo powiększyć) to roczna emisja CO<sub>2</sub> wzrosłaby z 1,3 do 2 miliardów ton, a więc o 704 miliony ton CO<sub>2</sub>.
- Jest wielkość równa **całkowitej emisji CO<sub>2</sub> z 200 milionów samochodów osobowych w Unii Europejskiej** (722 milionów ton rocznie).







# Same OZE nie wystarczą choć Niemcy twierdzą „keine Stromlucke”

FREITAG, DEN 9. DEZEMBER 2011

THEMA

OSTFRIESEN-ZEITUNG, SEITE 10

## Emden zeigt: Es gibt keine Stromlücke

Das Gaskraftwerk im Hafen wird kaum noch gebraucht. Die zu schwachen Netze Richtung Süden sind das Hauptproblem der deutschen Energieerzeugung. Nötig sind nicht unbedingt neue Kraftwerke, sondern leistungsfähige Stromleitungen.

Czy to  
prawda?



Die erneuerbaren Energien – das Bild zeigt den Blick vom Emder Hafen auf die Windparks im Wybelsumer Polder – erzeugen bereits jetzt so viel Strom, dass das Emder Gaskraftwerk kaum noch einspringen muss.

BILD: DODEN



# Energia wiatru jest zmienna, a okresy ciszy wiatrowej bywają długie

Łącznie w ciągu roku może być około 50 dni, gdy wiatr dostarcza mniej niż 1 % zapotrzebowania.

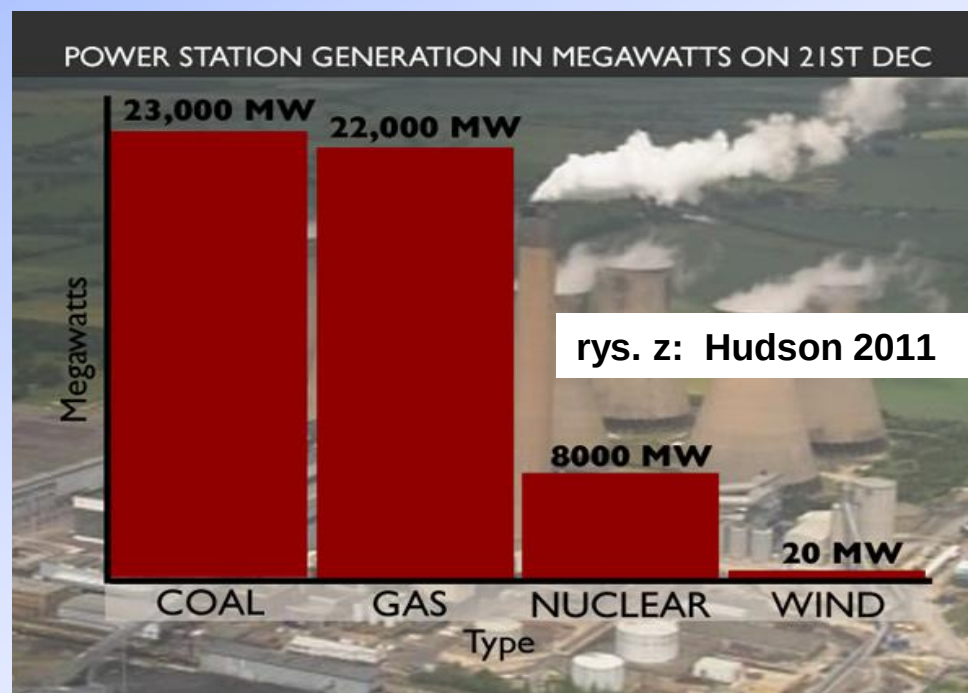
Jednak moc systemu energetycznego musi wystarczać na pokrycie potrzeb odbiorców niezależnie od mocy wiatraków.

Okresy ciszy mogą trwać 2 tygodnie bez przerwy.

Jak wtedy zaspokoić potrzeby odbiorców, jeśli wiatr jest istotnym źródłem prądu?

Konieczne jest utrzymywanie w systemie rezerwy wirującej - elektrowni pracujących na biegu luzem

## Wielka Brytania, 5200 MWe Cisza w dniu 21.12.2010



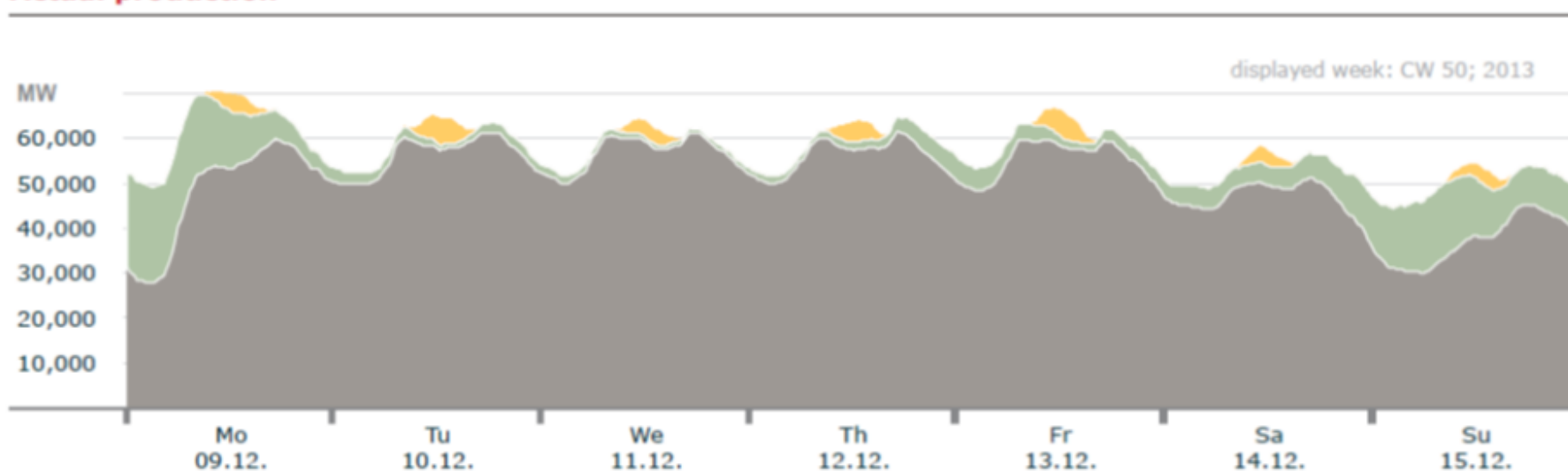
. Lata 2008-2010: % czasu  
poniżej 2,5% mocy – 8%,  
poniżej 1,25% mocy – 3,09%.

# Niemcy – np. 2-gi tydzień grudnia 2013 r. - brak energii z OZE

## Electricity Production in Germany: Calendar Week 50

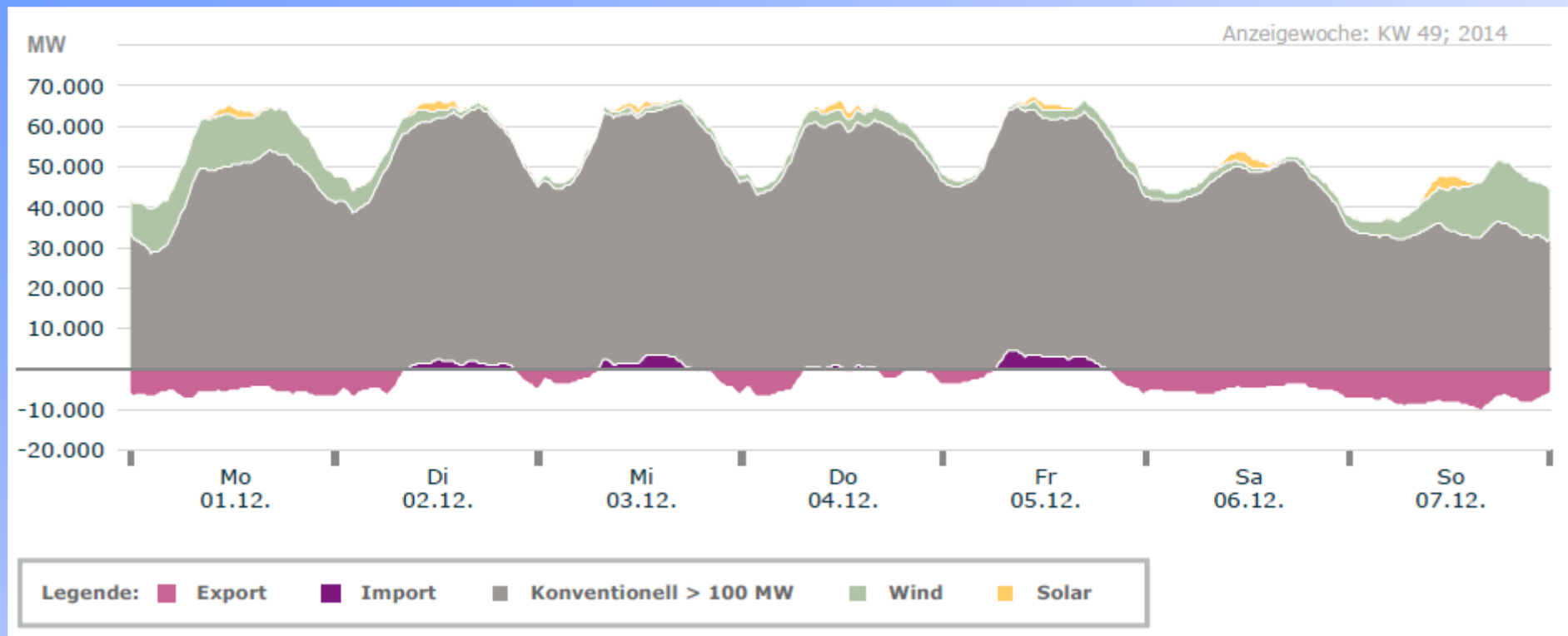
*Institut Fraunhofer fur Solar und Wind Energie ISE*

Actual production



Die Welt: „Na początku grudnia 2013 r. produkcja energii z elektrowni wiatrowych i słonecznych niemal kompletnie stanęła. Nie obracało się ponad 23 000 wiatraków. Milion układów fotowoltaicznych niemal całkowicie przerwało wytwarzanie prądu. Przez cały tydzień EW, EJ i gazowe musiały zaspokajać około 95% zapotrzebowania Niemiec

# A oto załamanie produkcji z OZE, Niemcy, w grudniu 2014.



**Mimo zainstalowanej mocy wiatraków 35 678 MWe i paneli fotoelektrycznych 38 124 MWe przez 5 dni całe obciążenie pokrywały elektrownie jądrowe, węglowe i gazowe.**



# **W razie ciszy wiatrowej w Polsce, na ile starczą zapasy energii w hydroelektrowniach?**

---

Przy udziale energii z OZE 18,2%, w tym 50% z wiatru, moc wiatraków średnio wyniesie 1,72 GW.

W razie zupełnej ciszy wiatrowej elektrownie pompowo-szczytowe mogą dać 1,75 GW. Ale tylko przez krótki czas. .

Maksymalna energia zgromadzona w elektrowniach szczytowo- pompowych to 7,8 GWh - czas ich pracy do opróżnienia to 4,5 h

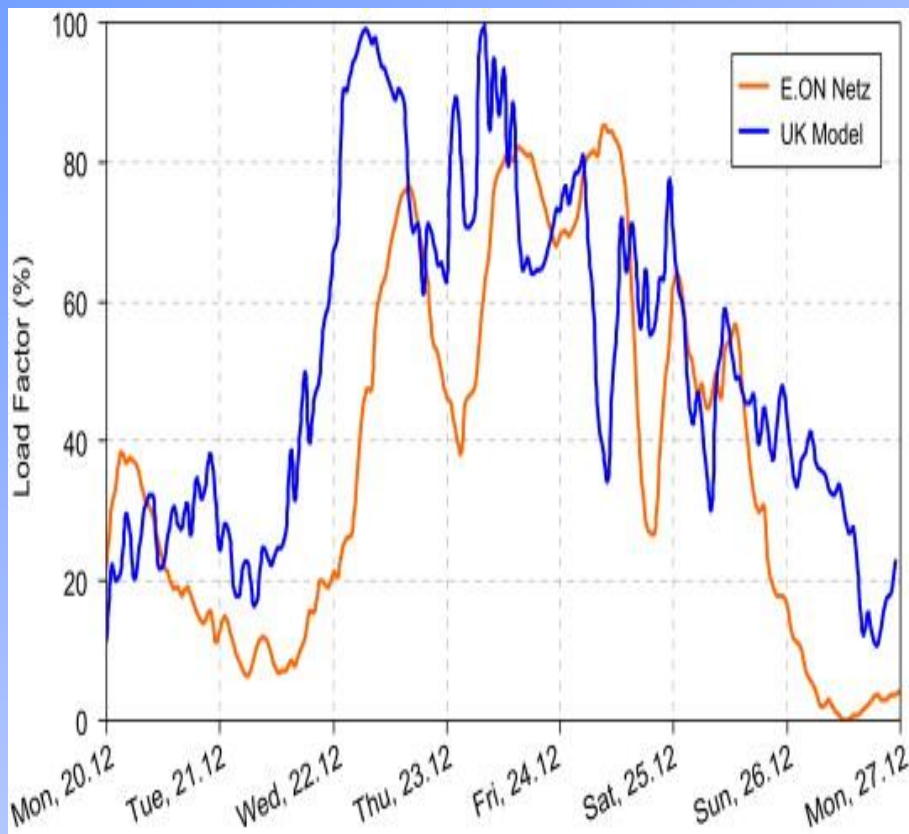
A co potem?

