

Istota technologii małych modularnych reaktorów jądrowych (SMR)

Prof. Wacław Gudowski
OSGE

waclaw.gudowski@osge.com

SMR w Polsce
Nowe Wyzwania i Szanse dla Gospodarki

31 stycznia 2024 NOVOTEL CENTRUM (Wrocław)



Dofinansowano ze środków
**NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**

W oparciu o raport KPMG – “Wykorzystanie technologii BWRX-300 w Polsce –analiza korzyści”, maj 2023

Konferencja została dofinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.
Za treść prezentacji odpowiada wyłącznie jej autor.

Program

- Różnice pomiędzy dużym i małym atomem
 - Jak działa reactor
 - ✓ Reaktory trzeciej, czwartej i 3+ generacji
 - ✓ Typy reaktorów SMR
 - ✓ Bezpieczeństwo
- Potencjał zastosowania SMR w energetyce, ciepłownictwie i przemyśle



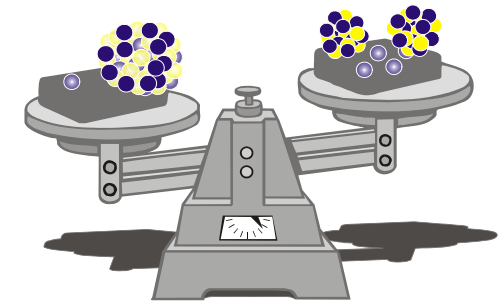
Energia Jądrowa – skąd się bierze?

$$E=\Delta mc^2$$

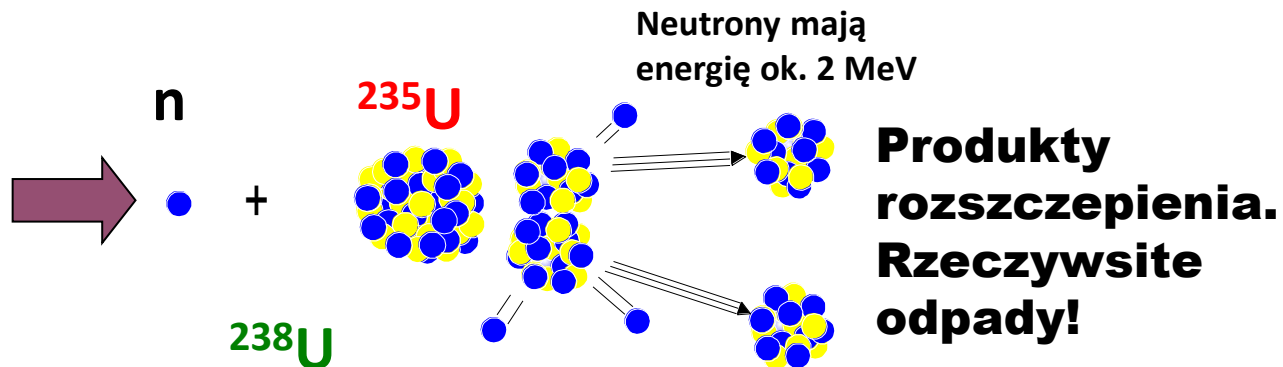
~ 200MeV!!

Rozszczepienie jądra
 ^{235}U

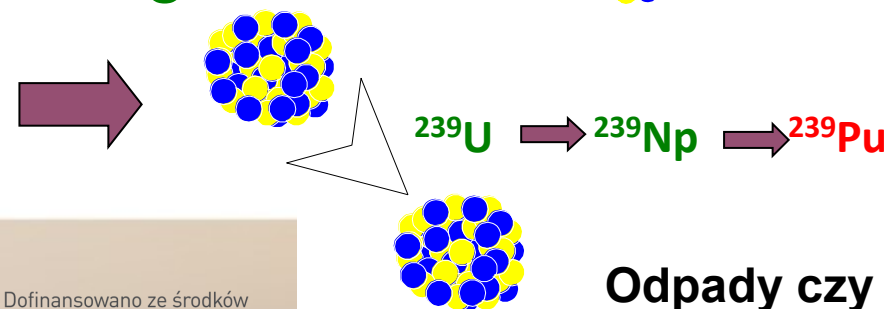
To ponad 10 milionów razy więcej niż w procesie spalania węgla czy gazu



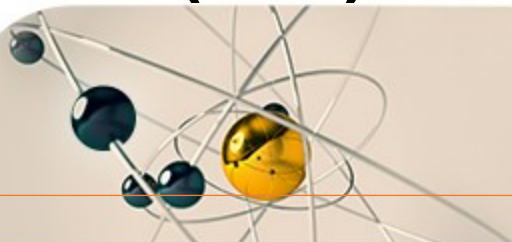
Produkcja energii



**Efekty „uboczne”
Produkcja plutonu
(^{239}Pu) z ^{238}U**



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Jak produkuje się energię jądrową?

W reaktorze jądrowym!

Do zbudowania reaktora potrzebujemy:

1. Paliwo jądrowe, zawierające rozszczepialne materiały
2. Medium, substancja, w której neutrony mogą się poruszać bez strat, zwane MODERATOREM neutronów
3. Chłodziwo, substancja odbierająca ciepło wygenerowane przez rozszczepienia w paliwie jądrowym,
4. Urządzenia sterujące, zwykle “pręty sterujące” – pełniące rolę “gaźnika lub hamulca” reaktora
5. Zbiornik reaktora, w którym to wszystko jest umieszczone
6. Obudowa bezpieczeństwa eliminująca ryzyko awarii z uwolnieniem substancji radioaktywnych.



Zaczniemy od zbiornika reaktora

Zbiornik ze stali nierdzewnej, grubości ok 14 cm, to troszkę bardziej zaawansowy KOCIOŁ, miejsce gdzie wytwarza się ciepło z rozszczepienia jąder. Wszystkie kolejne elementy reaktora umieszcza się w zbiorniku reaktora.



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Paliwo jądrowe

Musi zawierać rozszczepialny materiał jak ^{235}U lub ^{239}Pu

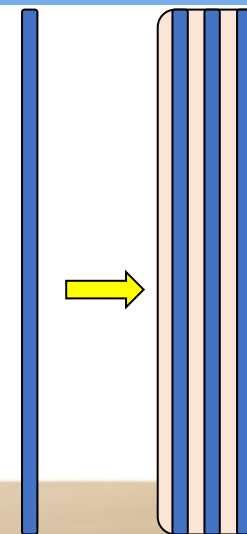
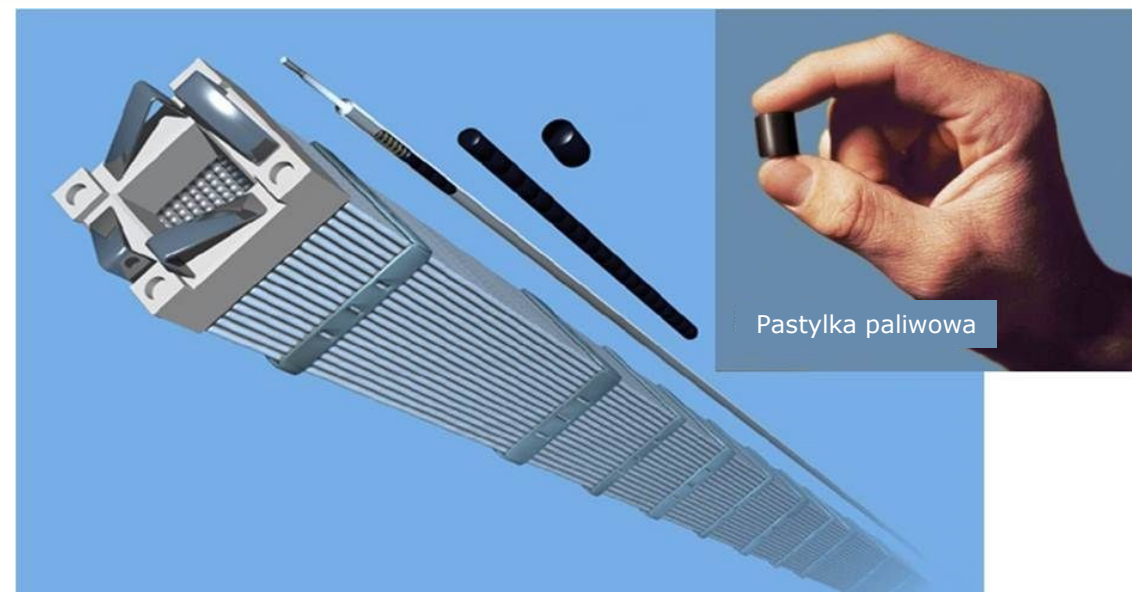
W praktyce paliwem jądrowym jest UO_2 , uran jest wzbogacony w pierwiastek ^{235}U do poziomu ok. 5%

Spieczone pastylki uranu wsadza się w tzw. koszulki, czyli rurki, a rurki montują się w kasety paliwowe.

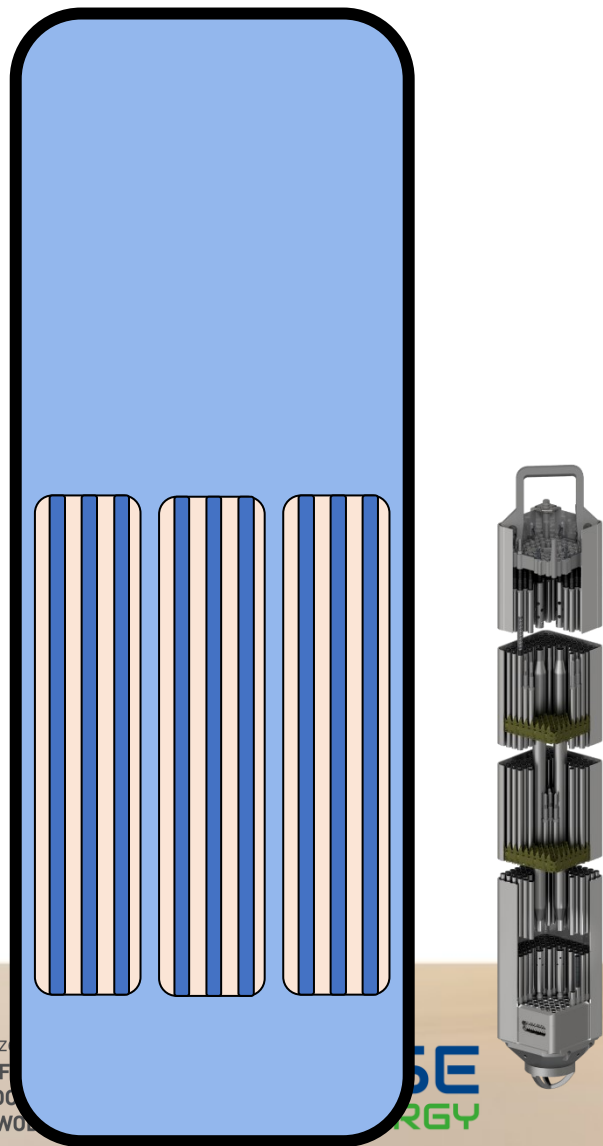
Uran naturalny, czyli ten, który jest w przyrodzie to:

99.3% - ^{238}U

0.7% - ^{235}U



Paliwo jądrowe, kasety, umocowane w zbiorniku reaktora



Moderator, spowalniacz neutronów

Substancja wypełniająca zbiornik reaktora i otaczająca paliwo.

