

Energetyka jądrowa: blok AP1000 i nie tylko...

Jacek Nowicki

Departament Bezpieczeństwa Jądrowego
Państwowa Agencja Atomistyki(PAA)

Komitety Energetyki Jądrowej
Stowarzyszenia Elektryków Polskich

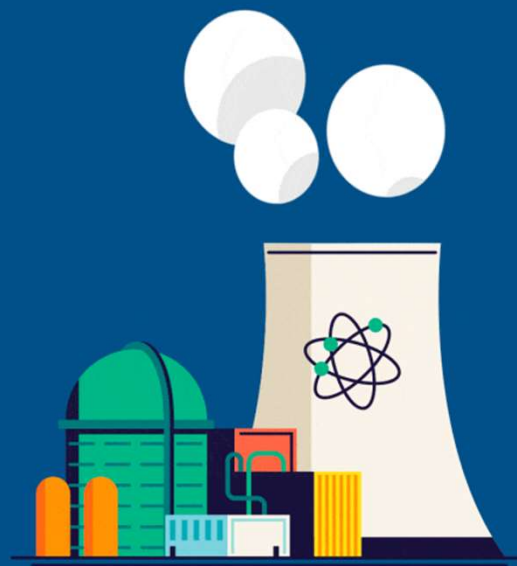


Seminarium Sekcji Energetyki i Koła 201
przy Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej

Oddział Warszawski SEP

22 maja 2025 r.

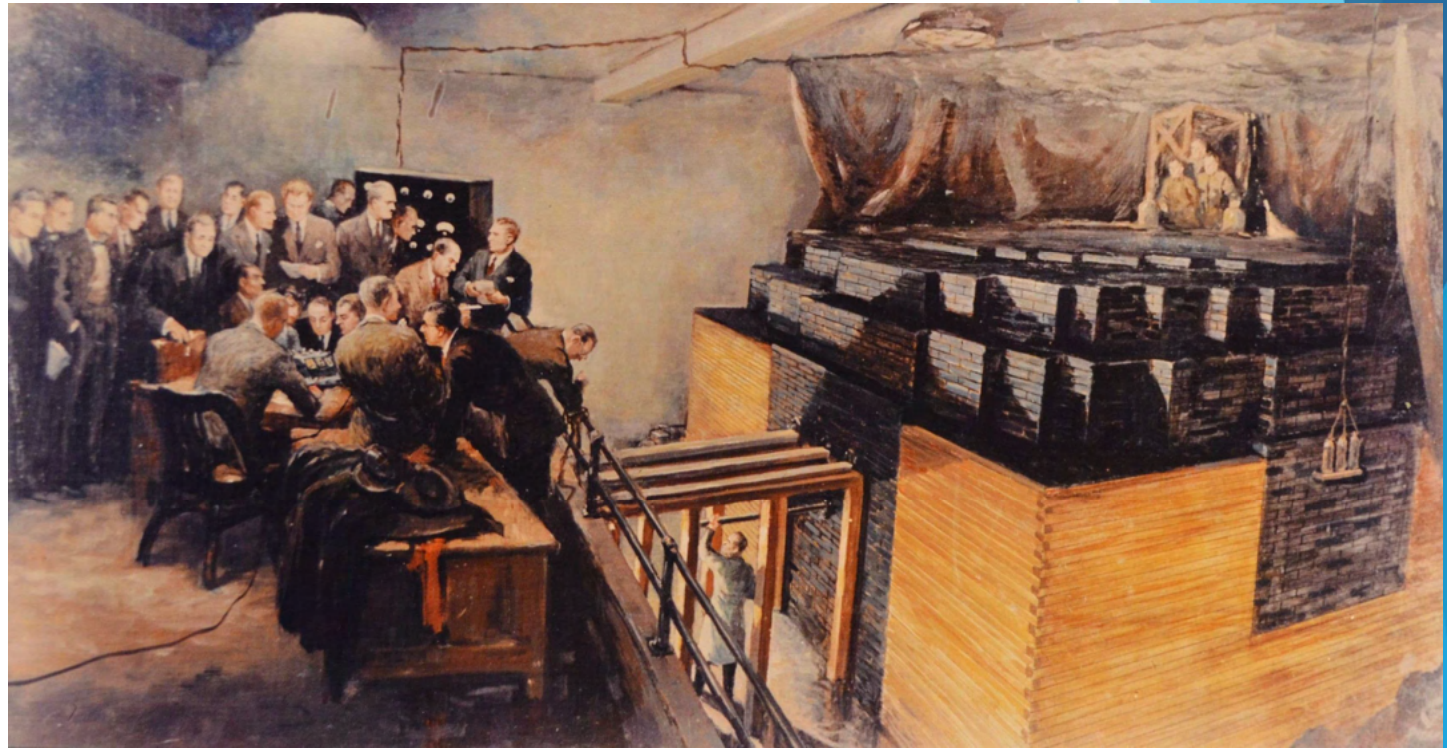
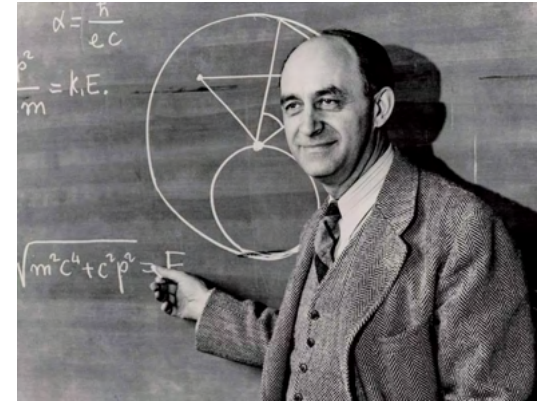
Nieco historii...



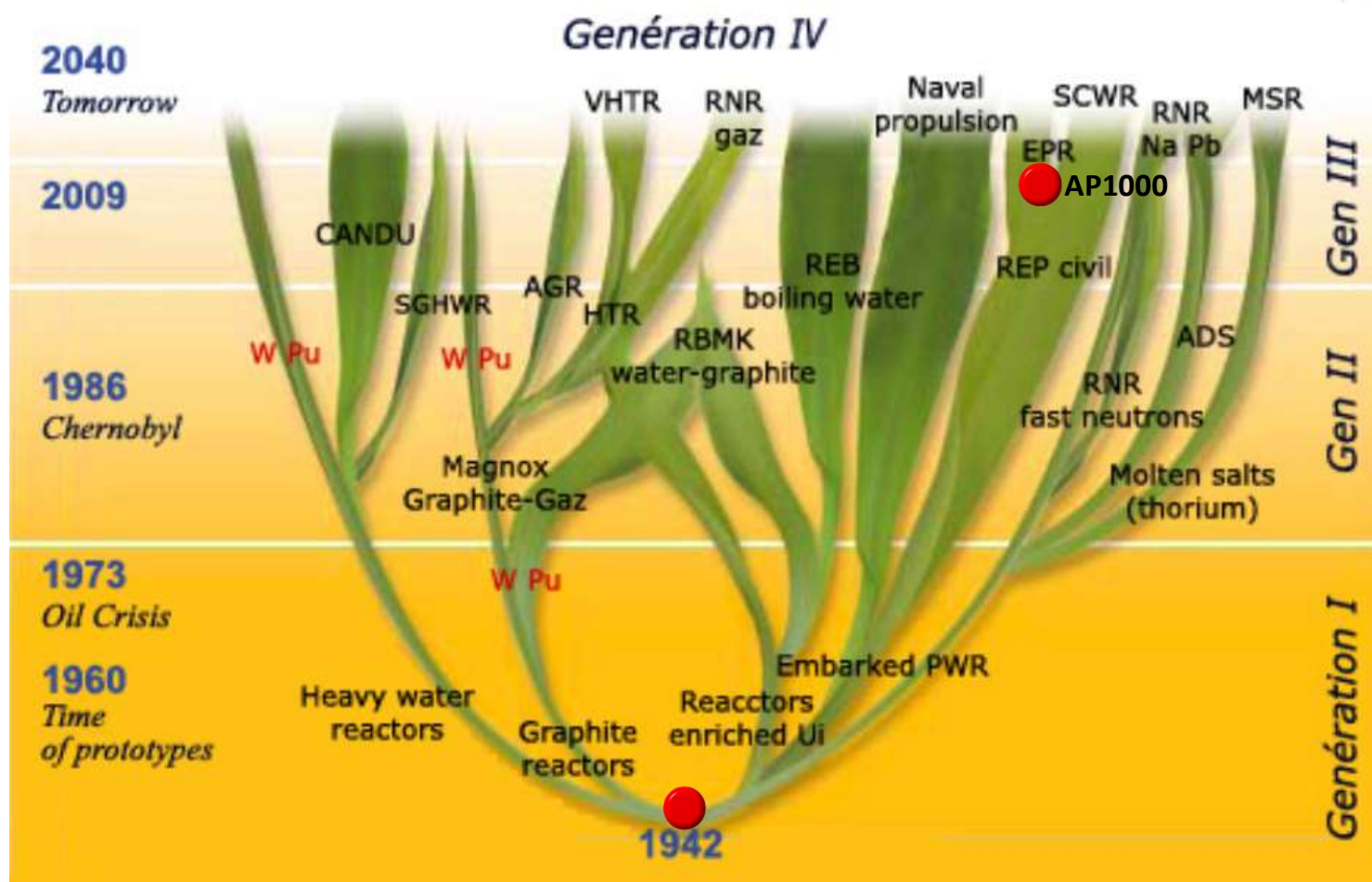
Chicago Pile - 1942 r. - to już 83 lata...

- ❑ Pierwszy na świecie reaktor jądrowy Chicago Pile (o znikomej jeszcze mocy), w którym uzyskano kontrolowaną reakcję łańcuchową, uruchomiono w grudniu 1942 roku (Enrico Fermi) na uniwersytecie w Chicago w USA.
- ❑ Reaktor zwany wówczas „stosem atomowym”, zbudowano z dużej liczby bloków grafitowych (moderator) i uranu naturalnego (paliwo).

Enrico Fermi
1901-1954



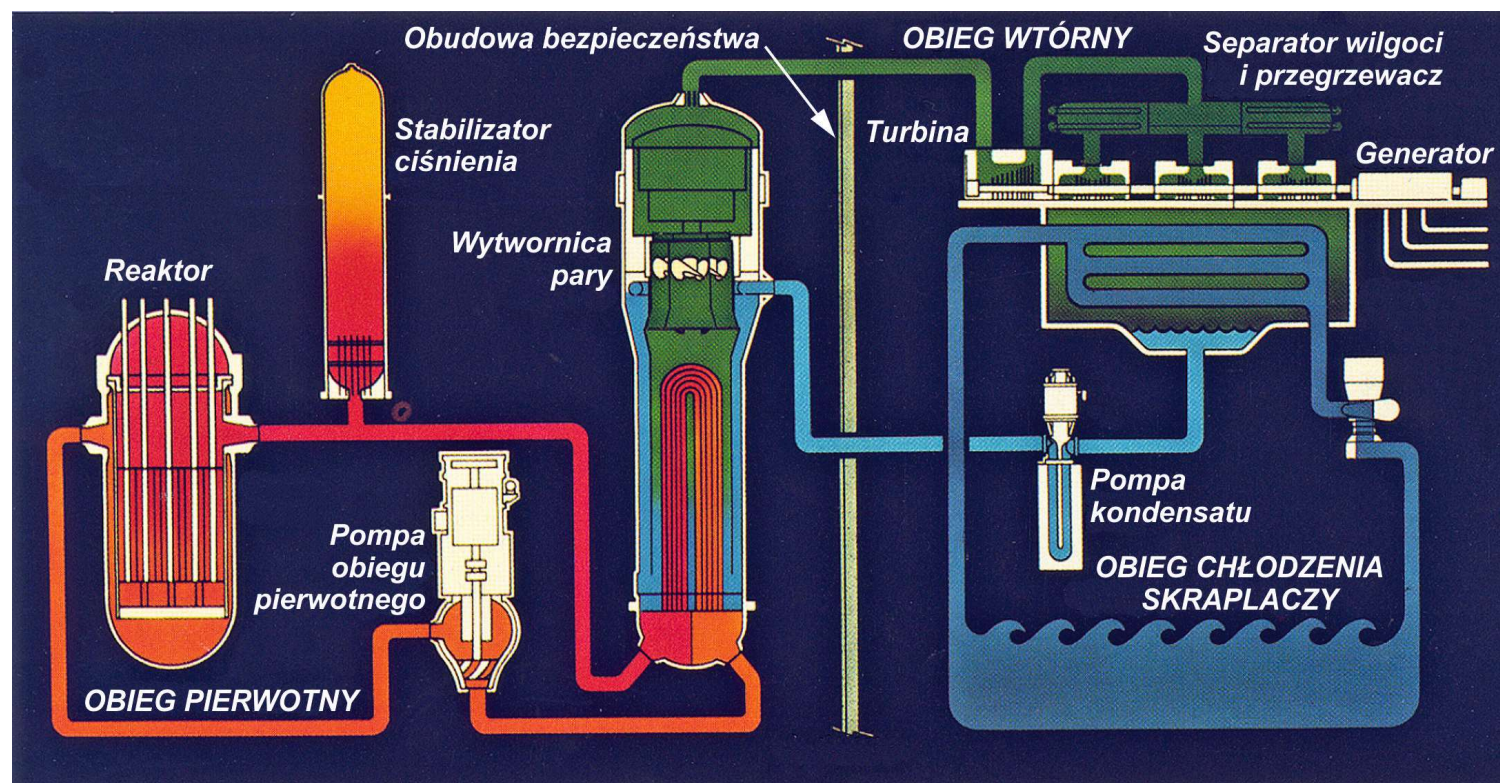
Drzewo genealogiczne reaktorów jądrowych



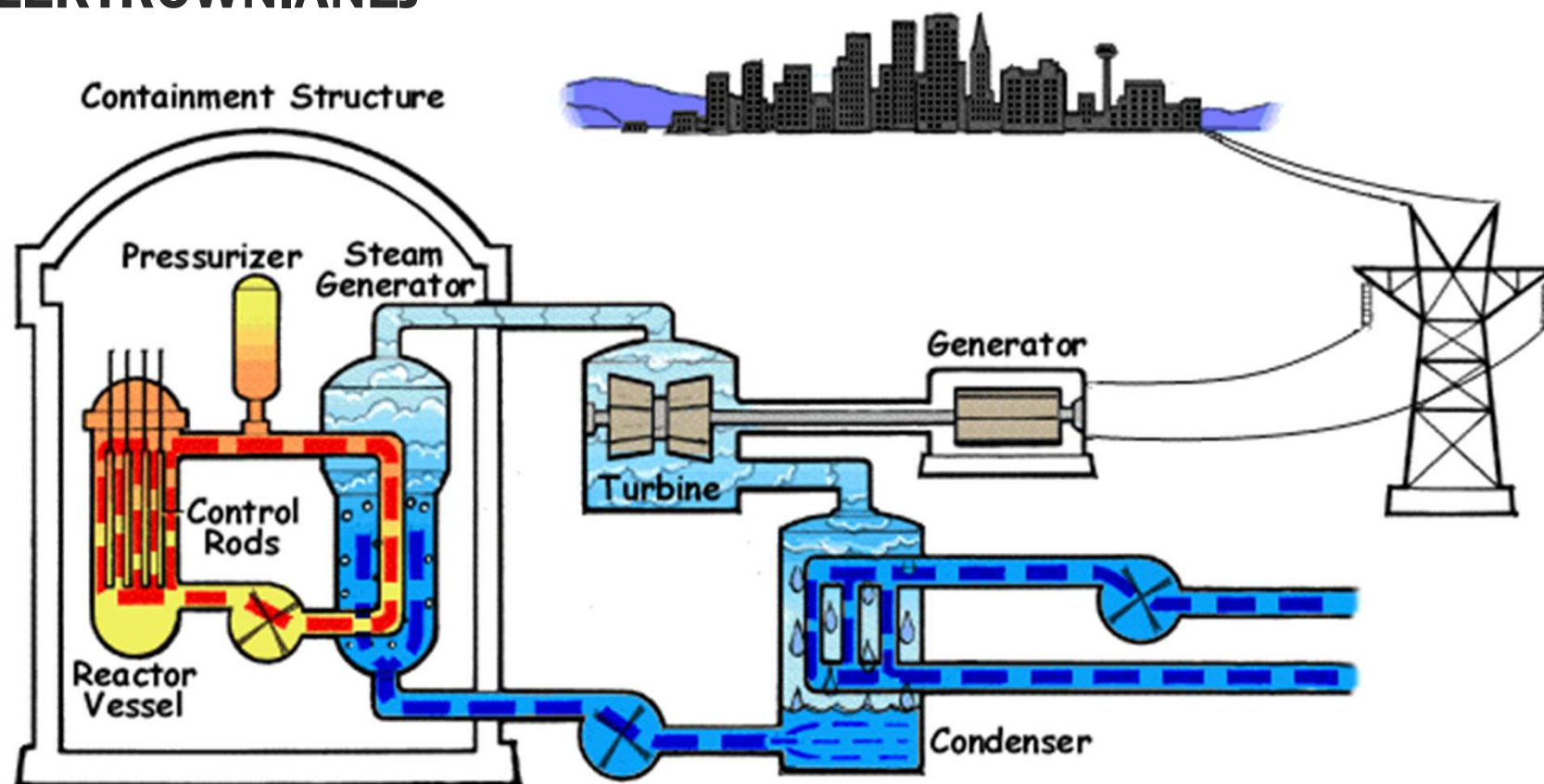
- [illegible]

OBIEGI: PIERWOTNY, WTÓRNY I OBIEG CHŁODZENIA SKRAPLACZY

- ❑ W obiegu wtórnym czynnikiem roboczym jest również lekka woda. W wytwornicy pary woda obiegu pierwotnego przepływa przez tysiące rurek, zamieniając opływającą je wodę obiegu wtórnego w parę pod wysokim ciśnieniem.
- ❑ Wytworzona para rozpręża się w turbinie parowej napędzającej generator, skrapla się w skraplaczu i jako woda zasilająca jest pompowana znów do wytwornicy pary.

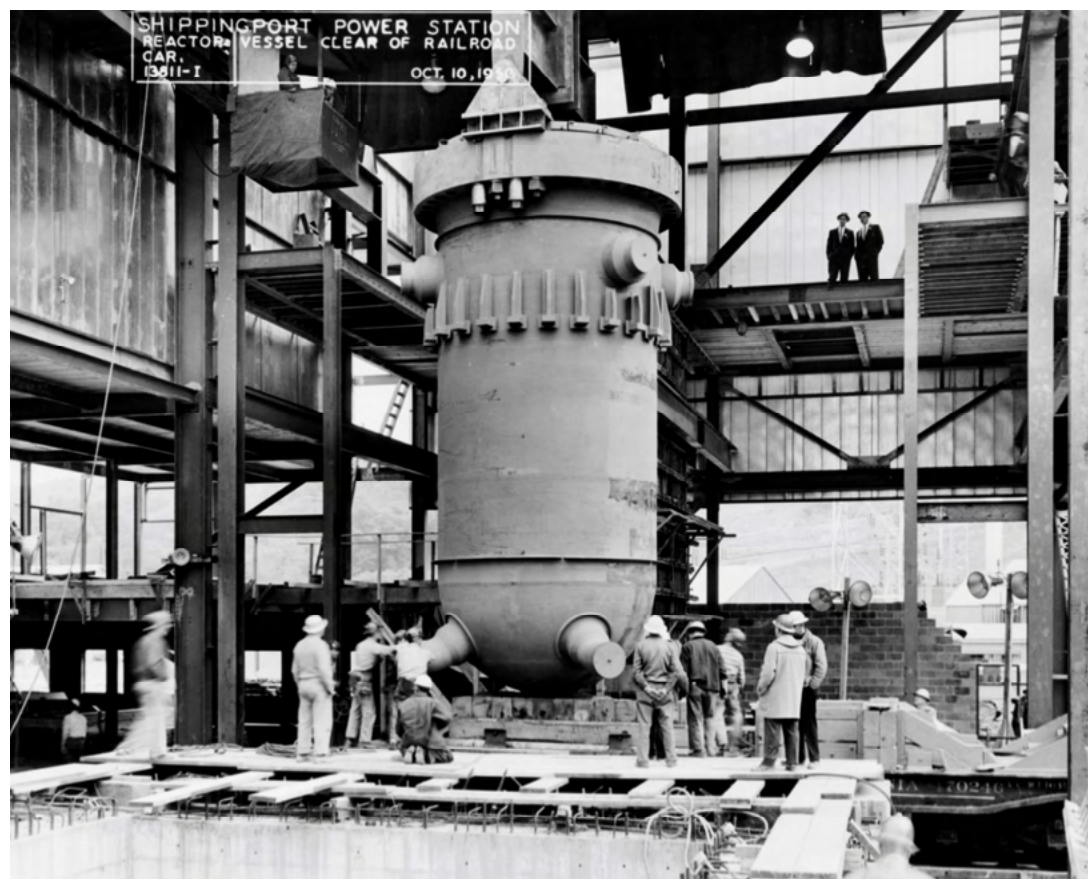


REAKTOR WODNY CIŚNIENIOWY (PWR) W APLIKACJI ELEKTROWNIANEJ



DOŚWIADCZALNA ELEKTROWNIA JĄDROWA SHIPPINGPORT (PA) - 1958

- ❑ Prototypowy reaktor Westinghouse CVR powstały dla potrzeb programu jądrowego napędu dla lotniskowców (moc cieplna 390 MW, oczekiwana moc napędu okrętowego ok. 56 MW), znalazł cywilne zastosowanie w pierwszej amerykańskiej elektrowni jądrowej Shippingport
- ❑ W ramach programu „Atoms for peace”, została ona przekazana do eksploatacji przez prezydenta Eisenhowera w dniu 26 maja 1958 roku. Doświadczalna elektrownia o mocy 60 MW została zbudowana w rekordowym czasie 32 miesięcy kosztem 72,5 miliona dolarów.

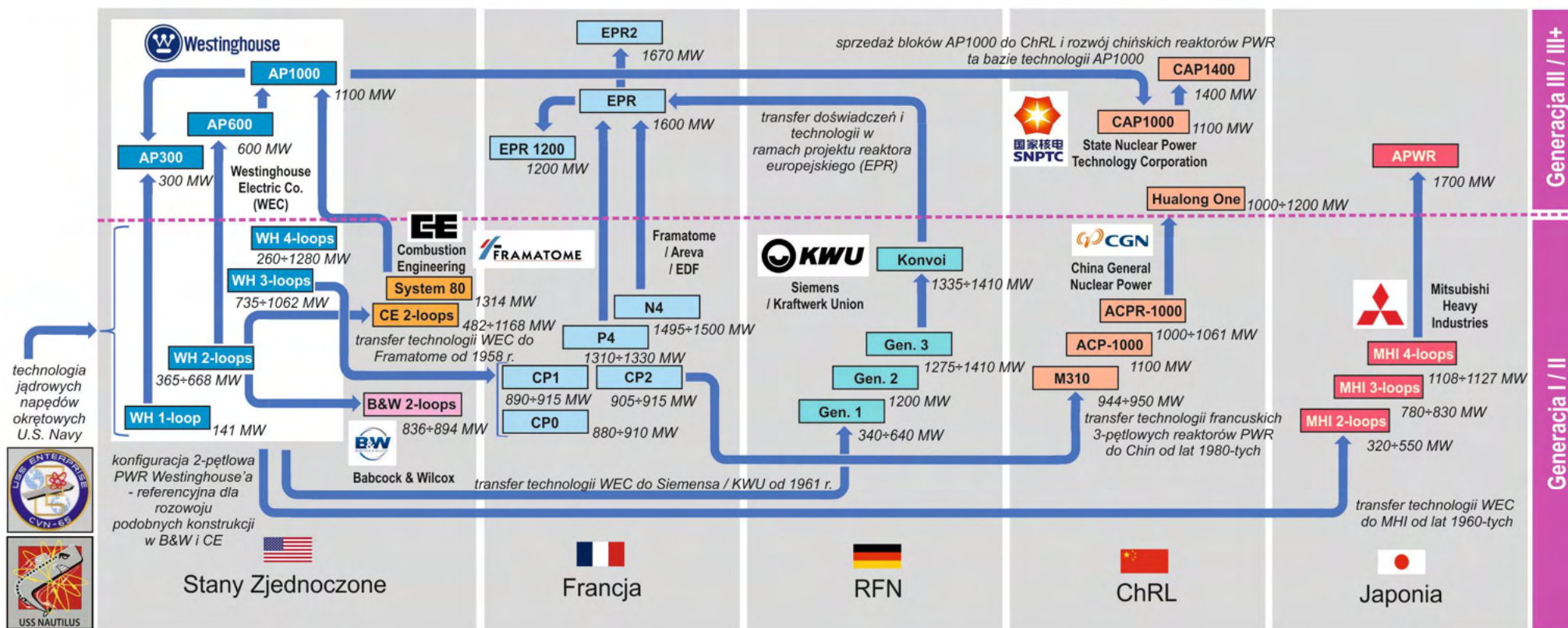


ELEKTROWNIA JĄDROWA YANKEE ROWE (MA), 1961

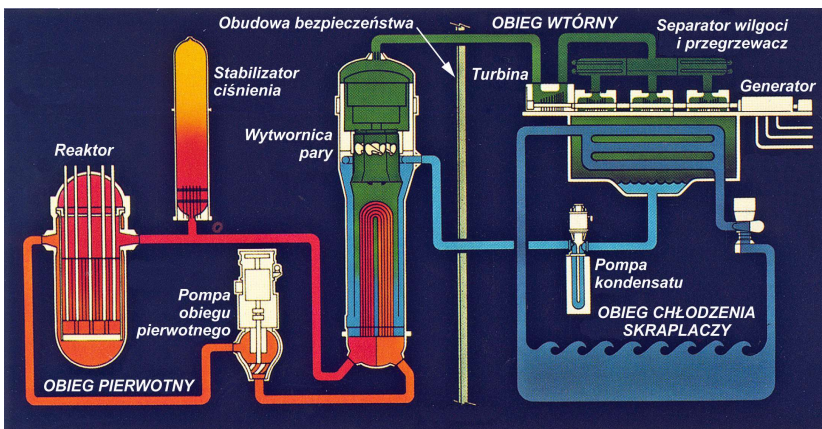
- ❑ Promowane przez Westinghouse Electric reaktory energetyczne PWR zdobyły sobie uznanie inwestorów i użytkowników przede wszystkim dzięki zamknięciu radioaktywnej części układu wymiany ciepła w obiegu pierwotnym.
- ❑ Realizacja części turbinowej z nie-radioaktywnym obiegiem wtórnym w sposób jak najbardziej zbliżony do konwencjonalnej elektrowni ciepłej.
- ❑ Już w 1961 r. uruchomiono pierwszą amerykańską wielkoskalową elektrownię PWR: Yankee Rowe w stanie Massachusetts o mocy 167 MW (mniejszej niż w większości typów opracowywanych obecnie SMR-ów).