.

# Polskie elektrownie szczytowo-pompowe mogą zmagazynować niecałe 8 GWh

| Elektrownia       | Moc (GW) | Spad średni (m) | Pojemność użyteczna zbiornika górnego (mln m <sup>3</sup> ) | Zmagazy nowana energia (GWh) |
|-------------------|----------|-----------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Żarnowiec         | 0,72     | 116,5           | 13,8                                                        | 3,6                          |
| Porąbka-Żar       | 0,50     | 430,5           | 1,98                                                        | 2,0                          |
| Solina-Myczkowce  | 0,20     | 55              | 240                                                         | 0,8 (dobowo 4 h)             |
| Niedzica-Sromowce | 0,09     | 43              | 133                                                         | 0,5 (dobowo 6h)              |
| Żydowo            | 0,16     | 79,3            | 3,3                                                         | 0,6                          |
| Dychów            | 0,09     | 27              | 3,6                                                         | 0,3                          |
| Razem             | 1,76     |                 |                                                             | 7,8                          |

# Czy lekarstwem jest przesyłanie energii z sąsiednich krajów?



<http://docs.wind-watch.org/oswald-energy-policy-2008.pdf>

Budowa wielkich sieci przesyłowych jest kosztowna i sprzeczna z ideałem energetyki rozproszonej, gdzie każdy wytwarza sam potrzebną mu energię elektryczną.

Co więcej, nie jest to wystarczające.

Zmiany mocy wiatru występują na dużych obszarach jednocześnie.

Przykład – moc wiatru w Wielkiej Brytanii i w Niemczech. (Oswald 2008)

**Wzrost i spadki mocy od 100% do 10% i od 85% do 0% występują jednocześnie w obu obszarach**



# **Dodatkowe koszty systemowe dla EJ i OZE w systemie energetycznym Niemiec, euro/MWh**

| <b>Technologia</b>                                | <b>EJ</b> | <b>Wiatr na lądzie</b> | <b>MFW</b> | <b>pV</b> |
|---------------------------------------------------|-----------|------------------------|------------|-----------|
| <b>Udział</b>                                     | 30%       | 30%                    | 30%        | 30%       |
| <b>Koszty rezerwy</b>                             | 0         | 6,55                   | 6,55       | 14,6      |
| <b>Koszty bilansowania</b>                        | 0,26      | 4,75                   | 4,75       | 4,75      |
| <b>Podłączenie do sieci</b>                       | 1,4       | 4,72                   | 11,64      | 7,0       |
| <b>Wzmocnienie sieci</b>                          | 0         | 16,47                  | 8,81       | 35,1      |
| <b>Łączne koszty na poziomie systemu euro/MWh</b> | 1,67      | 32,48                  | 31,74      | 61,4      |

Potrzeby sieciowe dla OZE są znacznie większe niż dla EJ. Wprowadzanie OZE wymaga wielkich subsydiów płaconych przez wszystkich odbiorców energii, zarówno na same instalacje jak i na rozbudowę sieci, znacznie większą niż byłaby potrzebna w systemie opartym na stabilnych źródłach energii.

# Koszty inwestycyjne farm wiatrowych przeliczone na moc średnią

---

- W 2012 r. odbyła się inauguracja należących do GDF Suez Energia Polska farm wiatrowych: Jarogniew-Mołtowo i Wartkowo.
- Koszt **84,2 mln euro** (360 mln zł), gminy Gościno i Karlino, moc łącznie 51,5 MW , 1,63 mln euro/MW. Przyjmując wysoki współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej 0,22 otrzymamy nakłady na moc średnią w wysokości  $1.63/0,22 = 7400 \text{ €/kW}$ .

Ale elektrownia wiatrowa pracuje przez 20 lat – a EJ 60 lat. W ciągu 60 lat trzeba na wiatraki wydać **22,200 €/kW mocy średniej**,

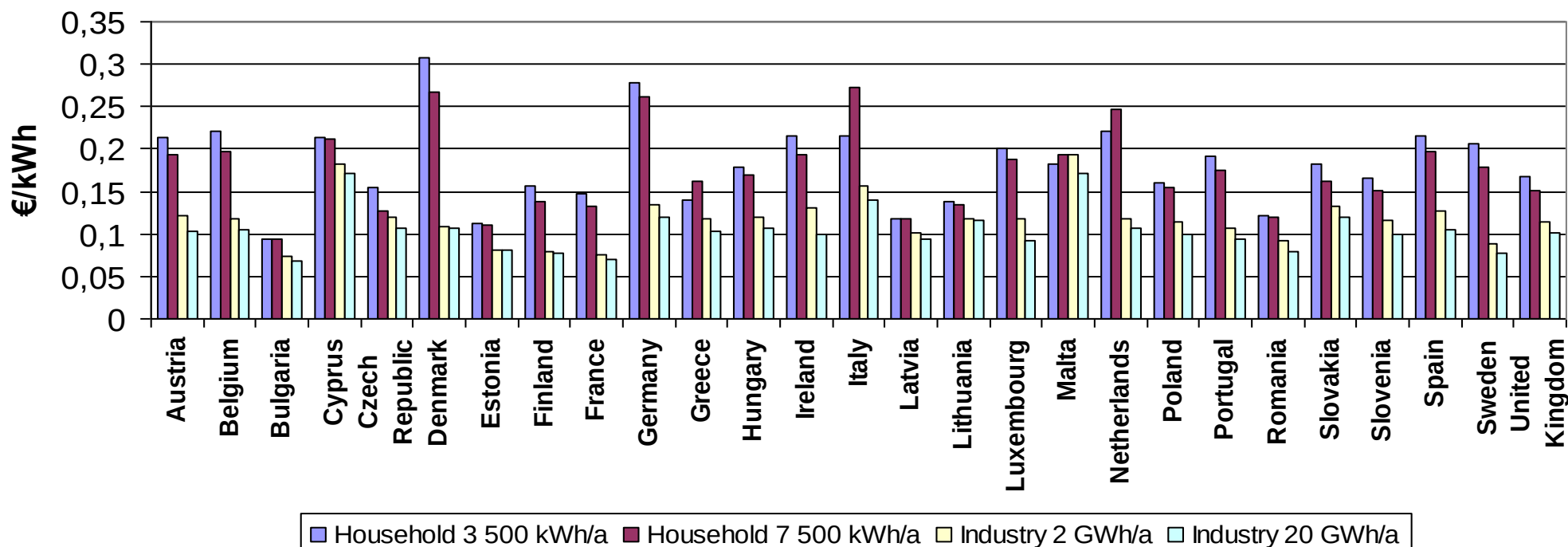
Jest to ponad 4,5 razy więcej niż dla EJ,

EJ: całkowite nakłady inwestycyjne łącznie z kosztami podłączeń, działki i finansowania wyniosą **4500-5000 €/kW mocy średniej**.

# Ceny energii elektrycznej w różnych krajach

Electricity prices in EU countries in November 2011

(data source: <http://www.energy.eu>)



Cena dla gospodarstw indywidualnych we Francji 0,15 €/kWh, 2 x mniejsza niż w Niemczech 0,27 €/kWh



# SMRy tworzą alternatywę wobec wysokich nakładów inwestycyjnych na duże EJ

---

Problemy EJ dużej mocy:

- Wysokie nakłady inwestycyjne, na MWe mocy średniej w ciągu roku mniejsze niż dla wiatru lub słońca, ale dla bloku 1600 MWe suma bardzo duża
- Brak standardowego rozwiązania, produkowanego seryjnie z wyjątkiem reaktorów francuskich PWR 900 i 1300 MWe. W USA każdy blok inny.
- Długie czasy budowy – spłaty oprocentowania kapitału

Moc SMR – typowo poniżej 300 MWe, czas budowy krótki

- TVA wierzy w potencjał seryjnie produkowanych SMR i opracowuje podanie do NRC o akceptację lokalizacji SMR w Clinch River, chociaż w 2014 r. wstrzymała proces licencyjny.

# SMR firmy NuScale – proste rozwiązanie problemu zasilania

---

- Firma NuScale promuje zastosowanie reaktora modułowego małej mocy do rafinacji ropy, produkcji wodoru i odsalania wody morskiej.
- Przyszłość - przetwarzania węgla w paliwo syntetyczne i inne produkty na bazie węgla.

Bezpieczeństwo zapewnione bez zasilania zewnętrznego

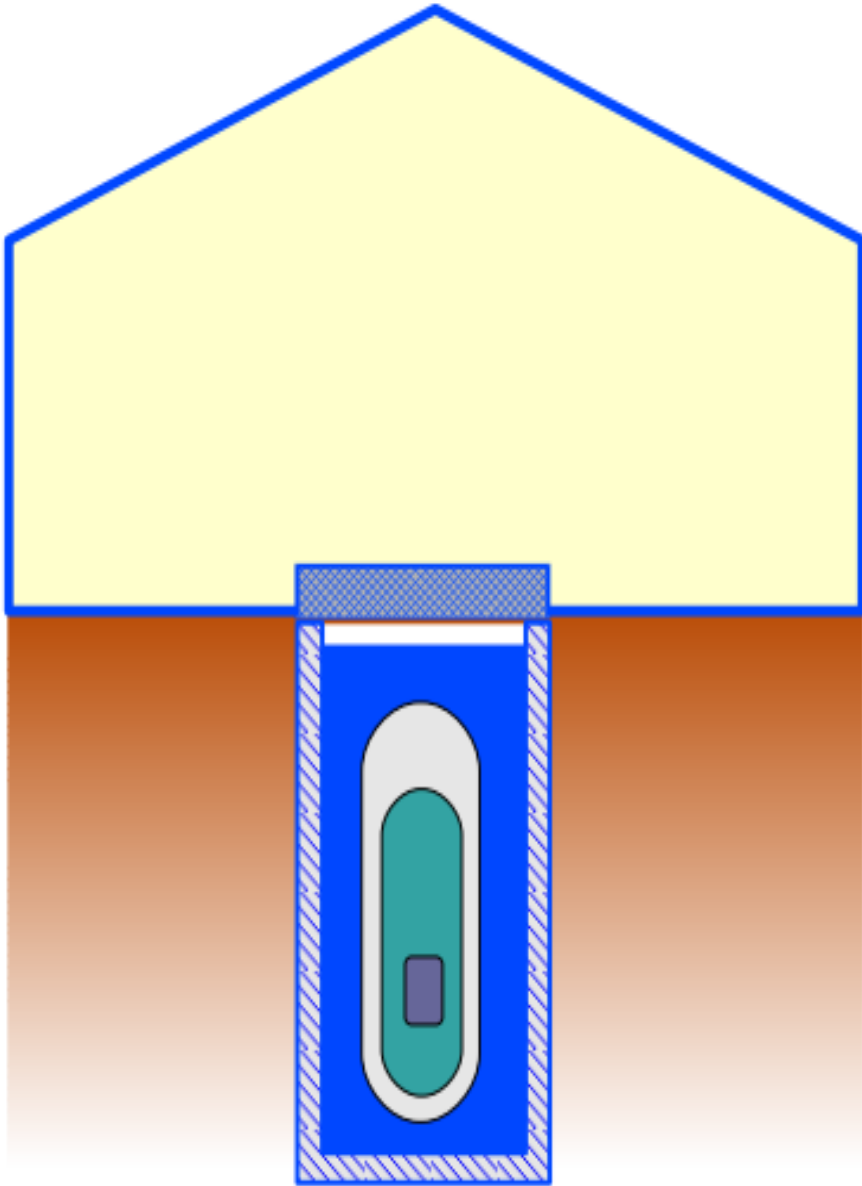
Pod poziomem gruntu:

- Jądrowy układ wytwarzania pary w obudowie bezp.)
- Sterownia
- Basen wypalonego paliwa

Niskie budynki – nie grozi katastrofa wskutek uderzenia samolotu

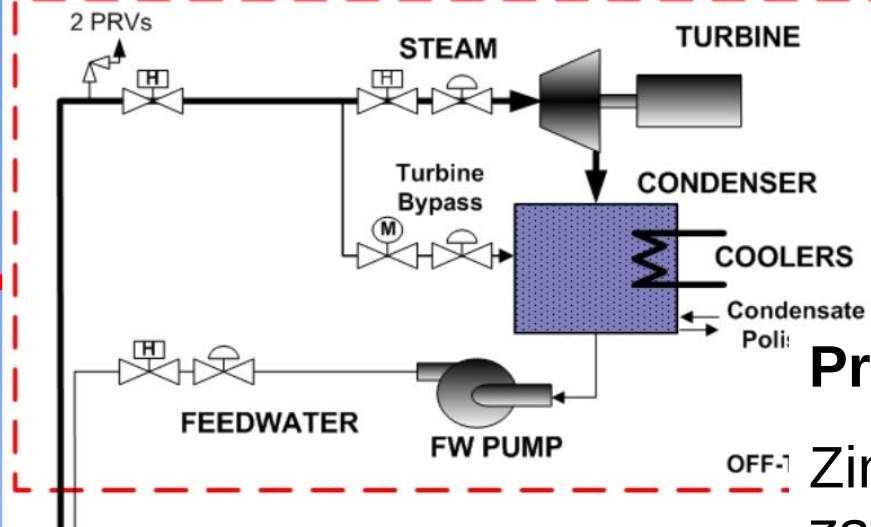
-

# System barier



- Pastyłki paliwowe i koszulka
- Zbiornik reaktora
- Obudowa bezpieczeństwa
- **Układ chłodzenia obudowy**
- **Woda w basenie**
- **Basen w obudowie**
- **Konstrukcja**
- **Osłona biologiczna**
- **Budynek reaktora**