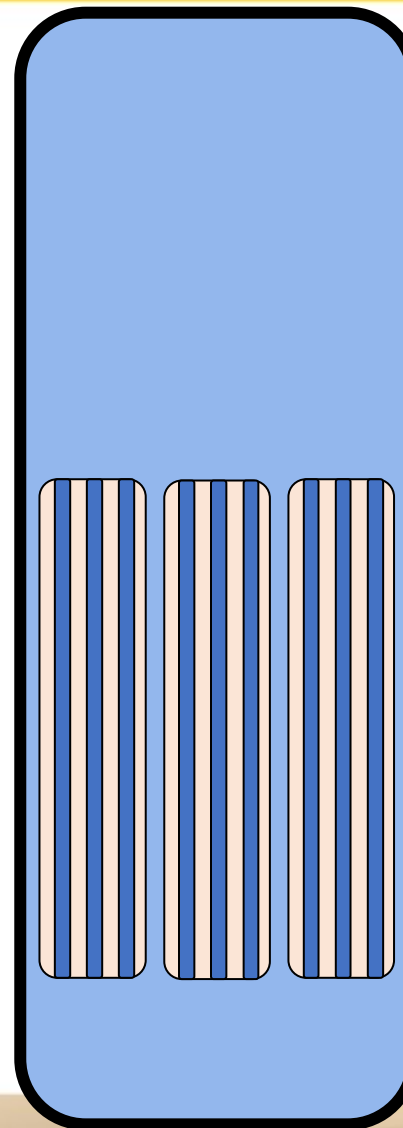
Nie może pochłaniać neutronów ale musi oddziaływać z neutronami aby odebrać od nich energię czyli *spowalniać*.

Materiały używane jako moderator:

Zwykła woda czyli tzw. lekka woda

Ciężka woda czyli zamiast normalnego H_2O mamy D_2O , D-deuter czyli izotop 2H

Grafit

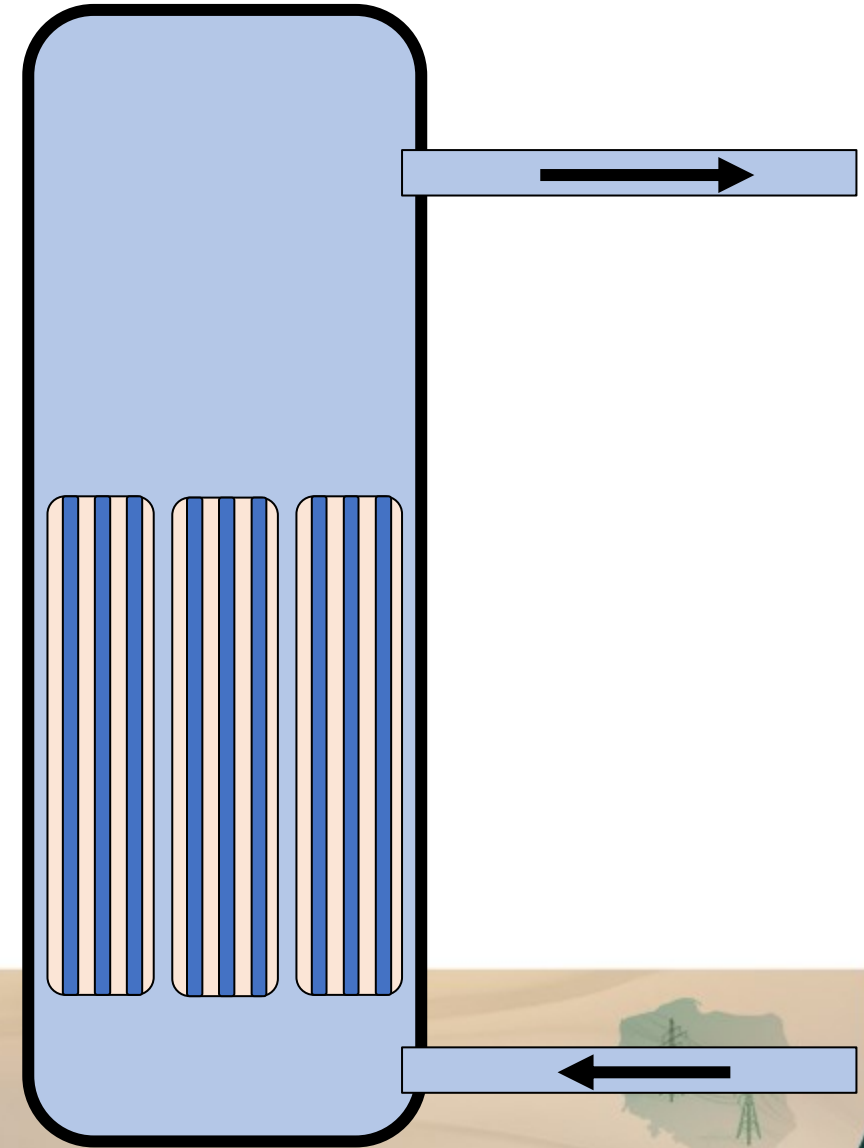


Chłodziwo

Substancja odbierająca ciepło wygenerowane przez rozszczepienia w paliwie jądrowym.

Chłodziwa używane w reaktorach:

- Lekka woda,
- Ciężka woda,
- Gaz, He lub CO_2 ,
- Ciekły metal: sód, ołów, eutektyka ołowiowo-bismutowa,
- Ciekłe sole: fluorki lub chlorki litu, beryl itp.

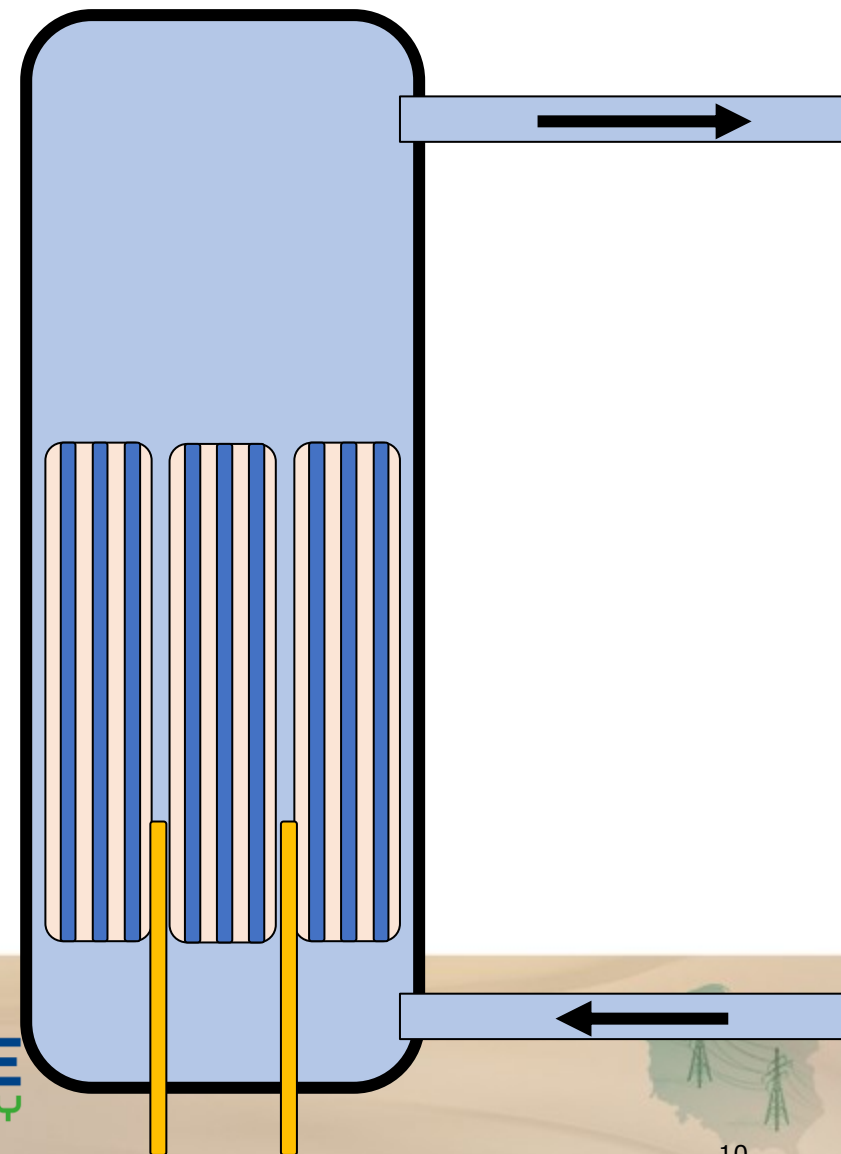


Pręty sterujące

Urządzenie pełniące rolę “gaźnika lub hamulca” reaktora, zawiera substancje silnie pochłaniające neutrony – rolą prętów sterujących jest kontrola samopodtrzymującej się reakcji łańcuchowej.

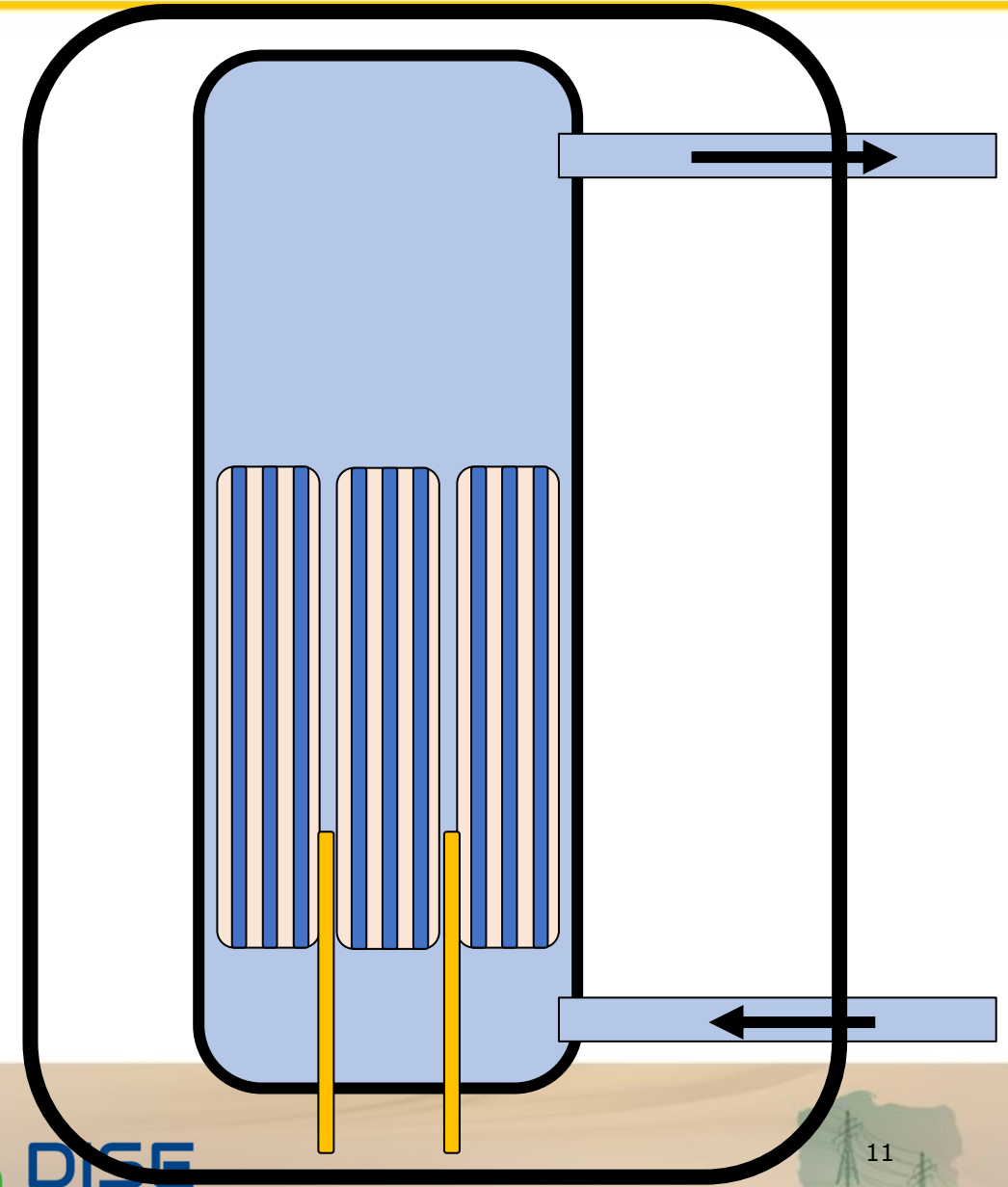
Pozwalają na płynne uruchomienie reaktora, kontrolę poziomu mocy i na zatrzymanie reaktora.

