

Jądrowe reaktory energetyczne 3



dr inż. Mariusz Kopec

Katedra Energetyki Jądrowej
Wydział Energetyki i Paliw
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie



Zagadnienia

Systemy reaktora PWR

Systemy podstawowe

Systemy pomocnicze

Systemy bezpieczeństwa

Operacje mocy reaktora PWR

Mod A

Mod G

Mod T

Podsumowanie



Systemy reaktora PWR

- System pierwotny
 - RCS – Reactor Cooling System (system chłodzenia reaktora)
- System wtórny
 - MSS – Main Steam System (główny system pary)
 - CS – Condensate System (system kondensatu)
 - FS – Feedwater System (system wody zasilającej)
- Systemy pomocnicze
 - CVCS – Chemical and Volume Control System
 - RHRS – Residual Heat Removal System
 - CCWS – Component Cooling Water System
 - ESWS – Essential Service Water System
 - PTR – Reactor Cavity and Spent Fuel Pit Cooling and Treatment System



Systemy reaktora PWR

- **Systemy bezpieczeństwa**
 - RPS – Reactor Protection System
 - ECCS – Emergency Core Cooling System
 - CSS – Containment Spray System
 - AFWS – Auxiliary Feedwater System
 - EES – Emergency Electrical Systems

Uwaga

Różni producenci stosują różne nazwy systemów, np.:

Residual Heat Removal System

Westinghouse

Decay Heat Removal System

Babcock&Wilcox

Shutdown Cooling System

Combustion Engineering

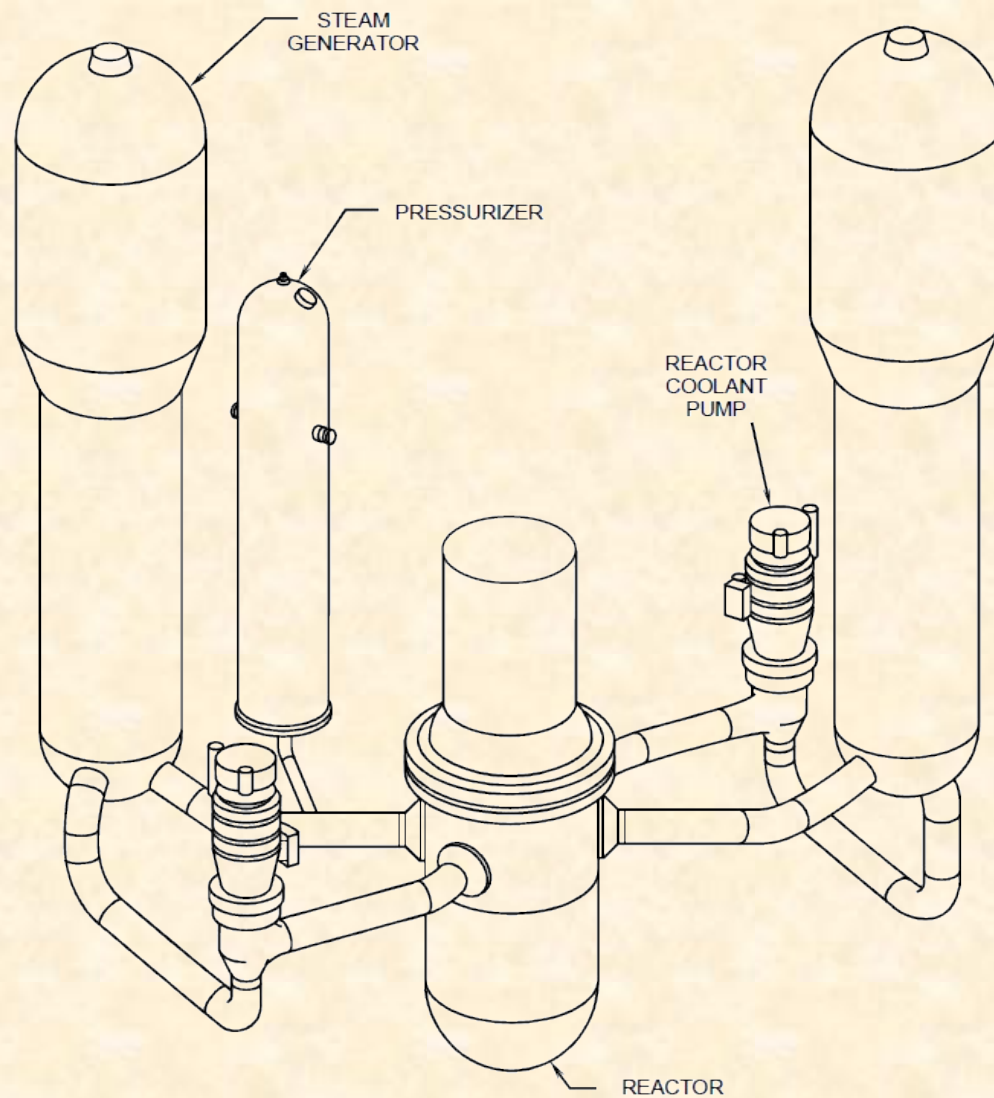


System RCS

- **Podstawowy system reaktora obejmujący:**
 - zbiornik reaktora
 - wytwornice pary
 - pompy pierwotnego obiegu chłodzenia
 - stabilizator ciśnienia
- **Funkcje systemu:**
 - przesyłanie ciepła z reaktora do wytwornicy pary
 - utrzymywanie ciśnienia w założonych granicach
 - stanowi drugą granicę obrony przed uwolnieniem radioaktywności