**NUSCALE**  
**POWER**  
**150 MWt**  
**45 MWe**



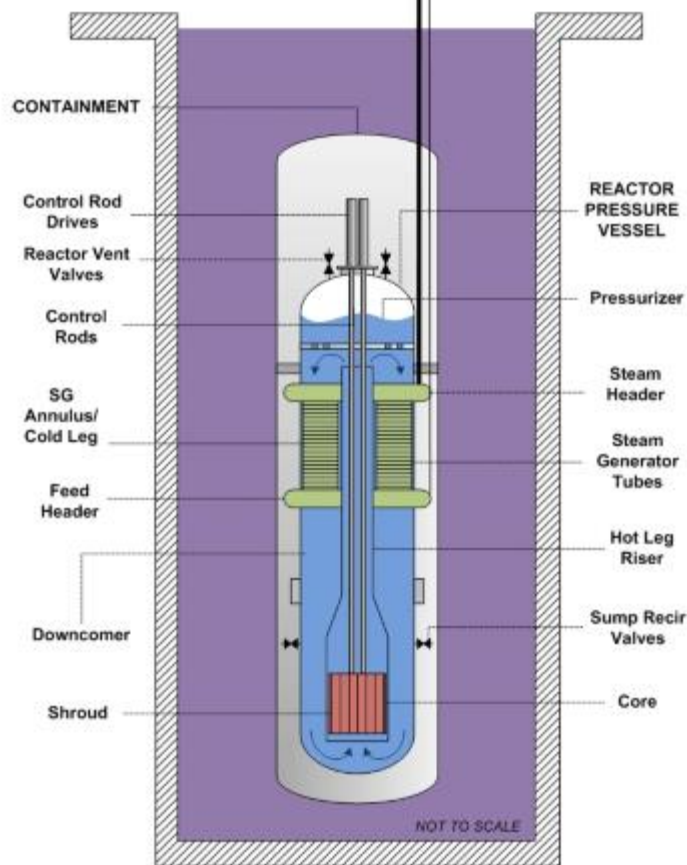
# Reaktory „bezobsługowe”

**Prosta, mocna konstrukcja**

Zintegrowany zbiornik reaktora zamknięty w obudowie bez powietrza.

Pogrążony w dużym basenie wodnym

Umieszczony pod poziomem gruntu  
Wykorzystuje typowy turbogenerator  
Podpory sejsmiczne z boku.  
Wiele barier chroniących przed uwolnieniami produktów rozszczepienia  
 **$P < 10.4 \text{ MPa}$ ,  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$**   
**30 mcy,  $\text{UO}_2$ , wzbogacenie 4.95%**





# Modularny reaktor IPWR firmy NuScale

---

- Zintegrowany Reaktor Ciśnieniowy Wodny (Integral Pressurized Water Reactor - IPWR) oparty jest na technologii reaktorów PWR pracujących pomyślnie już ponad 50 lat.
- NuScale zamierza budować modułowe EJ z wieloma reaktorami o mocy 50 MWe każdy.
- Rozwiązania konstrukcyjne reaktora podnoszą jego bezpieczeństwo i ułatwiają eksploatację.

Reaktor można bezpiecznie wyłączyć. Wychładza się on samoczynnie, bez ograniczeń czasowych, bez działań operatora.

- Nie potrzebuje zasilania prądem AC lub DC, nie potrzebuje dodatkowych zapasów wody.

# Moduły chłodzone siłami naturalnymi, odporne na wstrząsy sejsmiczne

---

- Kompletną obudowę bezpieczeństwa i zbiornik reaktora można przewozić w segmentach, kolejną, ciężarówkami lub na barkach, dla szybkiego zainstalowania na miejscu budowy.
- Modułowe reaktory umieszczone są pod ziemią, zamknięte w zbiornikach reaktorowych o odporności sejsmicznej klasy I.
- Układ chłodzenia powyłączeniowego i układy chłodzenia awaryjnego działają na zasadzie konwekcji naturalnej dzięki sile ciężkości
- Wspólny basen zapewnia tłumienie wstrząsów sejsmicznych i osłonę przed promieniowaniem,
- Czas pracy użytecznej - 60 lat
- Projektowy współczynnik obciążenia 95%

# **Każdy moduł NuScale zawiera reaktor, stabilizator ciśn, WP i obudowę bezp.**

---

- Każdemu reaktorowi towarzyszy turbogenerator 50 MWe brutto.
- Elektrownia NuScale może zawierać od 1 do 12 modułów. W elektrowni wielomodułowej można wyłączyć jeden moduł bez wpływu na pozostałe. Pozwala to na niezawodne zaspokojenie potrzeb odbiorców.
- Każdy moduł może pracować w 4-letnim cyklu paliwowym, ale pracuje w cyklu 24 m-ce, by umożliwić inspekcje NRC.
- W elektrowni z 12 modułami wyłączenia na przeładunek paliwa następują co 2 miesiące. Dzięki temu wymiana paliwa stanowi regularnie wykonywaną czynność, do której wystarcza normalna załoga elektrowni.
- Pozwala to uniknąć zatrudniania na okres przeładunków dodatkowo 1000 pracowników.

# Technologia NuScale SMR

---

- Wysokość reaktora to 19,5 m, a średnica 2,7 m. Znajduje się on w obudowie bezpieczeństwa, położonej w basenie wodnym pod poziomem gruntu .
- Układ chłodzenia pracuje w oparciu o konwencję naturalną, bez pomp. Woda podgrzewa się przepływając przez rdzeń. Jej gęstość maleje, woda podnosi się wewnątrz zbiornika.
- Gdy gorąca woda dopłynie do szczytu komina, jest ona kierowana ku dołowi przez wodę schłodzoną przy przepływie przez wytwornice pary. Chłodniejsza woda ma większą gęstość. Siła ciężkości ściąga ją w dół do dna zbiornika, skąd płynie znów ku górze przez rdzeń.
- Dla uniknięcia rozprzestrzeniania skażeń, woda w układzie chłodzenia rdzenia jest oddzielona od wody w wytwornicy pary..



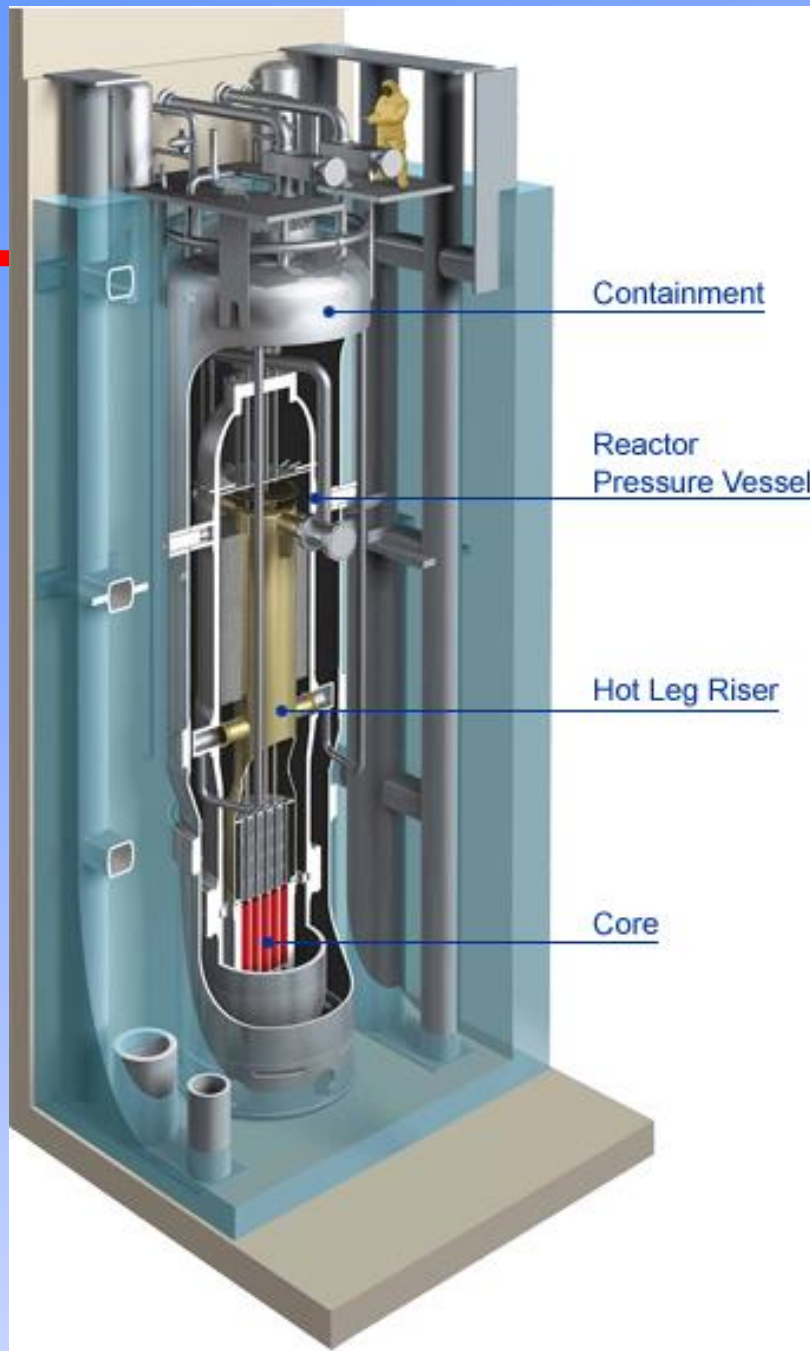
# Wytwarzanie pary i generacja energii elektrycznej



- Gdy gorąca woda w układzie odbioru ciepła z rdzenia NuScale SMR przepływa wokół setek rurek w wytwornicy pary, ciepło przenika przez ścianki rurek i woda w rurkach zamienia się w parę.
- Para napędza turbinę, połączoną wspólnym wałem z generatorem elektrycznym. Przepływając przez łopatki turbiny, para traci swą energię.

Para jest ostatecznie schładzana do postaci wody w skraplaczu, następnie jest pompowana pompą wody zasilającej do wytwornic pary, gdzie cykl zaczyna się na nowo.

# Inżynieryjne cechy bezpieczeństwa



Wysokociśnieniowa obudowa bezpieczeństwa

System hydroakumulatorów powyłączeniowych (SAS)

Pasywne Systemy Bezpieczeństwa

Układ chłodzenia powyłączeniowego (DHRS)

Układ odbioru ciepła z obudowy (CHRS)

Urządzenia do opanowania ciężkich awarii i zapobiegania uwolnieniom produktów rozszczepienia

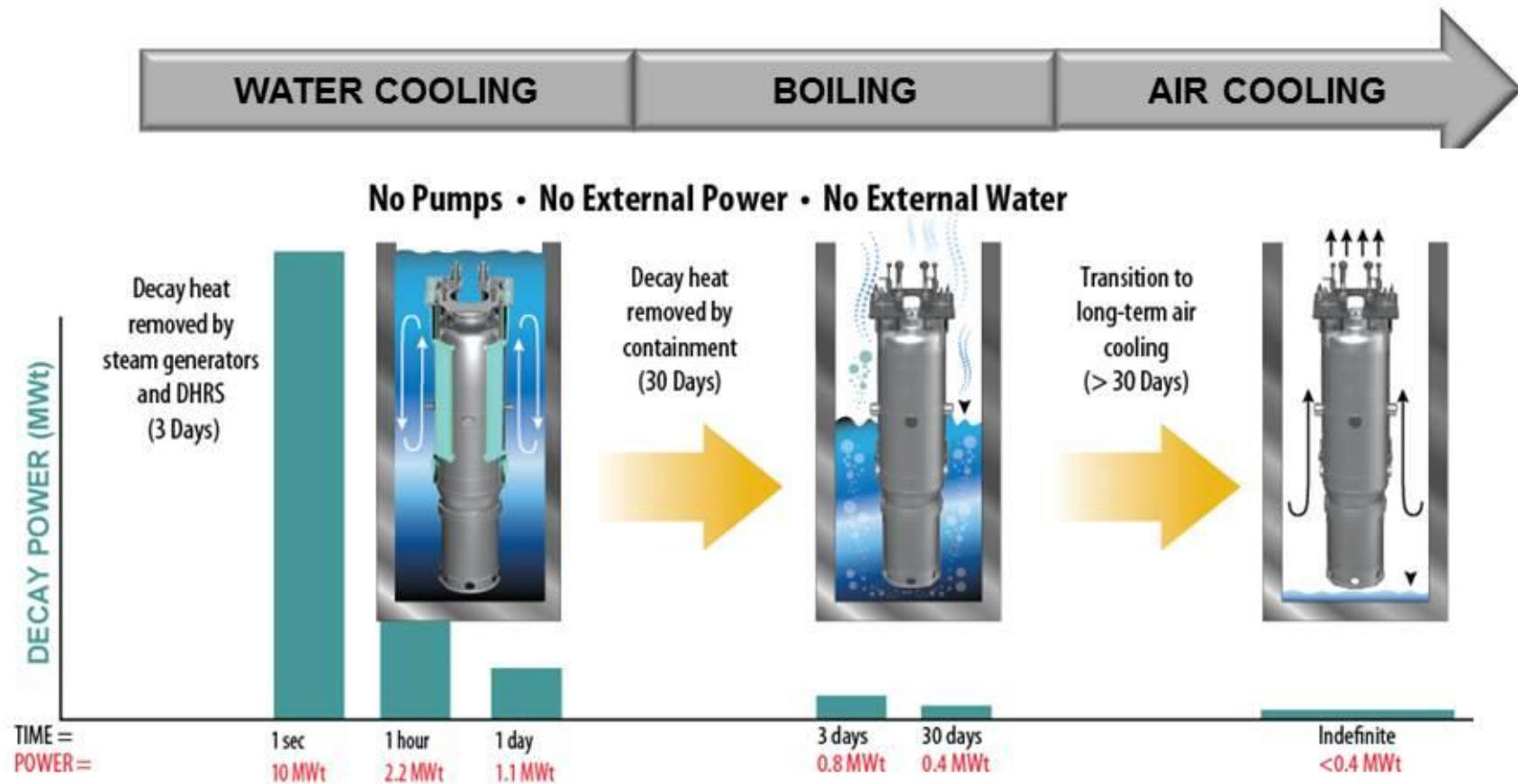
# Charakterystyka techniczna reaktora NuScale SMR