Oddzielna część prętów sterujących ma za zadanie szybkie zatrzymanie reaktora w sytuacjach awaryjnych.



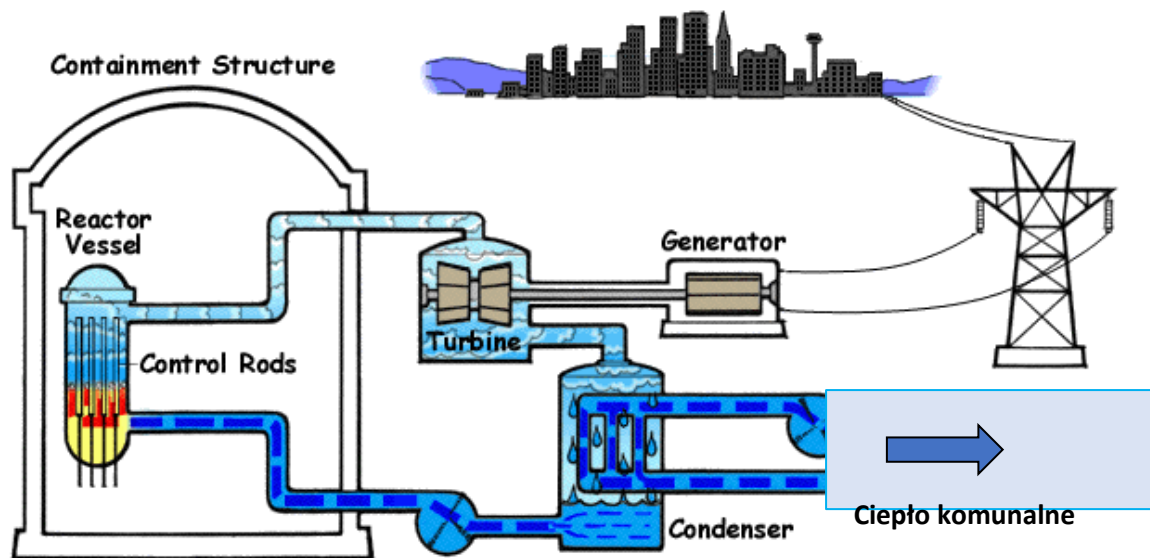
Obudowa bezpieczeństwa

... i całe urządzenie zamknięte jest w obudowie bezpieczeństwa z żelazobetonu, eliminującej ryzyko awarii z uwolnieniem substancji radioaktywnych.

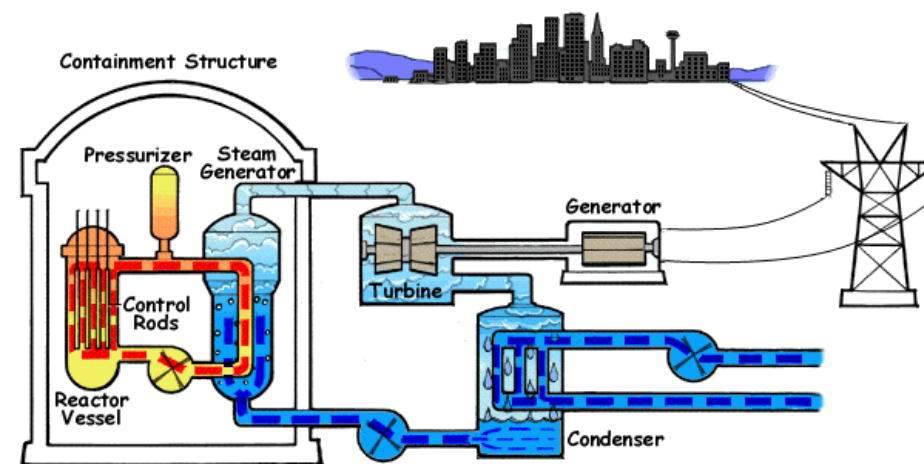


W pewnym uproszczeniu reactor lekkowodny to “kocioł do gotowania wody”, ze specjalnymi cechami:

Reaktor BWR – z gotującą wodą



Reaktor PWR , tzw. ciśnieniowy



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Reaktory “termiczne” i reaktory “prędkie”

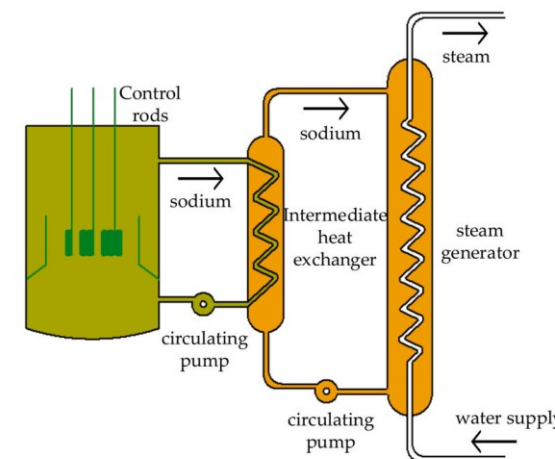
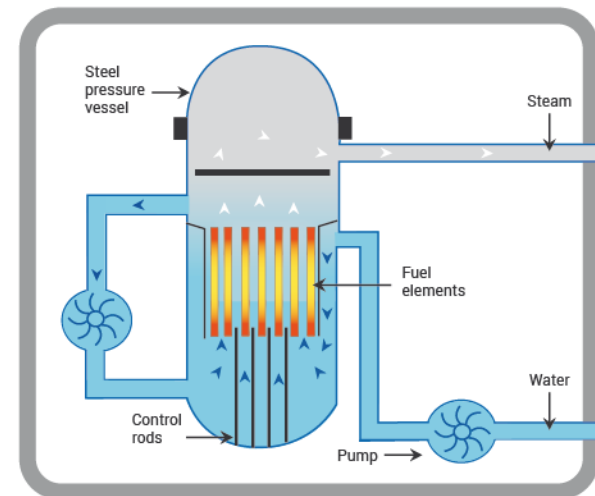
Reaktor “**termiczny**” lub na “**neutronach termicznych**” to reaktor z moderatorem/chłodziwem wodnym, na stopione sole lub z moderatorem grafitowy.

Nazwa “**termiczny**” pochodzi od tego, że neutrony uwolnione w procesie rozszczepienia trzeba “spowolnić” od energii 2 MeV do energii termicznej, czyli ok. 0.1 eV.

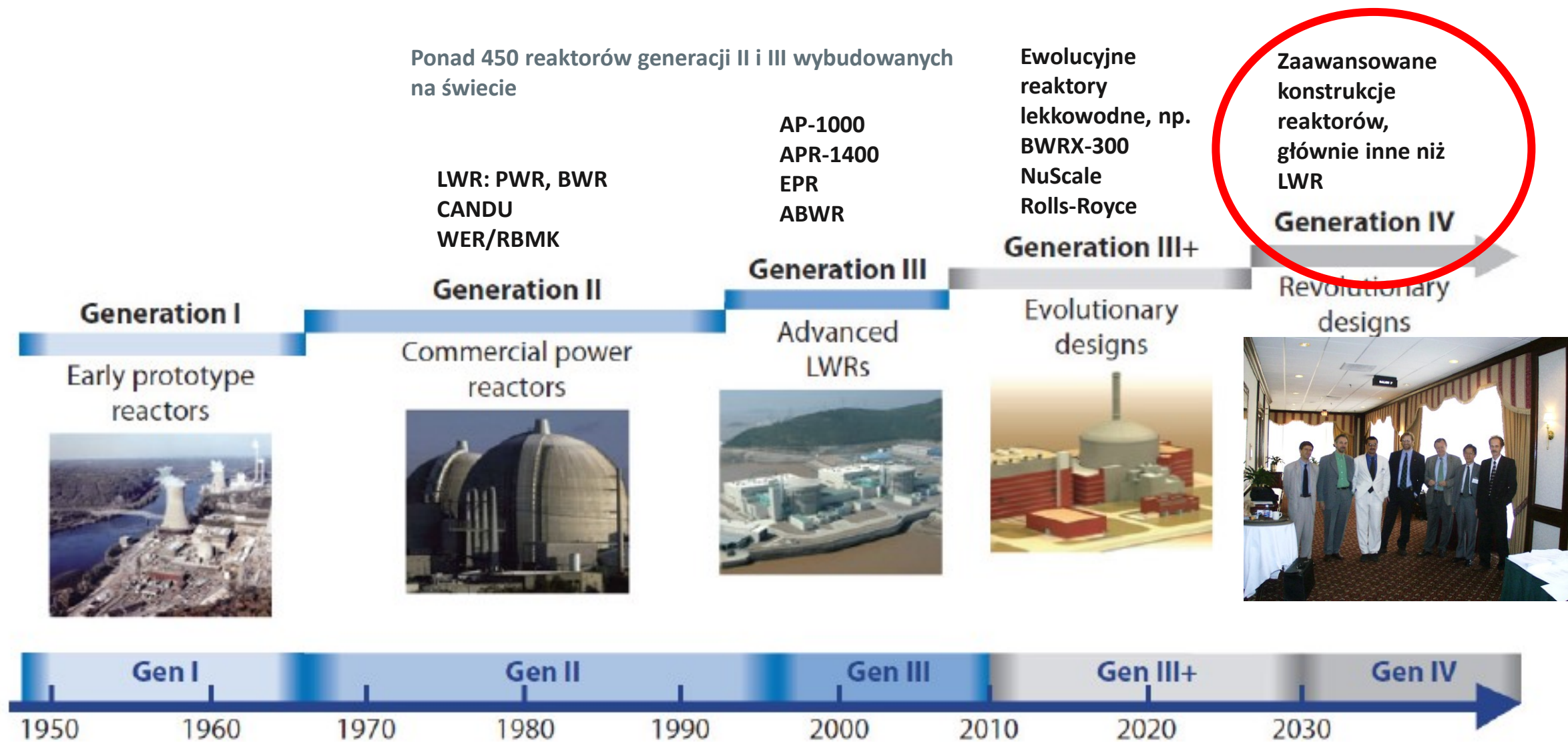
Paliwem reaktorów termicznych musi być wzbogacony uran.