ROZWÓJ REAKTORÓW WESTINGHOUSE I KONSTRUKCJI POCHODNYCH W ŚWIECIE ZACHODNIM



KONFIGURACJE OBIEGU PIERWOTNEGO REAKTORÓW PWR WESTINGHOUSE ELECTRIC



a. układ 1-pętlowy
(1-loop)



b. układ 2-pętlowy
(2-loops)



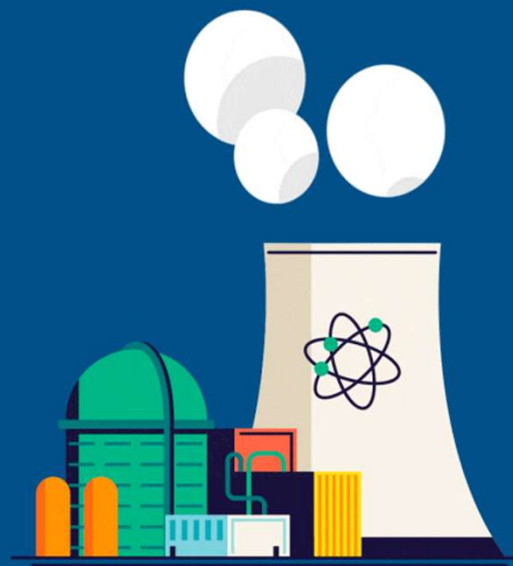
c. układ 3-pętlowy
(3-loops)



d. układ 4-pętlowy
(4-loops)

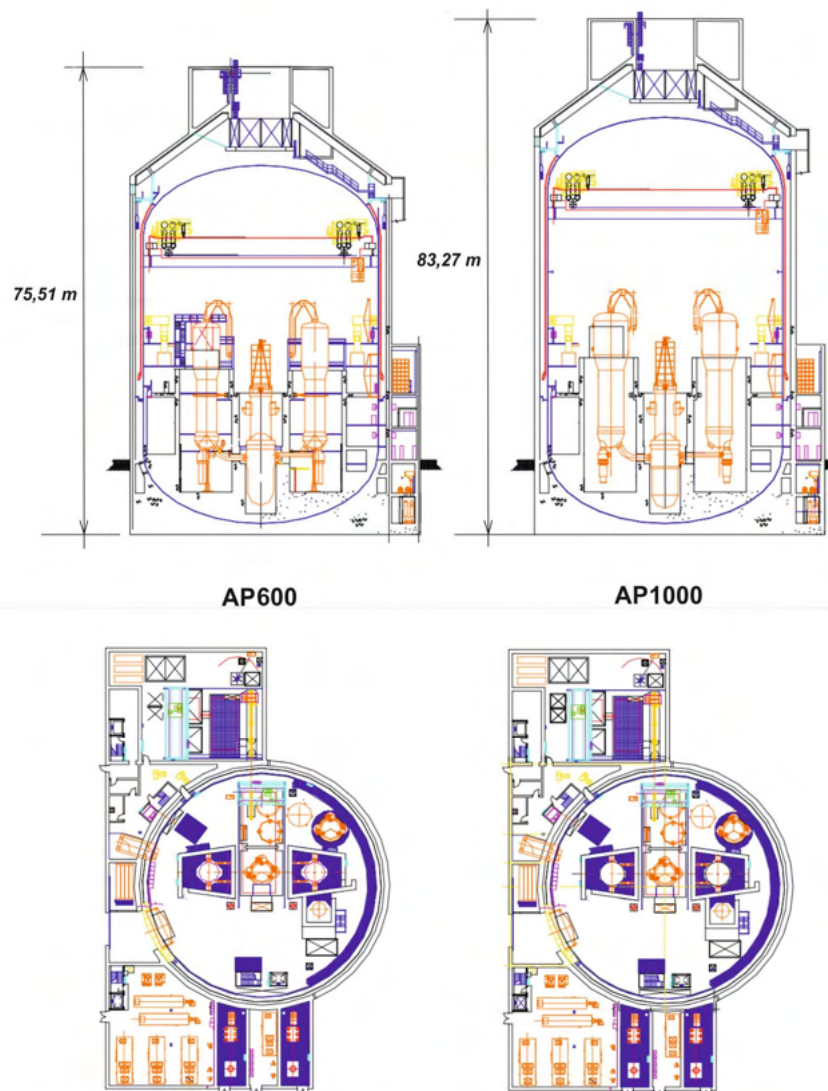
- zbiornik reaktora
- wytownica pary
- stabilizator ciśnienia
- pompa obiegu pierwotnego

AP600 i AP1000



AP600 - POPRZEDNIK AP1000

- W latach 1990-tych Firma Westinghouse Electric przystąpiła do prac nad projektem nowoczesnego reaktora o cechach bezpieczeństwa pasywnego oznaczonego AP600. AP w nazwie to skrót od ang. *Advance Passive reactor*, zaś liczba 600 wynika z projektowej mocy elektrycznej bloku wynoszącej ok. 600 MW (dokładnie 610 MW).
- Założono wykorzystanie stosunkowo prostej konfiguracji układu chłodzenia z dwoma pętlami obiegu pierwotnego z pojedynczym generatorem pary i dwiema pompami chłodziwa reaktora w każdej pętli. Westinghouse dysponował sporymi doświadczeniami w zakresie podobnych konstrukcji II generacji (np. słoweńska EJ Krsko

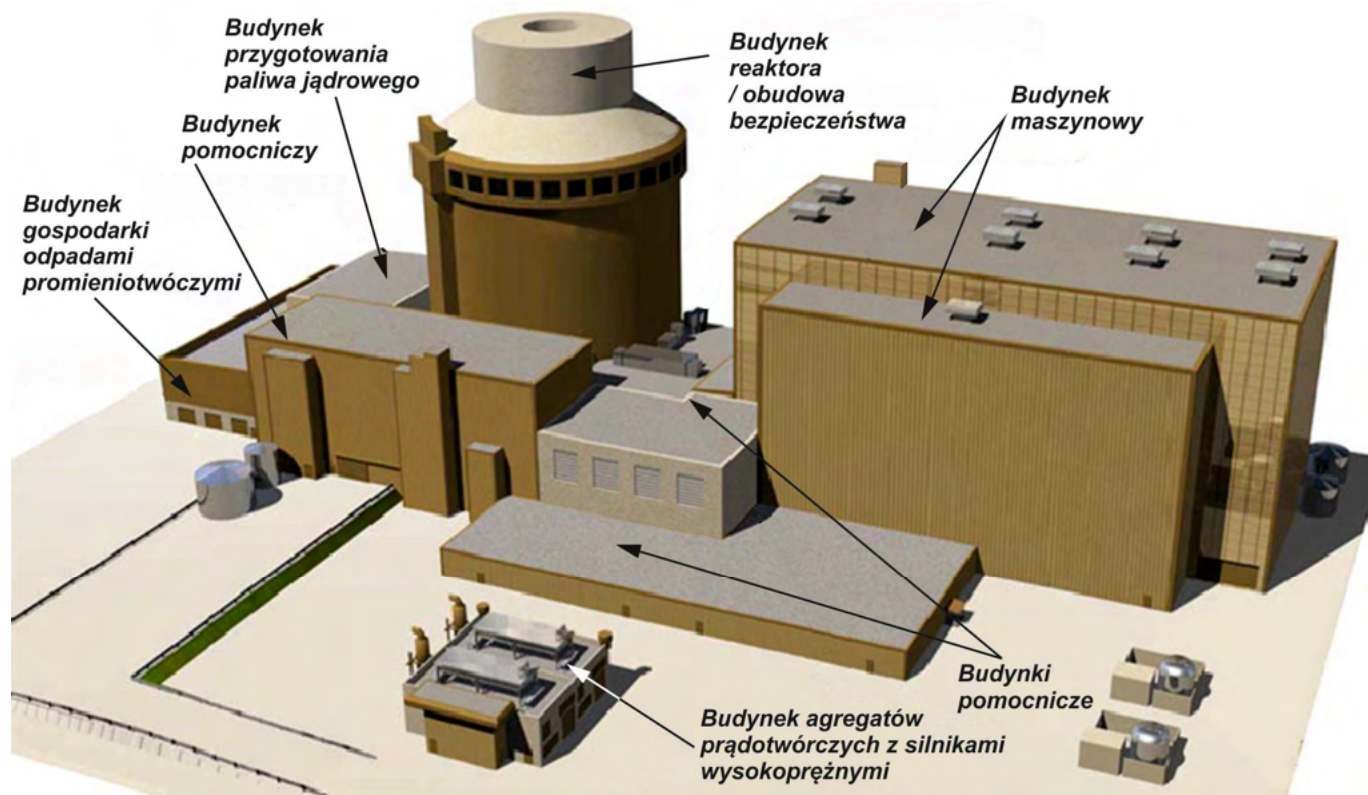


AP600 - POPRZEDNIK AP1000

- ❑ Założono zastosowanie w budowie bloku **AP600** nowatorskiej konstrukcji modułowej, pozwalającej w założeniu skrócić czas budowy od wylania pierwszego betonu do załadunku paliwa jądrowego do zaledwie 36 miesięcy.
- ❑ Modułowe komponenty miały być w założeniu produkowane przez dostawców z rynku lokalnego. Okres użytecznej eksploatacji elektrowni miały wynosić co najmniej 60 lat.
- ❑ Projektowi AP600 patronował amerykański **Departament Energii** w ramach programu opracowania nowych konstrukcji energetycznych reaktorów lekkowodnych (ang. *Advanced Light Water Reactor*).
- ❑ Zaplanowany dla AP600 parametr częstości uszkodzeń rdzenia reaktora był ponad 1000 razy niższy od wymagań certyfikacyjnych amerykańskiej Komisji Dozoru Jądrowego U.S. NRC (ang. *Nuclear Regulatory Commission*).
- ❑ Prace badawczo-rozwojowe nad AP600 prowadzone były przy współpracy Westinghouse Electric z **Uniwersytetem Stanu Oregon**.
- ❑ Wykorzystywano w nich m. in. **model układu chłodzenia reaktora zmniejszony do 25% rzeczywistej wielkości** dla sprawdzenia możliwości rozwiązań pasywnego chłodzenia rdzenia przy wykorzystaniu sił grawitacji i naturalnej cyrkulacji wody chłodzącej. W projekcie położono nacisk na uproszczenie konstrukcji i zredukowanie liczby elementów mogących potencjalnie stać się zarzewiem awarii – w tym szczególnie pomp.



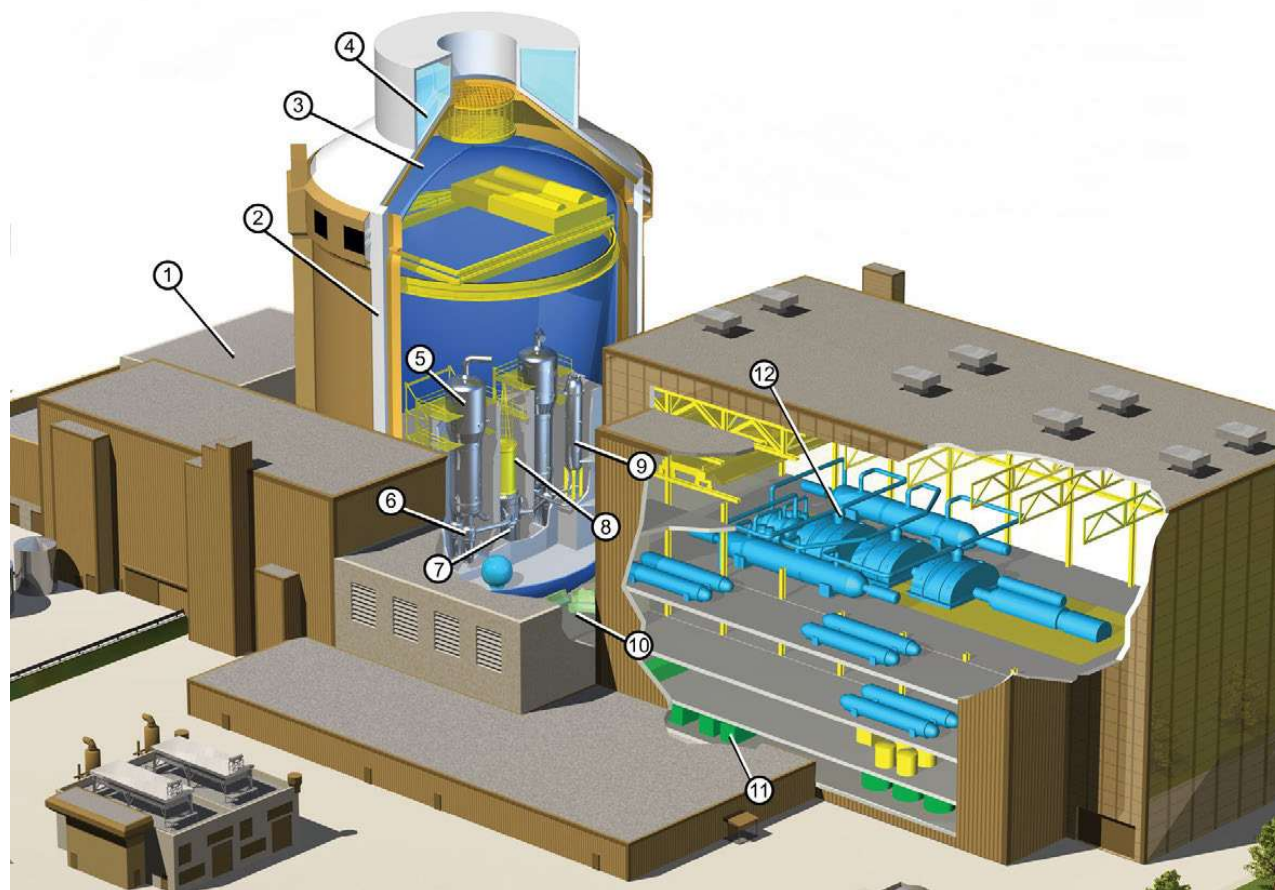
AP1000 – KONFIGURACJA BLOKU



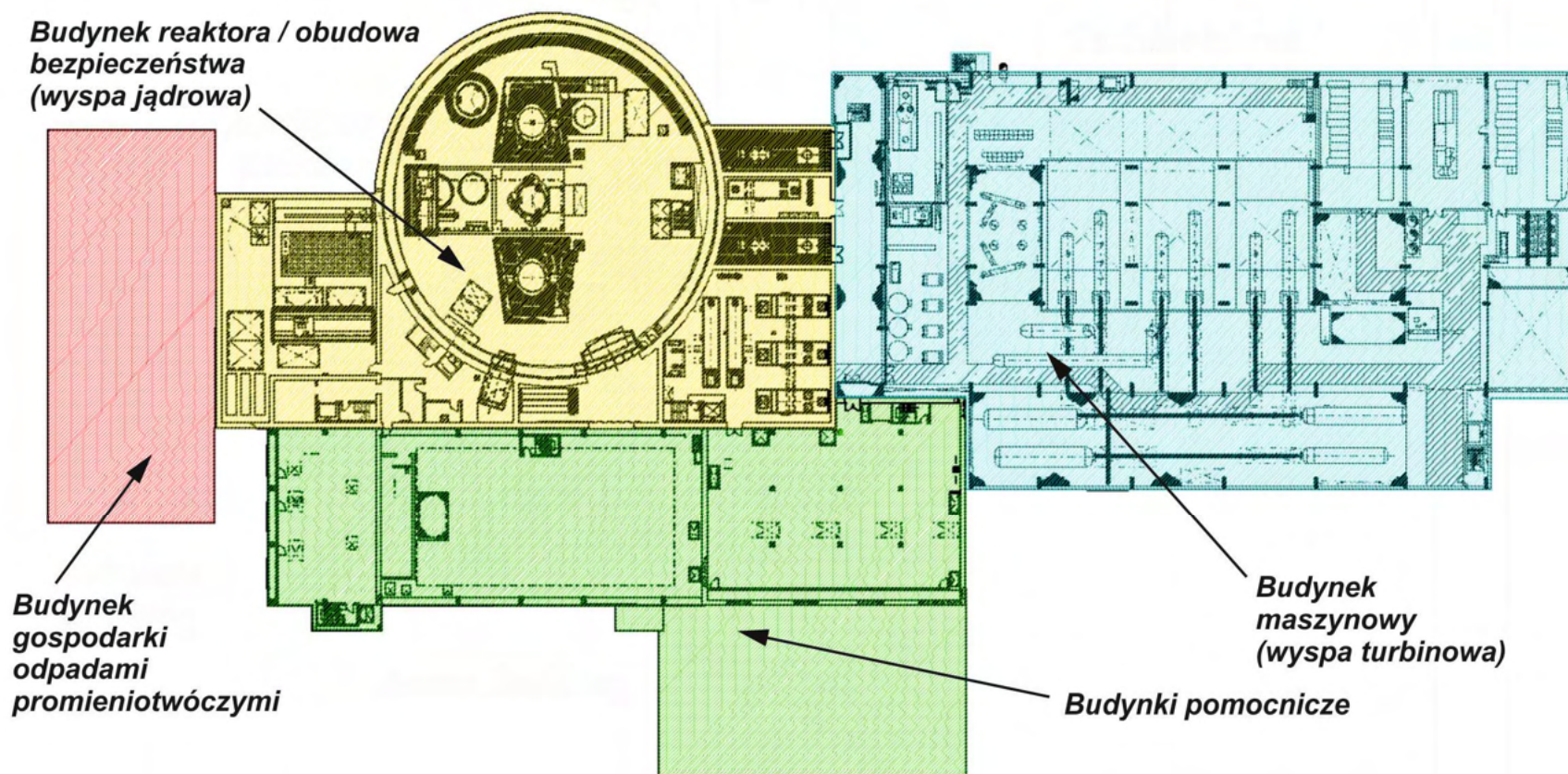
AP1000 – PRZEKRÓJ AKSONOMETRYCZNY

- 1 – budynek przygotowania paliwa jądrowego;
- 2 – zewnętrzna obudowa bezpieczeństwa;
- 3 – wewnętrzna, stalowa część obudowy bezpieczeństwa;
- 4 – zapasowy zbiornik wody PCCWST;
- 5 – wytwornica pary (2 szt.);
- 6 – zintegrowana pompa cyrkulacyjna obiegu pierwotnego (4 szt.);
- 7 – reaktor;
- 8 – zintegrowany zespół głowicy reaktora;
- 9 – stabilizator ciśnienia;
- 10 – sterownia bloku;
- 11 – pompy skroplin obiegu wtórnego;
- 12 – turbozespół.

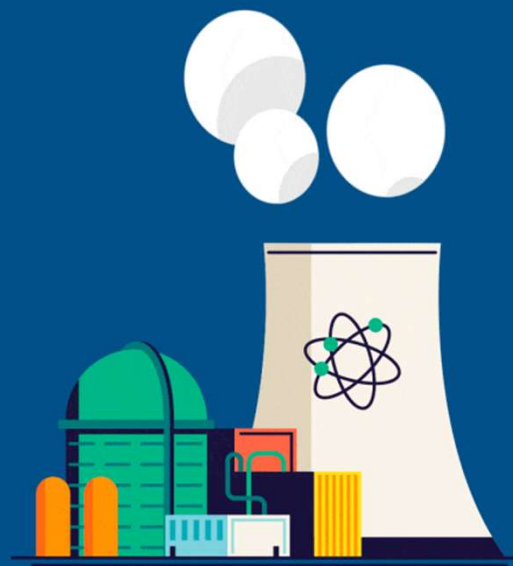
(rys. Westinghouse Electric Company)



AP1000 – KONFIGURACJA BLOKU – RZUT Z GÓRY



AP1000 – dotychczasowe referencje w Chinach i w Stanach Zjednoczonych



EJ SANMEN, CHINY



EJ SANMEN, CHINY



- ❑ Elektrownia Jądrowa Sanmen (zlokalizowana jest ok. 300 km na południe od Szanghaju, w prowincji Zheijang, przy ujściu Kanału Shefan (wskazanego jako źródło wody chłodzącej dla elektrowni) do Morza Wschodniochińskiego.
- ❑ Umowa: 2007 r.
- ❑ Początek budowy: 2008 r.
- ❑ Uruchomienie – Blok 1: 2018 r.
- ❑ Uruchomienie – Blok 2: 2019 r.

EJ HAYIANG

Elektrownia Jądrowa Haiyang. Druga chińska elektrownia zaprojektowana i zbudowana z wykorzystaniem technologii AP1000 powstała w prowincji Shandong na brzegu Morza Żółtego (wskazane jako źródło chłodzenia obiektu) – ok. 700 km na północ od Szanghaju



- Uruchomienie – Blok 1: 2018 r.
- Uruchomienie – Blok 2: 2019 r.

EJ HAYIANG



Ciepło wytwarzane w Elektrowni Jądrowej Haiyang wykorzystane jest w bardzo interesującym projekcie kogeneracyjnym. Po wprowadzeniu odpowiednich modyfikacji bloków 1 i 2 będzie można zapewnić ogrzewanie lokali o łącznej powierzchni 30 mln. metrów kwadratowych.

EJ VOGTLE

- ❑ Wstępne zezwolenie: 2009 r.
- ❑ Początek budowy: 2013 r.
- ❑ Uruchomienie – Blok 3: 2023 r.
- ❑ Uruchomienie – Blok 4: 2004 r.

- ❑ EJ Vogtle lokalizowana jest w pobliżu miejscowości Waynesboro w hrabstwie Burke w stanie Georgia, nad rzeką Savannah wskazaną jako źródło wody dla obiektu. Współwłaścicielami elektrowni są firmy: Georgia Power (45,7%), OPC (30%), MEAG (22,7%) oraz Dalton Utilities (1,6%) zaś jej operatorem firma Southern Nuclear.