---

- **Moc cieplna/elektryczna brutto** – 160 MWt/ 50 MWe
- **Współczynnik wykorzystania mocy** – >95 percent
- **Wymiary** – cylindryczna obudowa bezpieczeństwa 23 m wysokości, 4,5 m średnicy zawierająca reaktor i wytwornicę pary
- **Waga** – ~ 700 ton w transporcie z wytwórni
- **Transport** – Barka, ciężarówka lub pociąg
- **Koszt** – Wiele zalet: prostota, użycie znormalizowanych produktów dostępnych w handlu, konstrukcja modułowa, krótki czas budowy, nakłady inw. <\$5,000/KW
- **Paliwo** – Standardowe paliwo LWR, układ 17 x 17, długość 2 m. Cykl paliwowy 24-mce z paliwem wzbogaconym poniżej 4.95 %

# Innovative Advancements to Reactor Safety

*Nuclear fuel cooled indefinitely without AC or DC power\**



• 30 days is a minimum based on very conservative estimates.

*\*Alternate 1E power system design eliminates the need for 1E qualified batteries to perform ESFAS protective functions – Patent Pending*



# Reaktor SMR NuScale zawsze bezpieczny

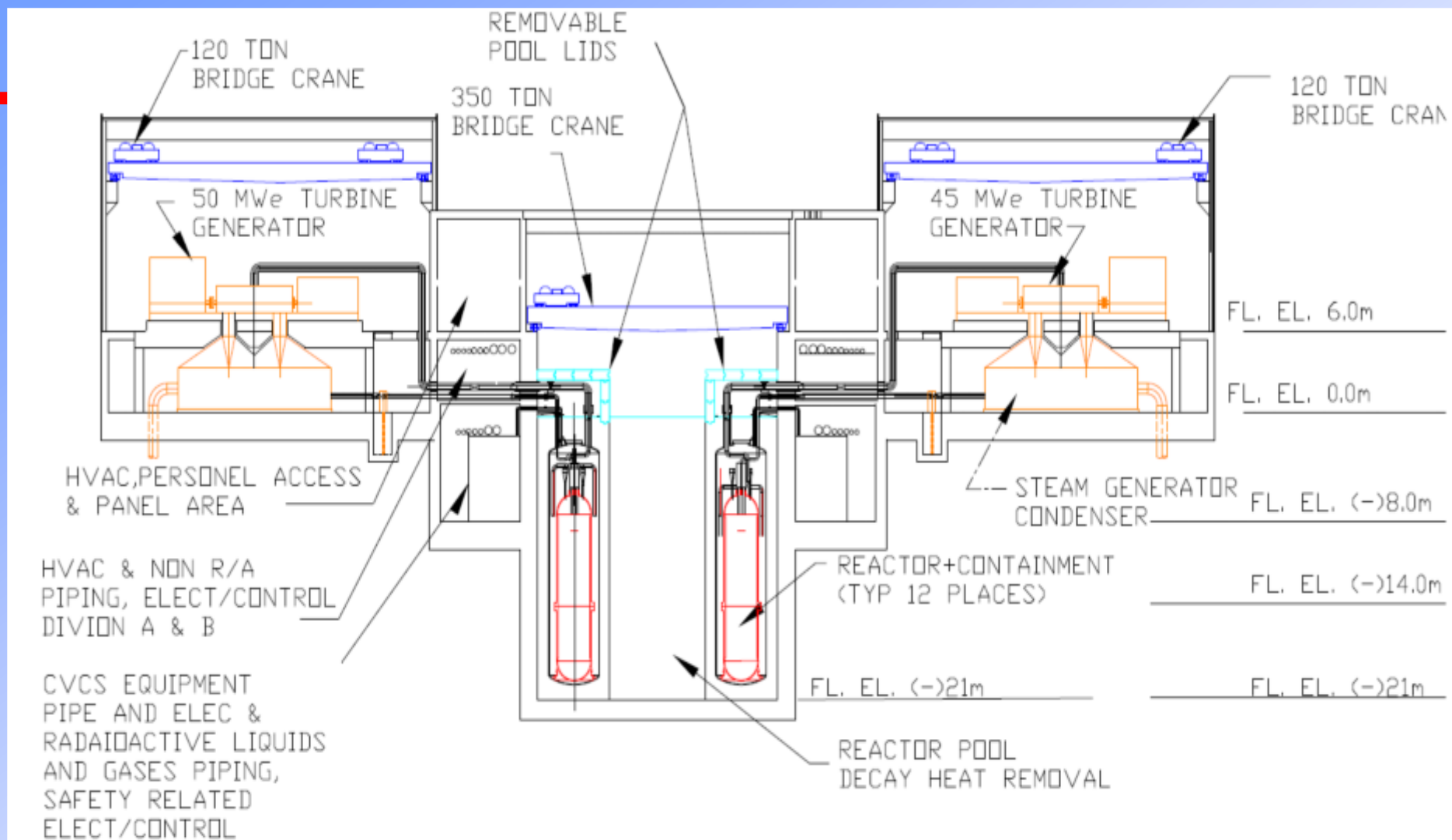
---

- Bezpieczne wyłączenie i chłodzenie, bez udziału operatora, bez zasilania AC lub DC, bez potrzeby dodatkowej wody.
- Zawory bezpieczeństwa w razie zaniku zasilania ustawiają się same w najbezpieczniejszej pozycji, tak by chłodzenie było łatwe i skuteczne. Nie potrzebują akumulatorów prądu stałego.
- Nie potrzeba również pomp ani dodatkowego zapasu wody do chłodzenia awaryjnego. Odbiór ciepła przez nieskończenie długi czas jest zapewniony przez odparowanie wody a potem konwekcję powietrza.
- Jedyne akumulatory DC klasy bezpieczeństwa są potrzebne dla monitorowania stanu elektrowni po awarii.

| <b>Układy bezpieczeństwa obecnych reaktorów dużej mocy</b>                                                                                   | <b>Układy bezpieczeństwa SMR</b>                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Wysokociśnieniowy układ wtrysku</b><br><b>Niskociśnieniowy układ wtrysku</b>                                                              | Nie potrzeba układów aktywnych. Chłodzenie w drodze pasywnego odbioru ciepła.                               |
| <b>Konieczna awaryjna miska ściekowa i zapewnienie ciśnienia na wlocie do pomp (NPSH) bezp.</b>                                              | Nie ma pomp w układach bezpieczeństwa, nie potrzeba miski ściekowej ani zabezpieczeń przed zatkaniem wlotu. |
| <b>Awaryjne generatory z napędem diesla</b>                                                                                                  | Nie potrzeba prądu zmiennego (AC) dla chłodzenia rdzenia. Ciepło odbierane poprzez zbiornik reaktora.       |
| <b>Aktywny układ odbioru ciepła z obudowy bezpieczeństwa.</b>                                                                                | Nie potrzebny dzięki pasywnemu odbiorowi ciepła z obudowy.                                                  |
| <b>Układ zraszania obudowy bezpieczeństwa.</b>                                                                                               | Układ zraszania nie potrzebny ani do obniżenia ciśnienia pary, ani do usuwania jodu.                        |
| <b>Układy chłodzenia awaryjnego, systemy sterowania i kontroli. Wymagane sprawdzanie ich działania w EJ, co zmniejsza dyspozycyjność EJ.</b> | Prostsze i pasywne układy bezpieczeństwa wymagają mniej sprawdzania i nie są podatne na mylne uruchomienia. |
| <b>Awaryjny układ wody zasilającej, zbiorniki kondensatu itd.</b>                                                                            | Grzanie powyłaczeniowe odbierane bez AUWZ – jest to znaczące ulepszenie bezpieczeństwa. (Fukushima)         |

| Układy pomocnicze EJ II Gen.                                                                                                                                                                       | Układy pomocnicze SMR                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Uszczelnienia pomp obiegu pierwotnego. Przepięcia są problemem bezp.</p> <p>■ <b>Konserwacja i wymiana uszczelnień kosztowne i czasochłonne.</b></p>                                            | <p>Układ scalony wyeliminował potrzebę pomp i ich uszczelnień.</p>                                                                                                     |
| <p><b>Ostateczne ujście ciepła i związane z nim systemy. Pobór wody z morza i rzeki to systemy aktywne, mogą zawieść wskutek krańcowych warunków pogody lub zanieczyszczenia biologicznego</b></p> | <p>Rozwiązania w SMR są pasywne i odbiór ciepła następuje przez konwekcję i przewodzenie. Nie potrzeba usuwania ciepła do ostatecznego wodnego odbiornika ciepła..</p> |
| <p><b>Wymagane zamknięty układ chłodzenia by zapewnić odbiór ciepła z pomocniczych systemów bezp.</b></p>                                                                                          | <p>Nie potrzeba zamkniętego systemu chłodzenia wodnego dla pomocniczych systemów bezp.</p>                                                                             |
| <p><b>Wentylacja, grzanie, klimatyzacja (HVAC) muszą pracować, by zapewnić wymagane warunki pracy systemów bezp.</b></p>                                                                           | <p>Konstrukcja elektrowni minimalizuje lub usuwa potrzebę chłodzenia systemów bezp., co eliminuje HVAC i związane z nim wodne układy chłodzenia.</p>                   |