Reaktory “**prędkie**” lub “**na neutronach prędkich**” (nie spowolnionych) to reaktory bez moderatora, czyli i chłodziwem musi być substancja, która nie “spowalnia” neutronów. Takie chłodziwa to: ciekły sód, ciężki stopiony metal jak ołów czy eutektyka ołowiowo-bismutowa, lub gaz, np. He (ale bez GRAFITU). Reaktory te mogą “powielać” paliwo.

Paliwem dla reaktorów prędkich może być ^{235}U , ^{239}Pu

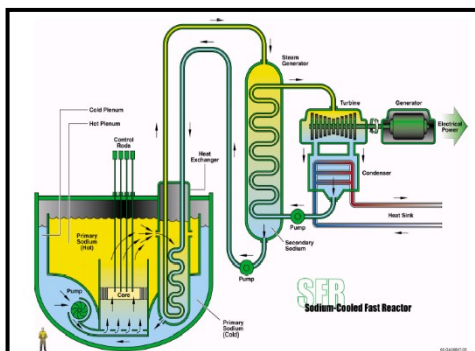


Rozwój reaktorów jądrowych od lat 40-50 XX wieku

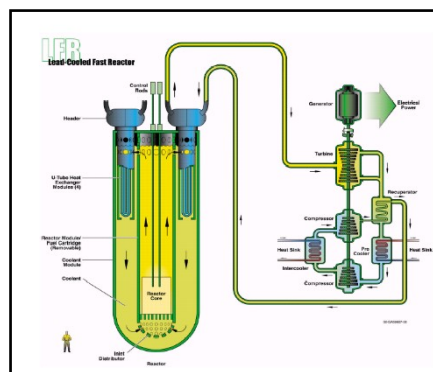


Generacja IV reaktorów

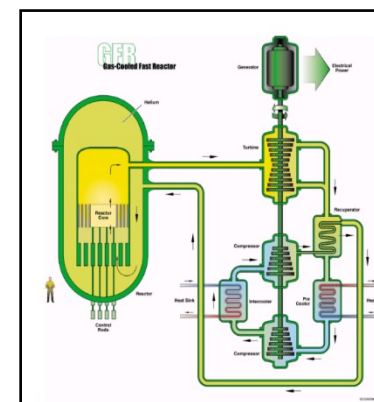
Reaktor chłodzony ciekłym sodem



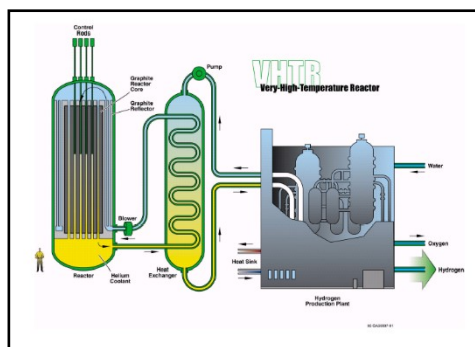
Reaktor chłodzony ciekłym ołowiem



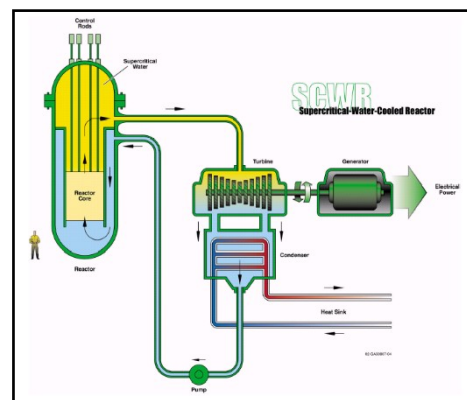
Reaktor chłodzony gazem



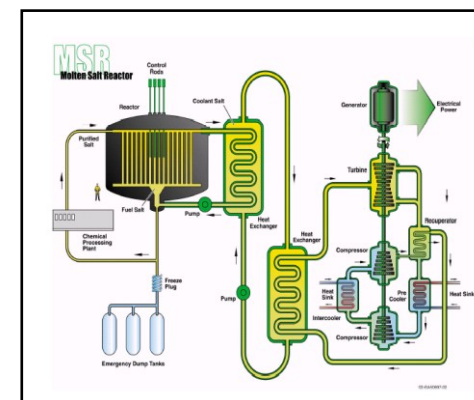
Reaktor wysokotemperaturowy chłodzony gazem



Reaktor z nadkrytyczną parą wodną



Reaktor na ciekłych solach



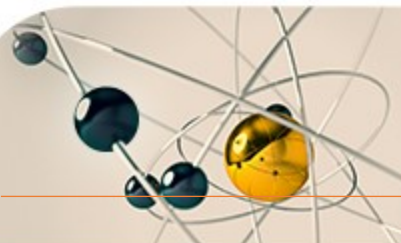
Szybki rozwój projektów SMR w ostatnich 20 latach...

Co to jest/są SMR??

Małe reaktory modułowe (SMR) to zaawansowane reaktory jądrowe – mogą ale nie muszą być IV Generacji - o mocy **do** 300 MW(e) na jednostkę, co stanowi około **jednej trzeciej mocy wytwórczej tradycyjnych reaktorów jądrowych**.

Główna zaleta SMR-ów:

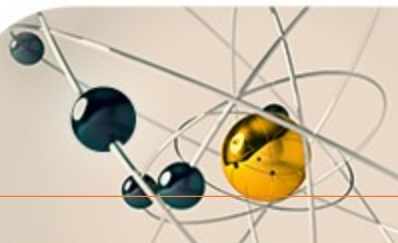
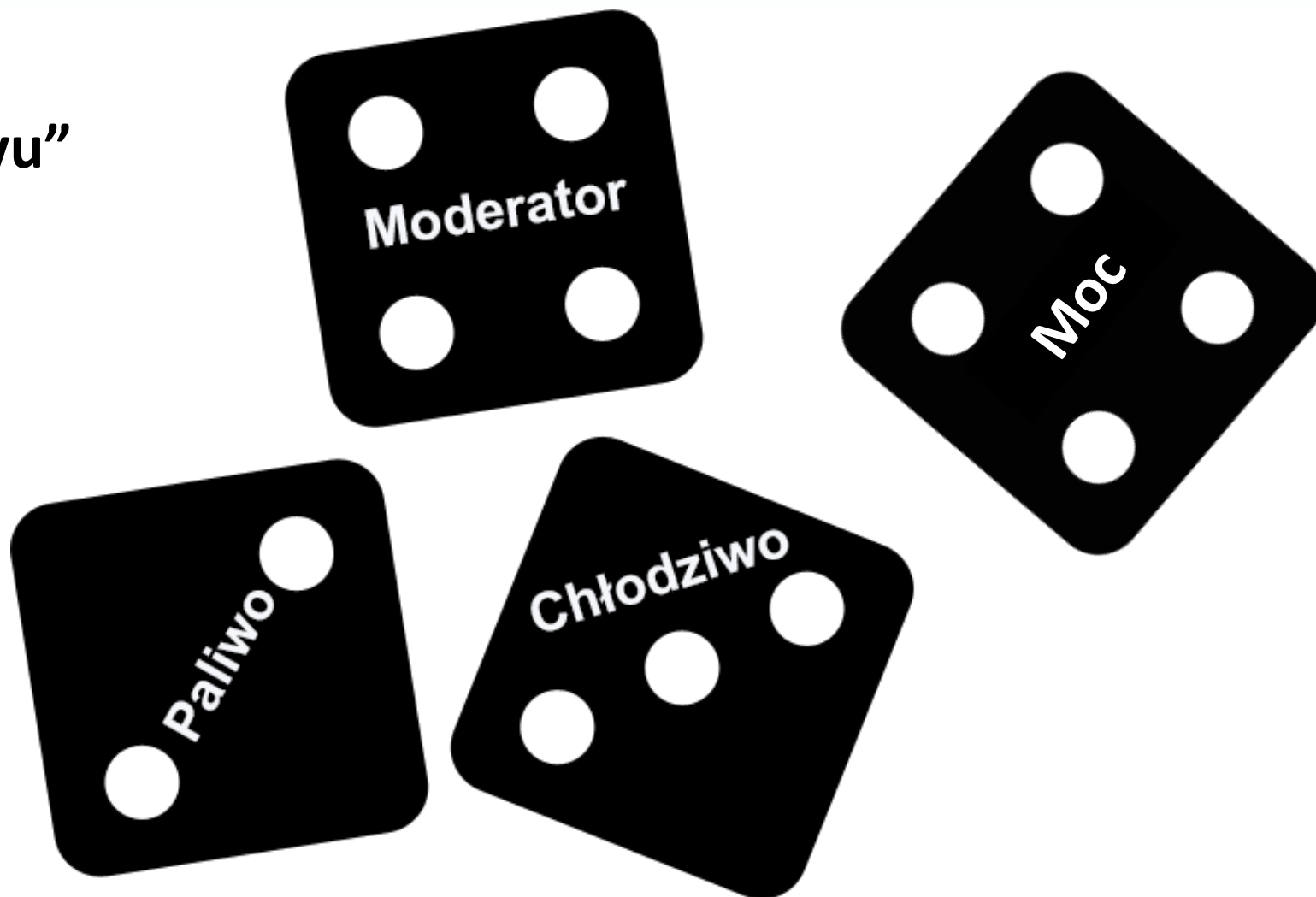
SMR-y mogą być łatwiej dostosowane do różnorodnych wymagań klienta, oferują **poligenerację energetyczną** itp. Obniżają próg inwestycyjny i próg licencyjny!