EJ VOGTLE – BLOK 4



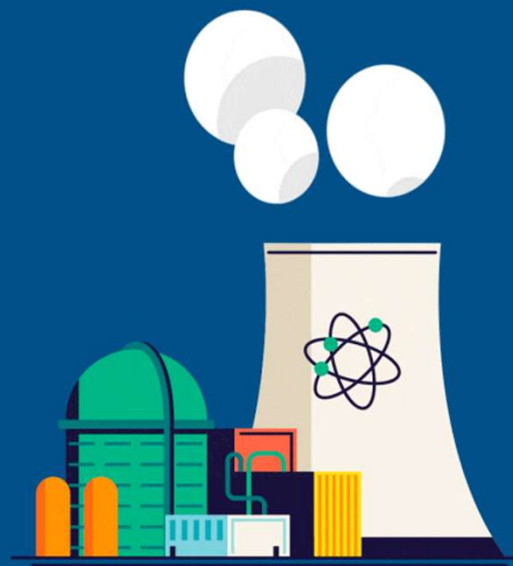
Po uruchomieniu bloków 3 i 4 EJ Vogtle jest **największym obiektem energetyki jądrowej** w Stanach Zjednoczonych dysponując mocą elektryczną netto wynoszącą **4536 MW**, odbierając palmę pierwszeństwa elektrowni Palo Verde w Arizonie (4200 MW). Spodziewany czas eksploatacji nowych bloków Vogtle 3 i 4 zgodnie z ocenami większości ekspertów wyniesie **co najmniej 80 lat**. Łączne koszty budowy nowych bloków ocenia się obecnie na **30 mld. USD**.

Vogtle Unit 4

VOGTLE 3 OJT PAA-UDT SIERPIEŃ 2024 R.



AP1000 – budowa jądrowego bloku energetycznego

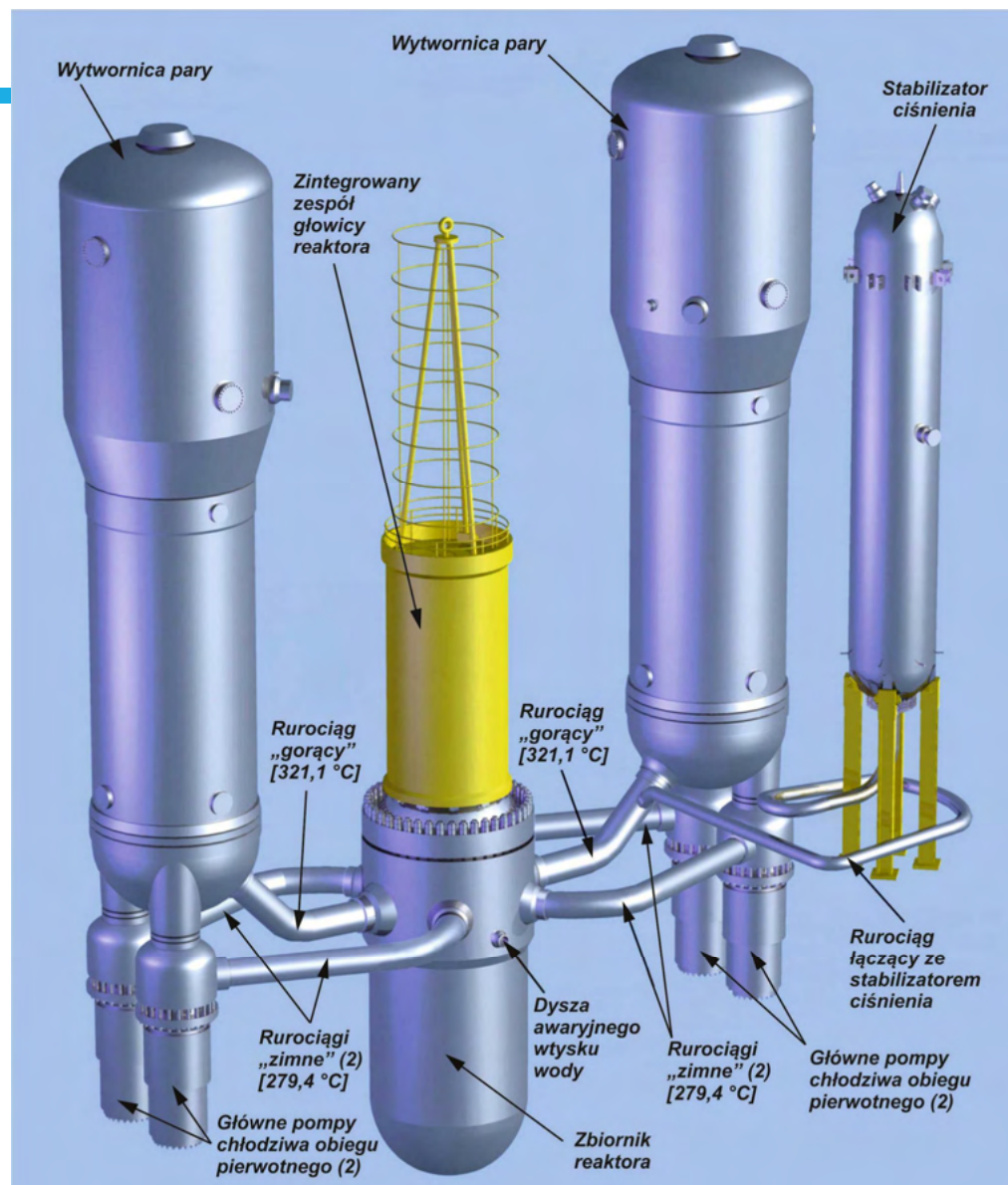


AP1000

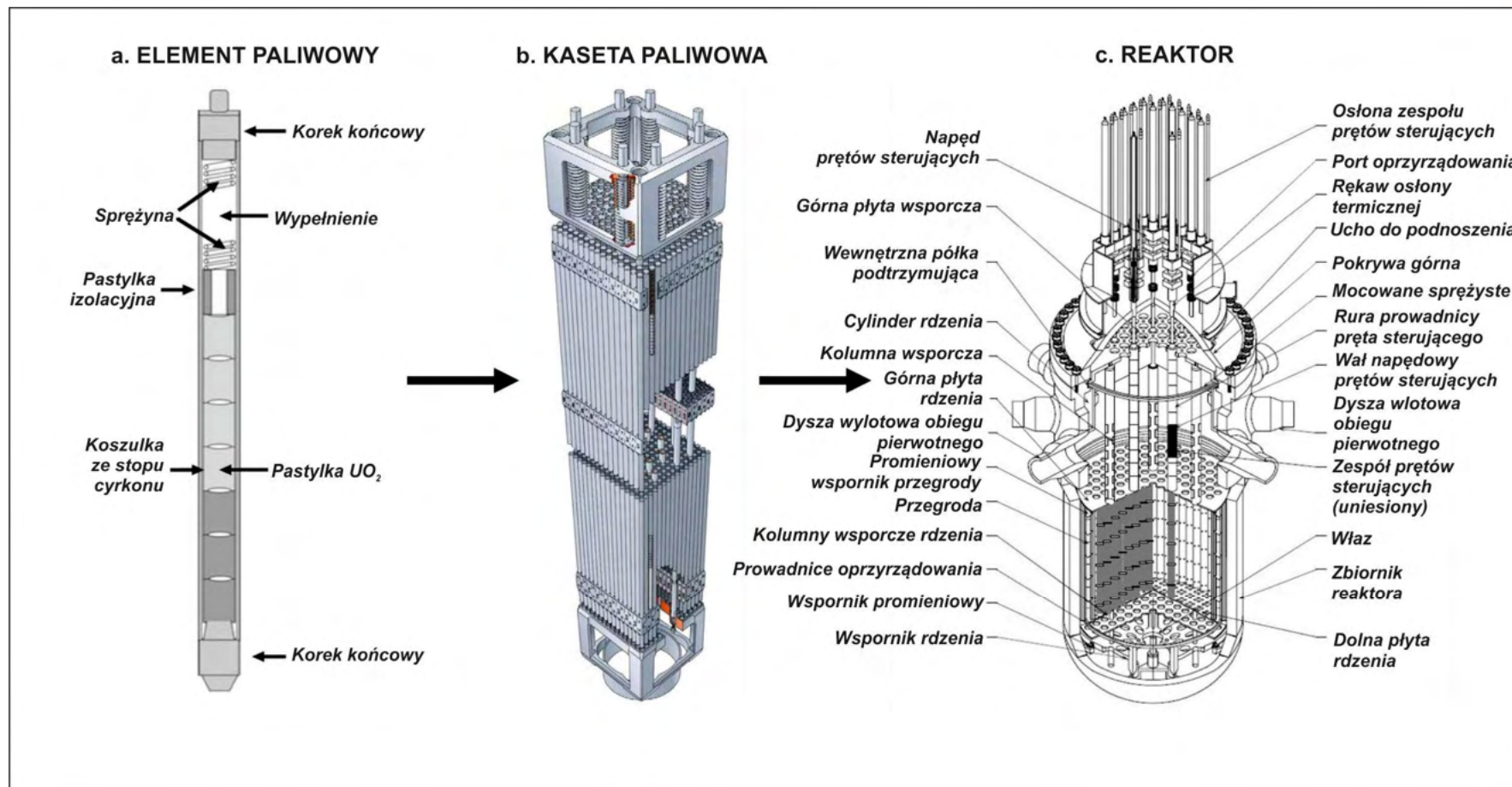
– OBIEG PIERWOTNY

Reaktory PWR pracują w systemie dwuobiegowym. Podstawowymi elementami obiegu

- ☐ pierwotnego są (patrz rysunek):
zbiornik reaktora wraz z rdzeniem
- ☐ wymiennik ciepła (zwany wytwornicą pary),
- ☐ pompa wodna
- ☐ i stabilizator ciśnienia.

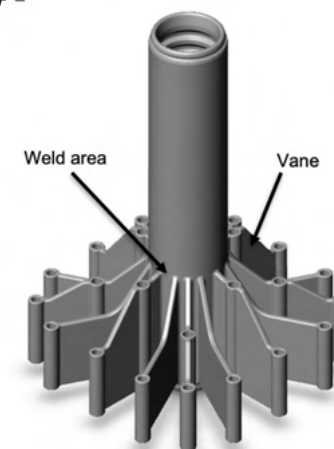


AP1000 – KONSTRUKCJA REAKTORA



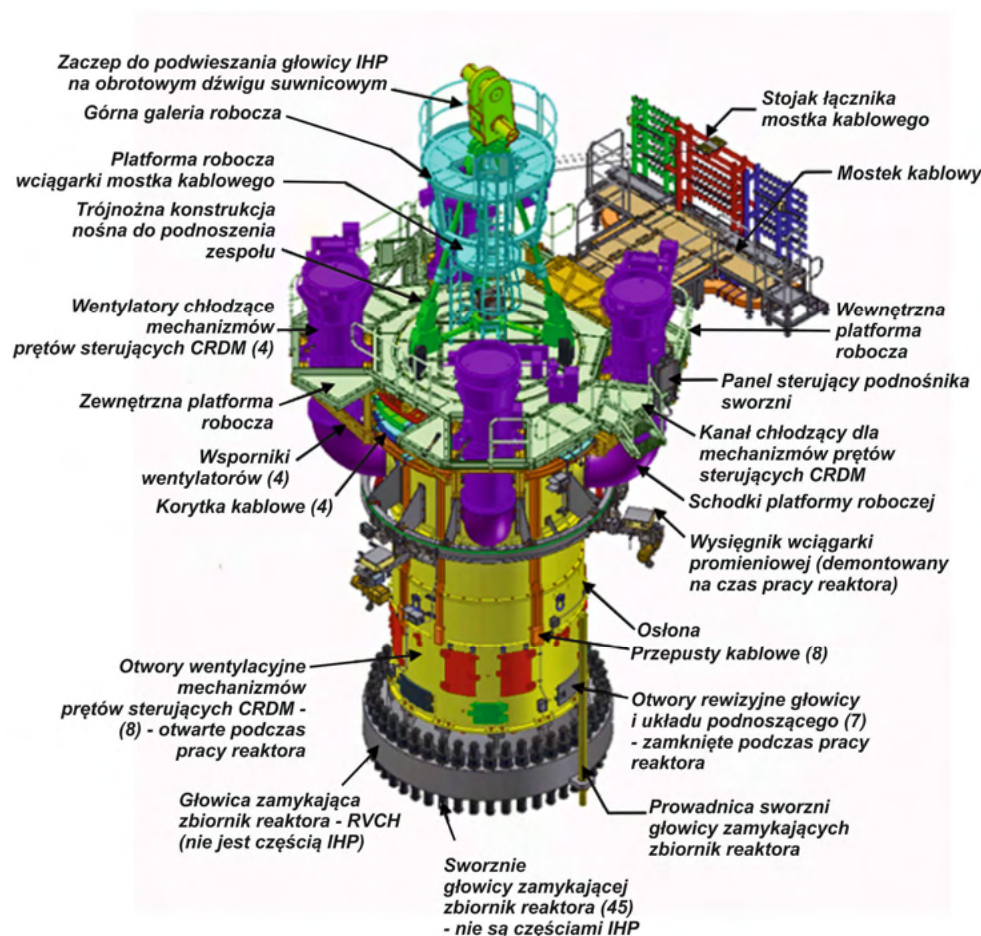
PRĘTY REGULACYJNE I CZUJNIKI POMIAROWE RDZENIA

- ❑ W części zespołów paliwowych umieszcza się ruchome (dające się wyciągać i wsuwać) **zespoły prętów regulacyjnych**, zawierających materiały silnie pochłaniające neutrony (zwykle związki boru).
- ❑ w reaktorze AP1000 zastosowano zestaw 53 zespołów prętów „czarnych” o pełnej zdolności regulacyjnej (tzw. ang. *Black Rods*) i 16 prętów „szarych” o zmniejszonej zdolności regulacyjnej (tzw. ang. *Gray Rods*).
- ❑ Każdy zespół wyposażony jest w indywidualny, **elektromagnesowy zespół napędowy** umieszczony w głowicy nabudowanej na górnej pokrywie reaktora. Ciężno napędowe przechodzi przez uszczelnienie dynamiczne w pokrywie reaktora. Już we wnętrzu zbiornika na jego końcu umocowany jest tzw. „pająk” (ang. *spider*) – element rozgałęziający, do którego umocowane są 24 właściwe pręty regulacyjne (ang. *rodlets*).
- ❑ W przypadku zespołów prętów „czarnych” wszystkie 24 sztuki wykonane są ze stopu srebra, indu i kadmu (Ag-In-Cd) z zewnętrzną powłoką ze stali nierdzewnej. W zespołach „szarych” – geometrycznie identycznych jak „czarne” wykorzystano odpowiednio: 12 prętów Ag-In-Cd i 12 prętów ze stali nierdzewnej typu 304.



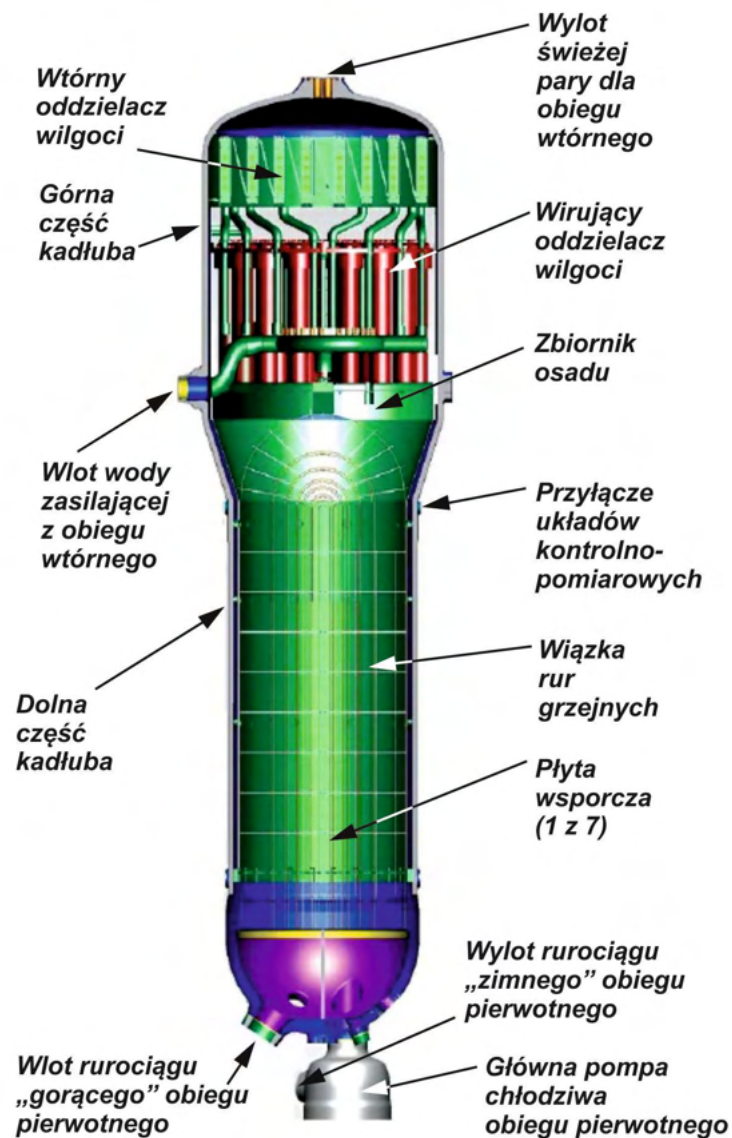
AP1000 ZESPÓŁ GŁOWICY REAKTORA

- ❑ Górna część zbiornika (pokrywa) jest zdejmowana w czasie przeładunków paliwa i remontów wraz z całą głowicą. W pokrywie znajdują się przepusty umożliwiające napęd zestawów prętów regulacyjnych podczas pracy reaktora.
- ❑ Głowica mieści w sobie elektromagnesowe napędy prętów sterujących wraz z powietrznym układem chłodzenia wymuszonego wentylatorami.



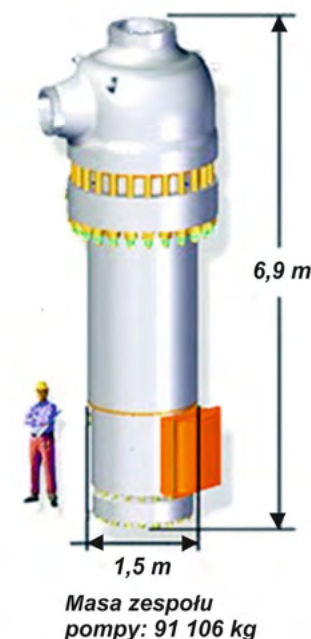
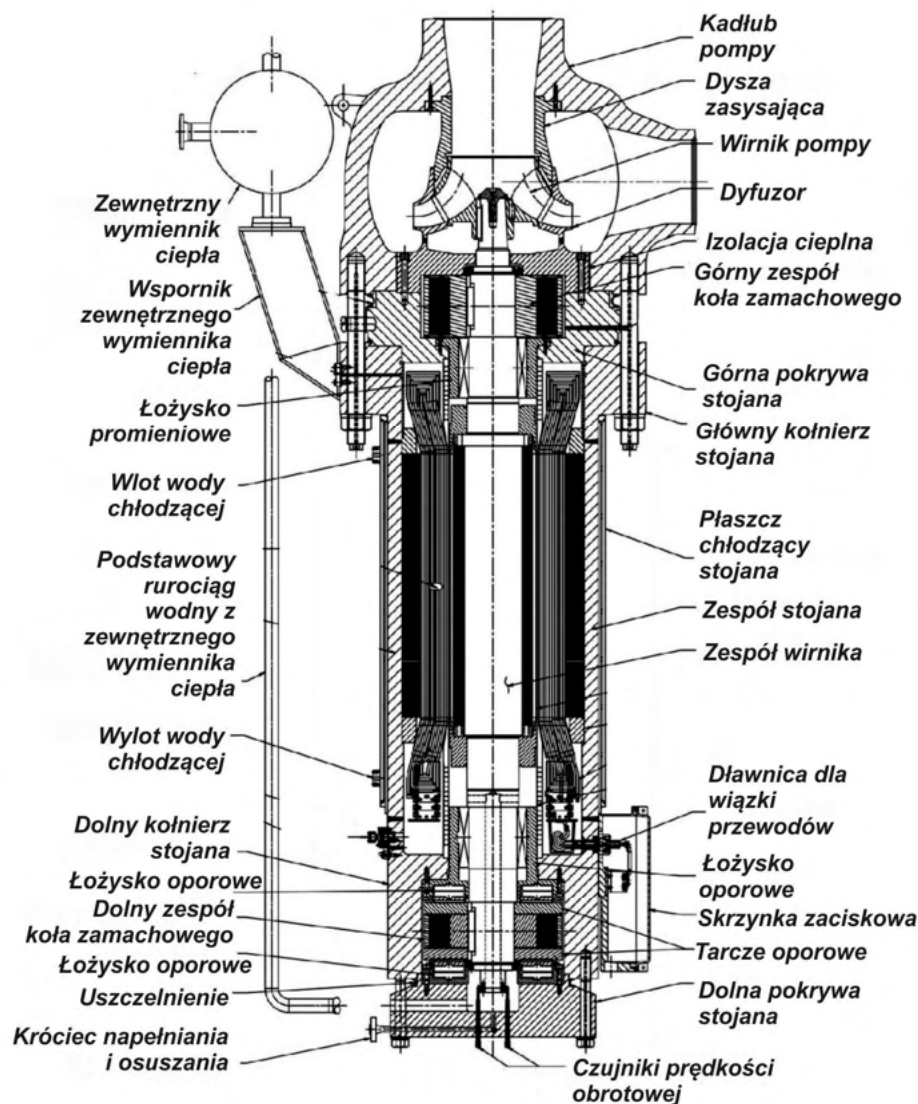
AP1000 – WYTWORNICA PARY (2 SZT. W OBIEGU PIERWOTNYM)

- ❑ W bloku AP1000 zastosowano dwie wytwornice pary typu Delta-125 (o wysokości 22,5 m).
- ❑ Woda obiegu pierwotnego przepływa przez 10 025 szt. rurek grzejnych o kształcie odwróconej o 180 stopni litery U.
- ❑ Łączna powierzchnia wymiany ciepła wynosi 11 600 m².

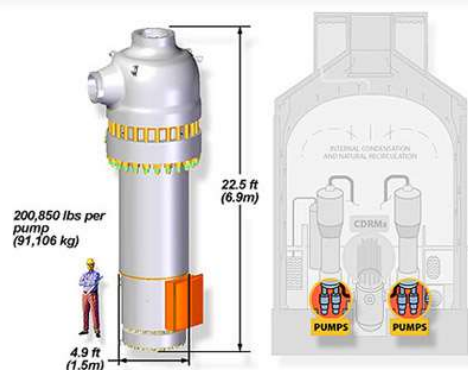
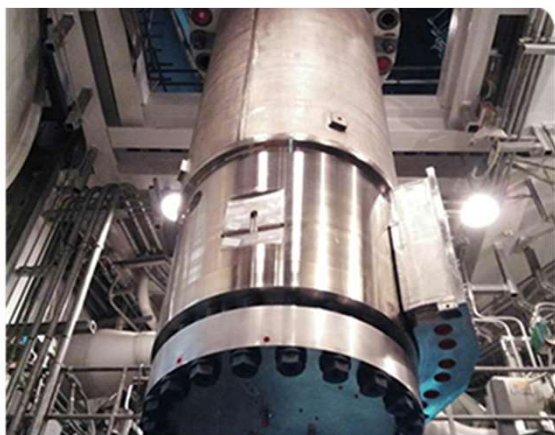


GŁÓWNA POMPA OBIEGU PIERWOTNEGO AP1000 (RCP) (4 SZT.)

- Do dolnej części każdej z wytwornic pary bezpośrednio na ich wylotach wody „zimnej” umocowane są dwie pompy chłodziwa reaktora – RCP (ang. Reactor Coolant Pump), których zadaniem jest przetłaczanie wody chłodzącej przez rdzeń reaktora, rurociągi i wytwornice pary.
- Każda z pomp o znamionowej prędkości obrotowej 1800 obr./min wyposażona jest w napędzający ją silnik elektryczny zintegrowany z pozostałymi elementami w jeden agregat umieszczony we wspólnej obudowie.