# Maszynownia, od 2 do 12 reaktorów NuScale

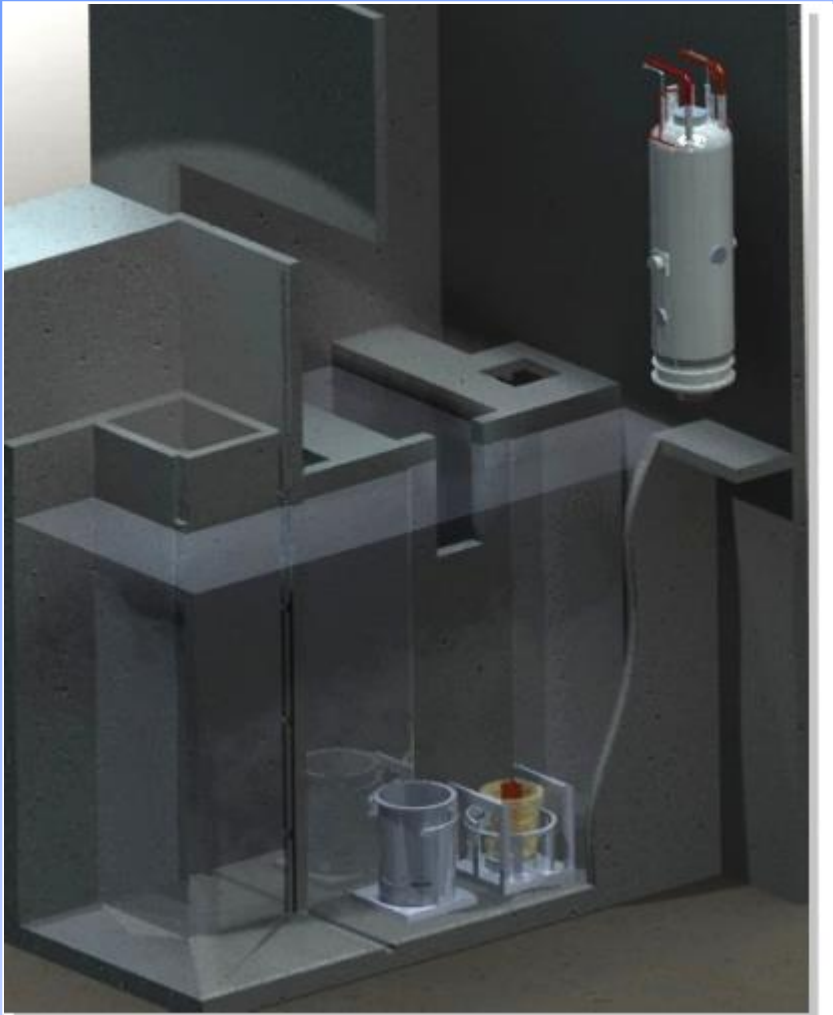




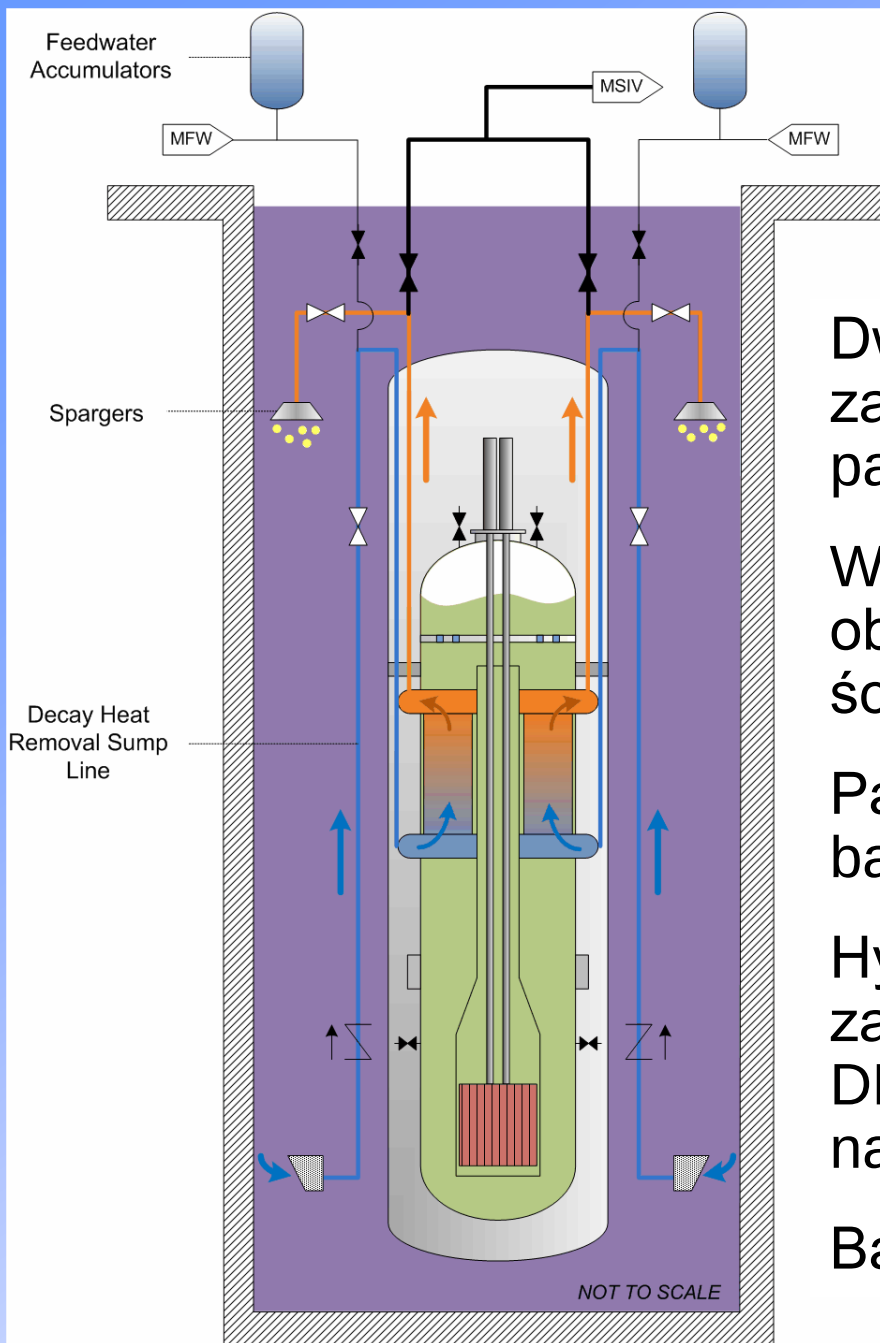
# Wymiana paliwa w reaktorze NuScale

Po wyłączeniu – normalna woda zasilająca  
Ciepło powyłączeniowe odbiera pasywny układ DHRS

---



Obudowa bezp. częściowo zalana  
Moduł odłączany od rur i mierników  
Moduł przenoszony dźwigiem do basenu wymiany paliwa  
Odłączanie dolnej części obudowy i dolnej głowicy zbiornika reaktora  
Przeładunek, tasowanie paliwa  
Dołączenie dolnej części zbiornika reaktora i obudowy  
Moduł przenoszony z powrotem do basenu  
Moduł ponownie podłączany  
Obudowa drenowana, moduł uruchamiany



# Układ odbioru ciepła powyłłączeniowego DHRS

Dwa niezależne ciągi awaryjnej wody zasilającej do pęczków rur w wytwornicy pary

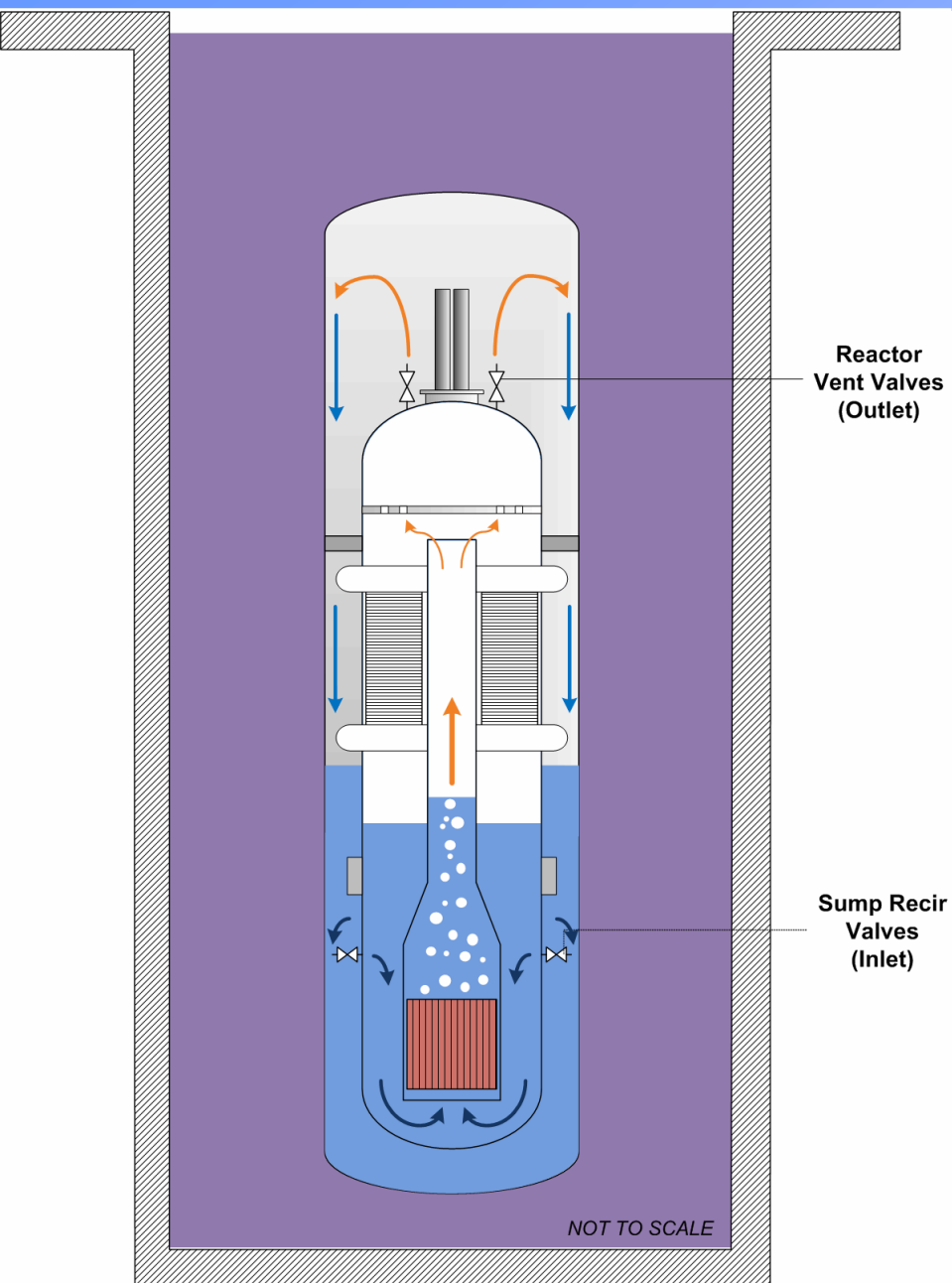
Woda jest wciągana z basenu chłodzenia obudowy bezpieczeństwa przez filtr miski ściekowej

Para ulatnia się przez sita i skrapla w basenie

Hydroakumulatory wody zasilającej zapewniają początkowy napływ wody zanim DHRS przejdzie do pracy w konwekcji naturalnej

Basen zapewnia wodę na 3 dni chłodzenia

# Układ odbioru ciepła z obudowy bezp. CHRS



Zapewnia odbiór grzania  
powyłączeniowego i ogranicza ciśnienie w  
obudowie przez:

Skraplanie pary

Konwekcyjną wymianę ciepła

Przewodzenie ciepła

Recyrkulację przez miskę ściekową

Para ze zbiornika reaktora wypływa przez  
zawory wentylacyjne reaktora z  
ogranicznikami przepływu □

Para skrapla się na powierzchni obudowy

Skropliny spływają do miski

Zawory w misce otwierają się by zapewnić  
drogę recyrkulacji przez rdzeń.

# **Wyniki oceny bezpieczeństwa reaktora NuScale**

---

## **Awaria z dużą utratą chłodziwa wykluczona projektowo**

Wobec tego, że woda „utracona” z obiegu pierwotnego może powrócić po otwarciu zaworów recyrkulacji pod miską niemożliwe jest odsłonięcie rdzenia po projektowej awarii LOCA .

Dlatego również awaria LOCA z małym przeciekiem nie stwarza zagrożenia reaktora.

## **Ograniczanie skutków ciężkich awarii**

Zmniejszone uwolnienia dzięki modularyzacji i dodatkowym barierom.

Nie potrzeba kontroli gazu w obudowie (atmosfera obojętna)

Nie ma oddziaływania stopionego rdzenia na beton

Pewny i rezerwowany układ redukcji ciśnienia w reaktorze (wykluczone rozerwanie zbiornika pod wysokim ciśnieniem).

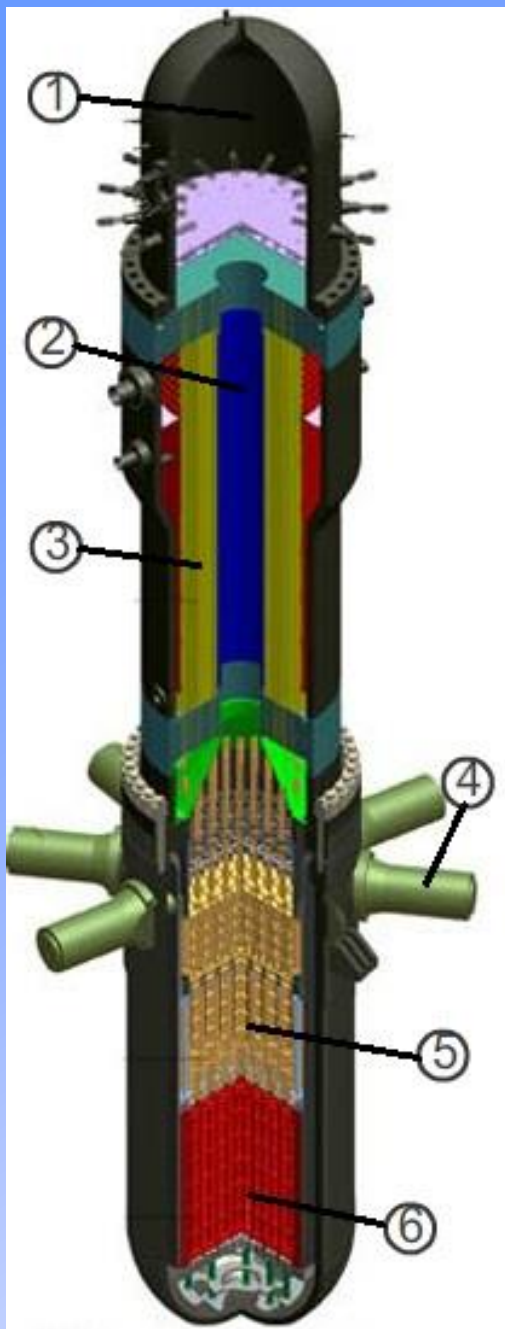


# Pozytywna ocena bezpieczeństwa reaktora SMR firmy Westinghouse

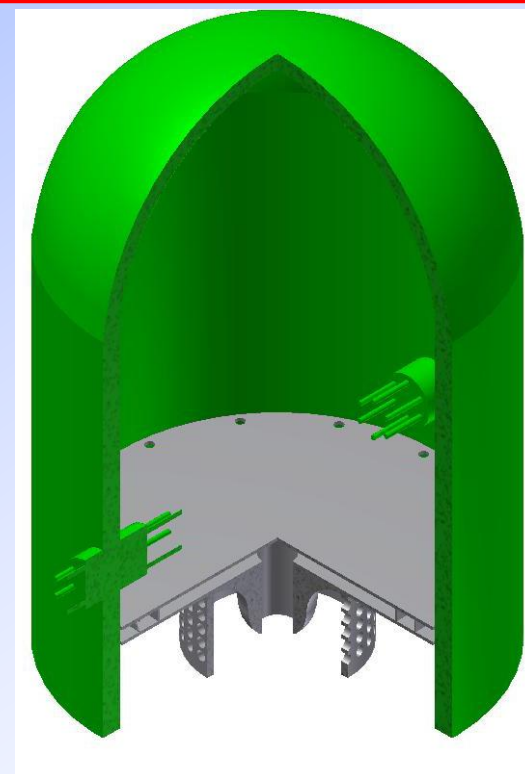
---

- W lutym 2015 r. firma Westinghouse otrzymała od US NRC zezwolenie na rozpoczęcie prób doskonalonego przez nią reaktora SMR o konstrukcji opartej na rozwiązaniu reaktora AP1000. Reaktor SMR o mocy 225 MWe doskonalony przez firmę Westinghouse ma wszystkie elementy obiegu pierwotnego zawarte w zbiorniku ciśnieniowym reaktora.
- Po tej decyzji NRC firma Westinghouse wznowiła swe prace nad zintegrowanym wodnym reaktorem ciśnieniowym, przerwane w lutym 2014 r. gdy firmie Westinghouse nie udało się uzyskać współfinansowania prac przez DoE.
- Zezwolenie NRC jest znaczącym krokiem w kierunku zatwierdzenia projektu, który skróci czas potrzebny na licencjonowanie tego reaktora modułowego.