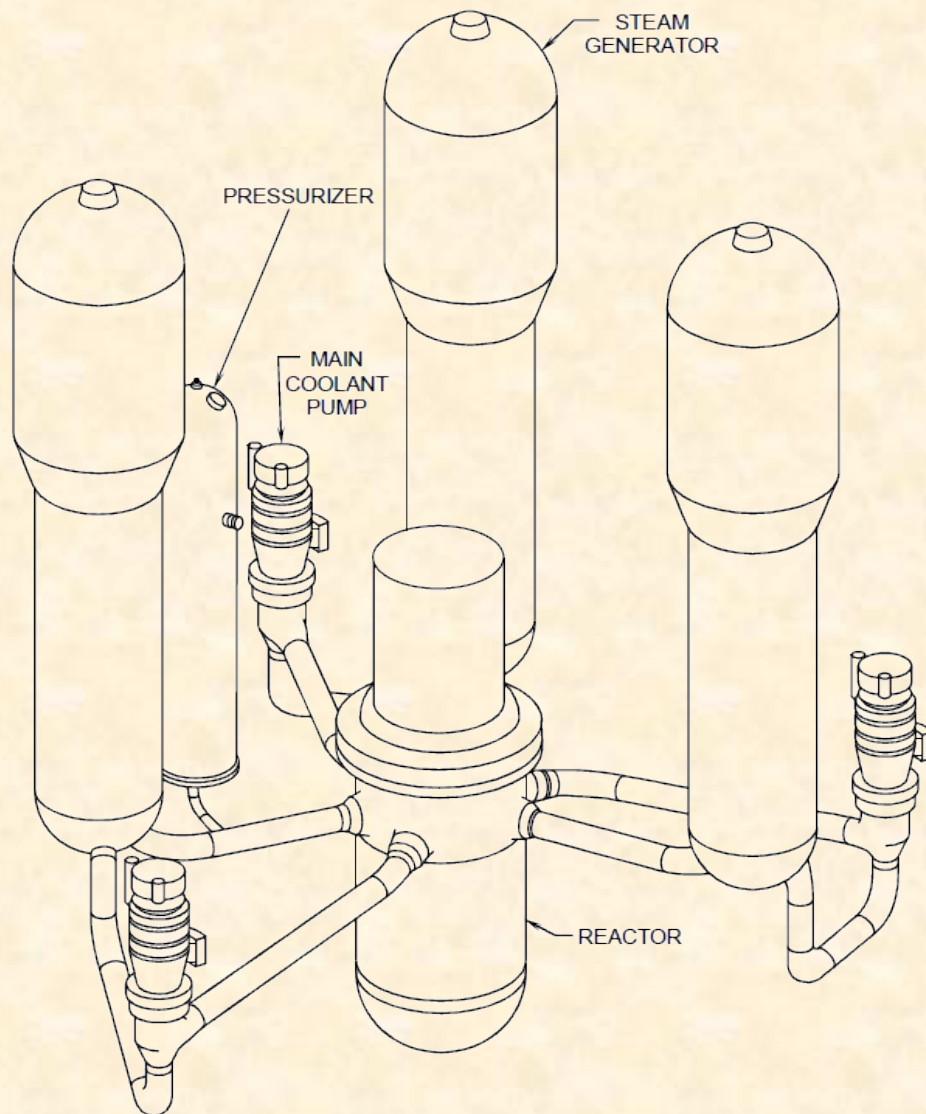
System RCS

Westinghouse
2 pętle chłodzenia



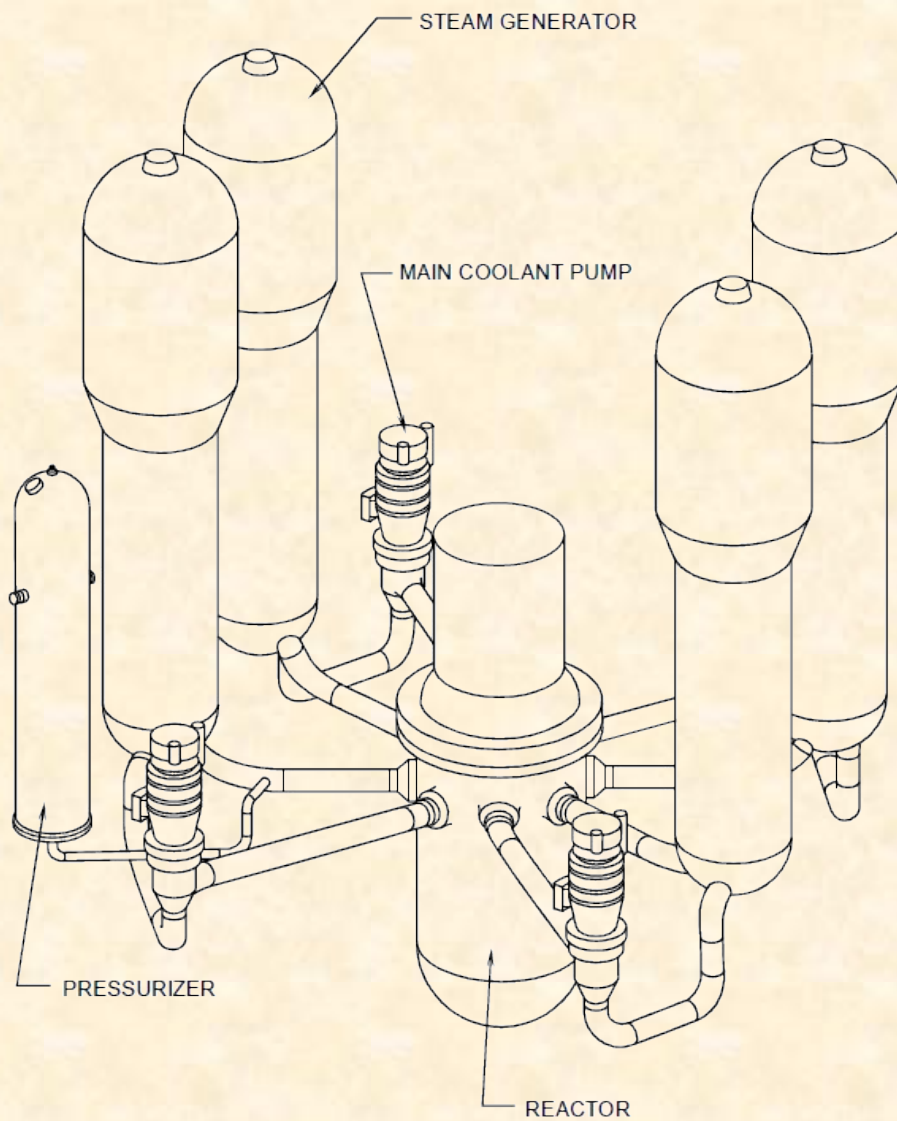
System RCS

Westinghouse 3 pętle chłodzenia