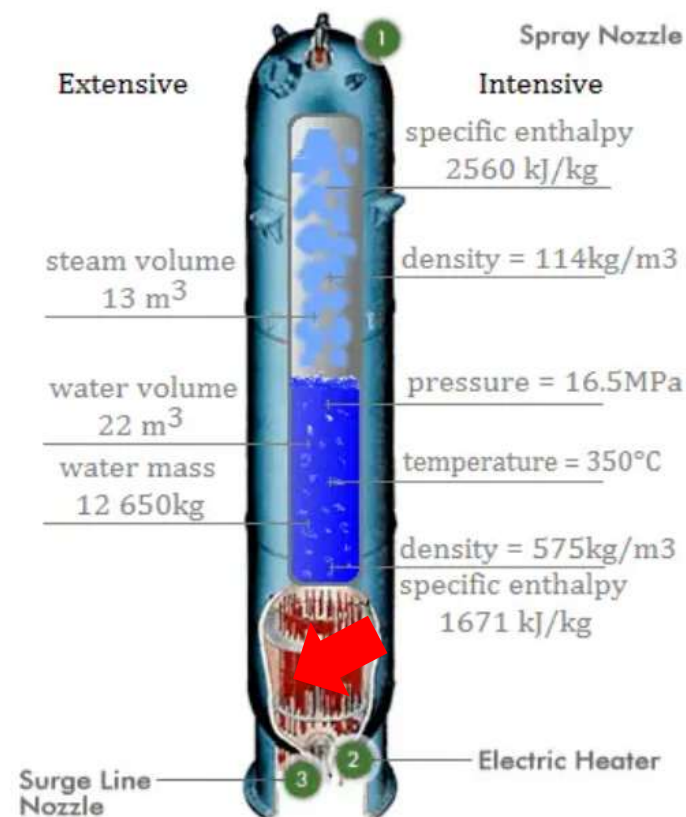
GŁÓWNA POMPA OBIEGU PIERWOTNEGO AP1000



- ❑ Pojęcie o wydajności pomp RCP daje parametr znamionowego natężenia przepływu wynoszący 4,97 m³/s. Zatem do przepompowania cieczy o objętości olimpijskiego basenu pływackiego (2500 m³) przez jedną pompę potrzebne jest zaledwie nieco ponad 8 minut.
- ❑ Pompy wyposażone są w koła zamachowe magazynujące energię kinetyczną ruchu obrotowego, co pozwala na „gładszą” pracę i zminimalizowanie zmiany natężenia przepływu w przypadku wystąpienia krótkotrwałej przerwy w zasilaniu silnika elektrycznego.
- ❑ Pompy RCP zastosowane w AP1000 w warunkach pracy obiegu pierwotnego przy parametrach znamionowych pracują ze stałą prędkością. W stanach pracy, w których temperatura chłodziwa jest niższa stosowana jest elektroniczna regulacja prędkości obrotowej pomp przetłaczających wodę o większej gęstości.
- ❑ Zastosowanie pomp zintegrowanych pozwoliło na znaczne uproszczenie pomocniczych elementów przepływowych oraz na wyeliminowanie kłopotliwych uszczelnień wału wymagających obsługi i uniknięcie potencjalnego ryzyka wynikającego z awarii uszczelnień.
- ❑ Integracja pomp z korpusami wytwornic pary uprościła całą konfigurację obiegu pierwotnego, pozwoliła na zmniejszenie spadku ciśnienia w obiegu pierwotnym, uproszczenie fundamentów i konstrukcji wsporczych wytwornic pary i praktycznie wyeliminowała możliwość spadku poziomu chłodziwa w reaktorze powodującego wynurzenie części rdzenia podczas awarii polegającej na niewielkiej utracie wody z obiegu pierwotnego (ang. small LOCA).

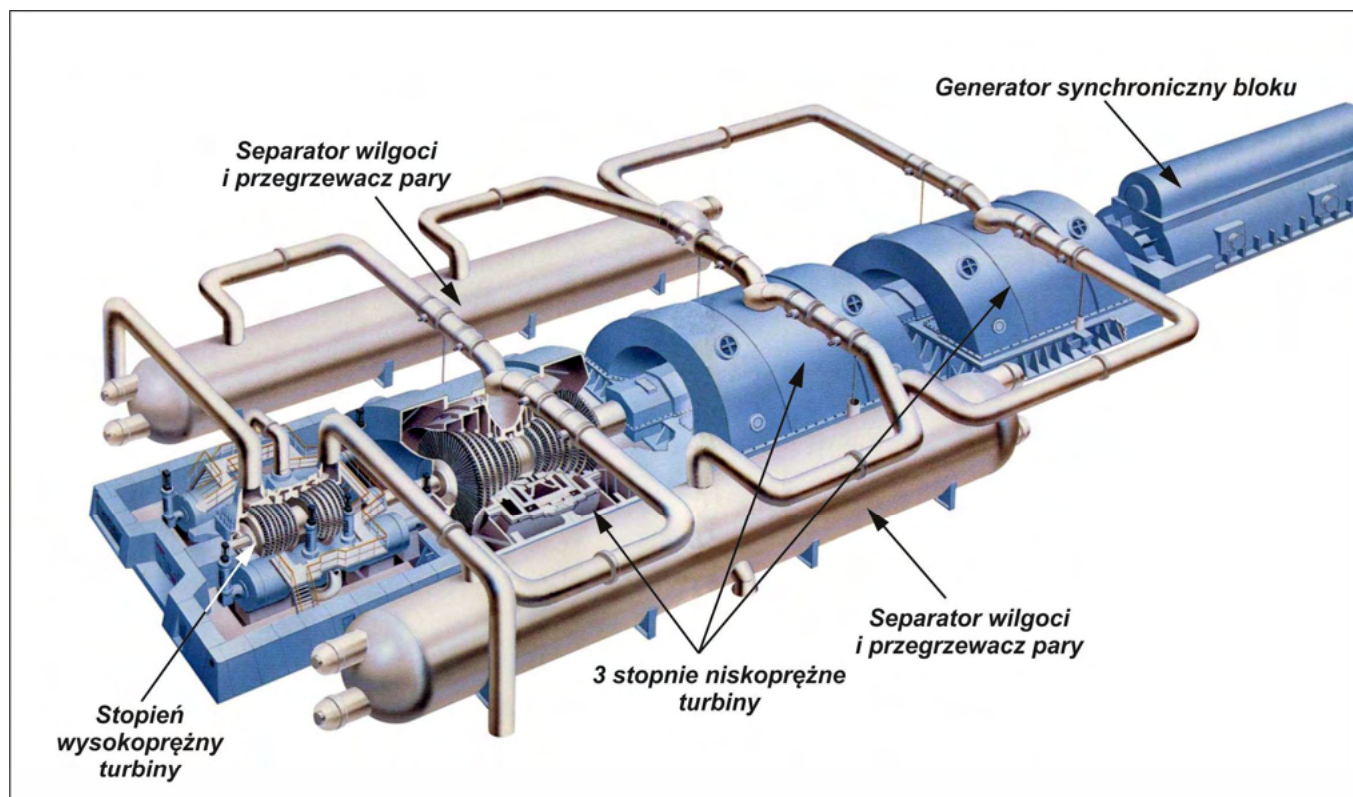
STABILIZATOR CIŚNIENIA

- ❑ W dolnej części stabilizatora znajduje się woda, w górnej para pod ciśnieniem.
- ❑ W dolnej części zbiornika zamontowano, zanurzony w wodzie, zestaw nurnikowych grzałek elektrycznych.
- ❑ Pod kopułą zbiornika umieszczono zestaw dysz wtrysku wody, połączony z zimniejszą częścią rurociągu obiegu pierwotnego.



Rys. www.nuclear-power.com/presurizer/

BLOK AP1000 - TURBOZESPÓŁ



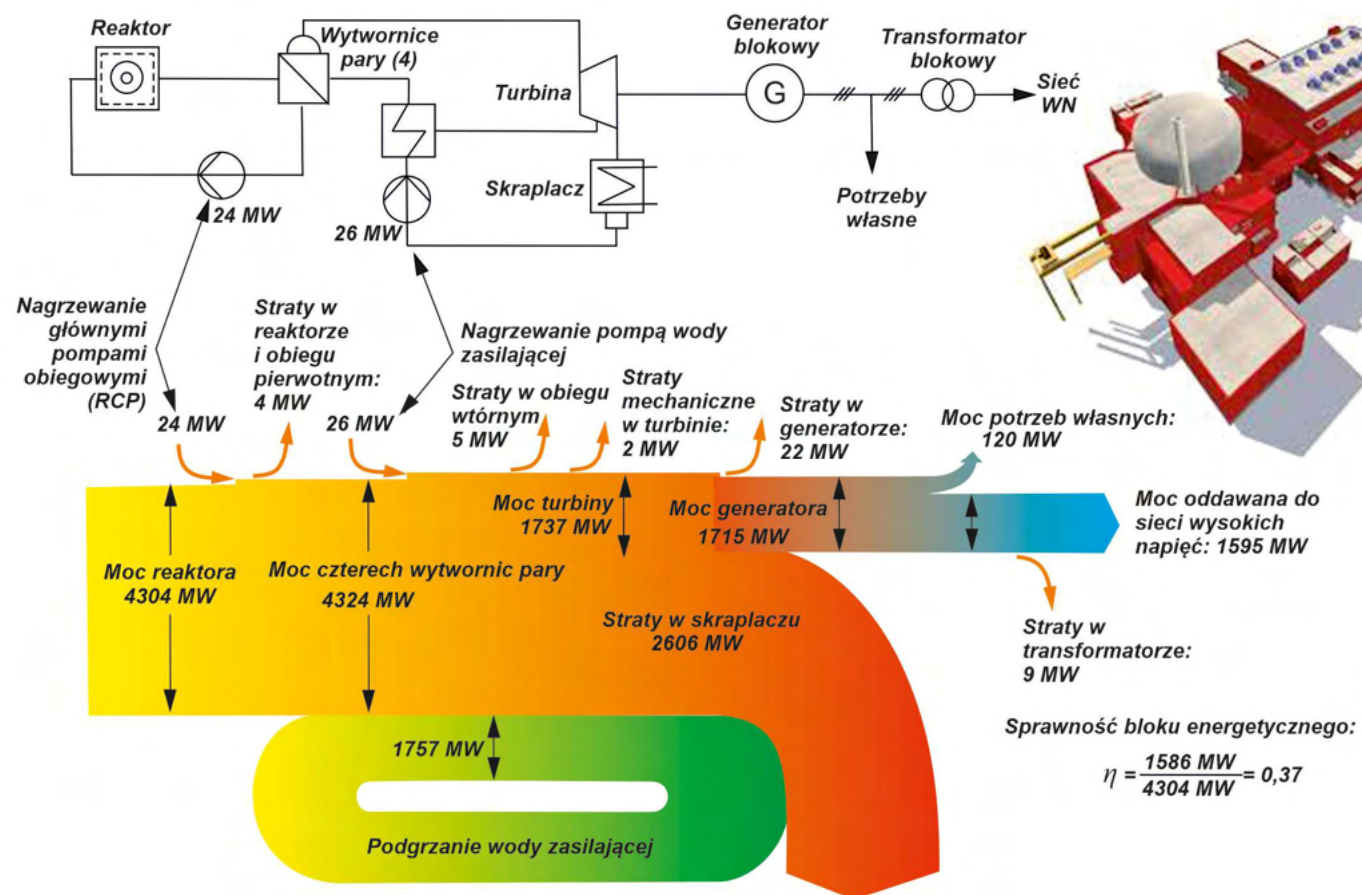
- Para kierowana jest najpierw do części wysokoprężnej turbiny. Tutaj w procesie rozprężania pary następuje zwiększenie udziału fazy wodnej. Dlatego dla uniknięcia szkodliwych zjawisk erozyjno-korozyjnych niezbędne jest usuwanie wody w separatorach a następnie przegrzewanie pozostałej pary parą świeżą.
- Odbywa się to w oddzielaczach wilgoci i podgrzewaczach międzystopniowych skąd para trafia do trzech stopni niskoprężnych turbiny pracujących na wspólnym wale ze wspomnianą wcześniej turbiną wysokiego ciśnienia i generatorem bloku.

WNĘTRZE HALI TURBOZESPOŁU VOGTLE 3 OJT PAA-UDT SIERPIEŃ 2024 R.

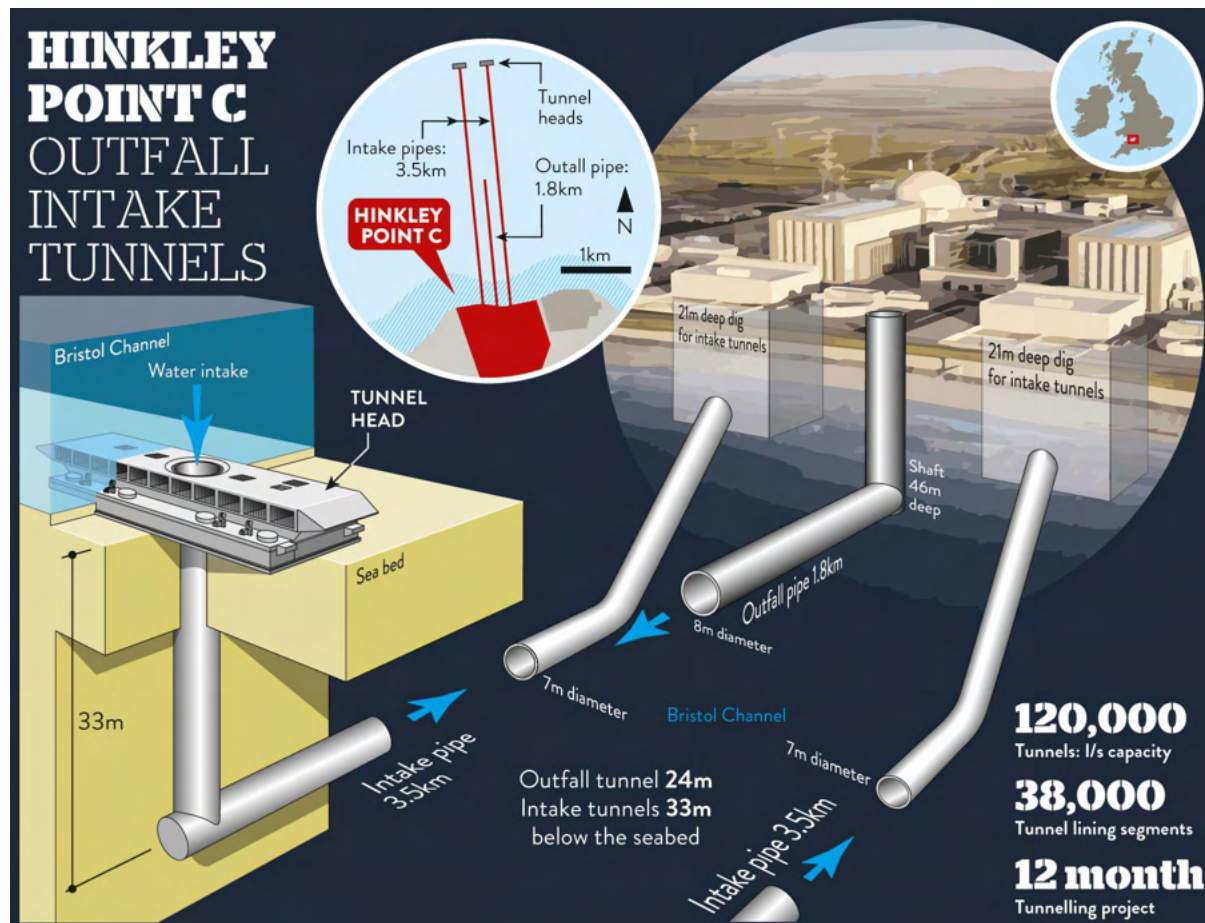
- ❑ Po przejściu przez turbinę para jest skraplana w trzech głównych skraplaczach. Chłodzenie skraplaczy zapewnione jest poprzez wymianę ciepła z ich układami chłodzenia (CWS - ang. *Circulating Water System*) wykorzystującymi wodę z naturalnych zbiorników, chłodnie kominowe lub wentylatorowe.
- ❑ Uzyskany w skraplaczach kondensat jest podgrzewany i pompowany ponownie do wytwornic pary domykając drogę obiegu wtórnego. W obu referencjach AP1000 w Chinach w lokalizacjach nadmorskich Sanmen i Haiyang zastosowano chłodzenie skraplaczy wodą morską, zaś elektrowni Vogtle znajdującej się w głębi lądu, chłodzenie w chłodniach kominowych.



BILANS MOCY BLOKU JĄDROWEGO (EPR)



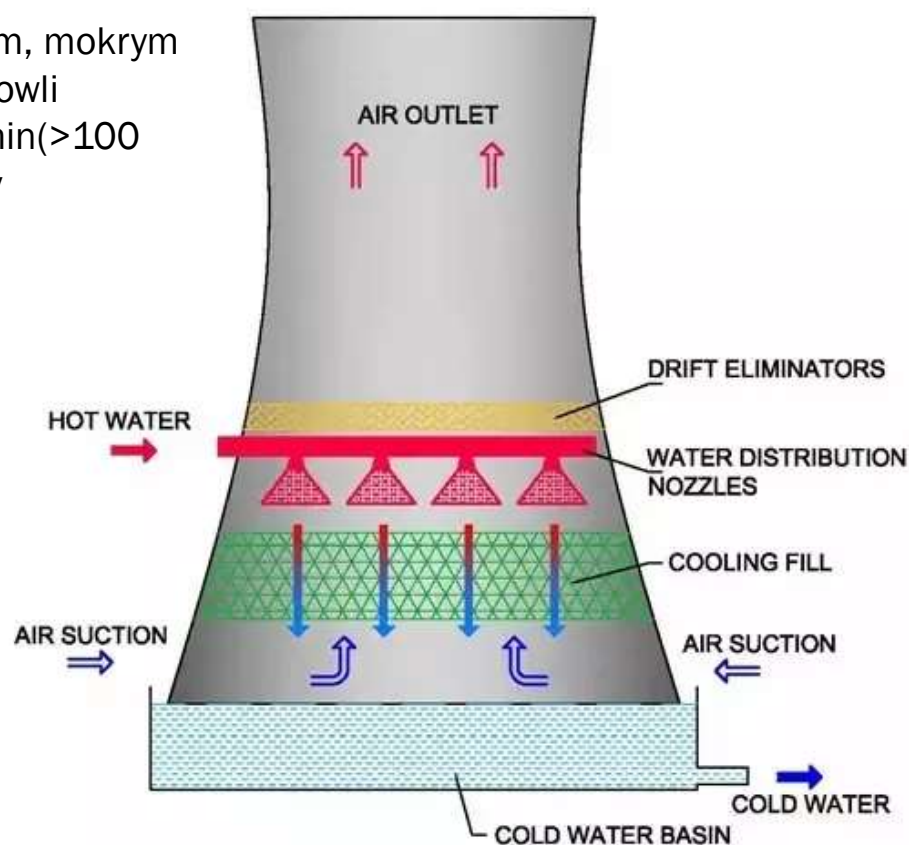
CHŁODZENIE SKLAPLACZY – NATURALNY ZBIORNIK WODNY



CHŁODZENIE SKLAPLACZY – CHŁODNIA KOMINOWA

WET COOLING TOWER
NATURAL DRAFT

Chłodnia kominowa jest specyficznym, kontaktowym, mokrym wymiennikiem ciepła. Wykonana jest w formie budowli żelbetowej, wyposażona w znacznej wysokości komin(>100 m) wymuszający przepływ powietrza umożliwiający chłodzenie wody.



ZESPÓŁ TRANSFORMATORÓW – VOGTLE 3



Zespół transformatorów napowietrznych bloku jądrowego Vogtle 3: 1 – trzy jednostki jednofazowe transformatora blokowego, 2 – czwarta, rezerwowa jednostka transformatora blokowego, 3 – dwa transformatory potrzeb własnych (UAT), 4 – transformator układu wzbudzenia generatora, 5 – dwa rezerwowe transformatory potrzeb własnych (RUAT), układ przewodów szynowych wieloprądowych (fot. Georgia Power Company),

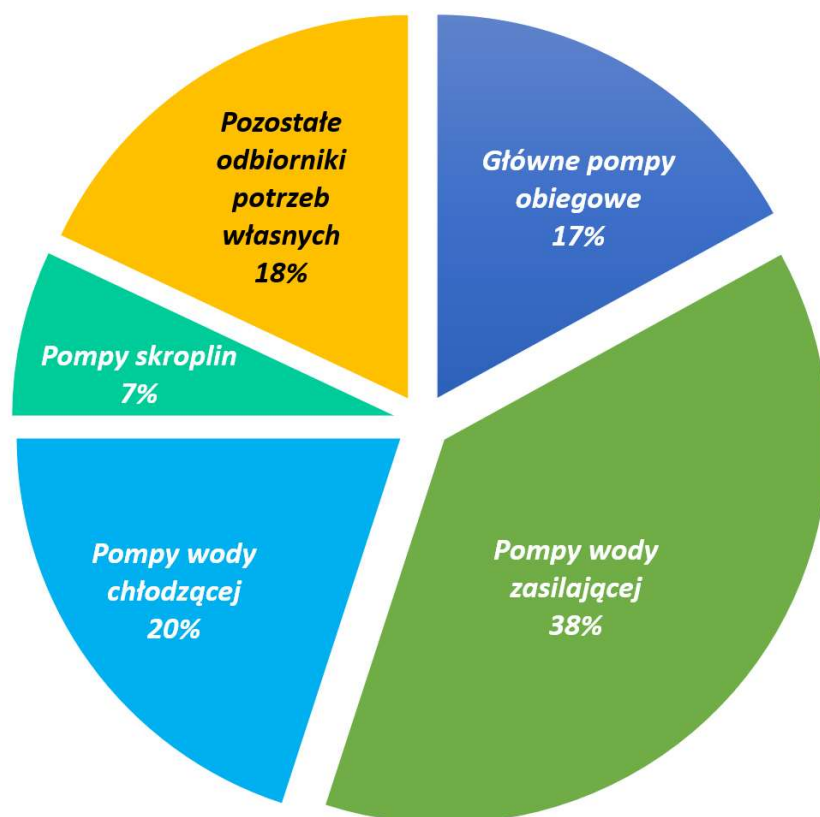
**POJEDYNCZA JEDNOSTKA
TRANSFORMATORA
BLOKOWEGO - VOGTLE 3
OJT PAA-UDT
SIERPIEŃ 2024 R.**



ROZDZIELNIA WYSOKIEGO NAPIĘCIA (500 KV) - VOGTLE



PODZIAŁ ZAPOTRZEBOWANIA ENERGETYCZNEGO POSZCZEGÓLNYCH URZĄDZEŃ BLOKU JĄDROWEGO (PRZYKŁAD)



TYPOWE RODZAJE POMP DLA BLOKU PWR

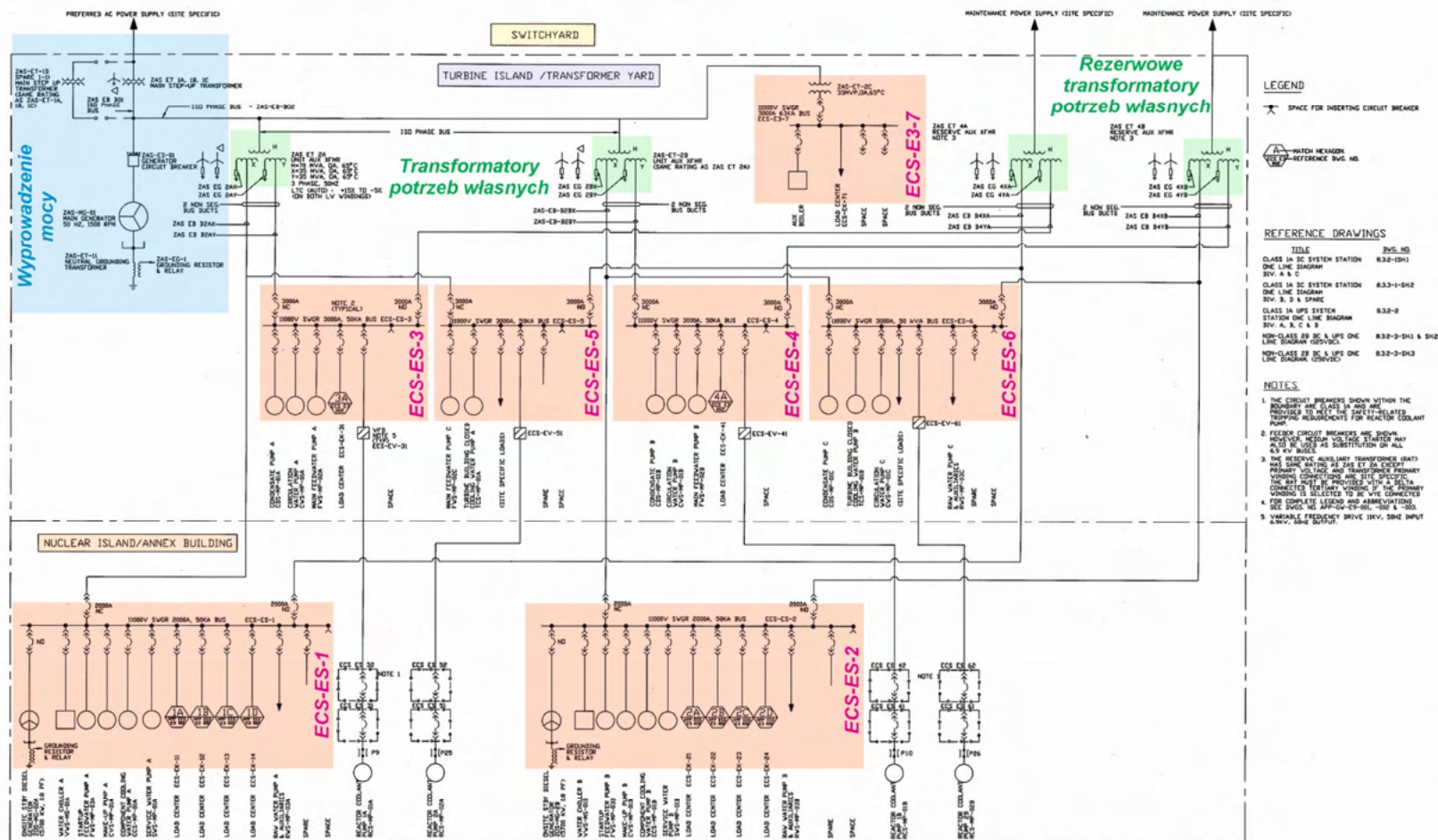
- **Główne pompy obiegowe** (ang. *Reactor Coolant Pumps* – RCP). Ich głównym zadaniem w bloku PWR jest tłoczenie wody obiegu pierwotnego pod wysokim ciśnieniem przez rdzeń reaktora i system rurek wymiany ciepła w wytwornicy pary;
- **Pompy doładowujące** (ang. *Charging Pumps*). Są to wysokociśnieniowe pompy wirowe w układzie regulacji chemicznej i objętości (ang. *Chemical and Volume Control System* – CVCS), przeznaczone do uzupełniania chłodziwa reaktora. W stanach awaryjnych związanych z rozszczelnieniami obiegu chłodzenia reaktora lub dużymi rozszczelnieniami rurociągów pary świeżej pompy te służą do awaryjnego wtrysku do obiegu chłodzenia reaktora wody zawierającej kwas borowy, dla utrzymania poziomu chłodziwa w reaktorze i zapewnienia wymaganej podkrytyczności;
- **Pompy kwasu borowego** (ang. *Boric Acid Pumps*);
- **Pompy awaryjnego uzupełniania wody w rdzeniu reaktora** (ang. *Make-up Pumps*);
- **Pompy układu spryskiwania wnętrza obudowy bezpieczeństwa** (ang. *Containment Spray Pump*), charakterystyczne dla układów awaryjnych reaktorów II generacji. Nie występują np. w bloku AP1000;
- **Wysokociśnieniowe pompy wtrysku bezpieczeństwa** (ang. *High Pressure Injection Pumps*);
- **Niskociśnieniowe pompy wtrysku bezpieczeństwa** (ang. *Low Pressure Injection Pumps*);
- **Pompy usuwania ciepła powyłaczeniowego** (ang. *Residual Heat Removal Pumps*).