# SMR 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.



Rozwiązanie oparte na AP1000. Wszystkie elementy obiegu pierwotnego wewnątrz zbiornika reaktora .

# Obudowa bezpieczeństwa

Konstrukcja zwarta, wysokie ciśnienie

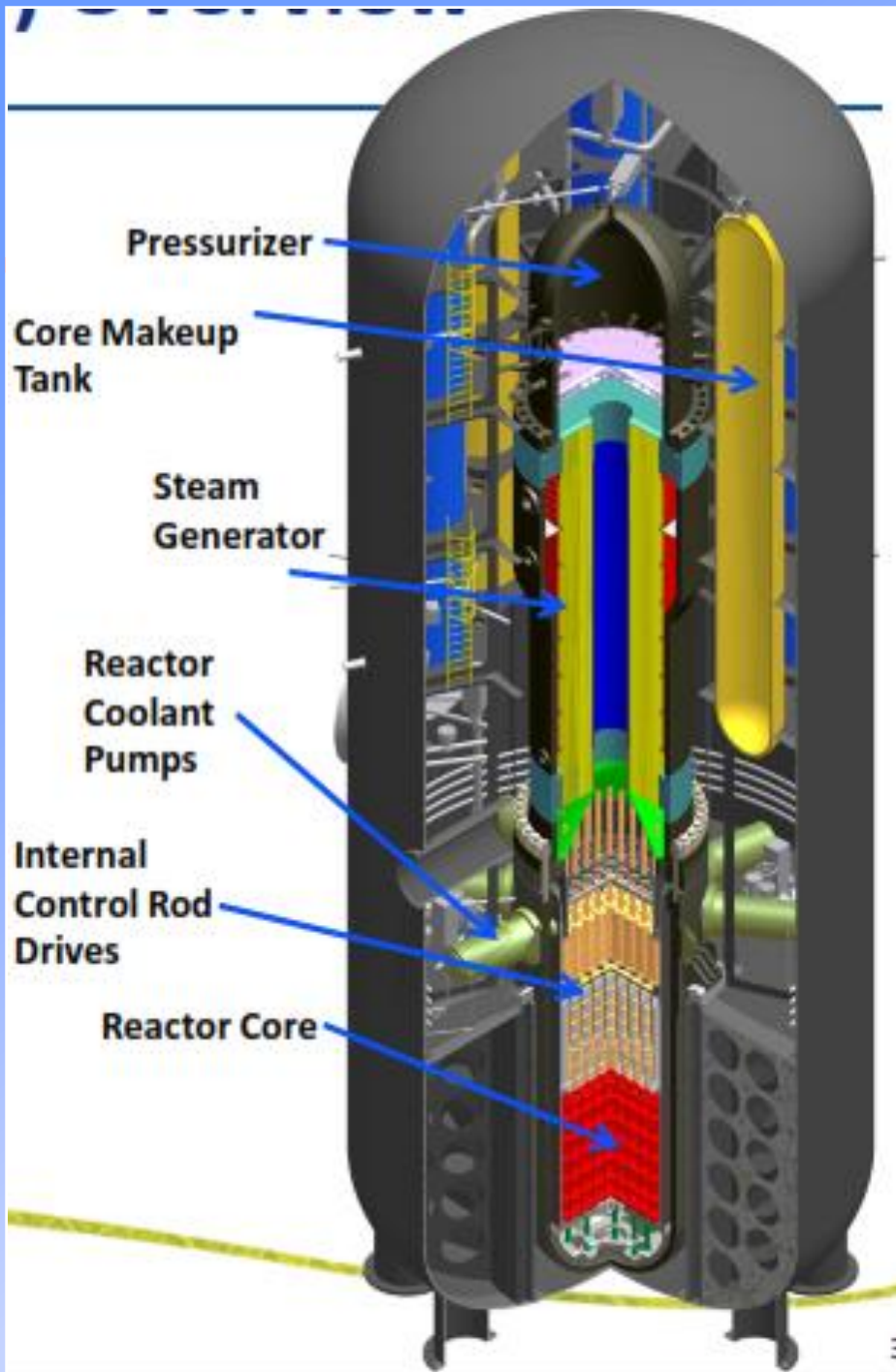
Całość pokryta wodą

Pokrywa górna usuwana

Układ modułowy

Maksymalna średnica 3,9 m  
(transport kolejowy)

Wytwornica pary z prostymi rurami, część gorąca w środku

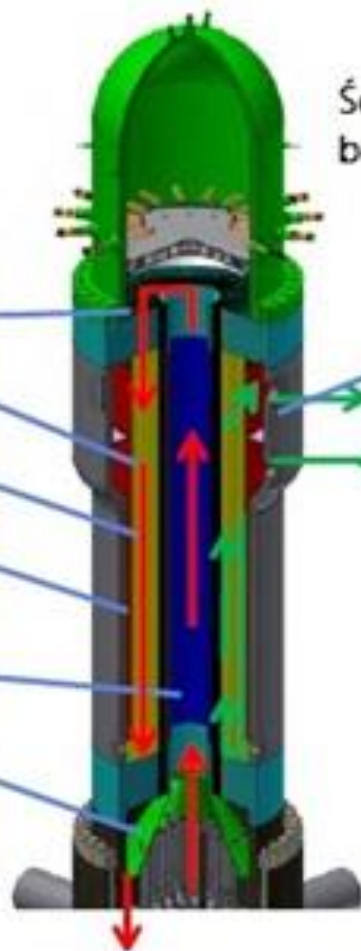




# Wytwornica pary SMR Westinghouse wraz z zewnętrznym separatorem pary

Wewnętrzna  
wytwornica pary

- Płyta sitowa
- Rurki
- Podparcie rurek
- Ośłona
- Gorąca gałąź obiegu pierwotnego
- Zimna gałąź obiegu pierwotnego



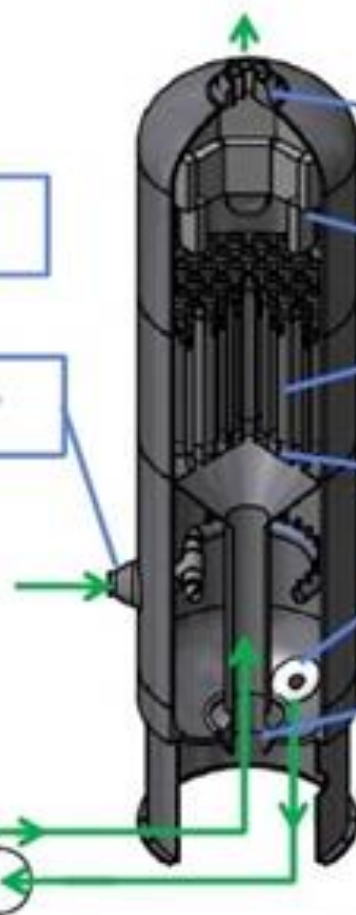
Ściana obudowy  
bezpieczeństwa

Wlot wody i  
wylot pary

Wlot wody

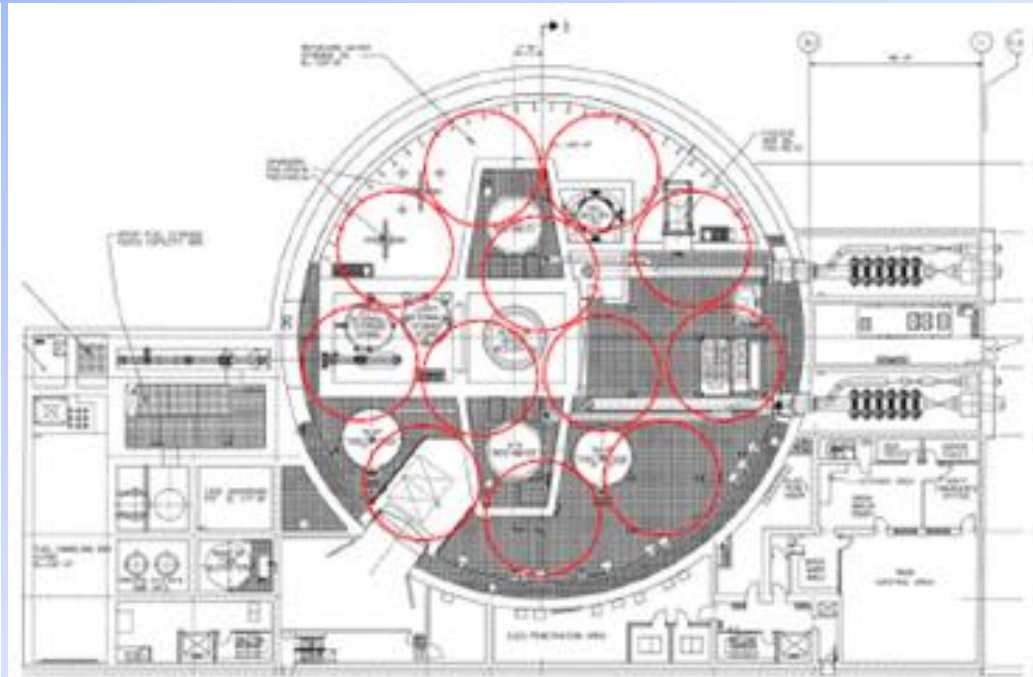
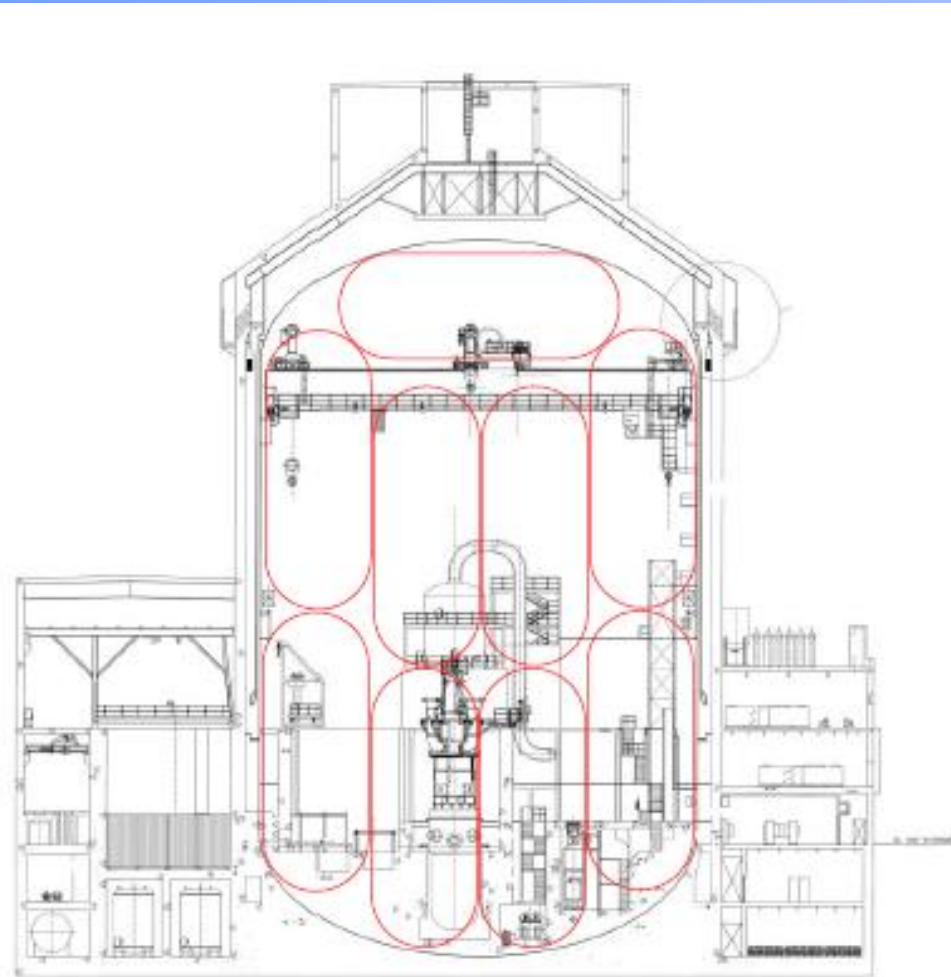
Zewnętrzny  
separator pary