System RCS

Westinghouse
4 pętle chłodzenia



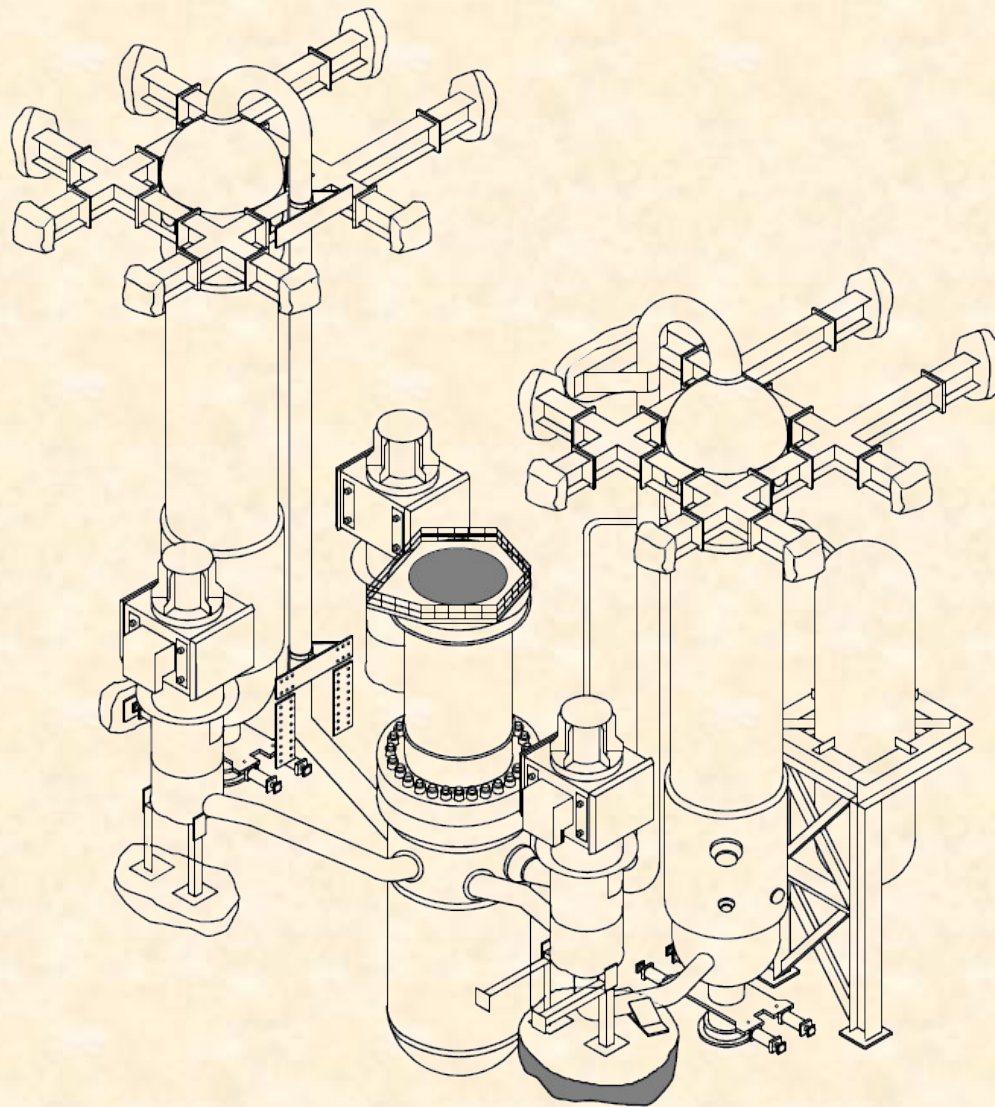
System RCS

Babcock&Wilcox

2 pętle chłodzenia

2 wytwornice pary
„once through”