POZOSTAŁE POMPY

Część pomp wykorzystanych w układach potrzeb własnych jest bardzo podobna w obu rodzajach bloków jądrowych PWR i BWR, jak również podobna do pomp wykorzystywanych w konwencjonalnych elektrowniach ciepłych:

- Główne pompy zasilające (ang. *Main Feedwater Pumps*);
- Wspomagające pompy wody ruchowej (ang. *Booster Pumps*);
- Zapasowe pompy zasilające (ang. *Emergency Feedwater Pumps*);
- Pompy kondensatu (ang. *Condensate Extraction Pumps*);
- Pompy układu chłodzenia (ang. *Cooling Water Pumps*);
- Pompy zamkniętego układu chłodzenia (ang. *Component Cooling Water Pumps*);
- Pompy wody ruchowej odpowiedzialnej (ang. *Essential Service Water Pumps*).

AP1000 - UKŁAD ZASILANIA ELEKTRYCZNEGO POTRZEB WŁASNYCH



ROZDZIELNICA ŚREDNIEGO NAPIĘCIA (6,9 kV) – VOGTLE 3

*Rozdzielnica potrzeb
własnych 6,9 kV typu
Eaton VacClad-W
zainstalowana w bloku
Vogtle 3*



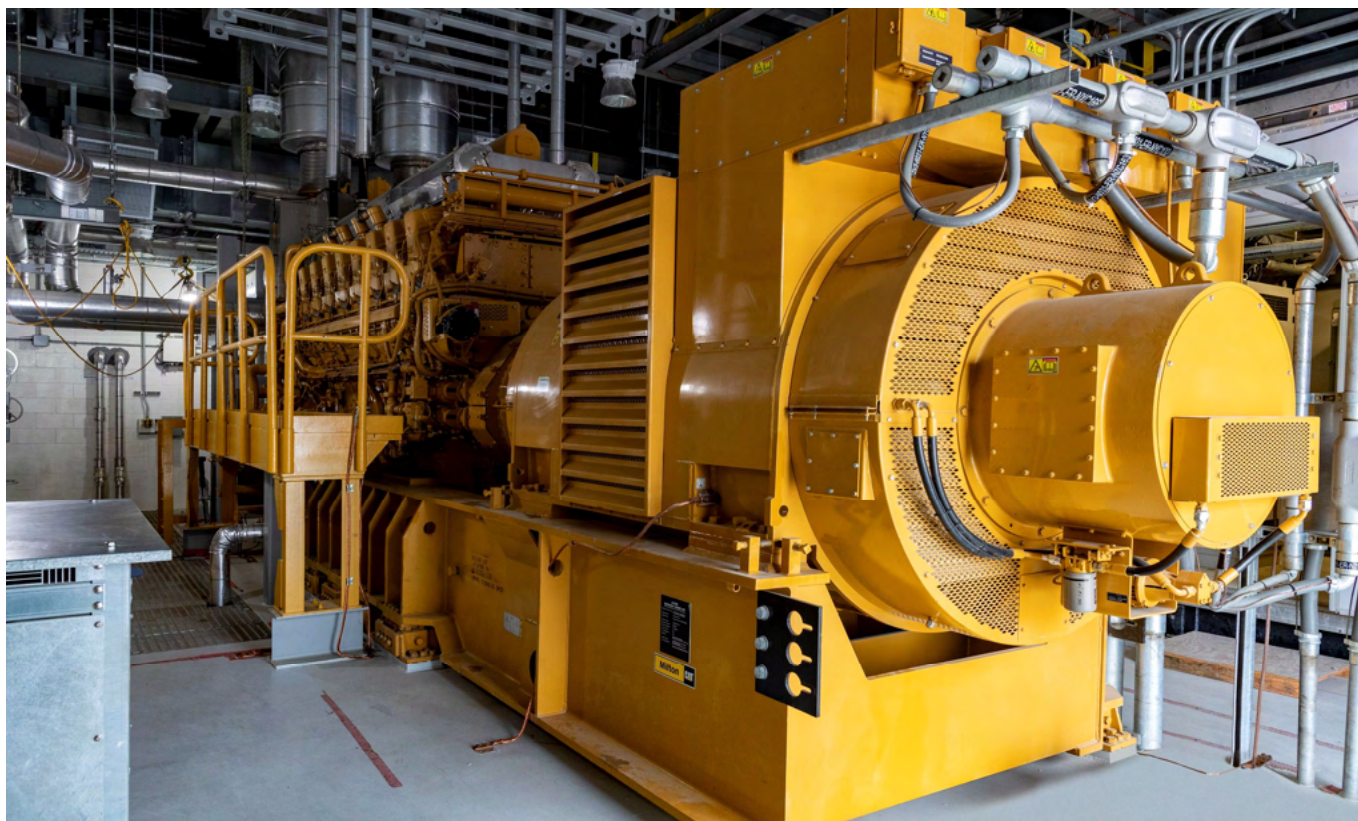
ROZDZIELNICA NISKIEGO NAPIĘCIA

VOGTLE 3 OJT PAA-UDT SIERPIEŃ 2024 R.

W blokach AP1000 w elektrowni Vogtle wykorzystane są rozdzielnice Magnum DS firmy Eaton pracujące na napięciu przemiennym trójfazowym 480 V o znamionowych prądach szyn zbiorczych 800, 1200 i 4000 A.

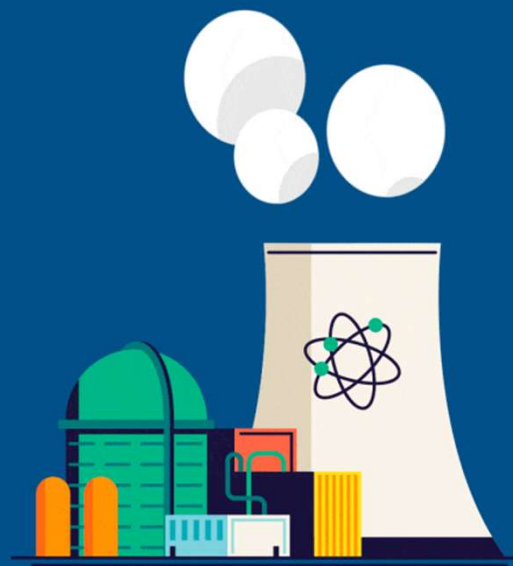


AGREGAT PRĄDOTWÓRCZY (1 Z 2) O MOCY 5,2 MW – VOGTLE 3

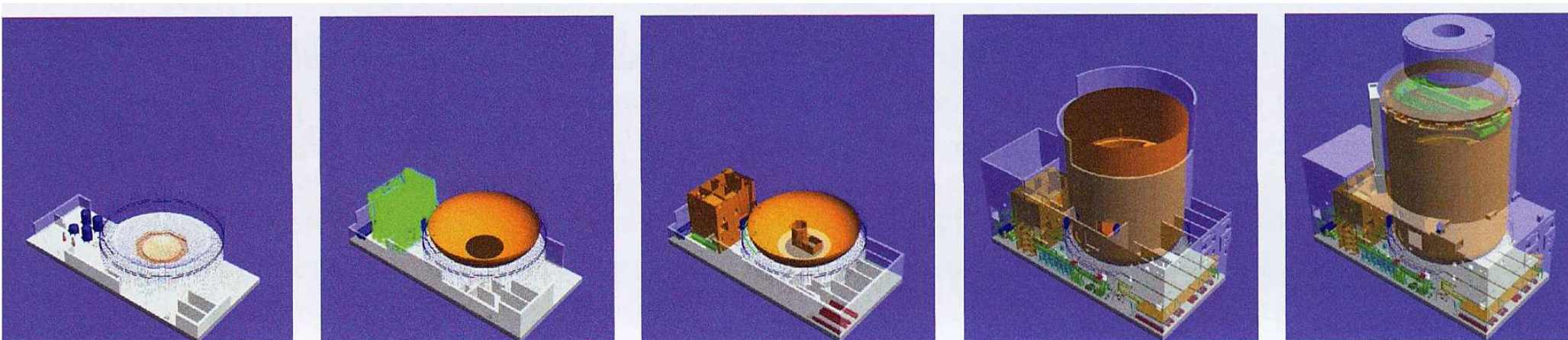


Agregat prądowórczy Catepillar-Milton typu CAT C280-16 z 16-cylindrowym silnikiem wysokoprężnym zainstalowany w energetycznym bloku jądrowym Vogtle 3 (fot. Georgia Power Company)

AP1000 – modułowość konstrukcji



AP1000 – MONTAŻ WYSPY JĄDROWEJ



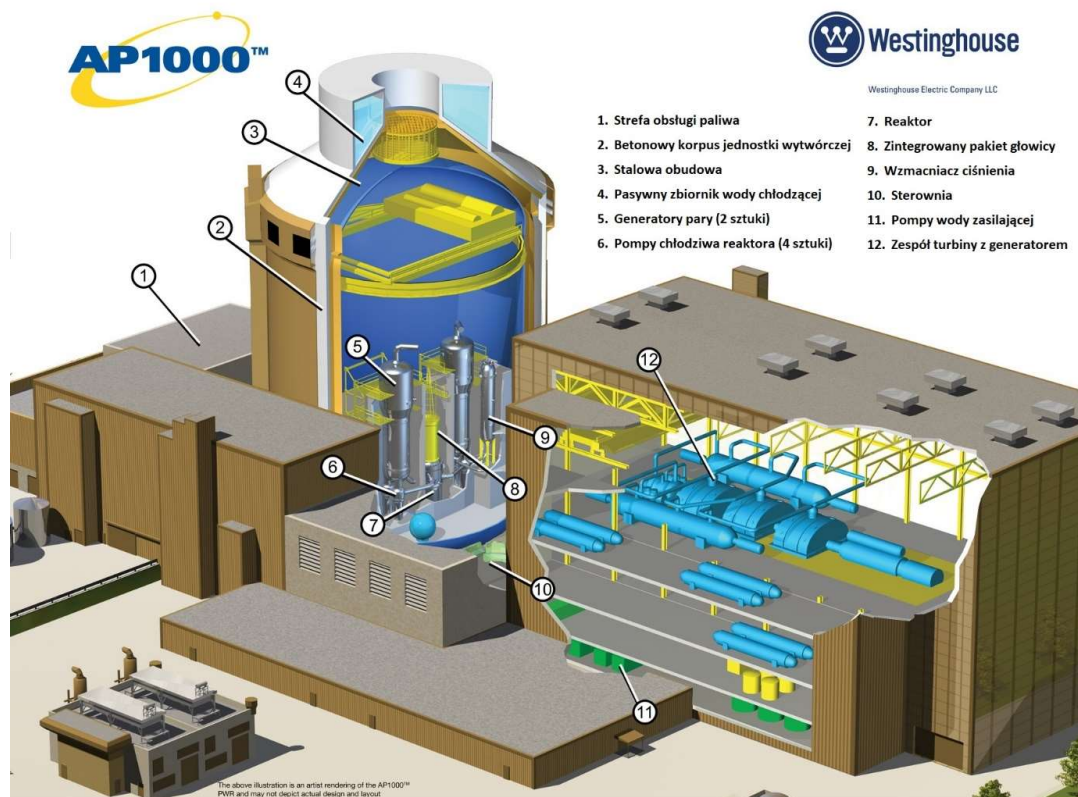
Rys. Westinghouse Electric

- ☐ Na rysunku pokazano kolejne fazy budowy wyspy jądrowej bloku **AP1000 montowanej w technologii modułowej**. W skład konstrukcji wyspy jądrowej wchodzi **137 modułów**.
- ☐ Moduły zostały zaprojektowane w taki sposób, aby mogły być względnie łatwo przewożone transportem samochodowym – na platformach niskopodwoziowych holowanych ciągnikami siodłowymi i na barkach śródlądowych lub morskich.
- ☐ Maksymalne wymiary modułu przeznaczonego do transportu określono na **12 x 12 x 80 stóp** (3,65 x 3,65 x 24,38 m) a masę na **80 ton**. Oczywiście możliwy jest również transport kolejowy przy zachowaniu gabarytów przewożonego obiektu w limitach skrajni ładunkowej.

AP1000 – DUŻY REAKTOR MODUŁOWY (LMR?)

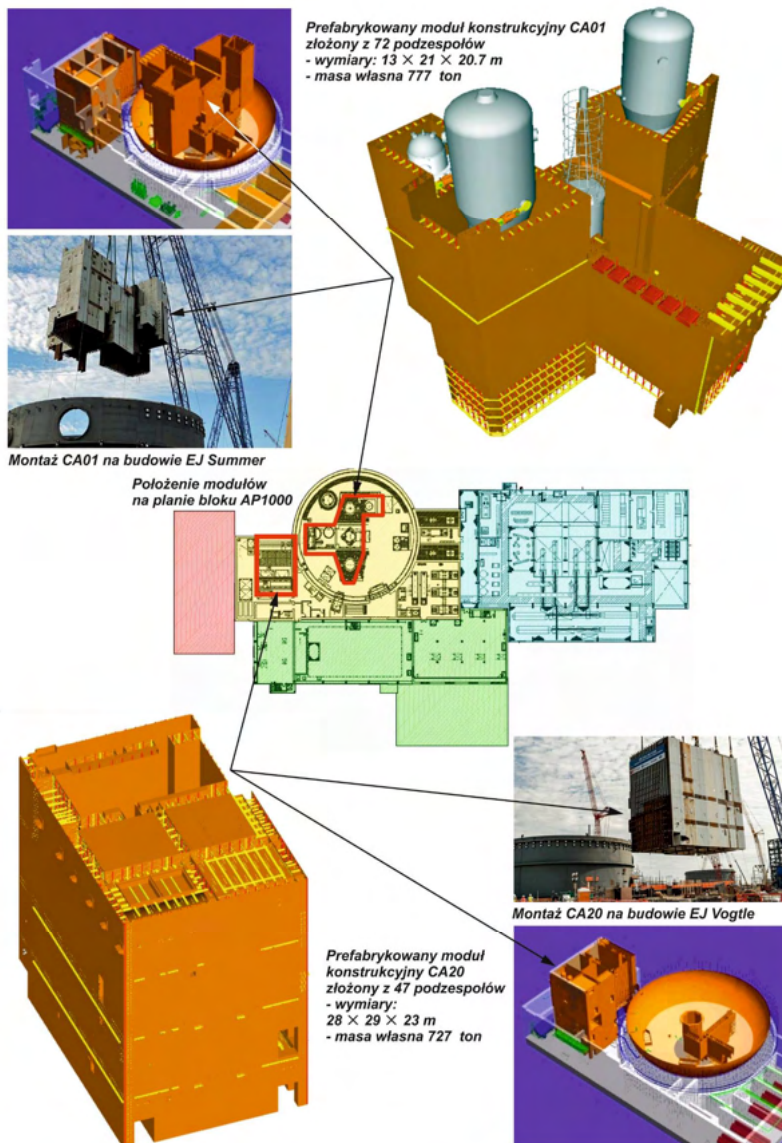


- Uproszczenie systemów
 - Znacząca redukcja materiałów konstrukcyjnych i pracochłonności na placu budowy
- Maksymalne wykorzystanie modularyzacji
 - 300 urządzeń i modułów rurociągów przystosowanych do transportu kolejowego
 - 50 dużych modułów konstrukcyjnych
 - Montaż na budowie na miejscu z modułów przystosowanych do transportu kolejowego
- Produkcja i montaż modułów w warunkach przemysłowych
 - Przewidywalny, krótki harmonogram produkcji
 - Poprawiona kontrola jakości
 - Wstępne testy i kontrola przed wysyłką
- Usprawniona instalacja na budowie
 - Moduły zmniejszają pracochłonność na budowie
 - Stosowanie szczegółowej sekwencji montażu



Rys. Westinghouse Electric

AP1000 – MODUŁY BUDOWLANE



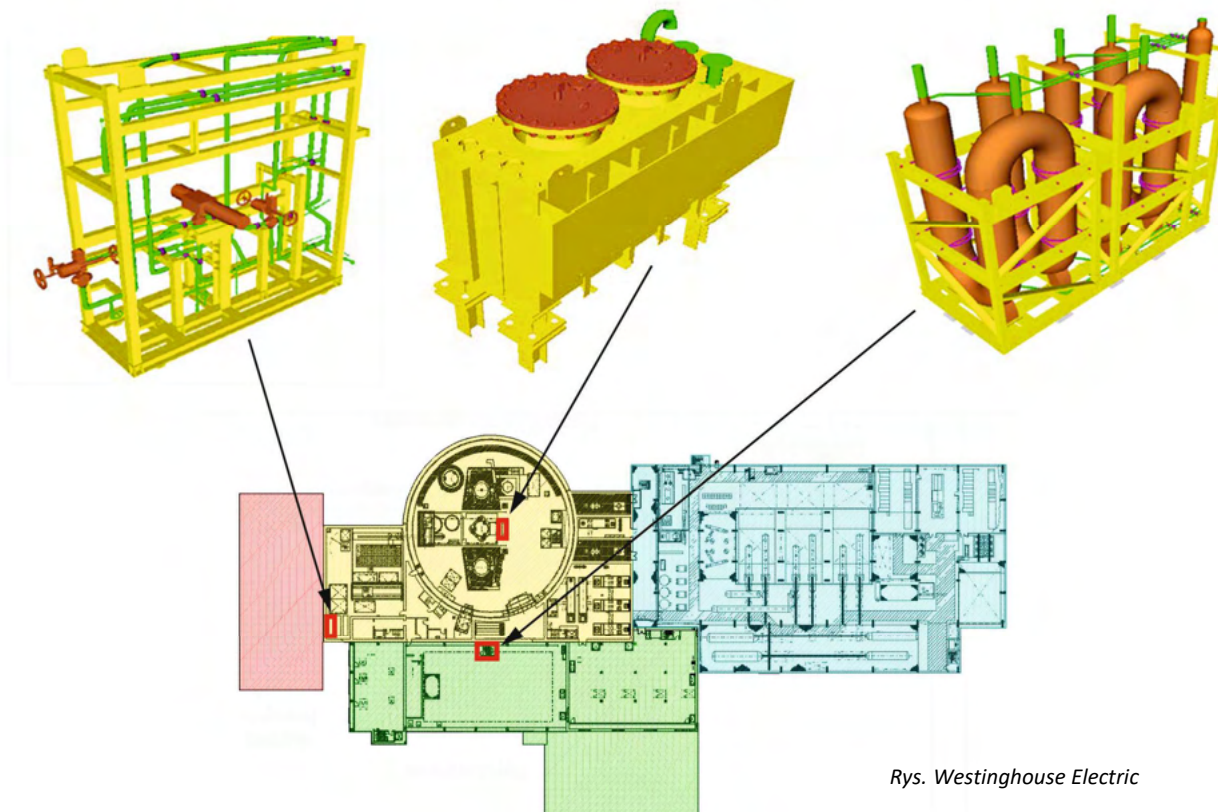
Rys. Westinghouse Electric

AP1000 – MODUŁY MECHANICZNE

Moduł mechaniczny R216:
zespół zaworów systemu ciekłych
odpadów promieniotwórczych (WLS)
- wymiary: $3,68 \times 1,247 \times 3,89$ m
- masa własna 2287 kg

Moduł mechaniczny KQ11:
pompa ciekłych odpadów
promieniotwórczych (WLS)
- wymiary: $2,79 \times 1,37 \times 1,24$ m
- masa własna 3927 kg

Moduł mechaniczny KB04:
zespół zabezpieczenia gazowych
odpadów promieniotwórczych (WGS)
- wymiary: $4,62 \times 1,88 \times 4,55$ m
- masa własna 6902 kg