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



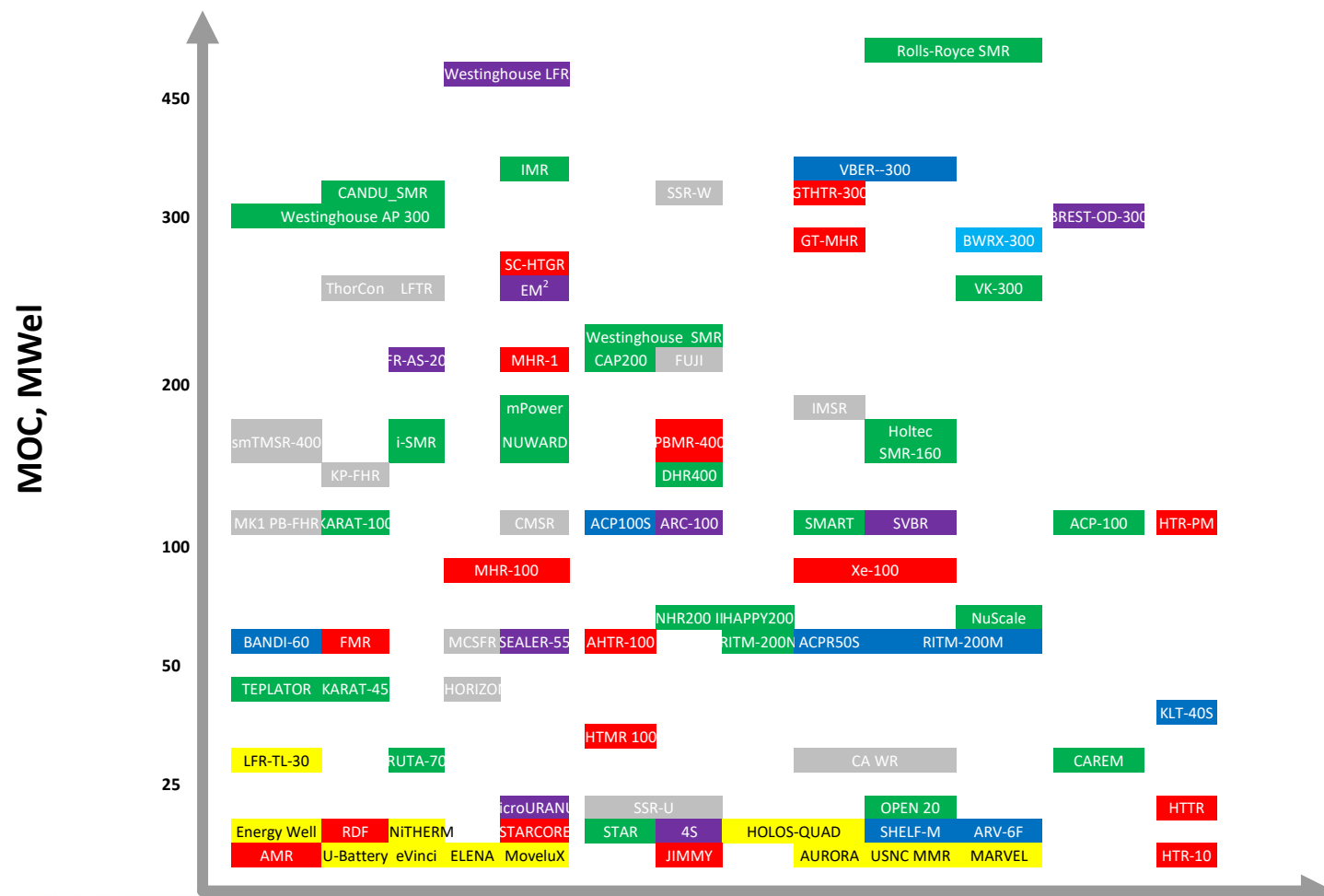
Rozwój SMR-ów – “dèjà vu” lat 50-tych XX wieku



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Era małych reaktorów jądrowych



REAKTORY LEKKOWODNE - CIŚNIENIOWE
REAKTORY LEKKOWODNE - WRZĄCE
REAKTORY NA BARKACI/ŁODZIACH
REAKTORY WYSOKOTEMPERATUROWE - HTGR
REAKTORY CIEKŁOMETALICZNE
REAKTORY NA STOPIONYCH SOLACH
MIKROREAKTORY - MMR

Dojrzałość projektów



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Najbardziej zaawansowane technicznie SMR-y wg ranking NEA/OECD

SMR	Technologia	Dostawca technologii	Moc jednos- tkowa (MWel)	Moc cieplna (MWth)	Ilość jednostek na elektrownię	NEA ranking
Reaktory lekko-wodne						
BWRX-300	BWR	GE Hitach	300		1	26
Nuscale	PWR	Nuscale	77		4-12	25
RR SMR	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd	470		1	22
NuWard	PWR	EdF-CEA, France	170		2	20
SMART	PWR	KAERI	100		1-4	20
SMR-160	PWR	Holtec International	160		1-2	17
Last Energy	PWR	Last Energy	20		1	16
Happy200	PWR - low pressure	SPIC-China		200	1	16
RITM-200 reaktor na lodołamaczach	PWR	Rosatom		198	2	14
Teplator	HWPR low pressure	Czech Technical University		170	1	12
BANDI 60	PWR	KEPCO - South Korea	60		1-4	0



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ

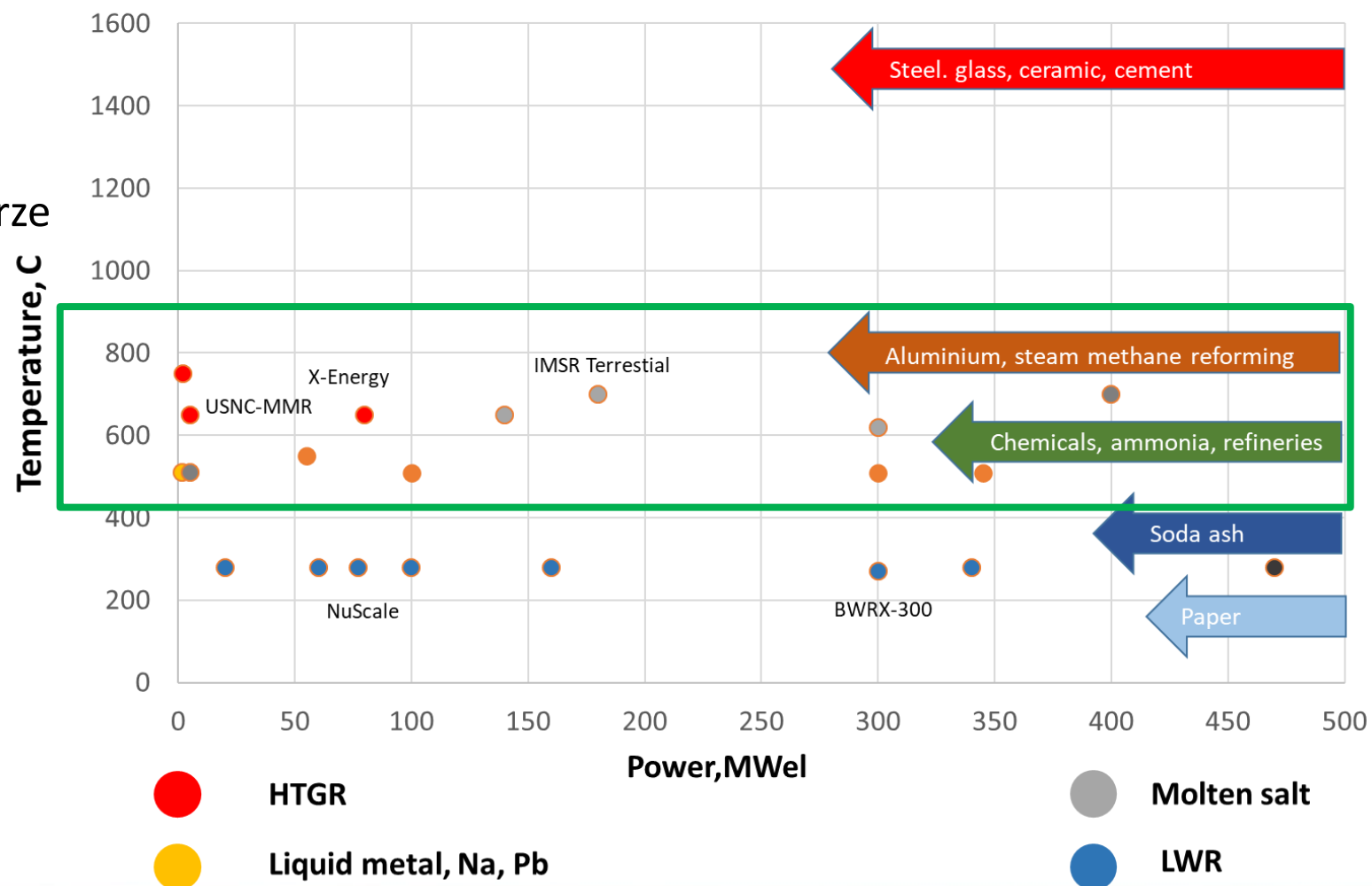


SMR-y innych technologii wg ranking NEA/OECD

SMR	Technologia	Dostawca technologii	Moc jednos- tkowa (MWel)	Moc cieplna (MWth)	Ilość jednostek na elektrownię	NEA ranking
Reaktory wysokotemperaturowe						
HTTR working research reactor	HTGR-blokowy	JAEA		30	1	34
PELE - military applications	HTGR-blokowy	BWXT	?	?	?	23
Xe-100	HTGR - kulowy	X-Energy	80			22
USNC-MMR	HTGR - blokowy	USNC Ultra Safe Nuclear Corp.	5-10			17
U-Battery - MMR	HTGR - blokowy	U-Battery, UK	2			15
BANR-MMR	HTGR-blokowy	BWXT		50	2	12
GTHTR	HTGR-blokowy	JAEA		600	1	10
Kaleidos - MMR	HTGR-blokowy	Radiant		1.9	1	10
Jimmy - MMR	HTGR-blokowy	Jimmy Energy (EgF)		10	1	9
Reaktory na stopionych solach						
Hermes	Stopione sole - kule TRISO	Kairos Power	140		1-4	22
Moltex SSR	Stopione sole - chlorany	Moltex Energy - UK	300		1	19
IMSR - Canada	Stopione sole	Terrestrial Energy Molten Salt Reactor Canada		884	1	18
CMSR - reaktor plywający na barce	Stopione sole	Seaborg		250	1	14
TMSR - reaktor z paliwem torowym	Stopione sole	ThorCon		557	1	11
Energy Well	Stopione sole - kule TRISO	Research Institute Rez		20	1	8
CMSR - reaktor plywający na barce	Stopione sole	Seaborg Technologies Molten Salt Reactor Denmark	100		1-8	
Reaktory ciekłometaliczne						
BREST-OD-300	stopiony ołów	NIKIET - RUSSIA		700	1	25
TerraPower SCFR	Sód	TerraPower Sodium Cooled Fast Reactor USA	345		1	20
ARC-100	Sód	ARC	100		1	18
Aurora Microreactor	Sód	Oklo Inc	1.5		1	15
E-vinci MMR	Sód	Westinghouse	3.5		1	14
SEALER	Stopiony ołów	LLC - Sweden	3		1	13
LFR AS 200	stopiony ołów	newcleo	200	530	1	11
Westinghouse Lead Fast Reactor	Stopiony ołów	Westinghouse	450		1	10
DF399	Dual Fluid	Dual Fluid Energy		600	1	9
4S	Sód	Toshiba		30-135	1	7
PRISM	Sód, metallic fuel	GE Hitachi	311		1	

Cechy reaktorów IV generacji i SMRów:

- Powielanie paliwa, czyli głównie reaktory prężkie
- Ciepło o dużo wyższej temperaturze niż reaktory wodne



Pytania, na które należy odpowiedzieć:



Czy reaktor jądrowy jest bezpieczny? Czytaj: energia jądrowa jest bezpieczna??



Ile to kosztuje?