4 pompy



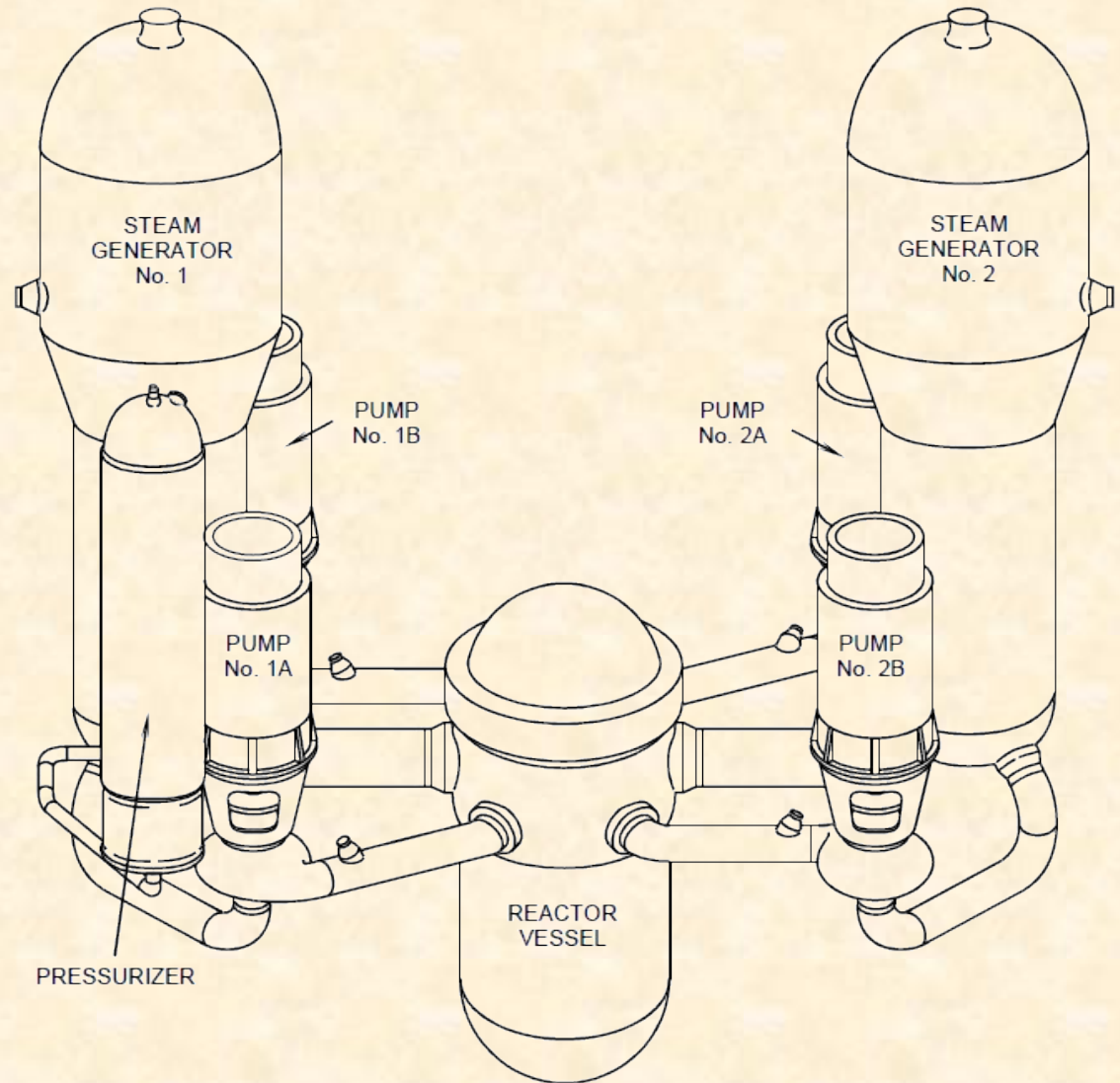
System RCS

Combustion Engineering

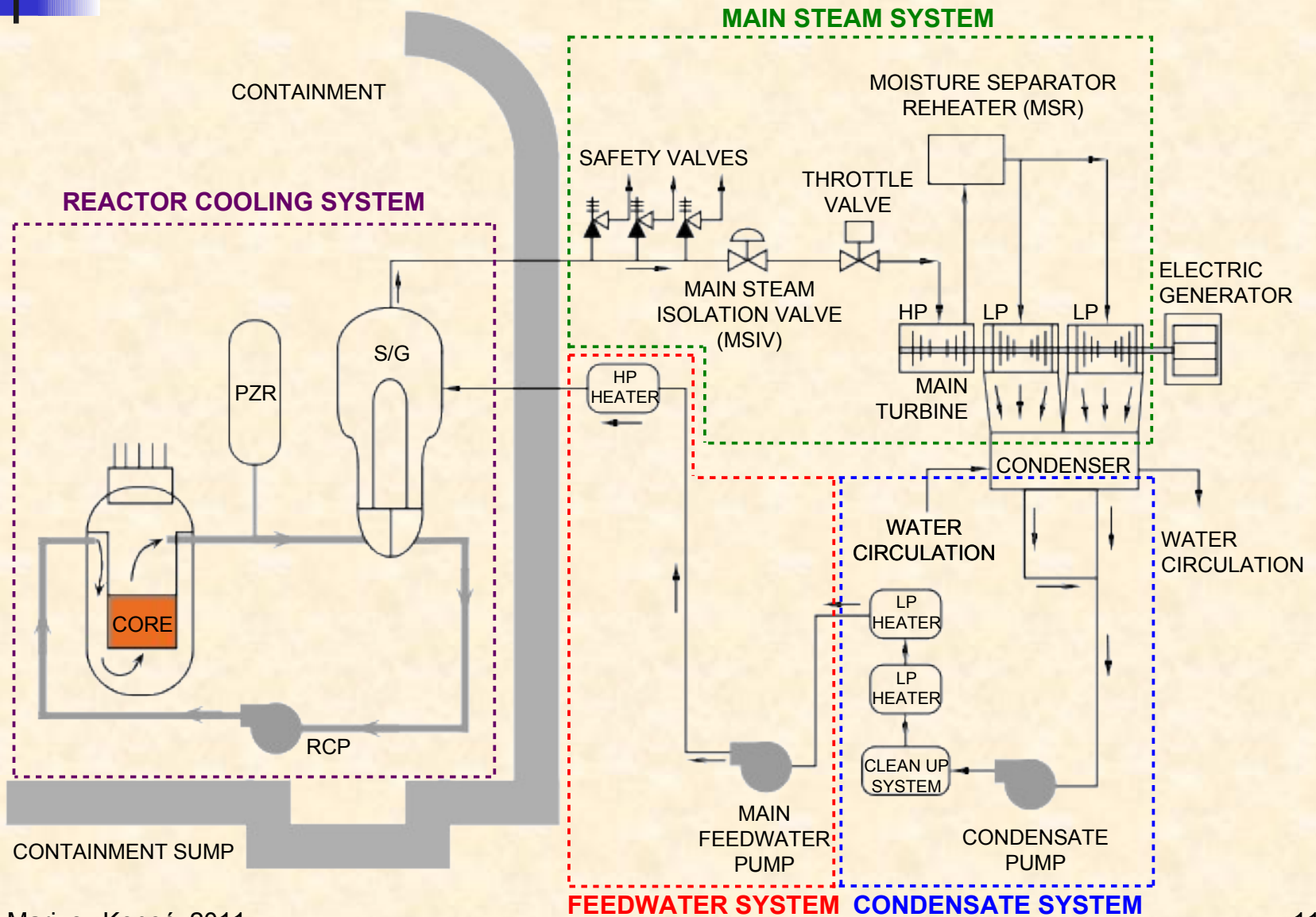
2 pętle chłodzenia

2 wytwornice pary

4 pompy



System wtórny





System MSS

- System zaczynający się na wytwornicy pary a kończący na skraplaczu, obejmujący:
 - zawory bezpieczeństwa
 - zawór odcinający
 - zawór regulacyjny
 - turbinę wysokiego ciśnienia
 - separator wilgoci i przegrzewacz pary
 - turbiny niskiego ciśnienia

W niektórych rozwiązaniach stosowane są turbiny pośredniego ciśnienia, po których znowu następuje osuszanie i przegrzew pary

Do podgrzewania pary używana jest para świeża



System CS

- System zaczynający się po skraplaczu a kończący na pompie wody zasilającej wytwornicę pary, obejmujący:
 - pompę kondensatu
zwiększenie ciśnienia kondensatu
 - system oczyszczania kondensatu
zanieczyszczenia, które przedostawałyby się do wytwornicy pary gromadziłyby się w niej po odparowaniu wody, prowadząc do stopniowego ograniczenia przepływu
 - niskociśnieniowe podgrzewacze kondensatu
do podgrzewania używana jest para z upustu turbin niskiego ciśnienia

Wytwornica pary działa jak koncentrator zanieczyszczeń



System FS

- System zaczynający się na pompie wody zasilającej wytwornicę pary a kończący na wytwornicy pary, obejmujący:
 - pompę wody zasilającej
zwiększenie ciśnienia wody zasilającej do poziomu wymaganego na wejściu wytwornicy pary
 - podgrzewacz wody zasilającej
podniesienie temperatury do wartości wymaganej na wejściu wytwornicy pary
do podgrzewania używana jest para z upustu turbiny wysokiego ciśnienia

Podgrzanie wody doprowadzanej do wytwornicy pary poprawia sprawność termodynamiczną systemu



Funkcje CVCS

- **Kontrola chemiczna systemu chłodzenia reaktora**
 - Usuwanie tlenu rozpuszczonego w wodzie (ochrona przed korozją/eksplozją)
 - *dodawanie hydrazyny: $N_2H_4 + O_2 \rightarrow 2H_2O + N_2$*
 - *dodawanie wodoru*
 - Kontrola pH wody w systemie chłodzenia (ochrona przed korozją)
 - *dodawanie $LiOH$*
 - Kontrola czystości wody w układzie chłodzenia (usuwanie produktów rozszczepienia i aktywacji)
 - *filtrowanie*
 - *demineralizacja*