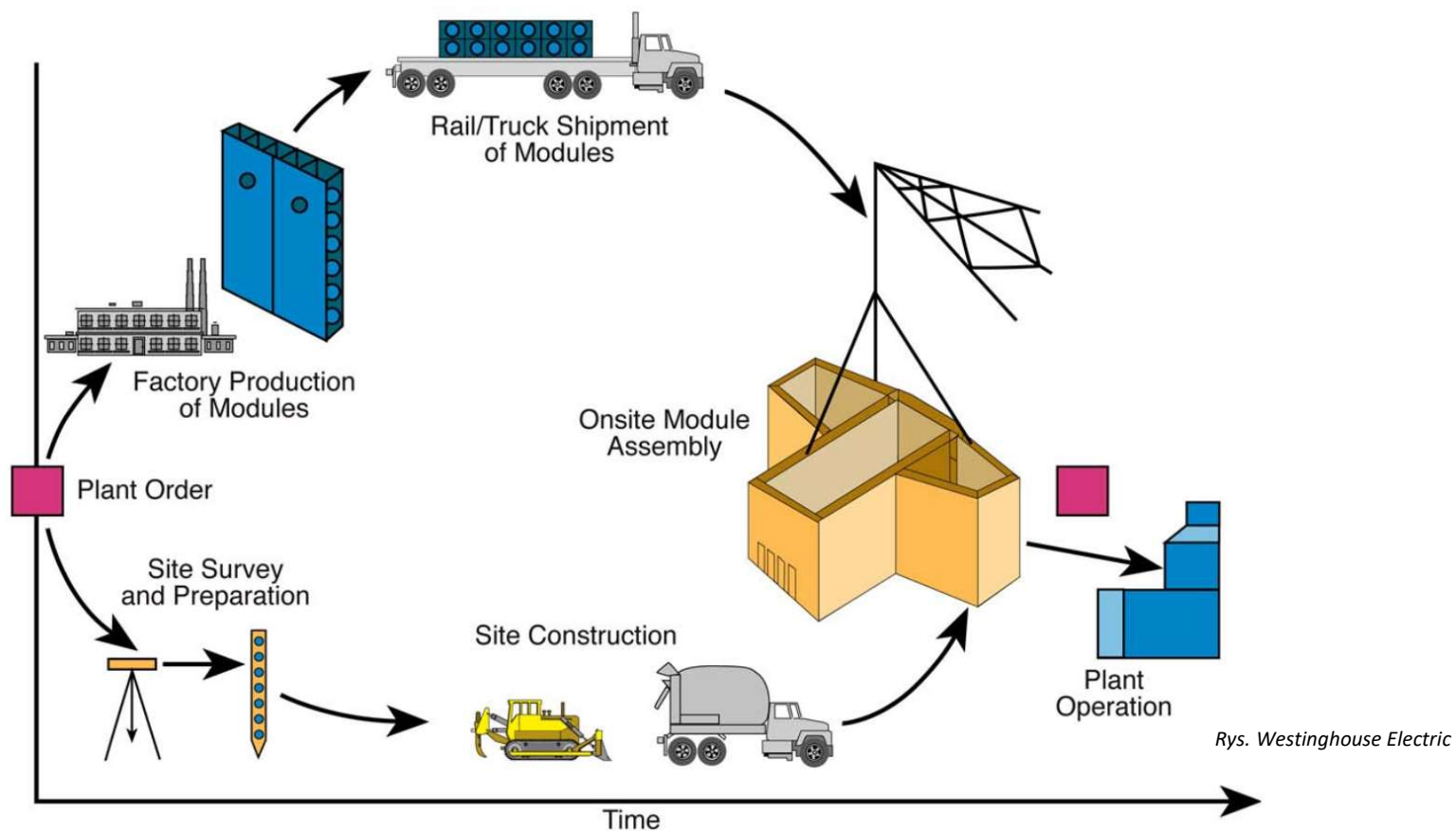


Rys. Westinghouse Electric

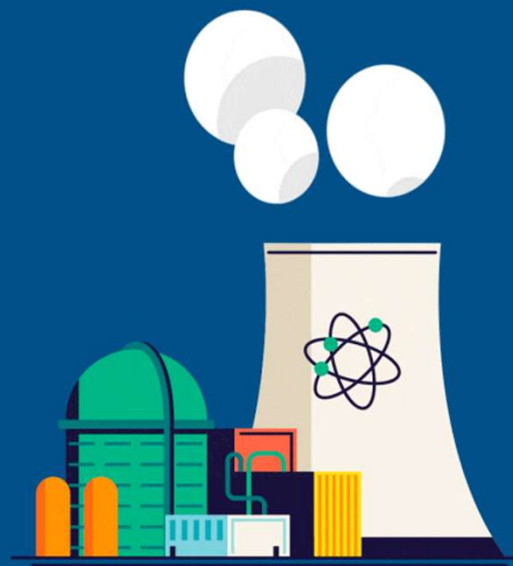
KONSTRUKCJA BUDYNKU REAKTORA



REALIZACJA RÓWNOLEGŁYCH ZADAŃ PRZY MODUŁOWEJ KONSTRUKCJI AP1000



AP1000 – bezpieczeństwo pasywne



BEZPIECZEŃSTWO PASYWNE

- Podstawową zasadą bezpieczeństwa pasywnego jest wykorzystanie rozwiązań technicznych opartych na naturalnych zjawiskach związanych z cyrkulacją czynnika chłodzącego tj. naturalnej konwekcji, kondensacji pary wodnej, odparowywania wody, wtrysku wody wytłaczanej zakumulowanym ciśnieniem poduszki azotowej oraz grawitacyjnego zrzutu wody.
- Podstawowym imperatywem, jakim kierowali się konstruktorzy systemów chłodzenia reaktorów o cechach bezpieczeństwa pasywnego uniezależnienie się od bieżącej dostępności energii elektrycznej lub mechanicznej (np. braku zasilania z sieci energetyki krajowej, a także braku dostawy energii z własnych agregatów prądotwórczych bloku jądrowego).

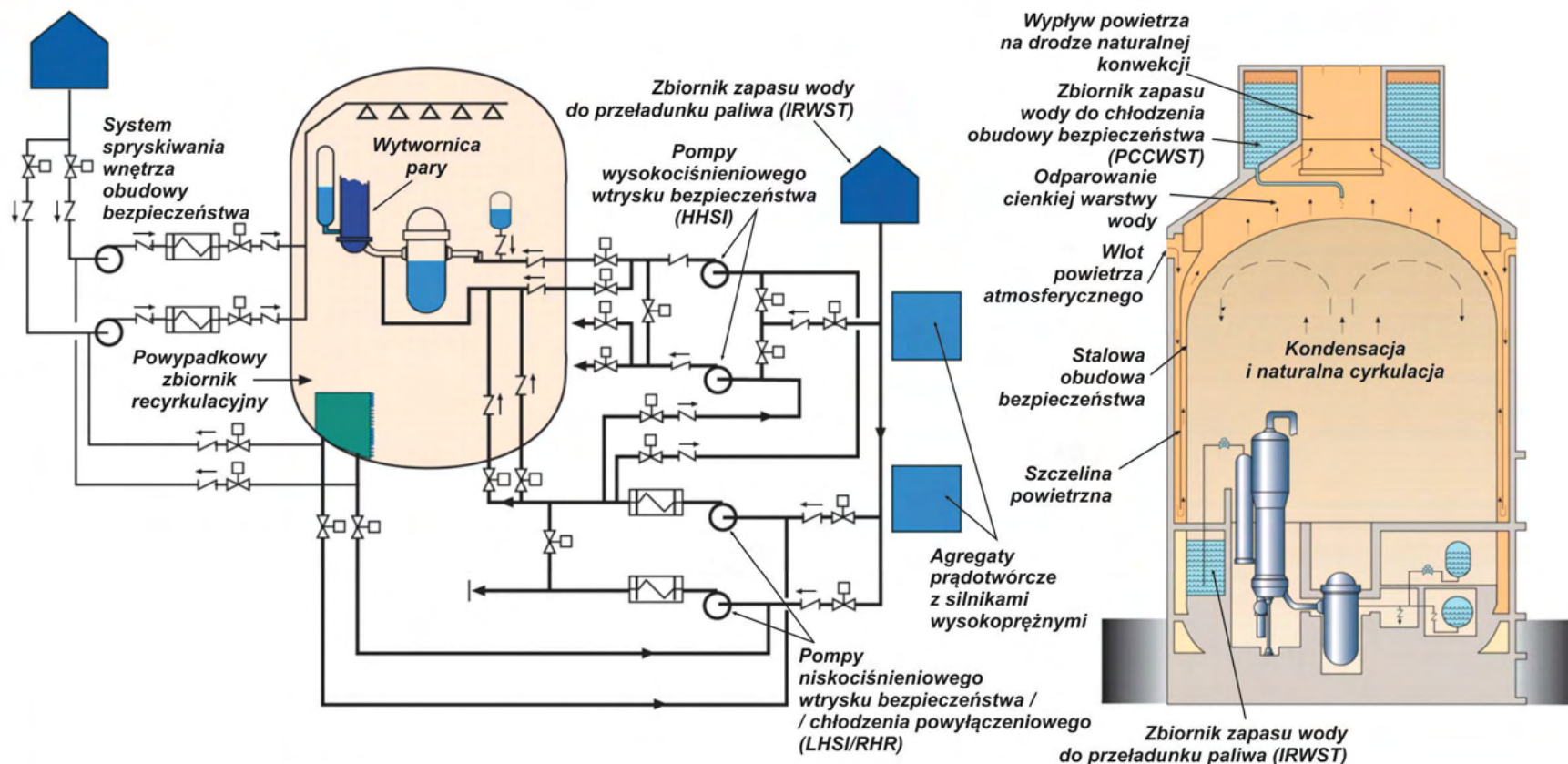
BEZPIECZEŃSTWO PASYWNE



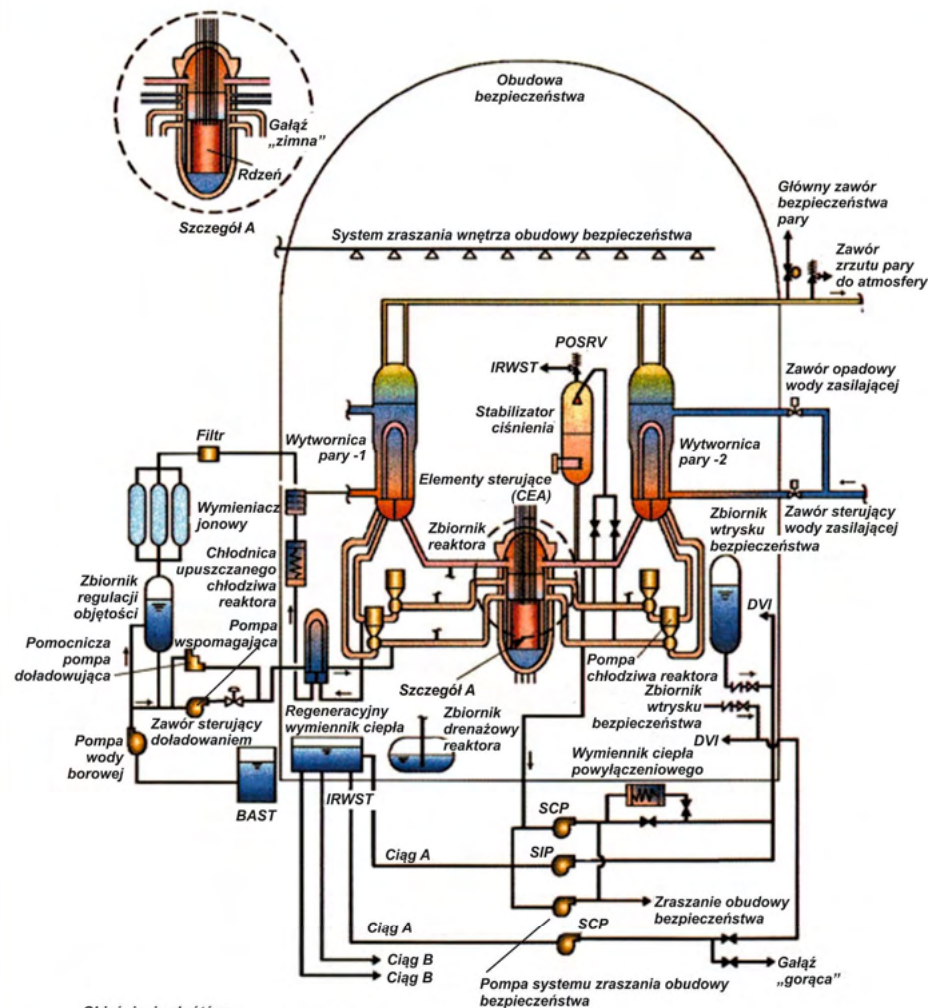
BLOK GENERACJI II



**BLOK AP1000
GENERACJI III+**



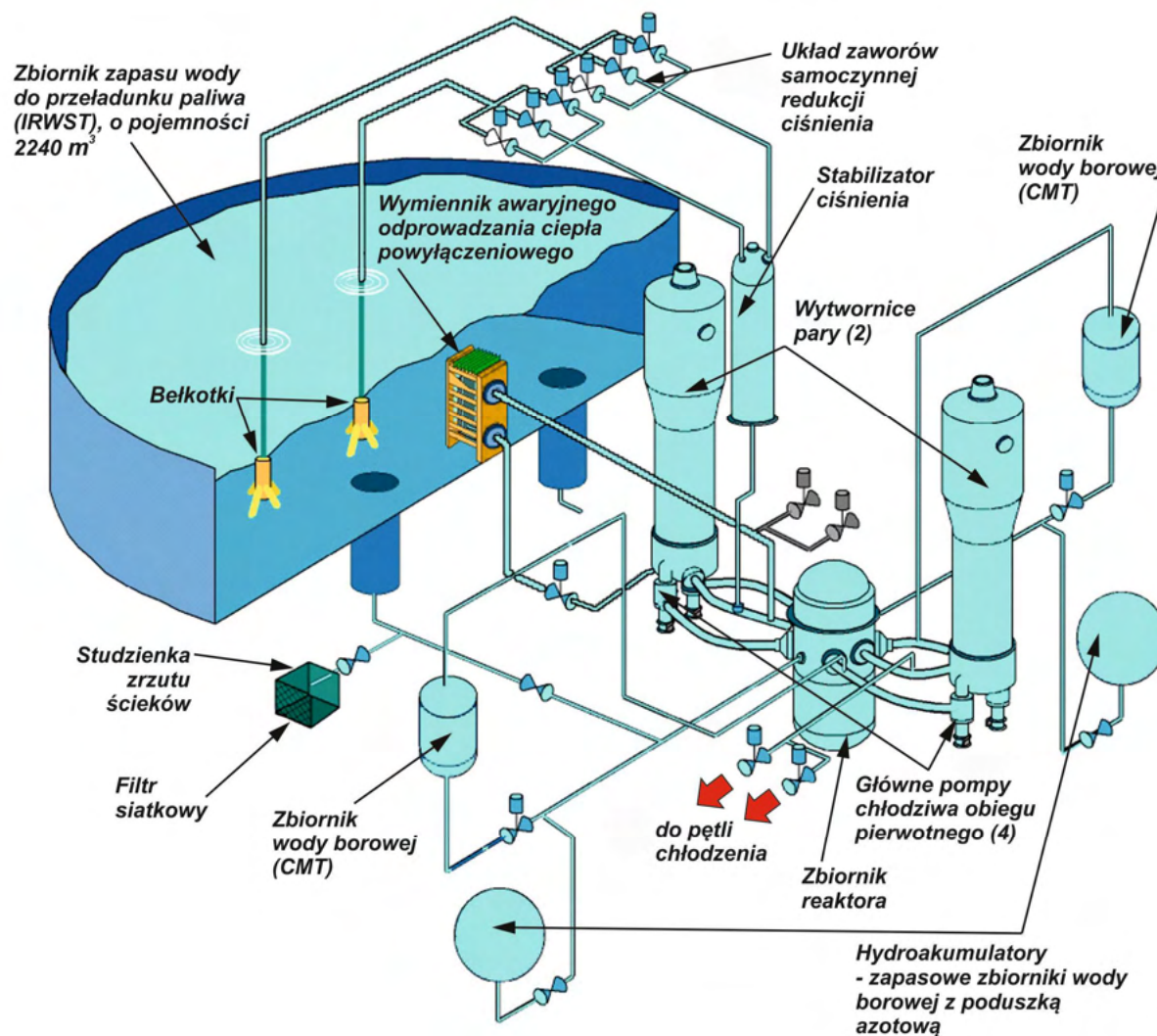
DLA PORÓWNIANIA: SCHEMAT OBIEGU PIERWOTNEGO I TOWARZYSZĄCYCH STEMÓW BEZPIECZEŃSTWA W BLOKU APR-1400



Objaśnienia skrótów:

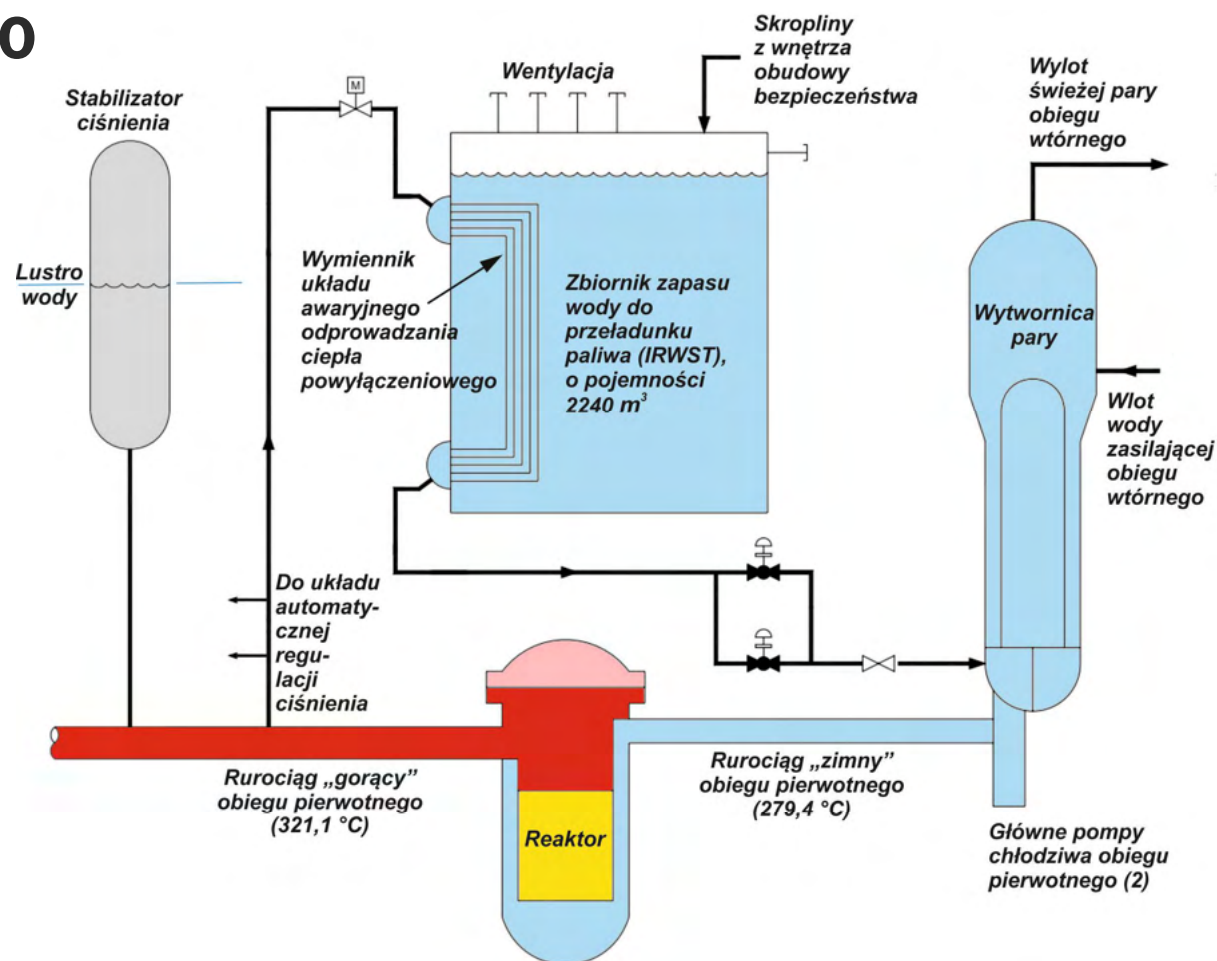
BAST (ang. Boric Acid Storage Tank) - Zbiornik roztworu kwasu borowego
DVI (ang. Direct Vessel Injection) - Bezpośredni wtrysk wody do
IRWST (ang. In-containment Refueling Water Storage Tank) - Zbiornik wody do przeładunku
paliwa zlokalizowany wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora
POSRV (ang. Pilot Operated Safety Relief Valve) - Sterowany zawór bezpieczeństwa
SCP (ang. Shutdown Cooling Pump) - Pompa chłodzenia powylączeniowego
SIP (ang. Safety Injection Pump) - Pompa wtrysku bezpieczeństwa