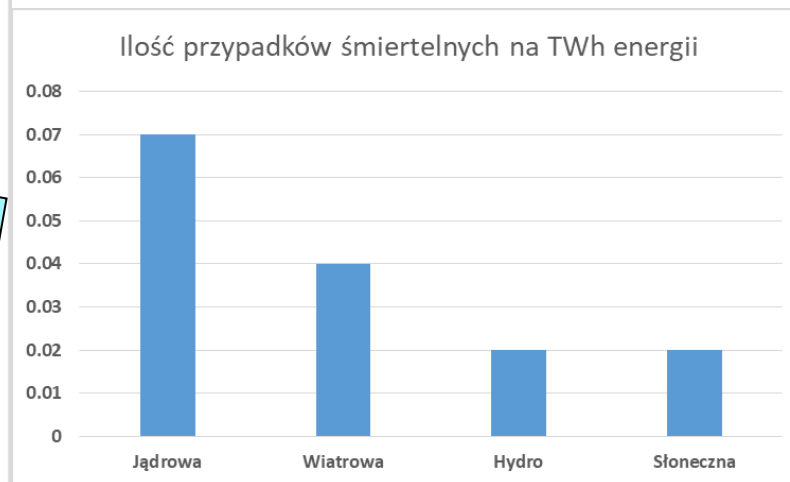
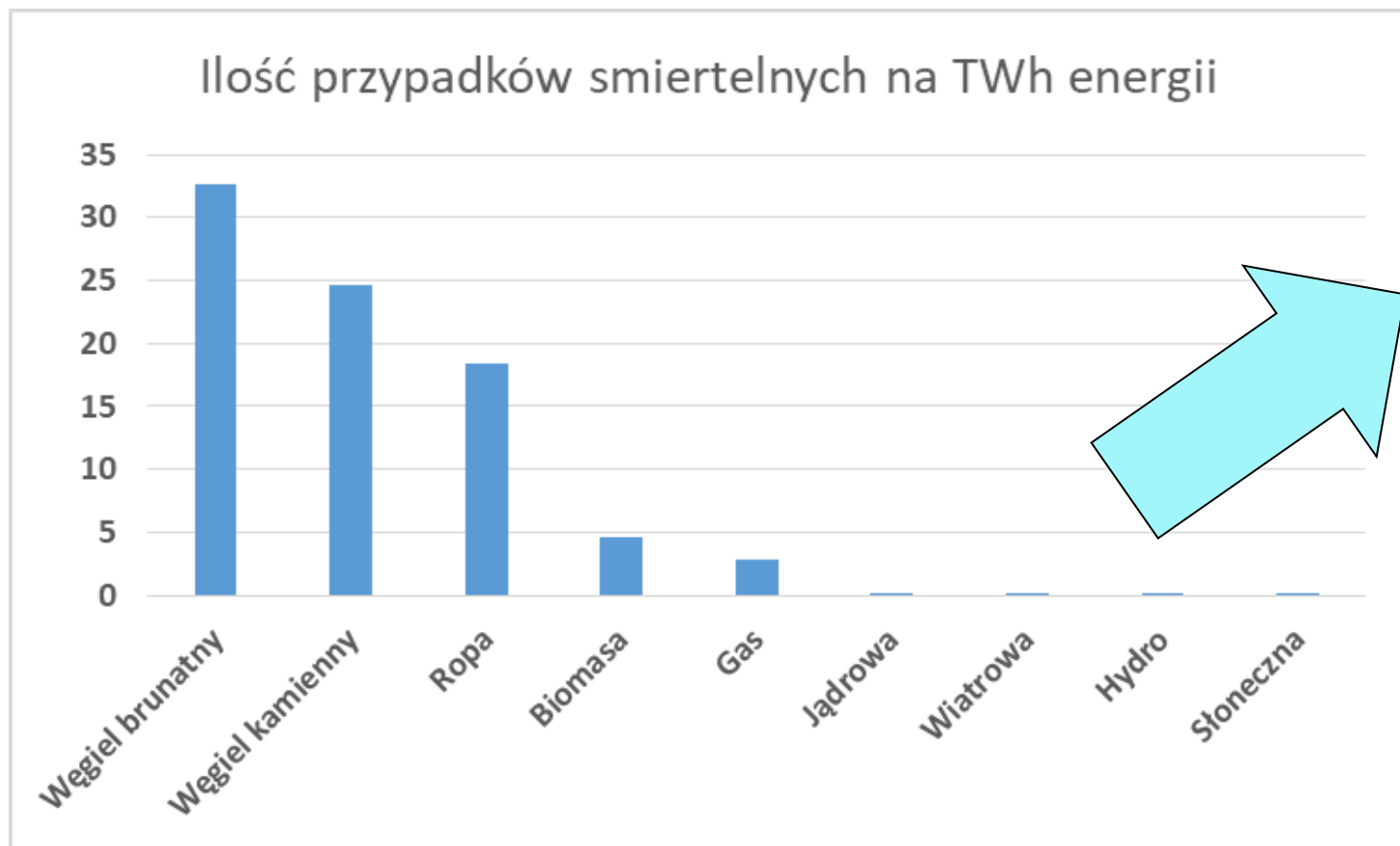
A co z odpadami radioaktywnymi/zużytym paliwem? **To jest temat na oddzielne seminarium, patrz przykład np. Szwecji i Finlandii**



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Czy energetyka jądrowa jest bezpieczna?



Przypadki śmiertelne: wypadki w energetyce + wygenerowane zgony wtórne (zanieczyszczenie lub skażenie powietrza)

<https://ourworldindata.org/grapher/death-rates-from-energy-production-per-twh>

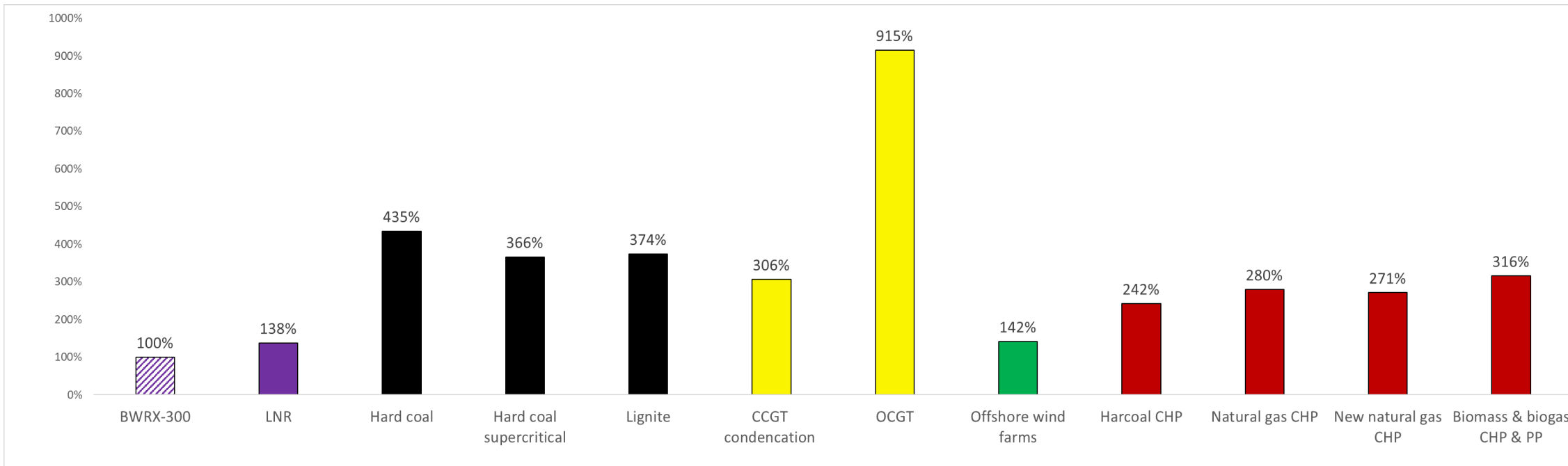


Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Czy energia jądrowa jest droga??

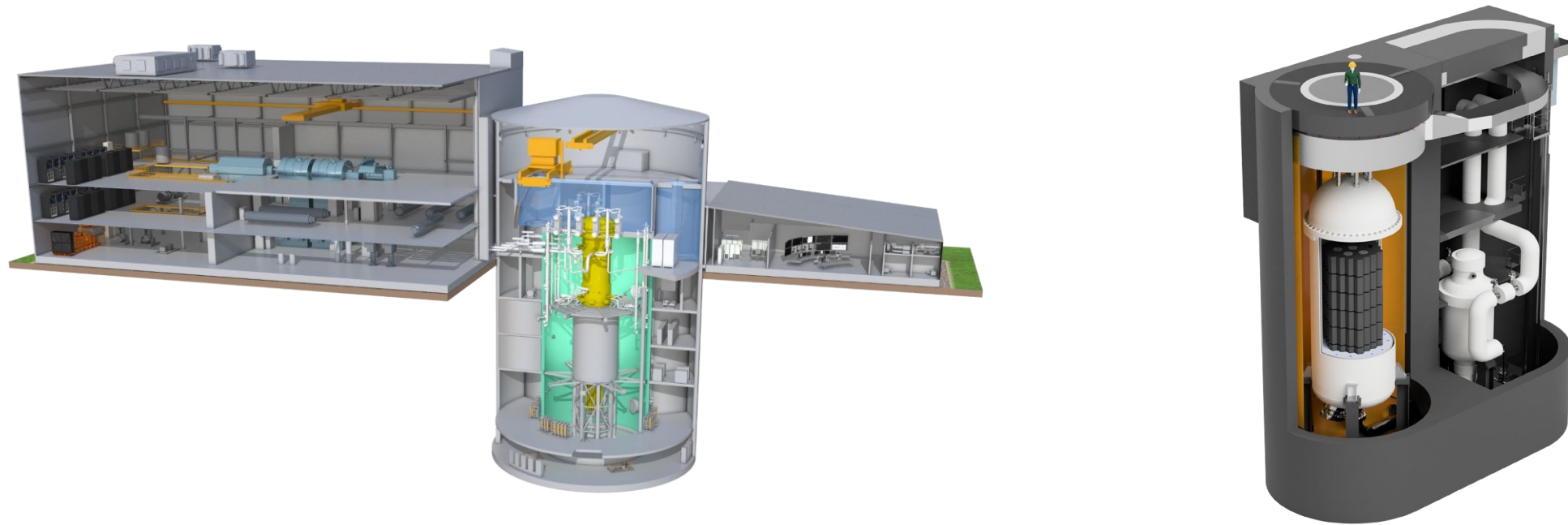
Względne porównanie kosztów wytwarzania energii przez przez różne technologie włączając koszty kapitałowe konieczne dla rozbudowy sieci przesyłowych (% , stałe ceny 2022)