- Wylot pary na  
turbine
- Drugi stopień  
separatora
- Pierwszy stopień  
separatora
- Kolektor  
odmulin
- Wlot wody do  
reaktora
- Wlot pary do  
separatora



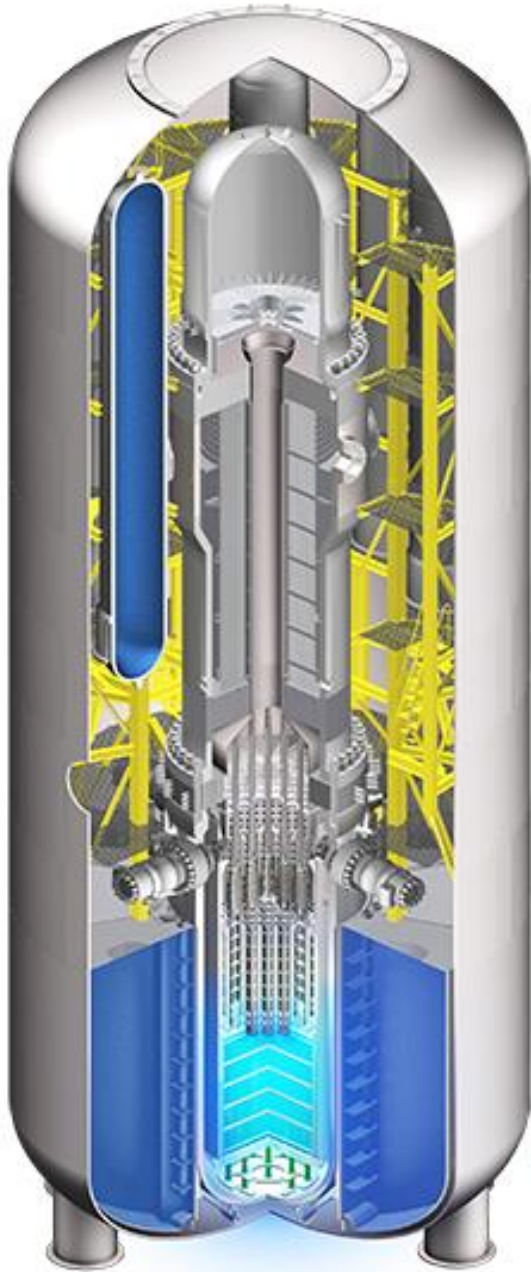


# Umieszczenie obudowy bezpieczeństwa reaktora SMR na planie reaktora AP 1000.



**25 reaktorów SMR w objętości  
reaktora A1000**

# Reaktor SMR firmy Westinghouse



- Moc 225 MWe , 800MWt
- Projektowy czas życia 60 lat
- *Paliwo: 17x17 RFA, <5% wzbogacenia UO<sub>2</sub>*
- *Całkowita powierzchnia: ~15 akrów*
- *Pasywne systemy bezpieczeństwa.*
- *Przewóz koleją, ciężarówką , lub barką*
- *Zwarta konstrukcja zintegrowana*
- *System uproszczony, modułarny*
- *Minimalna powierzchnia, maksymalna moc*
- *24 m-ce między przeładunkami paliwa*

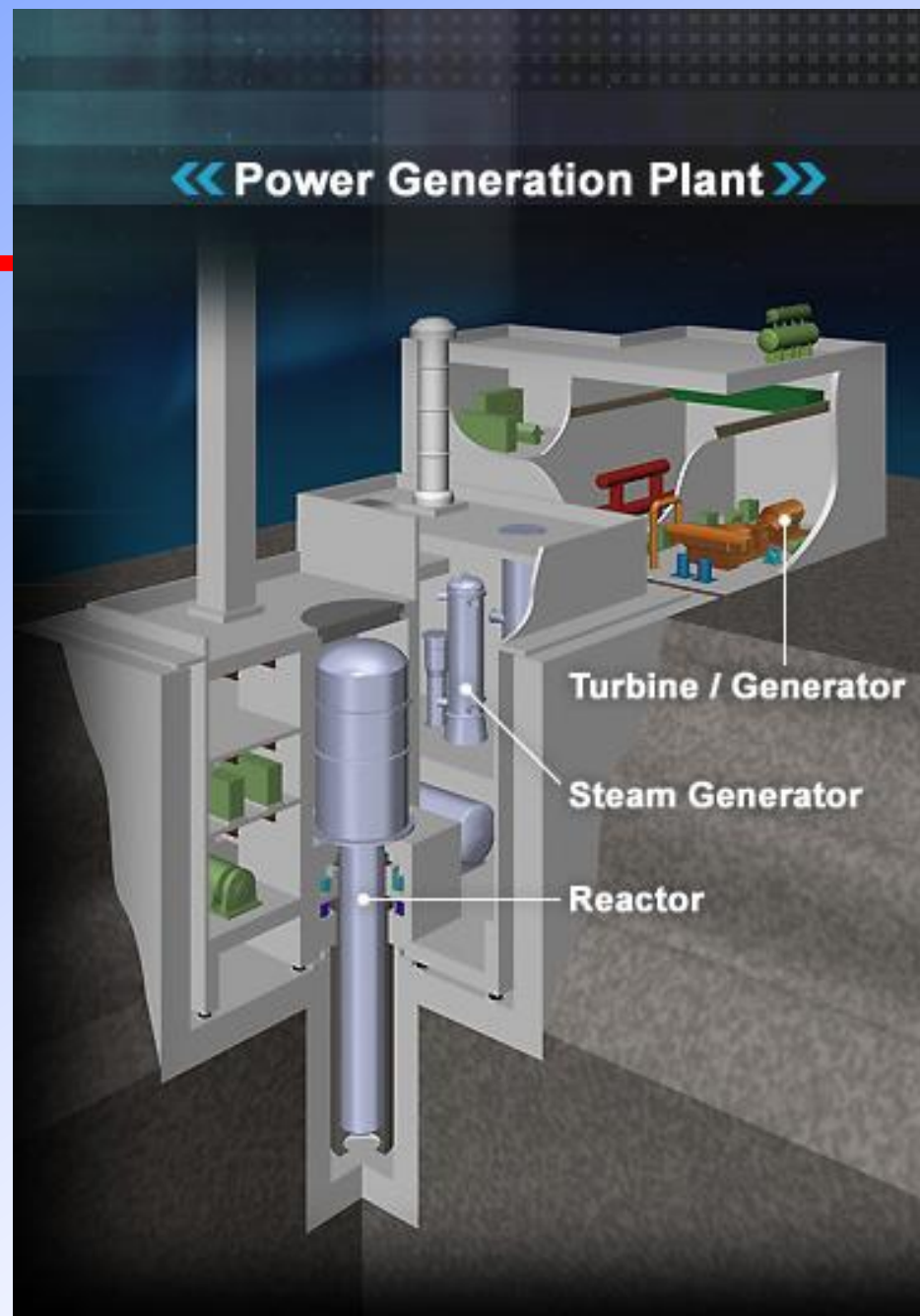
# Toshiba 4S reaktor

- Pracuje 30 lat na mocy 30 MW t bez wymiany paliwa
- Małe wymagania obsługi
- Pasywne bezpieczeństwo

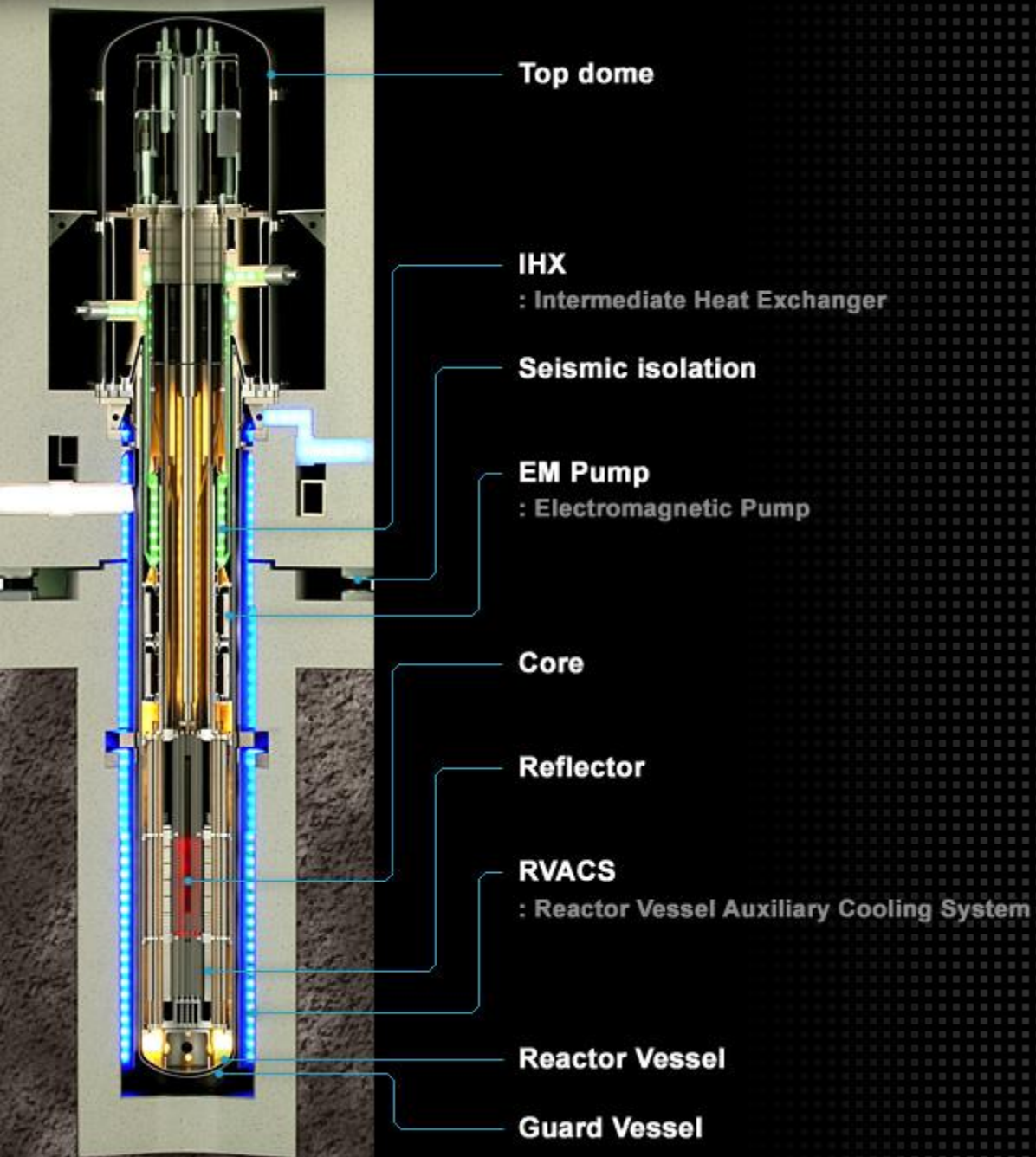
*Paliwo metaliczne w rdzeniu o mocy regulowanej ruchami reflektora.*

*Obsługa minimalna dzięki zastosowaniu pompy elektromagnetycznej bez części wirujących.*

*Pasywny układ odbioru ciepła i ujemne sprzężenie zwrotne temperaturowego wsp. reaktywności rdzenia*