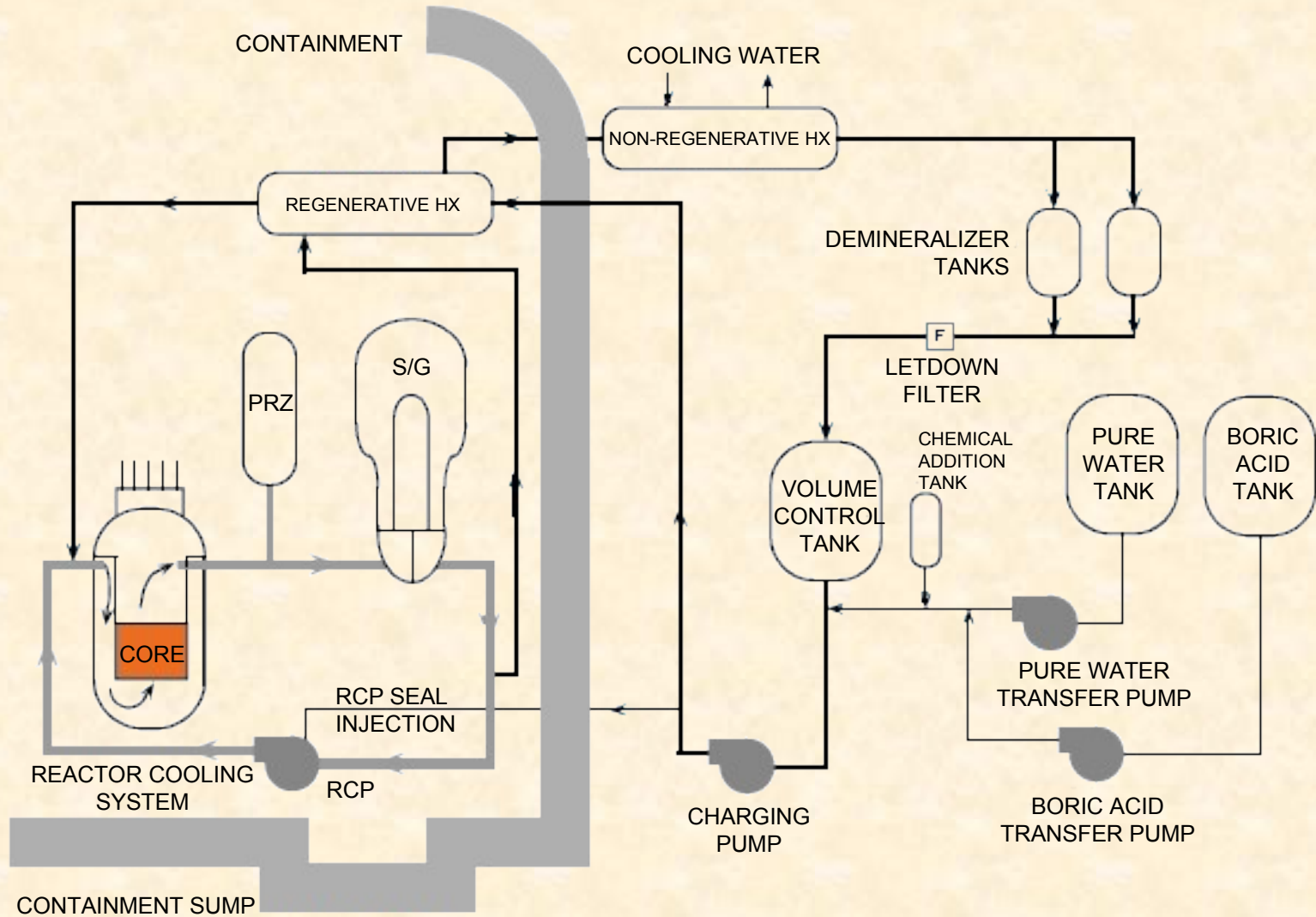
Pewna część wody jest stale przepuszczana przez CVCS (tzw. letdown) umożliwiając w ten sposób ciągłe oczyszczanie obiegu pierwotnego



Funkcje CVCS

- Regulacja ilości wody w systemie chłodzenia reaktora
 - Utrzymywanie zadanego poziomu wody w stabilizatorze ciśnienia
 - *nadatek wody kierowany jest do systemu recyklingu boru BRS*
- Regulacja reaktywności przez zmianę koncentracji boru w systemie chłodzenia reaktora
 - Bor jest dodawany w systemie dodawania boru RBMS
- Smarowanie i chłodzenie uszczeltek pomp obiegu pierwotnego
 - Oczyszczona i schłodzona woda jest natryskiwana na uszczelki pomp obiegu pierwotnego

CVCS





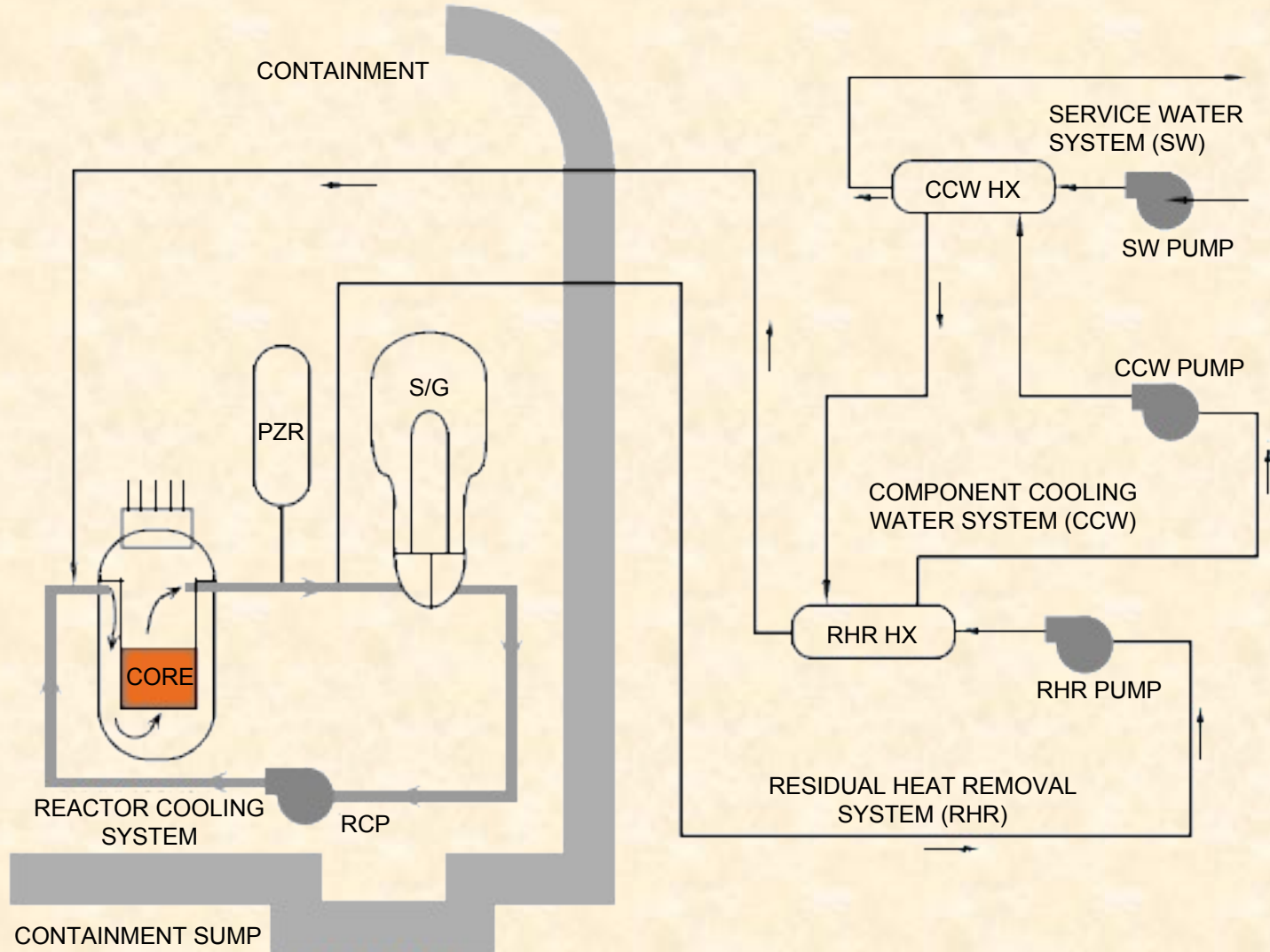
Funkcje RHRS

- Redukuje temperaturę chłodziwa poniżej 60 °C w sytuacji kiedy nie działa podstawowy układ chłodzenia
 - usuwanie ciepła powyłączeniowego
 - usuwanie ciepła generowanego przez działające pompy
- Utrzymuje temperaturę chłodziwa poniżej 60 °C w sytuacji długotrwałego wyłączenia reaktora (przeładunek)
- Miesza chłodziwo kiedy pompy są zatrzymane
- Kontroluje wzrost temperatury podczas ponownego rozruchu