BLOK AP1000 – BEZPIECZEŃSTWO PASYWNE - ZAPAS WODY WEWNĄTRZ CONTAINMENTU



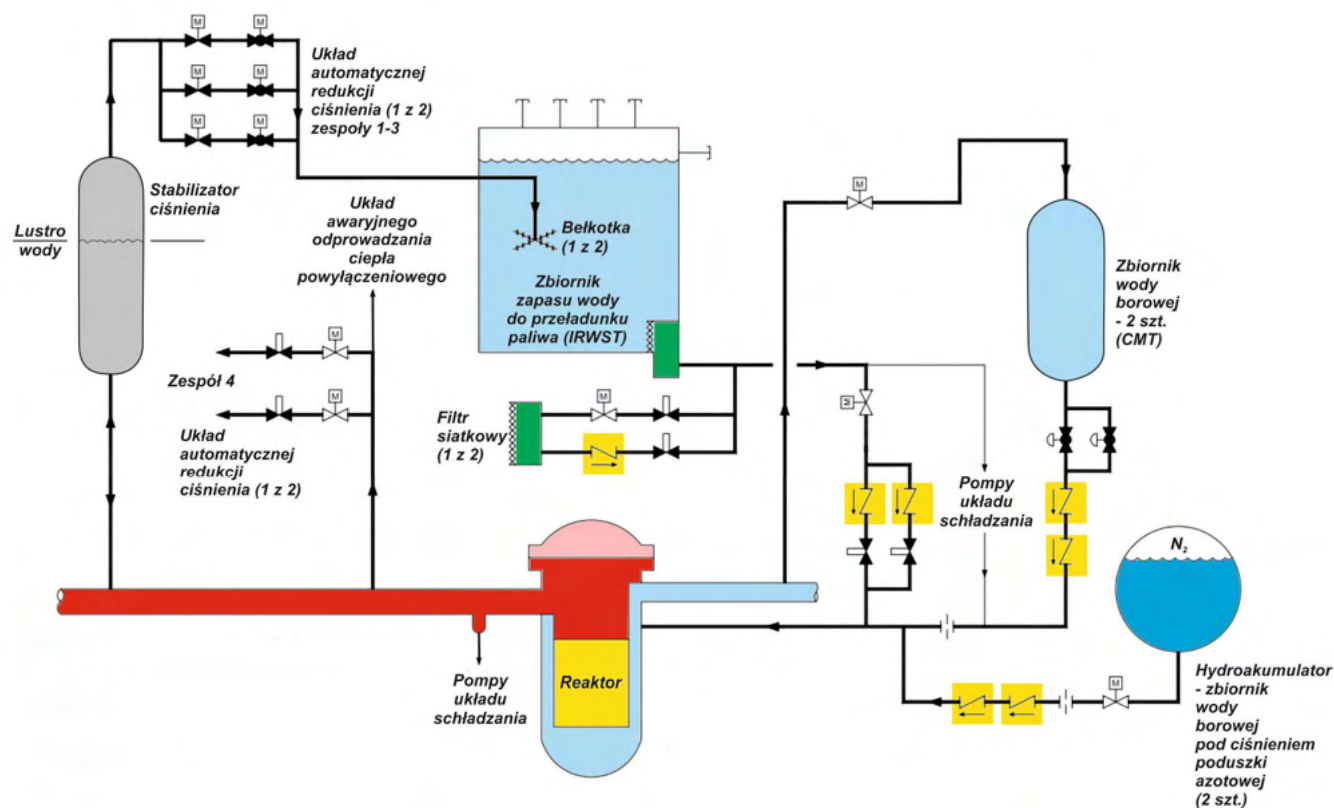
Rys. Westinghouse Electric

BLOK AP1000 – BEZPIECZEŃSTWO PASYWNE



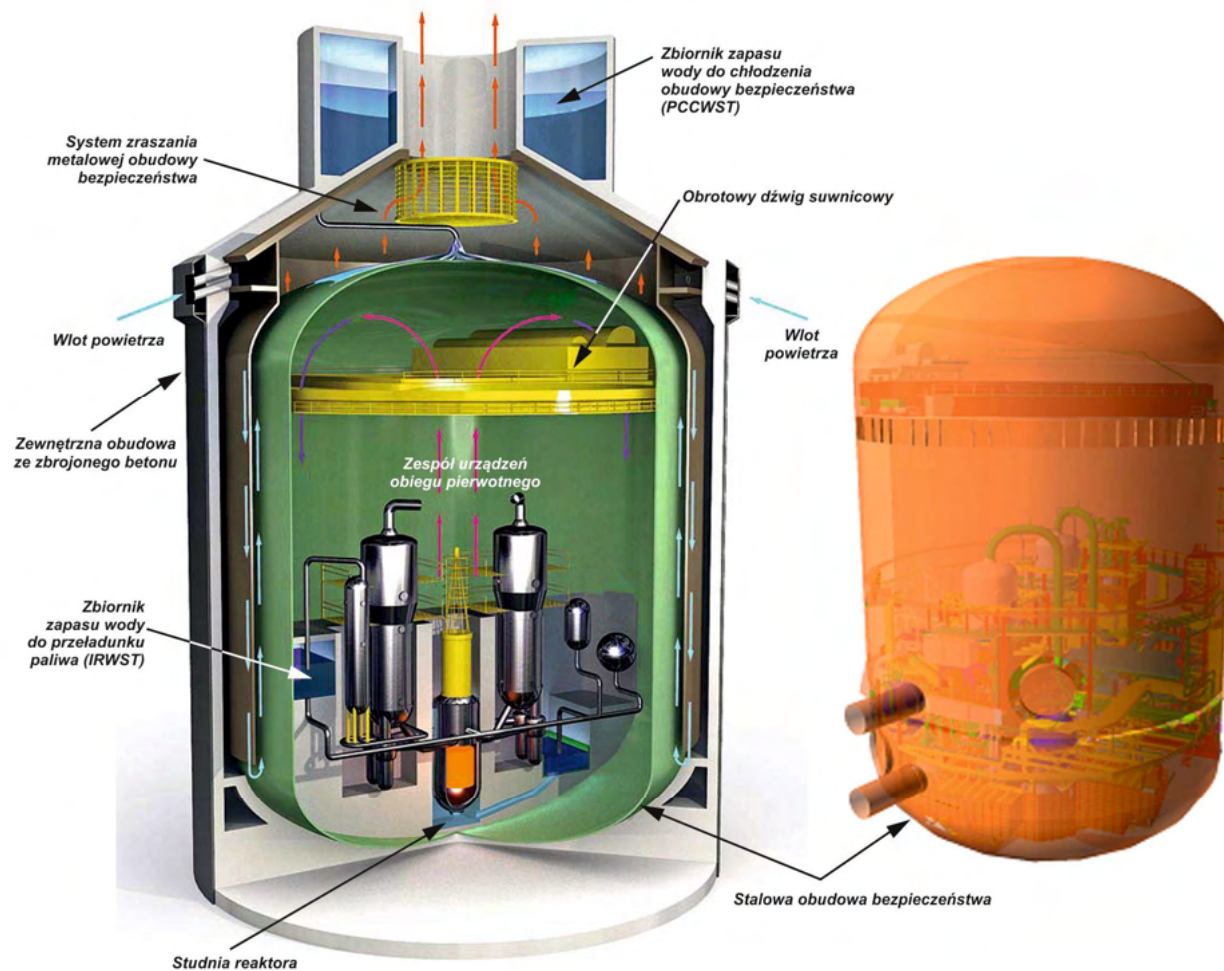
Rys. Westinghouse Electric

BLOK AP1000 – BEZPIECZEŃSTWO PASYWNE



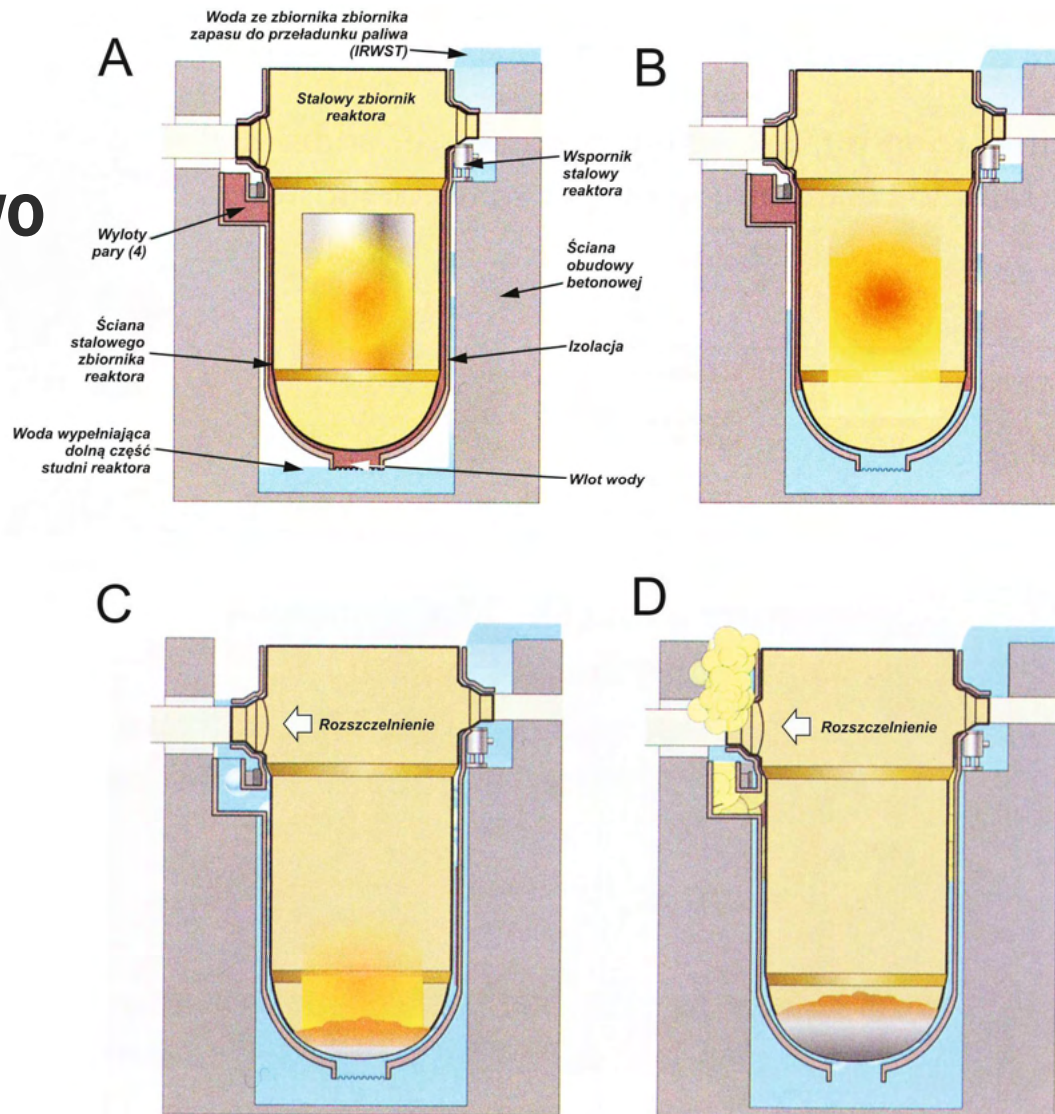
Rys. Westinghouse Electric

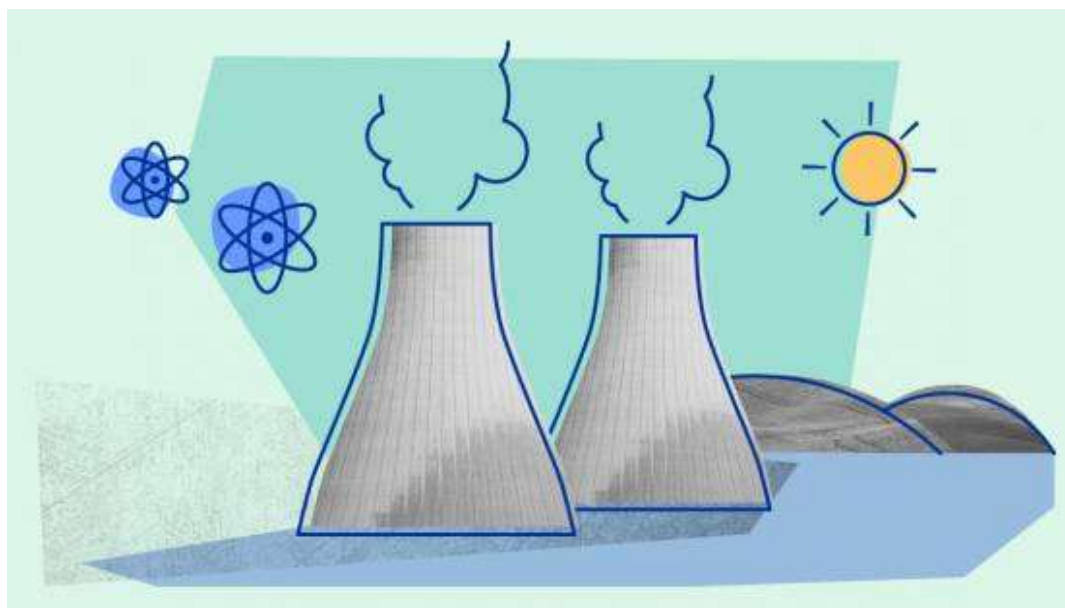
AP1000 - OBUDOWA BEZPIECZEŃSTWA



Rys. Westinghouse Electric

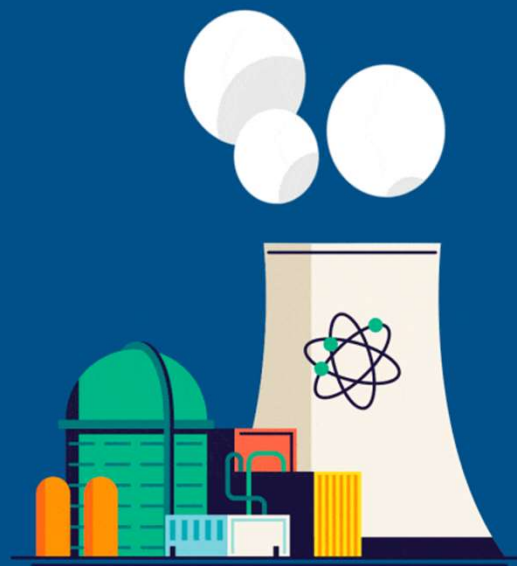
BLOK AP1000 – BEZPIECZEŃSTWO PASYWNE





STEROWNIA BLOKU

Rzut oka na sterownię...



CAŁKOWICIE SKOMPUTERYZOWANA STEROWNIA AP1000 (VOGTLE 3, 4)



SYMULATOR VOGTLE 3 I 4 – SIERPIEŃ 2024 R.



2. Energia jądrowa a sztuczna inteligencja (AI)



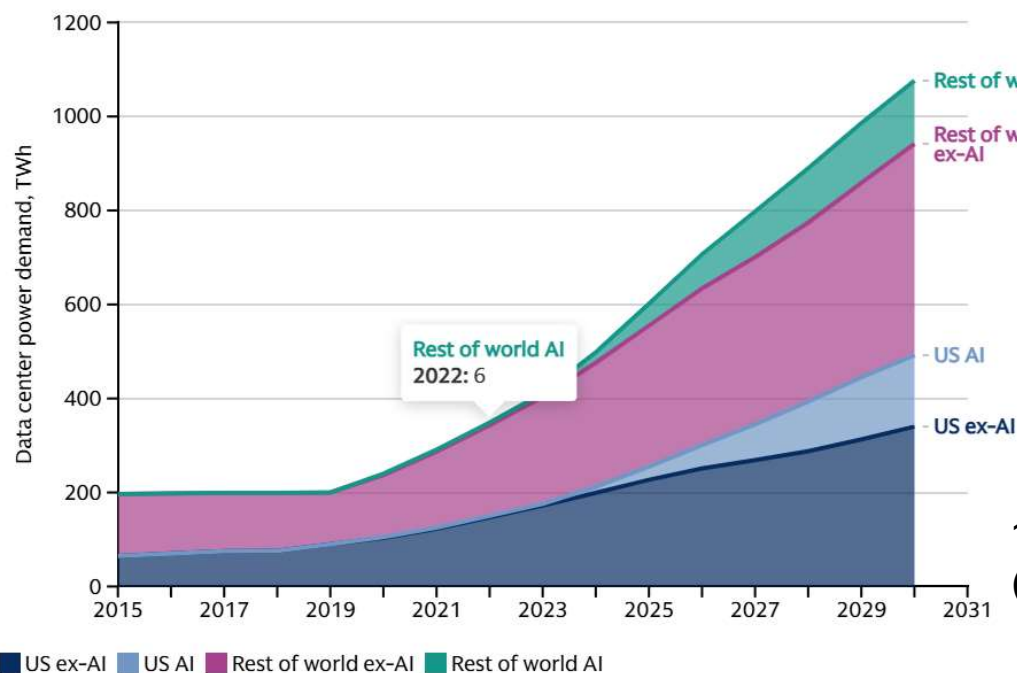
Inwestycje Big Tech w centra danych dedykowane AI

- ▶ Microsoft, Amazon, Apple, Google, Meta i inne duże firmy technologiczne inwestują duże środki w centra danych, w szczególności centra danych „hiperskalowych”, które są nie tylko ogromne pod względem wielkości, ale także pod względem możliwości przetwarzania zadań intensywnie wykorzystujących dane, takich jak generowanie odpowiedzi AI.
- ▶ Pojedyncze centrum danych hiperskalowych może zużywać **ogromne ilości energii elektrycznej przeznaczonej przede wszystkim do chłodzenia potężnych systemów serwerowych.**
- ▶ W Stanach Zjednoczonych są już setki centrów hiperskalowych, plus tysiące mniejszych centrów danych.



Wg ocen Goldman Sachs zapotrzebowanie energetyczne centrów danych wzrośnie o 160% do 2030 r.

Our analysts expect data center power consumption to increase by more than 160% by 2030



1033 TWh - zużycie roczne energii w Japonii (2022)

178 TWh - zużycie roczne energii w Polsce (2022)

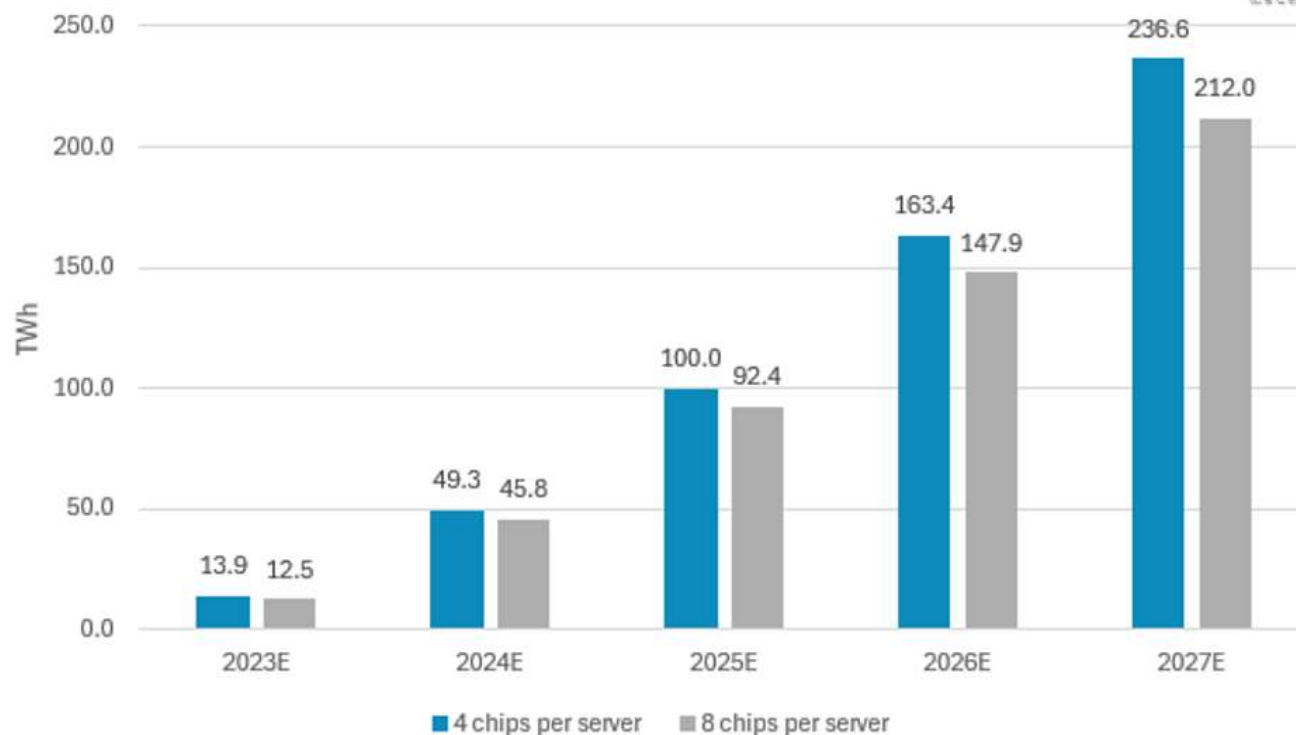
Source: Masanet et al. (2020), Cisco, IEA, Goldman Sachs Research
Figures for 2024-2030 are estimates

Goldman Sachs

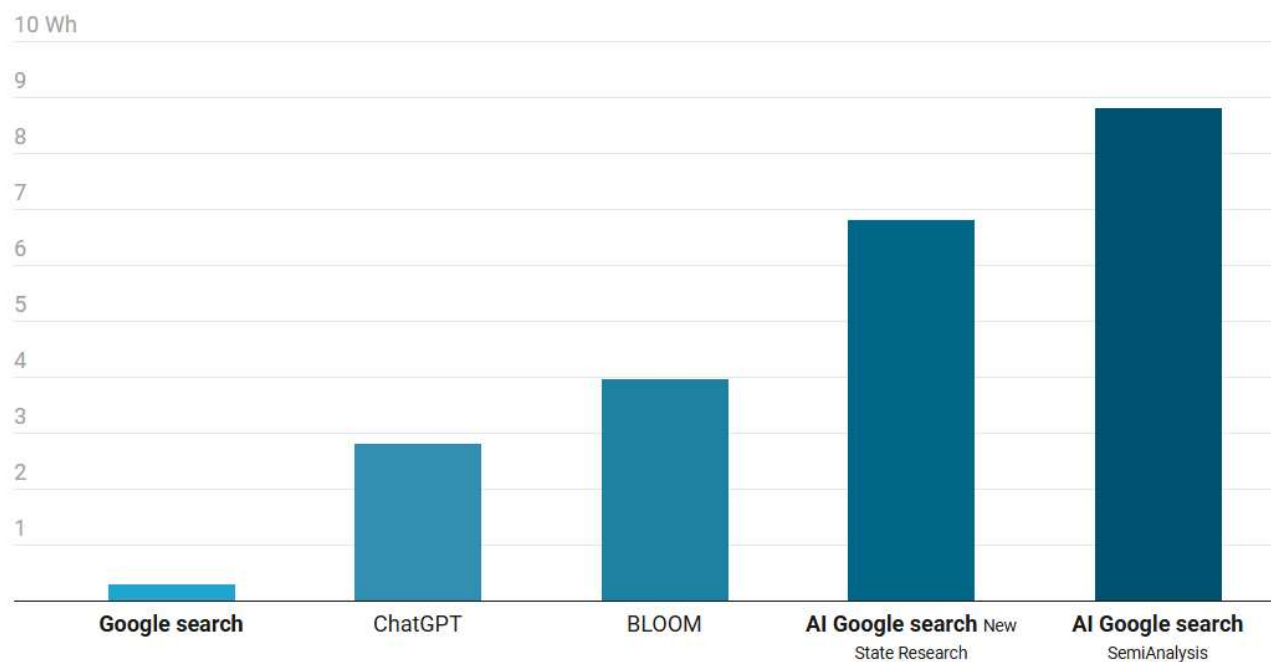
Rosnące zapotrzebowanie na energię dla centrów danych dedykowanych AI 2023-2027

Source: Morgan Stanley

Generative AI Power Demand (Base Case)



Ile energii elektrycznej potrzebne jest na pojedynczą odpowiedź wyszukiwarki? [Wh]



Prompt response. Estimated energy consumption per request for various AI-powered systems compared to a standard Google search. Chart by Thomas Gaulkin / Datawrapper, from Alex de Vries, "The growing energy footprint of artificial intelligence," *Joule*, Volume 7, Issue 10, October 2023.

Drugie życie Elektrowni Jądrowej Three Mile Island (TMI-1)

- ▶ Dwublokowa Elektrownia Jądrowa Three Mile Island w Harrisburgu w Pensylwanii: TMI-1, TMI-2.
- ▶ Blok TMI-2 - po głośniej awarii z 1979 roku nigdy nie wrócił do ruchu.
- ▶ Właściciel - Constellation Energy wyłączył blok TMI-1 (eksploatowany od 1974 r.) w 2019 r. uznając dalszą eksploatację za nieopłacalną.
- ▶ Obecnie trwają przygotowania do uruchomienia obiektu, który ma zasilić w energię elektryczną nowe centrum danych firmy Microsoft (wyłącznie odbiorca).
- ▶ Znamionowa moc elektryczna TMI-2: 819 MW - normalnie wystarczająca dla zasilenia 800 tysięcy gospodarstw domowych.



Elektrownia Jądrowa Palisades

- ▶ Kolejna amerykańska elektrownia jądrowa powracająca do ruchu na skutek zwiększonego zapotrzebowania na moc elektryczną to Palisades w stanie Michigan (805 MW).
- ▶ Była ona pierwotnie eksploatowana w latach 1971-2022.
- ▶ Zakupiona przez firmę Holtec z zamiarem budowy na tym terenie SMR-ów. Po analizach ekonomicznych zdecydowano się ją ponownie uruchomić.



A jak AI może służyć energetyce jądrowej?

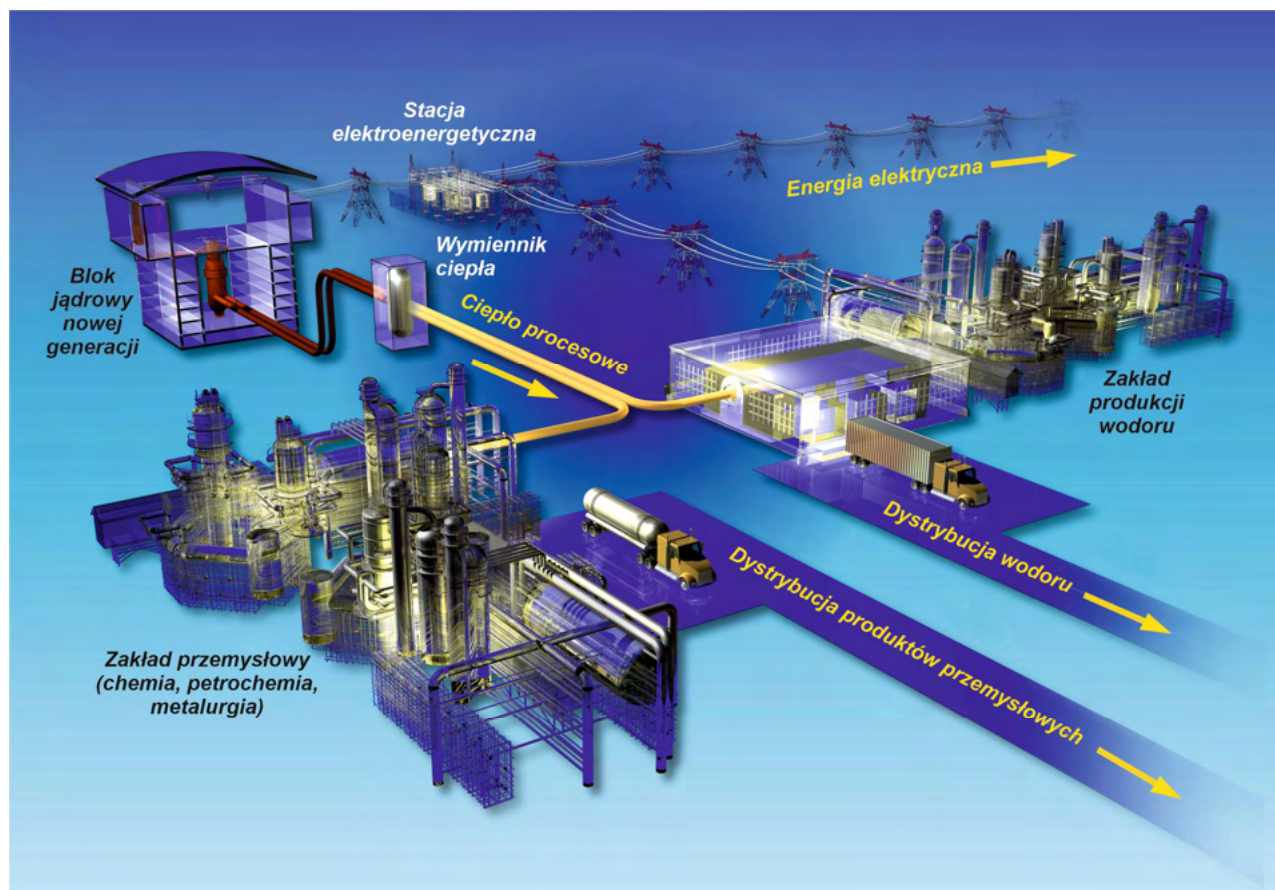
- ▶ **Optymalizacja projektu reaktora:** AI może pomóc w projektowaniu i budowie elektrowni jądrowych.
- ▶ **Poprawa wydajności eksploatacyjnej:** AI może pomóc w automatyzacji zadań, obniżeniu kosztów konserwacji i optymalizacji działania elektrowni.
- ▶ **Wykrywanie anomalii:** AI może analizować dane z czujników w celu identyfikacji anomalii i przewidywania potrzeb konserwacyjnych.
- ▶ **Poprawa bezpieczeństwa:** AI może pomóc w ulepszeniu środków bezpieczeństwa i zmniejszeniu ryzyka.
- ▶ **Ulepszanie zdalnego podejmowania decyzji:** AI może pomóc w ulepszeniu zdalnych procesów podejmowania decyzji.
- ▶ **Analizowanie wielkich zbiorów danych eksploatacyjnych** - np. dane niezawodnościowe działania układu podnoszenia-opuszczania prętów sterujących reaktora (AMS).