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



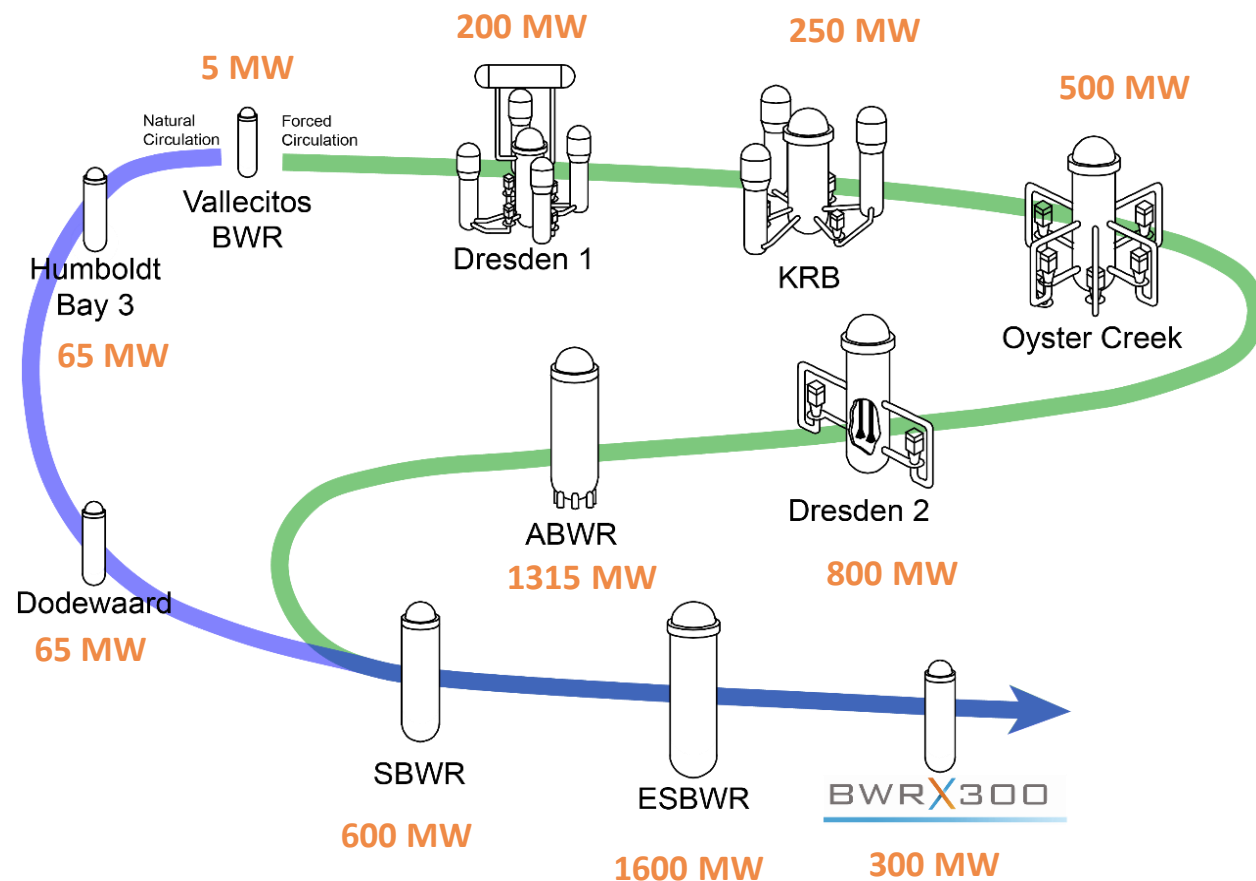
2 najbardziej zaawansowane typy reaktorów SMR: BWRX-300 i HTGR



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



BWRX300 - 60 lat ewolucyjnego rozwoju technologii reaktorów z wrzącą wodą (BWR)



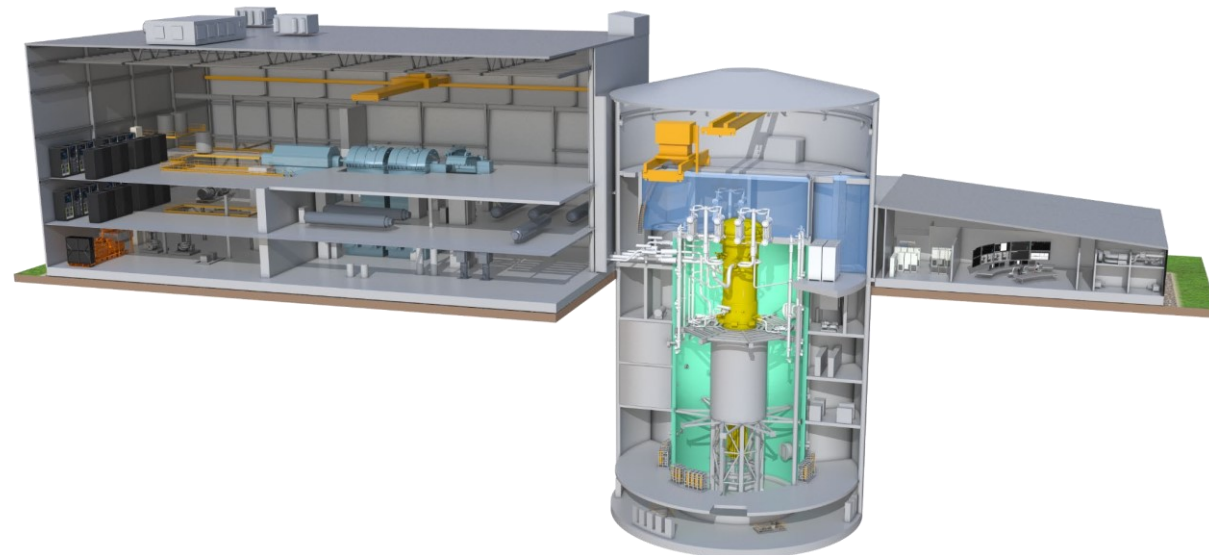
Cechy charakterystyczne BWRX-300

- To dziesiąty ewolucyjny model reaktora BWR.
- Konstrukcja reaktora uwzględnia:
 - możliwości kogeneracji i wykorzystania ciepła dla celów przemysłowych i komunalnych
 - dopasowanie do zmiennych wymagań sieci energetycznej („load-follow”)
 - produkcję wodoru
- BWRX-300 jest do 60% tańszy w kosztach kapitałowych na jednostkę mocy (MW) w porównaniu z innymi typami SMR-ów i dużymi reaktorami lekkowodnymi.

Reaktor BWRX-300 jest tak zaprojektowany, aby maksymalnie obniżyć zatrudnienie personelu operacyjnego, obniżyć koszty utrzymania reaktora, może być wybudowany w 2-3 lata ze względu na specyfikę konstrukcyjną i modułowość

Technologia BWRX-300

- Dostawca: **GE-Hitachi Nuclear Energy (USA)**
- Typ reaktora: **wodnowrzący (BWR)**
- Moc brutto/netto: **300/280 MWe**
- Projektowany okres eksploatacji: **60 lat**
- Współczynnik wykorzystania mocy: **93%**
- Synchronizacja z sieciami: **50 lub 60 Hz**
- Czas budowy: **24-36 miesięcy**
- Teren o powierzchni **ok. 10 ha**, stanowiący w przybliżeniu 10% terenu wymaganego dla dużego bloku jądrowego, a także mniejszy niż wymagany dla bloku węglowego o zbliżonej mocy
- Optymalny do współpracy z OZE: **dopuszcza zmianę mocy o 50% - 0,50% mocy / minutę 2 razy dziennie**
- **Optymalny do produkcji energii elektrycznej, zastosowania w ciepłownictwie i przemyśle, w tym produkcji wodoru**

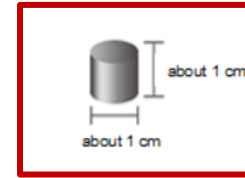


- **10. generacja reaktorów** wodnowrzących BWR od GE
- Zaprojektowany z myślą o **niskim koszcie inwestycji**
- **Najwyższej klasy** systemy **bezpieczeństwa**
- **BWRX-300 to rozwiązanie ewolucyjne, a nie rewolucyjne i przez to w pełni bezpieczne** – wykorzystuje sprawdzone i licencjonowane elementy konstrukcyjne

Bariery ochronne reaktora BWRX-300

Bariera 1 - pastylka paliwowa

Utwardzony tlenek uranu jak ceramika. Produkty rozszczepienia zatrzymane w tabletkach.



Bariera 2 - Koszulka paliwowa

Pastylki paliwowe są w zamkniętej i wytrzymałej tubie cyrkalojowej. Niewielka ilość gazów radioaktywnych uwolnionych z tabletki zostaje w koszulce.

Bariera 3 - Zbiornik reaktora (RPV)

Stal o grubości ~16 - 20 cm. Jeśli materiały radioaktywne "wycieką z koszulek – zostaną zatrzymane w zbiorniku reaktora.

Bariera 4 - Obudowa bezpieczeństwa

Uzbrojony beton chroni zbiornik reaktora.
Nie dopuszcza do uwolnień radioaktywności.

Bariera 5 - Budynek reaktora /wtórna obudowa bezpieczeństwa

Utrzymywane w podciśnieniu, aby zapobiec wyciekom; powietrze dokładnie przefiltrowane przed kontaktem z otoczeniem.



Strefa ograniczonego
użytkowania
wewnątrz płotu
elektrowni

HTGR – budowa, bariery i mechanizmy bezpieczeństwa dla reaktora wysokotemperaturowego

Wytrzymuje w szczelności
1600-1800 C

Jądro paliwowe, UO_2

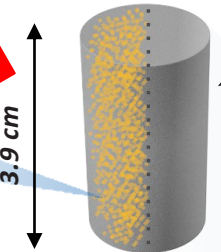


Cząsteczka TRISO



1 mm

Kompakt paliwowy



3.9 cm

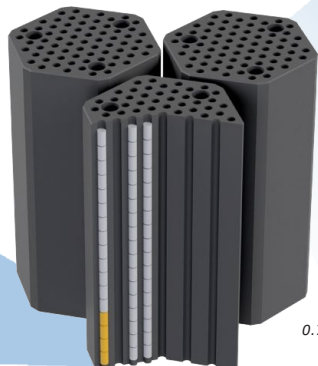
2 cm

Grafit lub
węgiel
krzemu

Koszulka paliwowa

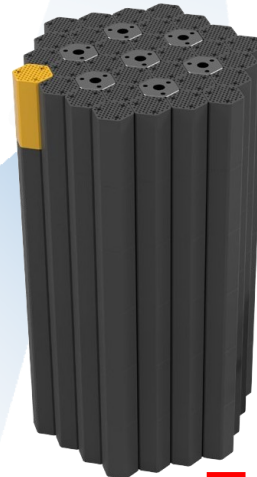


Bloki grafitowe



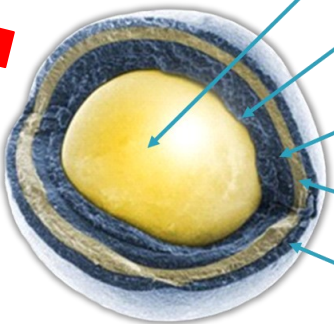
0.7 m

Rdzeń reaktora

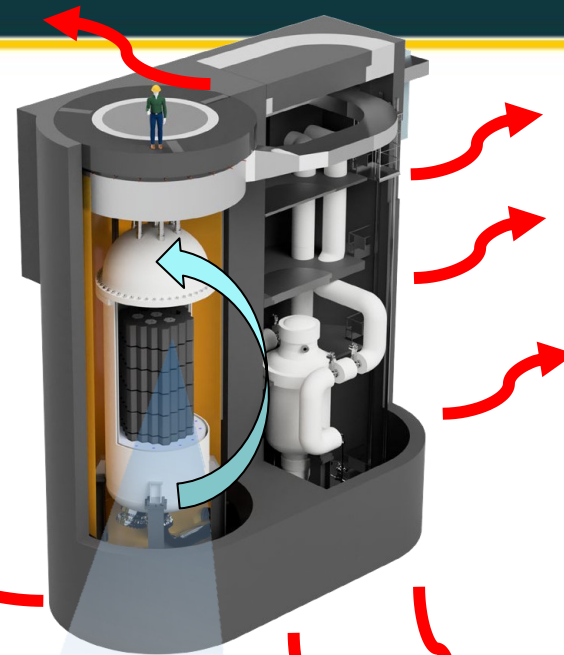


Wytrzymuje temperatury
1600C

- Jądro cząstki TRISO, wzbogacony uran w postaci UO_2
- Warstwa porowatego węgla
- Wewnętrzna warstwa pyrolitycznego grafitu
- Warstwa węgla krzemu
- Zewnętrzna warstwa pyrolitowego grafitu