Używany kiedy ciepło generowane w systemie nie wystarcza do produkcji pary w wytwornicy

Odbierane ciepło jest kierowane do CCW (Component Cooling Water system) i oddawane w SW (Service Water system)

RHRS



Elementy RHRS



Pompa RHRS

Wymiennik
ciepła RHRS





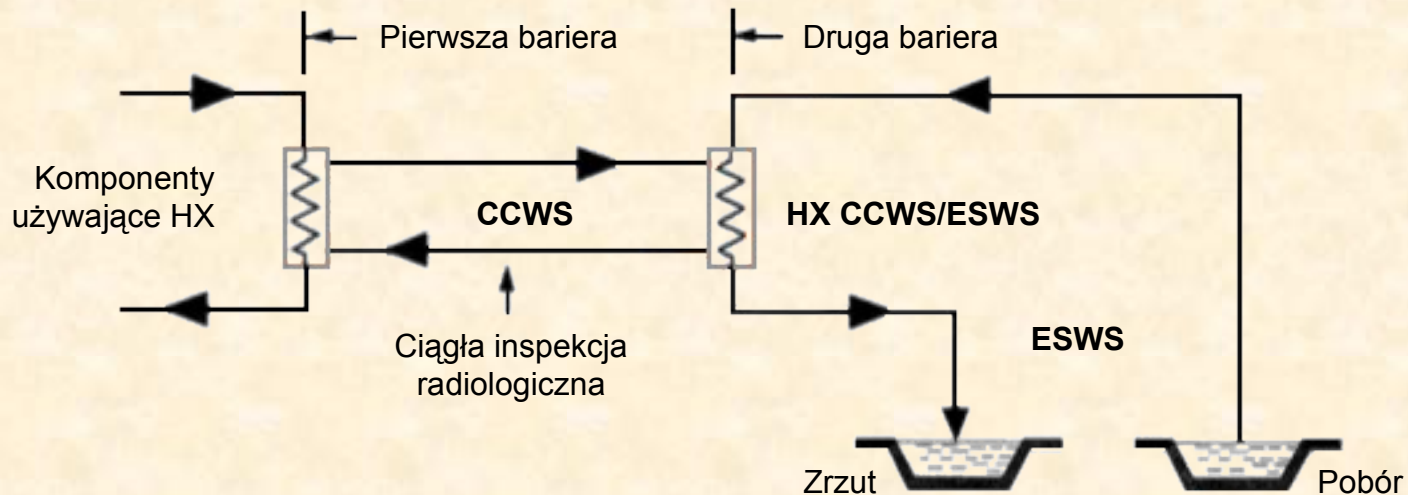
Funkcje CCWS

- Chłodzenie wymienników ciepła i komponentów systemu za pośrednictwem ESWS
 - w przypadku normalnej pracy
 - w przypadku utraty zewnętrznego zasilania
 - w przypadku awarii
- Składa się z:
 - wymienników ciepła chłodzenia komponentów
 - pomp wody chłodzenia komponentów
 - rur i zaworów
- Najważniejsze chłodzone komponenty:
 - wymiennik ciepła powyłączeniowego
 - wymiennik ciepła ciągłego przepływu (letdown)
 - pompy chłodzenia reaktora

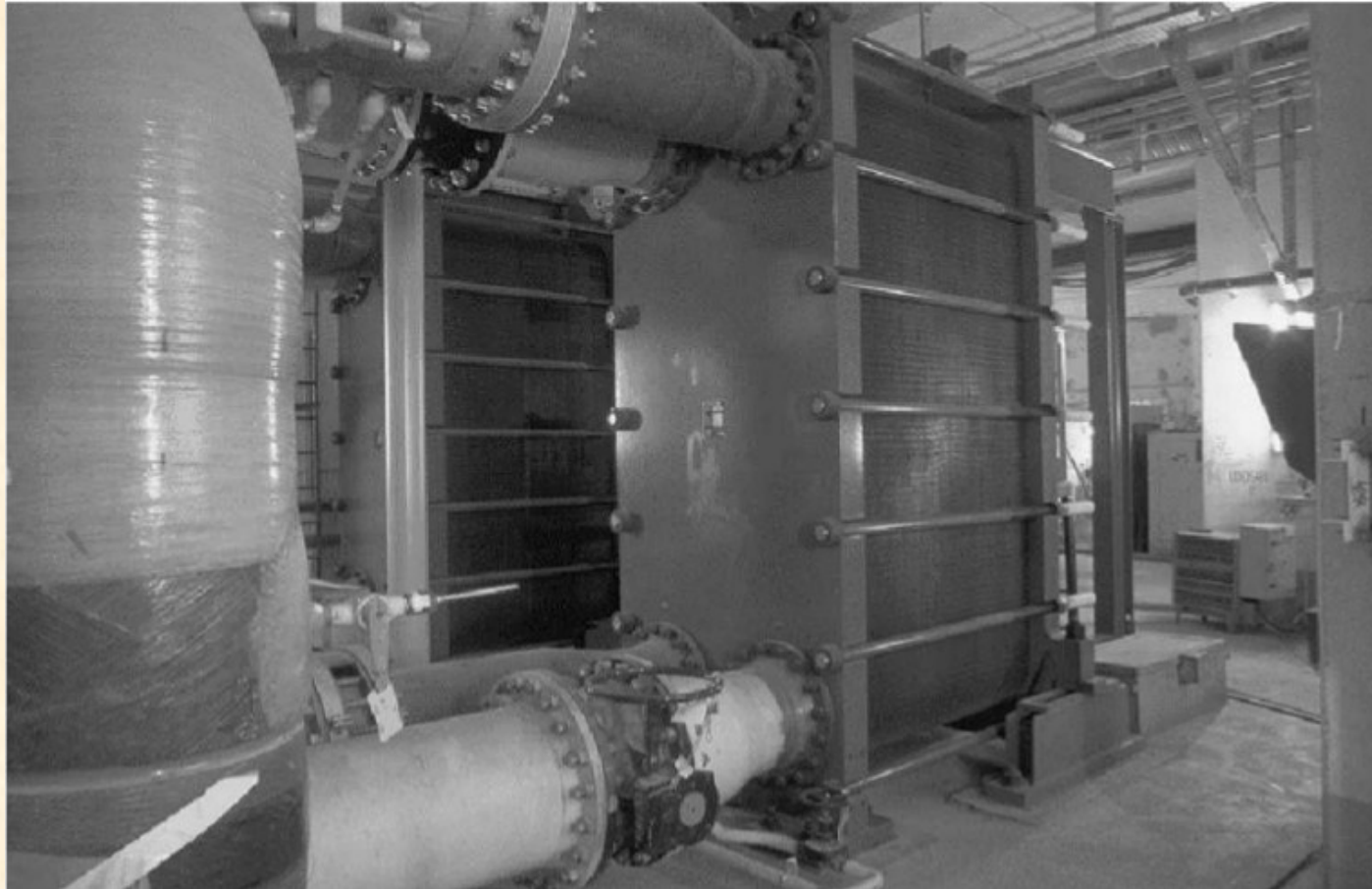
Funkcje ESWS

- Zapewnia odbiór ciepła z systemu chłodzenia komponentów (wszystkich poza skraplaczem)
- Zapewnia temperaturę nie wyższą niż 35°C podczas normalnej operacji