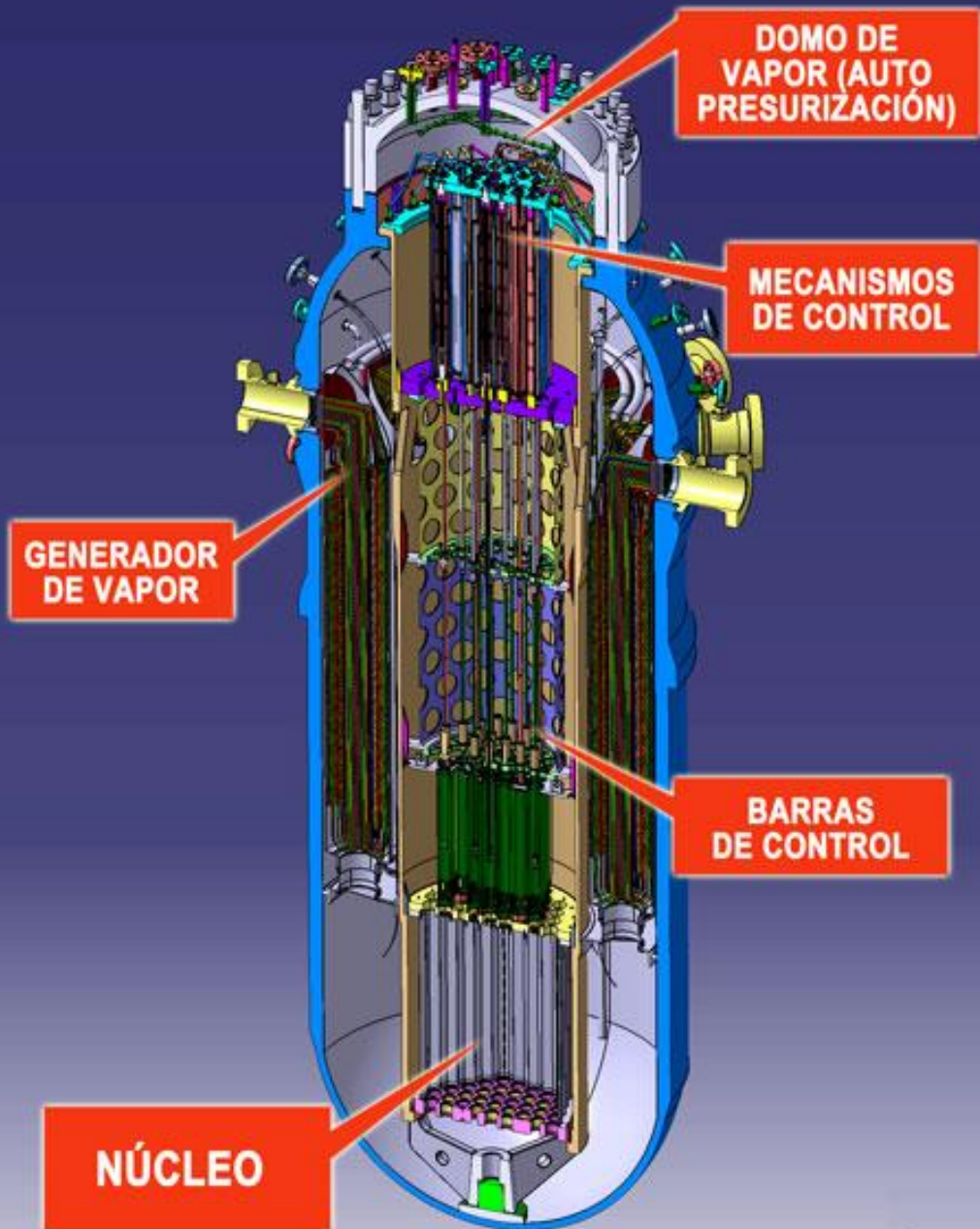


## Reaktor 4S

- Pokrywa górna
- Pośredni wymiennik ciepła
- Izolacja sejsmiczna
- Pompa elektromagnetyczna
- Rdzeń
- Reflektor
- Pomocniczy system chłodzenia zbiornika reaktora
- Zbiornik reaktora
- Osłona



# CAREM - 25



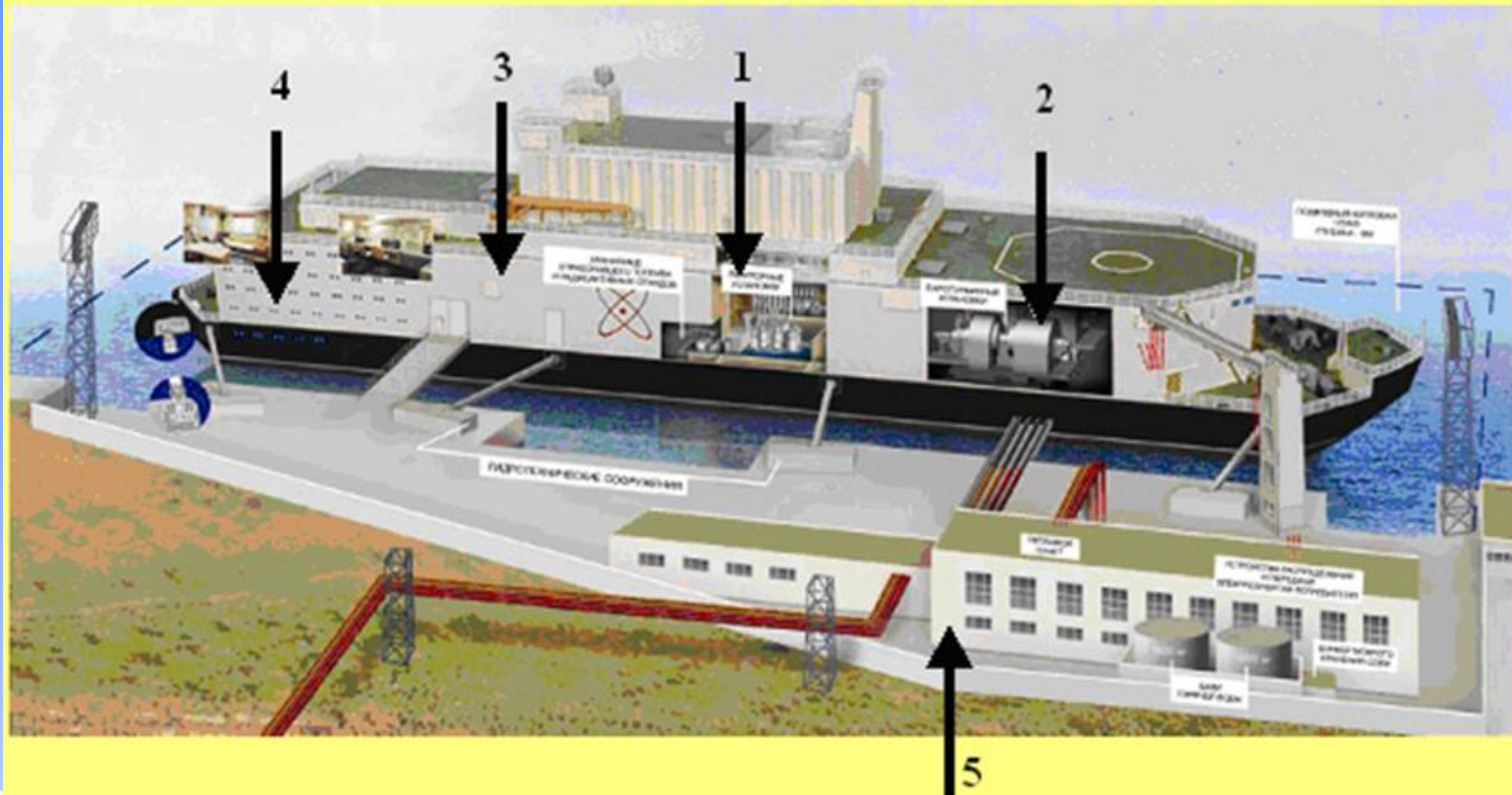
Od góry, zgodnie z ruchem wskazówek zegara:

- Przestrzeń zintegrowanego stabilizatora ciśnienia,
- mechanizmy napędowe prętów sterujących,
- pręty sterujące,
- rdzeń,
- wytwornice pary

Brak pomp obiegu pierwotnego, wystarcza konwekcja naturalna podobnie jak w NUScale i w iPWR SMR doskonalonym przez Mitsubishi Heavy Industries)

# Pływająca elektrownia jądrowa z reaktorem KLT-40S

FNPP ATES with reactor KLT-40S



1) reaktor, 2) turbina parowa 3) składowanie wypalonego paliwa i odpadów radioaktywnych, 4) pomieszczenia mieszkalne, 5) ośrodek dystrybucji gorącej wody.

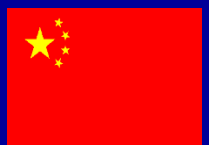
# Główne cechy reaktora KLT-40S

---

- Konstrukcja modułowa: reaktor, wytwornice pary i główne pompy cyrkulacyjne połączone krótkimi dyszami, bez długich rurociągów.);
- System 4 pętli z wymuszoną i naturalną konwekcją chłodziwa pierwotnego.
- Ciśnieniowy obieg pierwotny z zatopionymi pompami i szczelnymi zaworami mieszkowymi;
- Zewnętrzny gazowy układ stabilizacji ciśnienia;
- Pasywne systemy bezpieczeństwa
- Sprawdzone technologie instalacji, napraw i wymiany wyposażenia diagnostyki i kontroli stanu urządzeń. (300 reaktoro-lat doświadczenia z pracy reaktorów na statkach)



# Stan zaawansowania projektów SMR

| Kraj                                                                                | Projekt                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 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<br>mPower<br>Westingh<br>HI-SMUR | <p>W listopadzie 2012 r. Departament Energii Stanów Zjednoczonych spośród czterech projektów wybrał mPower firmy Babcock&amp;Wilcox i przeznaczył 425 mln \$ na jego rozwój.</p> <p>W 2014 r. DoE przyznał firmie NuScale 226 mln USD na licencjonowanie SMR w NRC. Prezydent nadał SMRom prawa takie jakie mają OZE</p> |
|    | KLT-40s<br>SVBR-100<br>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 50-250 MWe na dnie morskim na głębokości 60-100 m. 5-15 km od brzegu.                                                                                                                                                                                                      |
|   | CAREM-25                                 | Prace nad wyborem lokalizacji dla reaktora CAREM-25 rozpoczęły się we wrześniu 2011. Budowa demonstratora rozpoczęta w lutym 2014.                                                                                                                                                                                       |
|  | 4S                                       | Toshiba zgłosiła projekt reaktora 4S do certyfikacji przez NRC i w krajach rozpoczynających program jądrowy                                                                                                                                                                                                              |
|  | HTR-PM<br>ACP-100                        | Dwa moduły reaktorów HTR-PM są w trakcie budowy. Firma CNNC pracuje nad projektem reaktora ACP-100                                                                                                                                                                                                                       |



# Doświadczenie polskich inżynierów i polskich firm na potrzeby SMR

---

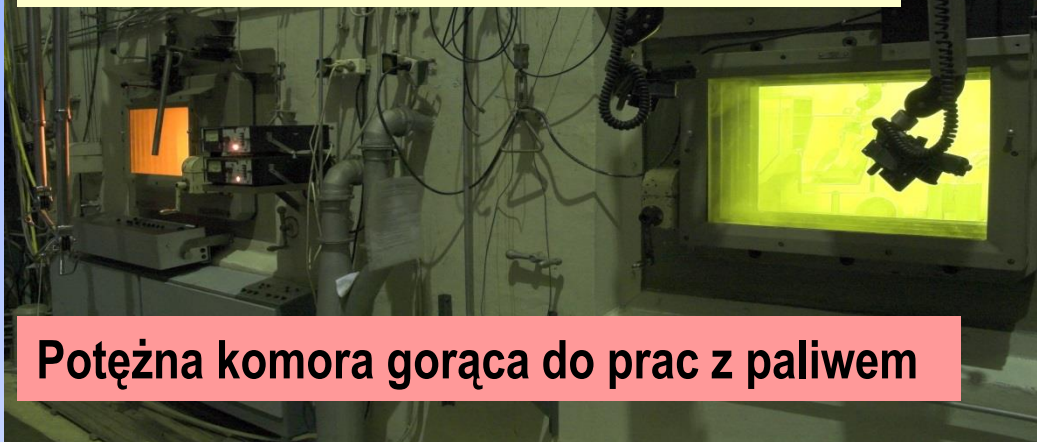
- Small power reactors – to bloki porównywalne w reaktorze MARIA w Swierku (40 MW<sub>th</sub>), a mniejsze od bloków EJ Żarnowiec. 440 MW<sub>e</sub>.
- Dla EJ Żarnowiec polski przemysł produkował wytwornice pary, zbiorniki, zawory, turbozespoły, awaryjne generatory diesla, układy sterowania, pomiarowe, dozymetryczne, przepusty, kable z pokryciami żaroodpornymi, drzwi osłonowe, układy elektryczne i elektroniczne, był przygotowany do montażu i spawania obiegów elektrowni, a polscy inżynierowie opracowali projekt techniczny, raport bezpieczeństwa, program zapewnienia jakości i procedurę rozruchu.
- Dla reaktorów SMR zakres prac polskiego przemysłu może być podobny.

# Narodowe Centrum Badań Jądrowych –56 lat z reaktorami

Uruchomiony w 1974 r. reaktor jądrowy „Maria” pracuje w Instytucie Energii Atomowej w Świerku. Na zdjęciu zanurzony w wodzie na głębokości 9 m rdzeń – serce reaktora.



Rdzeń reaktora MARIA – produkcja izotopów dla 250 000 pacjentów/rok



Potężna komora gorąca do prac z paliwem

Siedem reaktorów i zestawów krytycznych zbudowanych i eksploatowanych bezpiecznie od 1958 do 2014 r. w tym reaktor MARIA, zaprojektowany i wykonany całkowicie polskimi siłami.

NCBJ może wykonywać analizy fizyczne, cieplne, przepływowe, materiałowe, osłonowe, dozymetryczne – jako Organizacja Wsparcia Technicznego dla PAA



# Polskie firmy i dzisiaj aktywnie uczestniczą w budowie bloków jądrowych



Polacy stanowili 40% personelu budującego OL3.

Prace budowlane elektryczne, spawalnicze, układy wentylacji, rurociągów...

Przy budowie SMRów w Polsce ich doświadczenie będzie wykorzystane!

Pokrywa obudowy bezpieczeństwa wykonanej dla Olkiluoto 3 Energomontaż Płn.



# Dziękuję za uwagę



Tłumy na plaży koło EJ Vandellos w Hiszpanii,