Reaktor HTGR



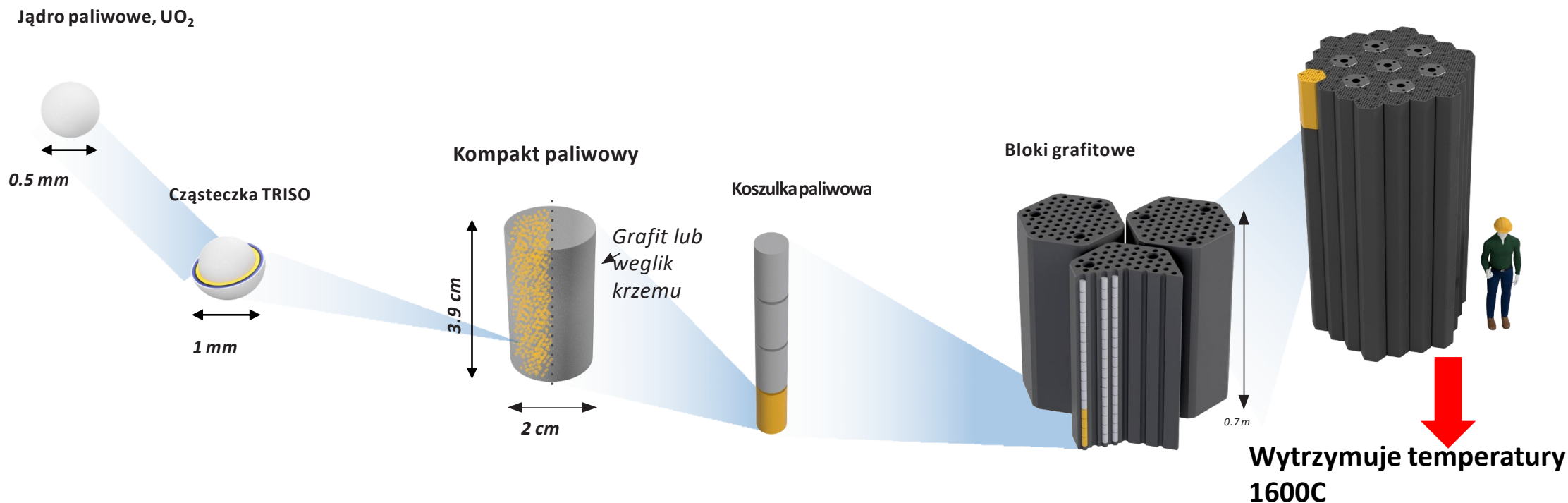
Wypromieniowanie
i chłodzenie powietrzem

Inherentne bezpieczeństwo reaktorów to PRAWA FIZYKI.

Przy niekontrolowanym wzroście temperatury – ustaje samopodtrzymująca reakcja łańcuchowych rozszczepień.

Fizyka gwarantuje tzw. ujemne sprzężenia zwrotne poprzez:

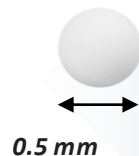
1. Zmniejszanie się tzw. przekrojów czynnych na rozszczepienie czyli neutrony stają się “bardziej leniwe” ze wzrostem temperatury (maleje prędkość reakcji)



2. Tzw. Efekt Dopplera, czyli “leniwe neutrony” pochłaniane są w różnych materiałach reaktora a nie w paliwie
3. Grafit i TRISO rozszerzają się ze wzrostem temperatury – co wygasza reakcję łańcuchową

Reaktor się sam “wygasza”

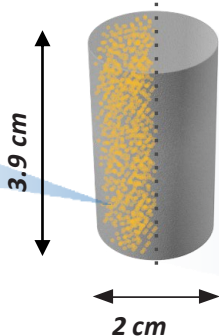
Jądro paliwowe, UO_2



Cząsteczka TRISO



Kompakt paliwowy

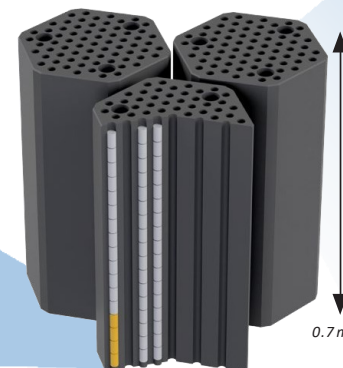


Grafit lub
węgiel
krzemu

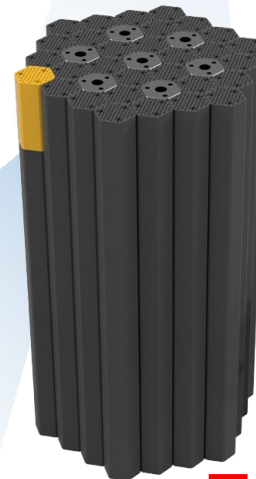
Koszulka paliwowa



Bloki grafitowe



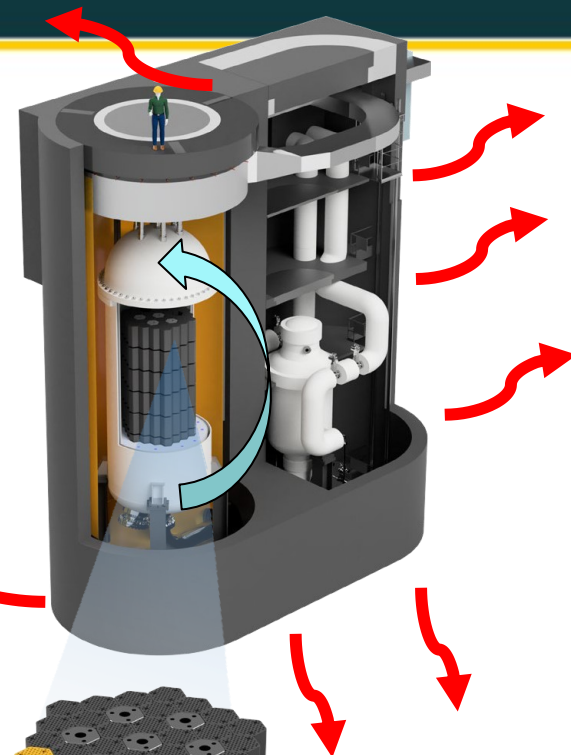
Rdzeń reaktora



**Wytrzymuje temperatury
1600C**

Reaktor HTGR

Wypromieniowanie
i chłodzenie powietrzem



A wygaszony reactor chłodzi się przez wypromieniowanie ciepła i poprzez odbiór ciepła do otoczenia



Cząsteczki paliwa TRISO to “mikro obudowa bezpieczeństwa” gwarantująca utrzymanie wszystkich radioaktywnych materiałów wewnątrz struktury TRISO - wewnątrz warstwy SiC



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



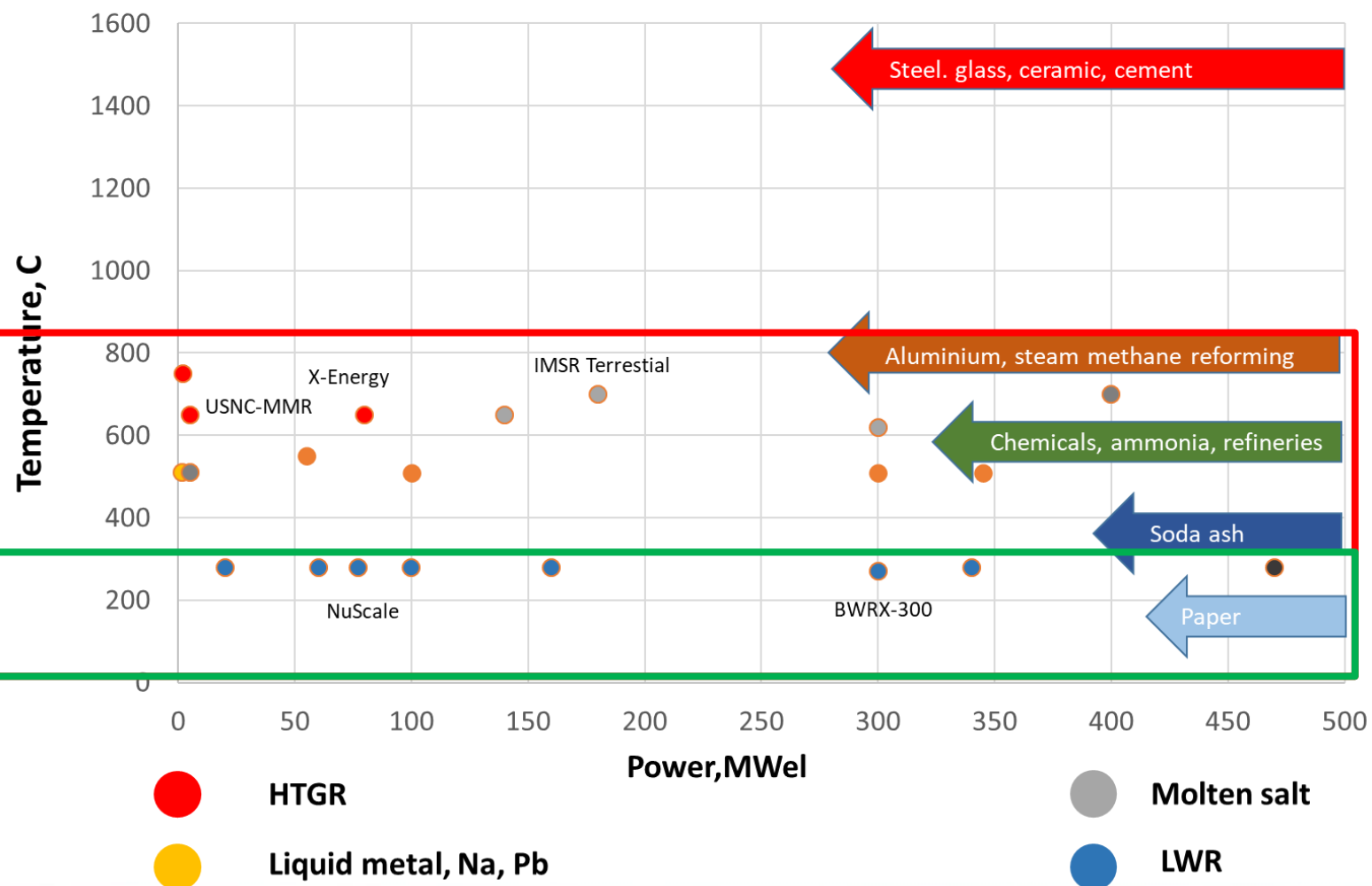
Potencjał SMRów:

Prąd, ciepło przemysłowe i komunalne

HTGR

Prąd, ciepło komunalne

BWRX-300



Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Dziękuję za uwagę
waclaw.gudowski@osge.com



Dofinansowano ze środków
**NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**

Konferencja została dofinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.
Za treść prezentacji odpowiada wyłącznie jej autor.