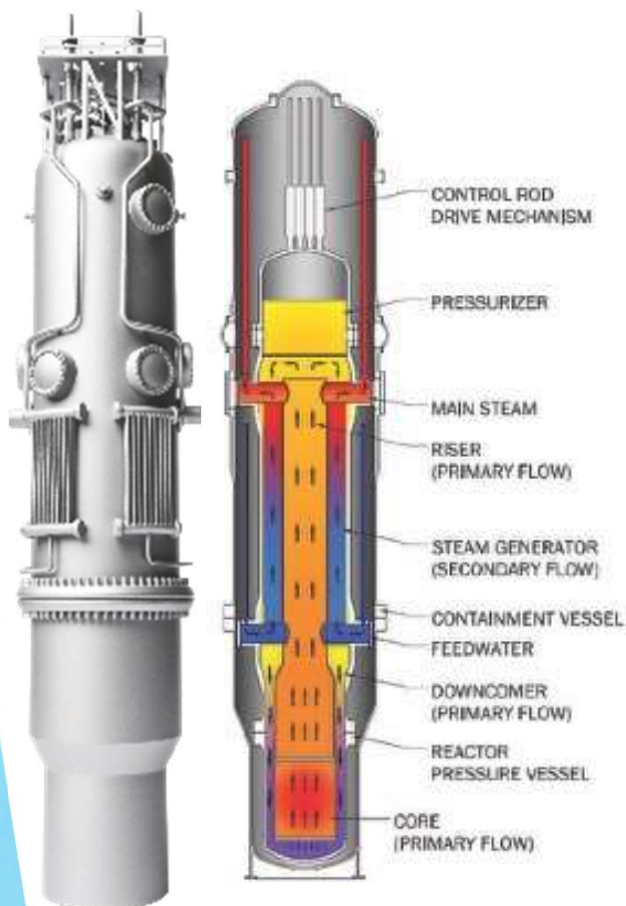
3. Energia jądrowa a przemysł przyszłości



Energia jądrowa - niezawodne źródło ciepła i elektryczności dla przemysłu



SMR-PWR: Nuscale 5 x 77 MW = 385 MW



Źródło: Nuscale



Obieg bezpompowy - bezpieczeństwo pasywne!

SMR-BWR: General Electric Hitachi BWRX-300



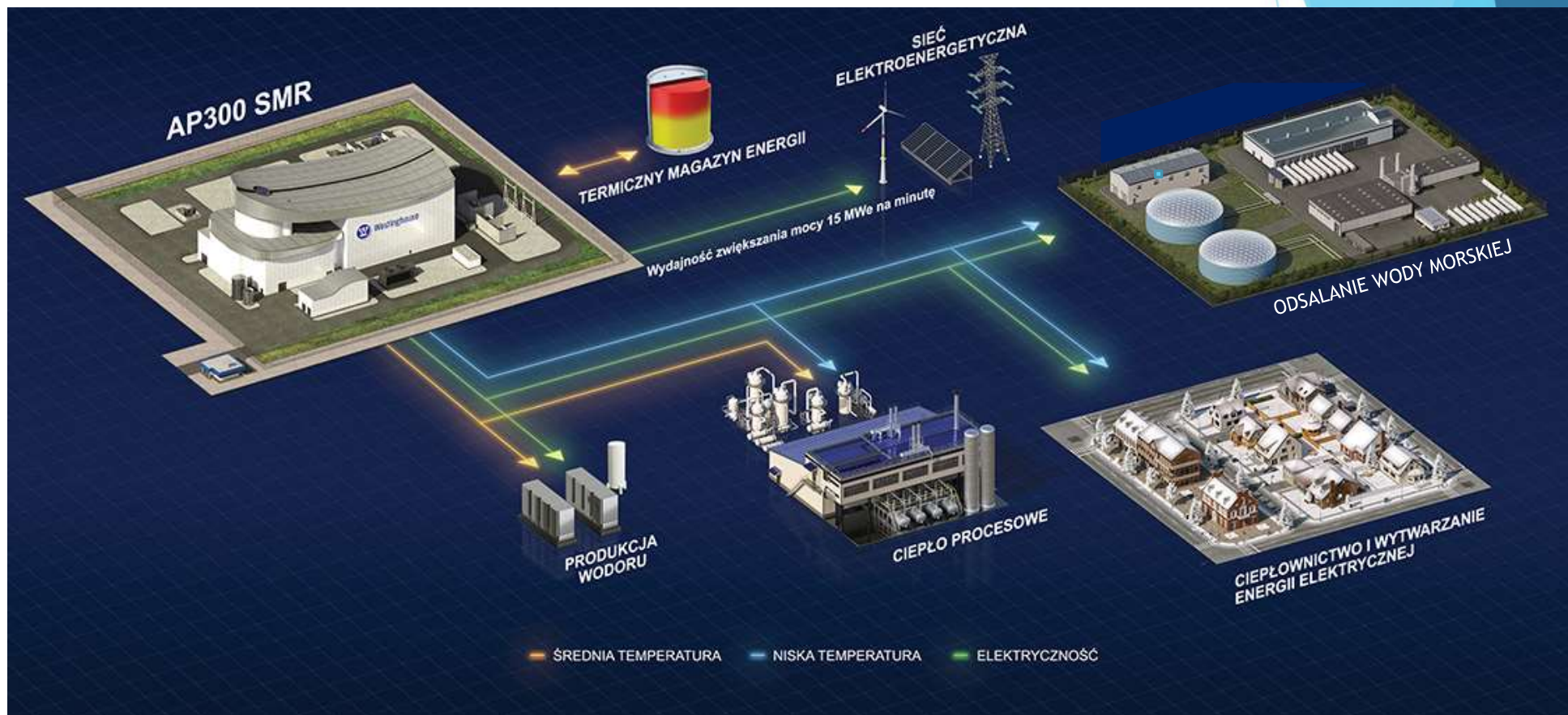
AP300 - SMR na bazie rozwiązań AP1000



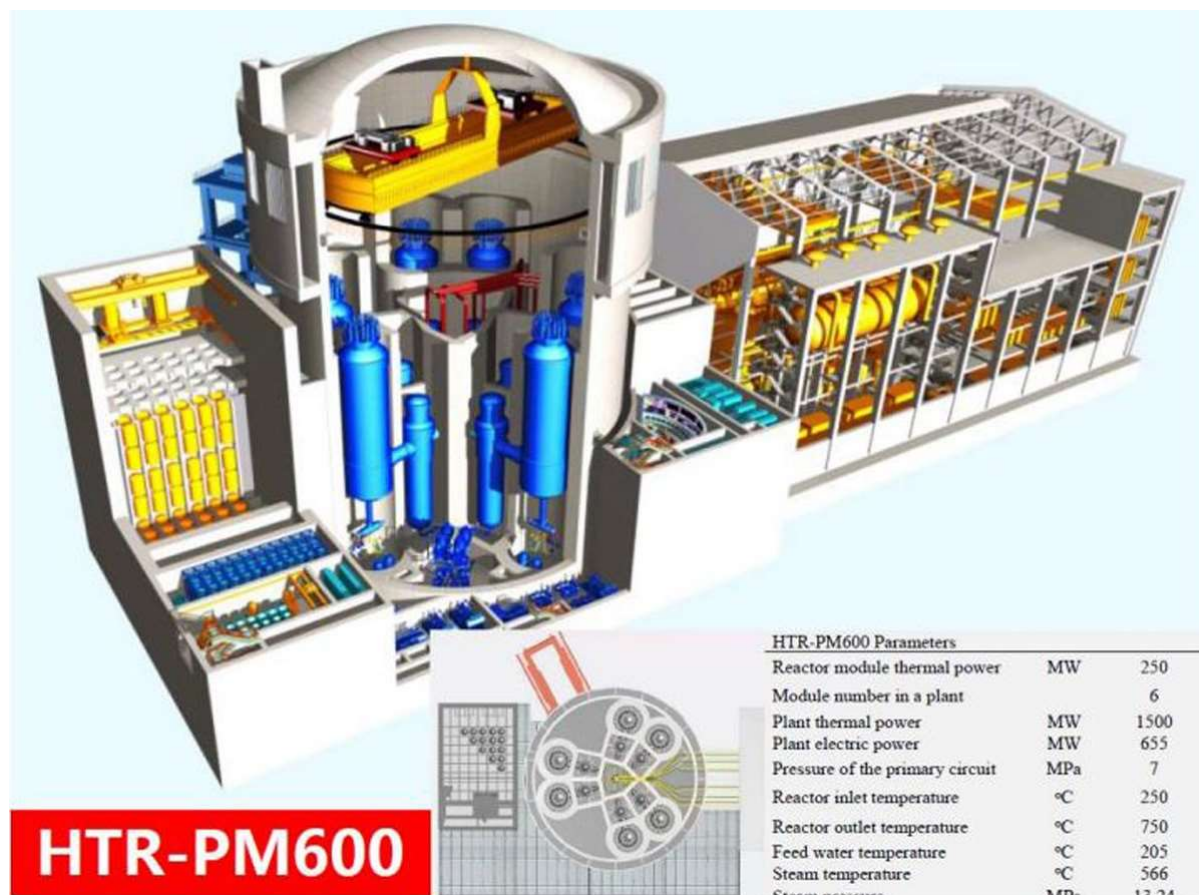
AP300 - SMR na bazie rozwiązań AP1000



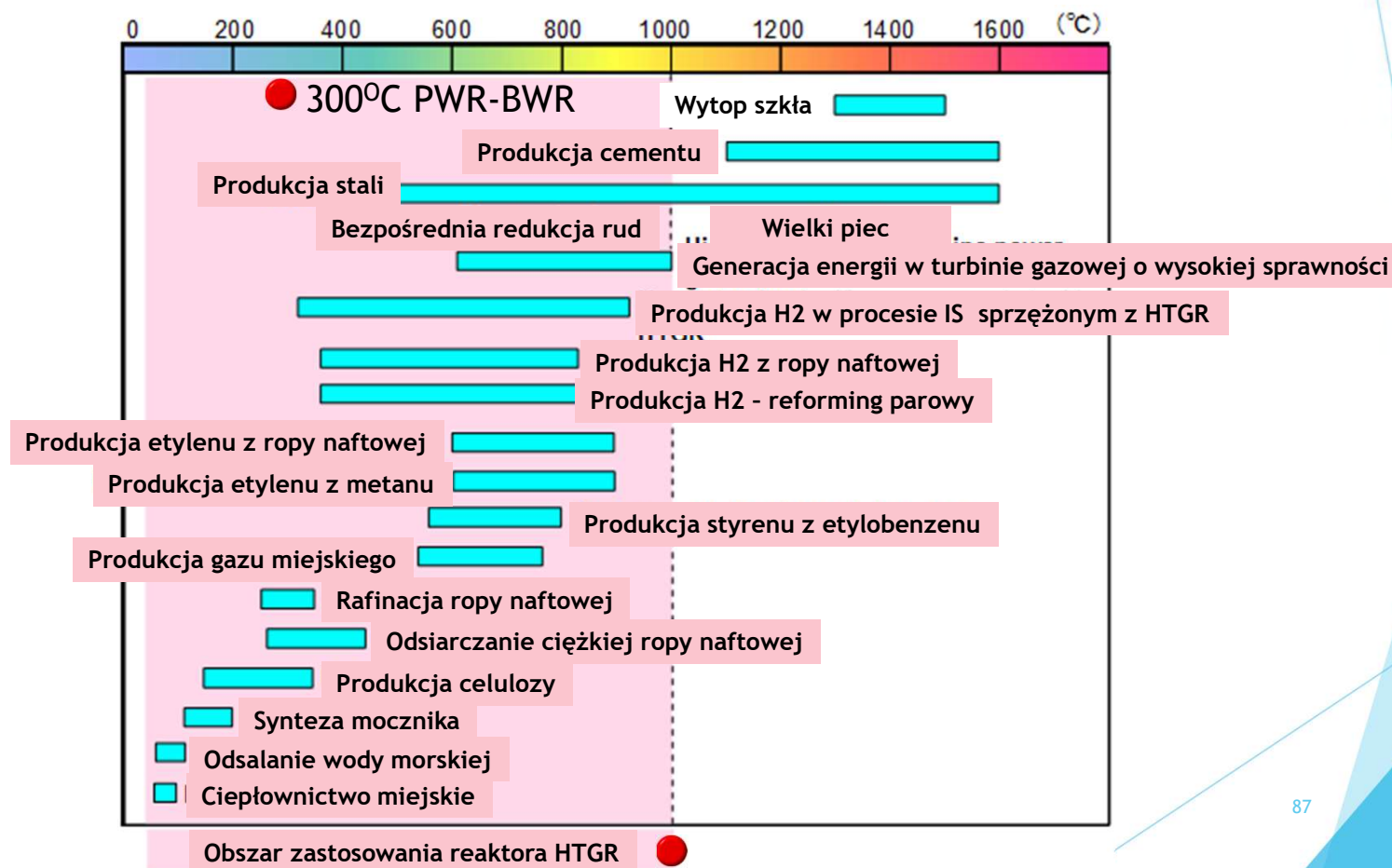
Aplikacje AP300



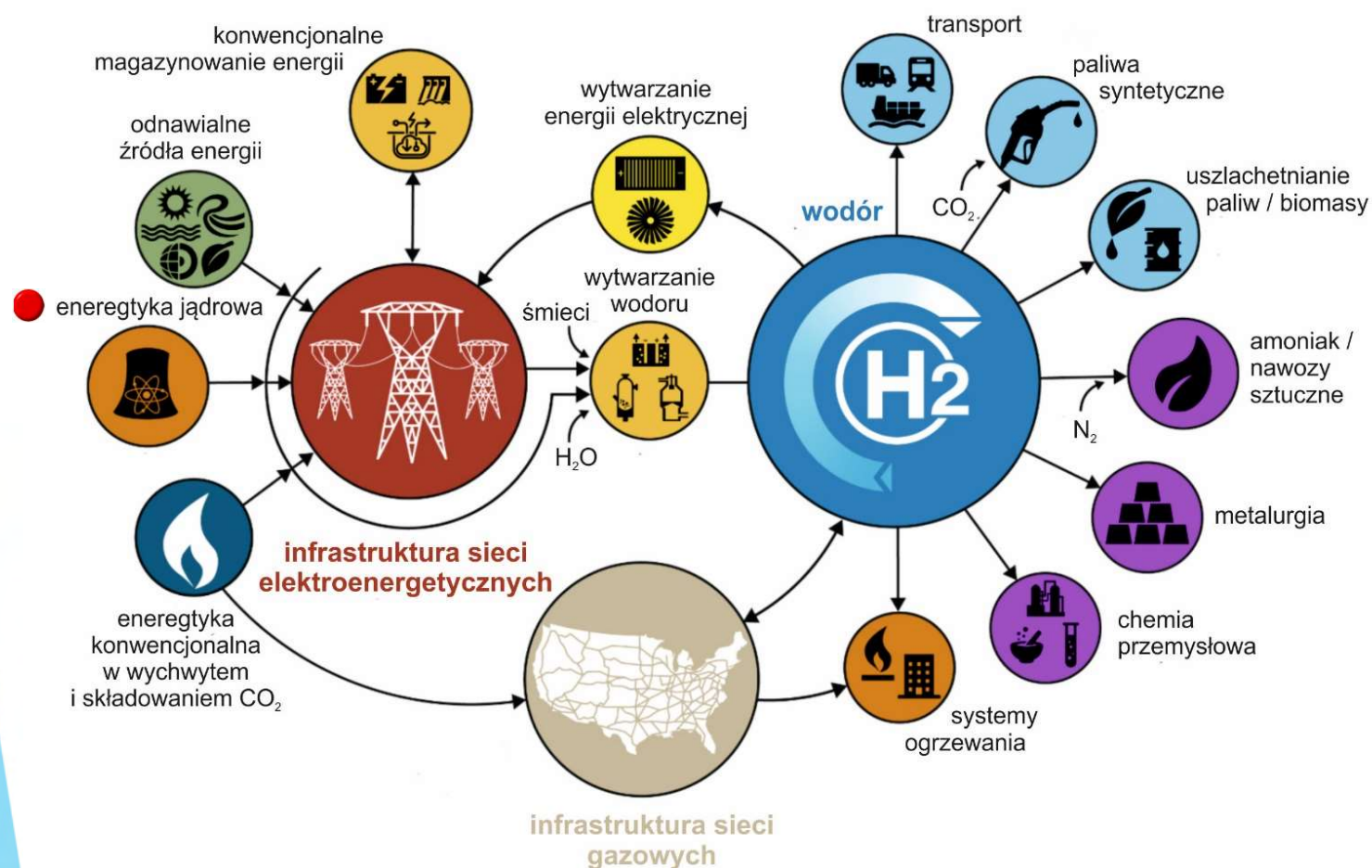
Reaktor wysokotemperaturowy HTR-PM600 (750°C)



Temperatury różnych procesów technologicznych



Energia jądrowa - element energetyki wodorowej



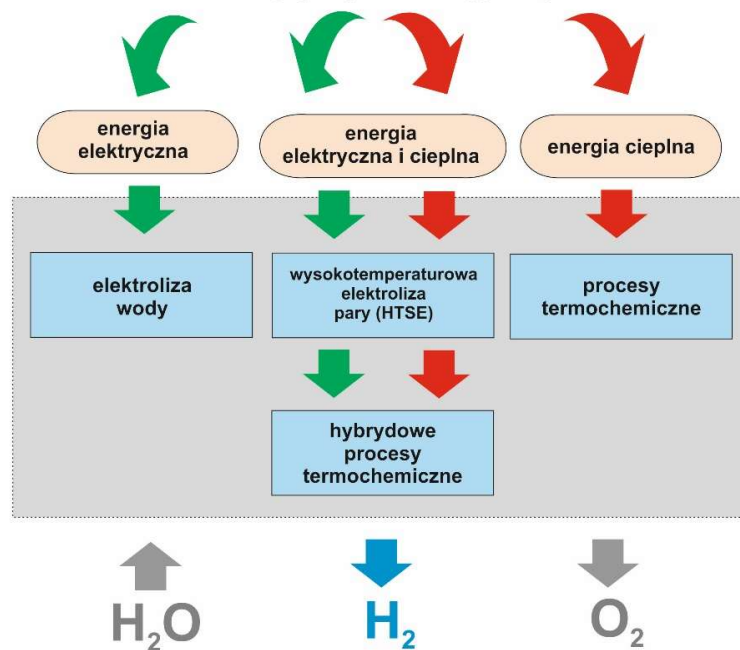
Co to jest wodór czerwony i wodór różowy?

	Kolor	Surowiec / źródło energii	Proces technologiczny	Produkty reakcji
●	Czarny	Węgiel	Reforming parowy lub gazyfikacja	$H_2 + CO_2$ (dwutlenek węgla uwalniany do atmosfery)
	Biały	-	Naturalna obecność w skorupie ziemskiej	H_2
	Szary	Gaz ziemny	Reforming parowy	$H_2 + CO_2$ (dwutlenek węgla uwalniany do atmosfery)
	Niebieski	Gaz ziemny	Reforming parowy	$H_2 + CO_2$ (część dwutlenku węgla wychwytyw- ana i składowana)
	Turkusowy	Gaz ziemny	Piroliza	$H_2 + C$ (węgiel odbierany jako ciało stałe - sadza)
●	Czerwony	Energia jądrowa	Podział katalityczny	$H_2 + O_2$
●	Różowy	Energia jądrowa	Elektroliza	$H_2 + O_2$
	Żółty	Energia słoneczna	Elektroliza	$H_2 + O_2$
	Zielony	Odnawialne źródła energii	Elektroliza	$H_2 + O_2$

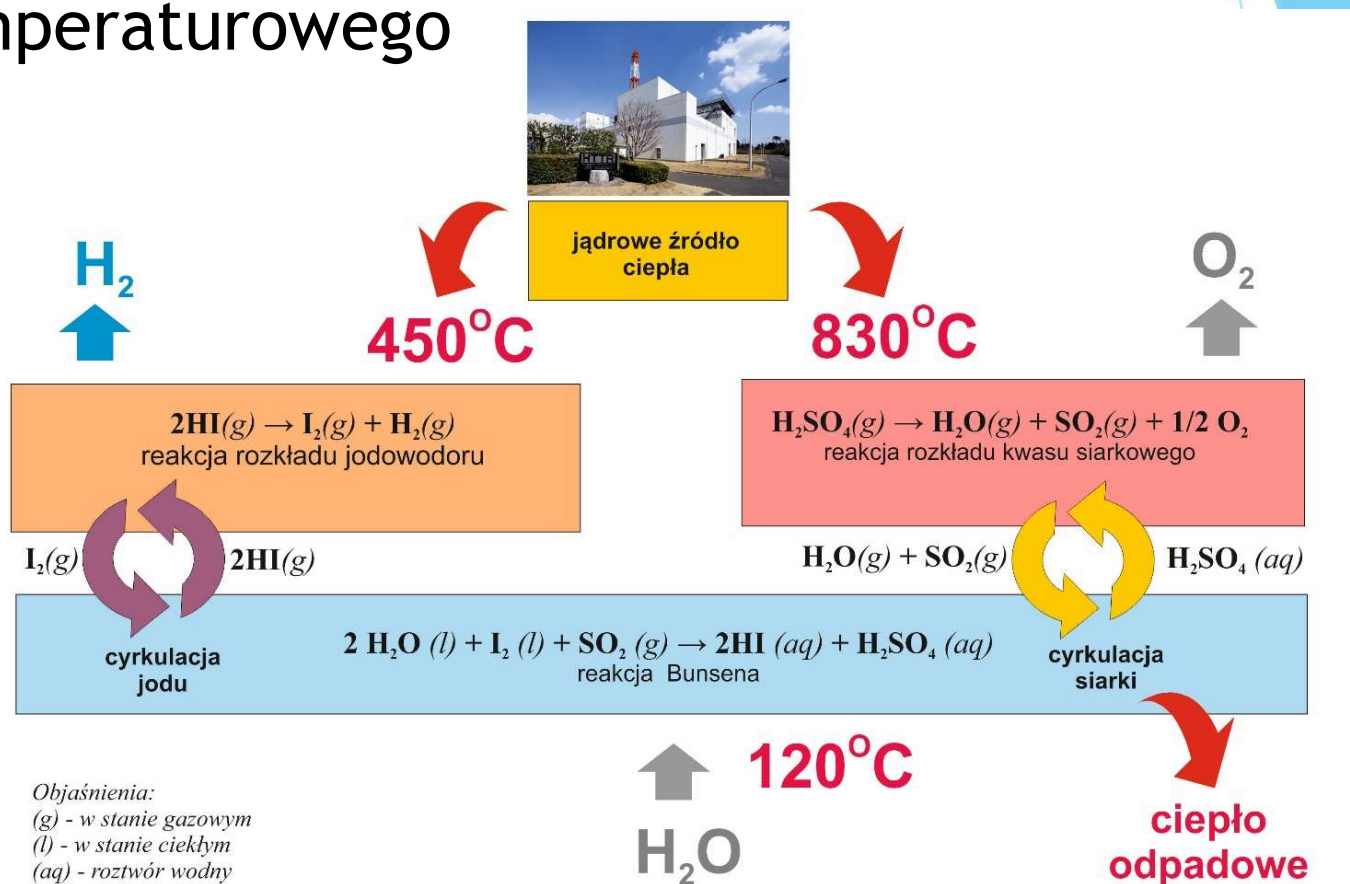
Produkcja wodoru przy wykorzystaniu energii jądrowej



blok energetyczny elektrowni jądrowej



Produkcja wodoru - proces IS z wykorzystaniem reaktora wysokotemperaturowego



Dziękuję za uwagę!