Ponieważ ten system odprowadza ciepło powyłaczeniowe, zarówno z rdzenia jak i basenu wypalonego paliwa, jest jednym z systemów krytycznych pod względem bezpieczeństwa



Elementy ESWS



Wymiennik ciepła CCWS/ESWS



Funkcje PTR

Reactor cavity and spent fuel pit cooling and treatment system

- Usuwanie ciepła powyłączeniowego z wypalonego paliwa przetrzymywanego w basenie wypalonego paliwa
- Oczyszczanie wody w basenie wypalonego paliwa i w szybie reaktora (w czasie przeładunku paliwa)

Ciepło powyłączeniowe odbierane z basenu wypalonego paliwa przekazywane jest do systemu usuwania ciepła powyłączeniowego RHRS



Funkcje RPS

- Zapewnia możliwość przerwania biegnącej reakcji łańcuchowej w każdych warunkach
 - Pręty sterujące
 - System iniekcji boru

Sygnaly prowadzące do wyłączenia reaktora (nie wszystkie):

- „wysoka moc” - moc względem ΔT
- „wysoki wzrost mocy startowej” - aktywny przy starcie reaktora
- „wysokie ciśnienie w stabilizatorze”
- „wysoki poziom wody w stabilizatorze”
- „niskie ciśnienie w wytwornicy pary”
- „niski poziom wody w wytwornicy pary”
- „niski przepływ chłodziwa”
- „wysokie ciśnienie w budynku reaktora”
- „utrata obciążenia” - turbine trip



Funkcje ECCS

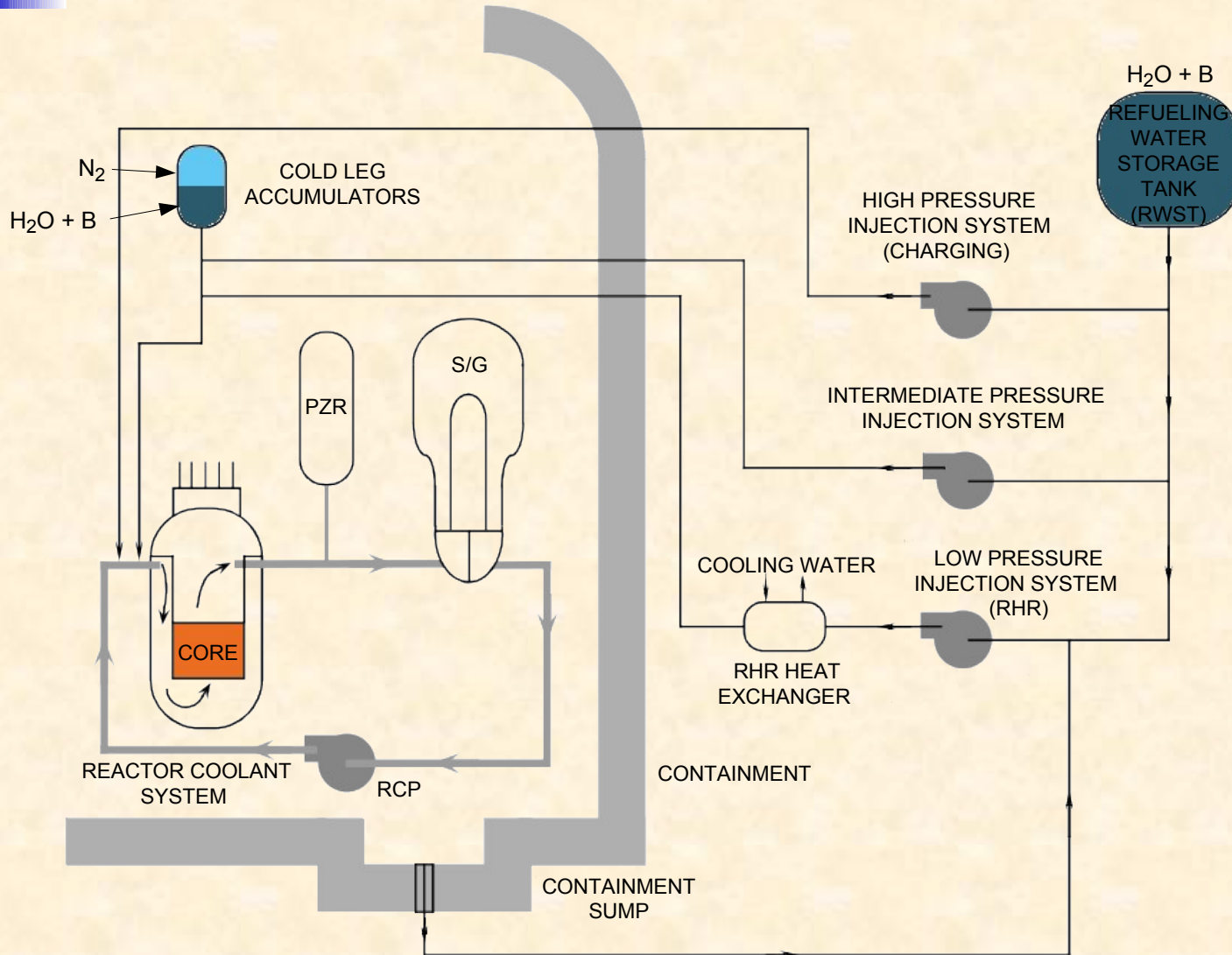
- Zapewnia chłodzenie rdzenia w przypadku awarii LOCA
 - high pressure injection system (mała LOCA)
 - intermediate pressure injection system (średnia LOCA)
 - low pressure injection system = RHR
- Wprowadza bor do systemu zapewniając, że reaktor pozostanie wyłączony nawet w przypadku wychłodzenia połączonego z przerwaniem wtórnego obiegu pary

Zbiorniki wody z borem (cold leg accumulators) nie wymagają zasilania

Dwie fazy działania systemu:

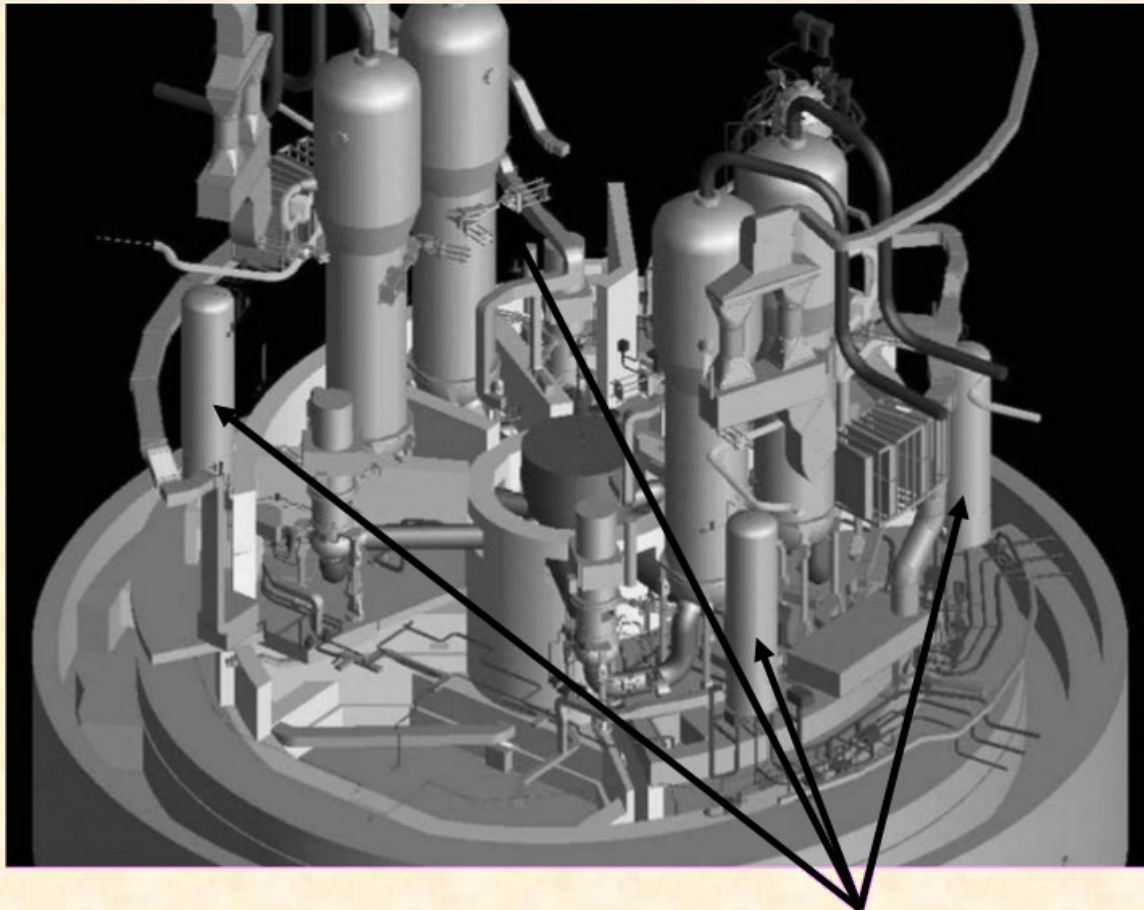
- iniekcja
- recyrkulacja

ECCS





ECCS



Cold leg accumulators



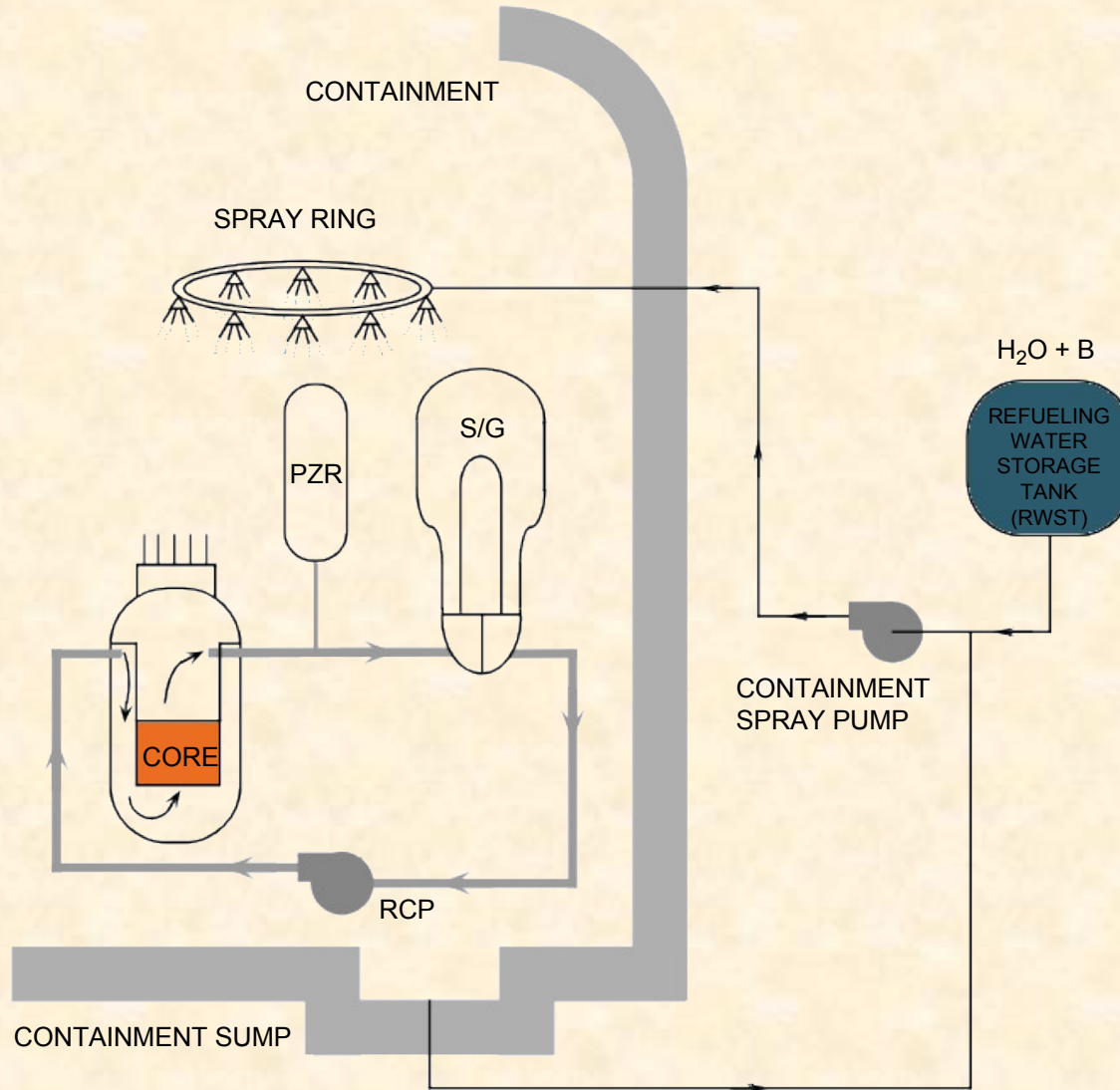
Chwyty wody (containment sumps)



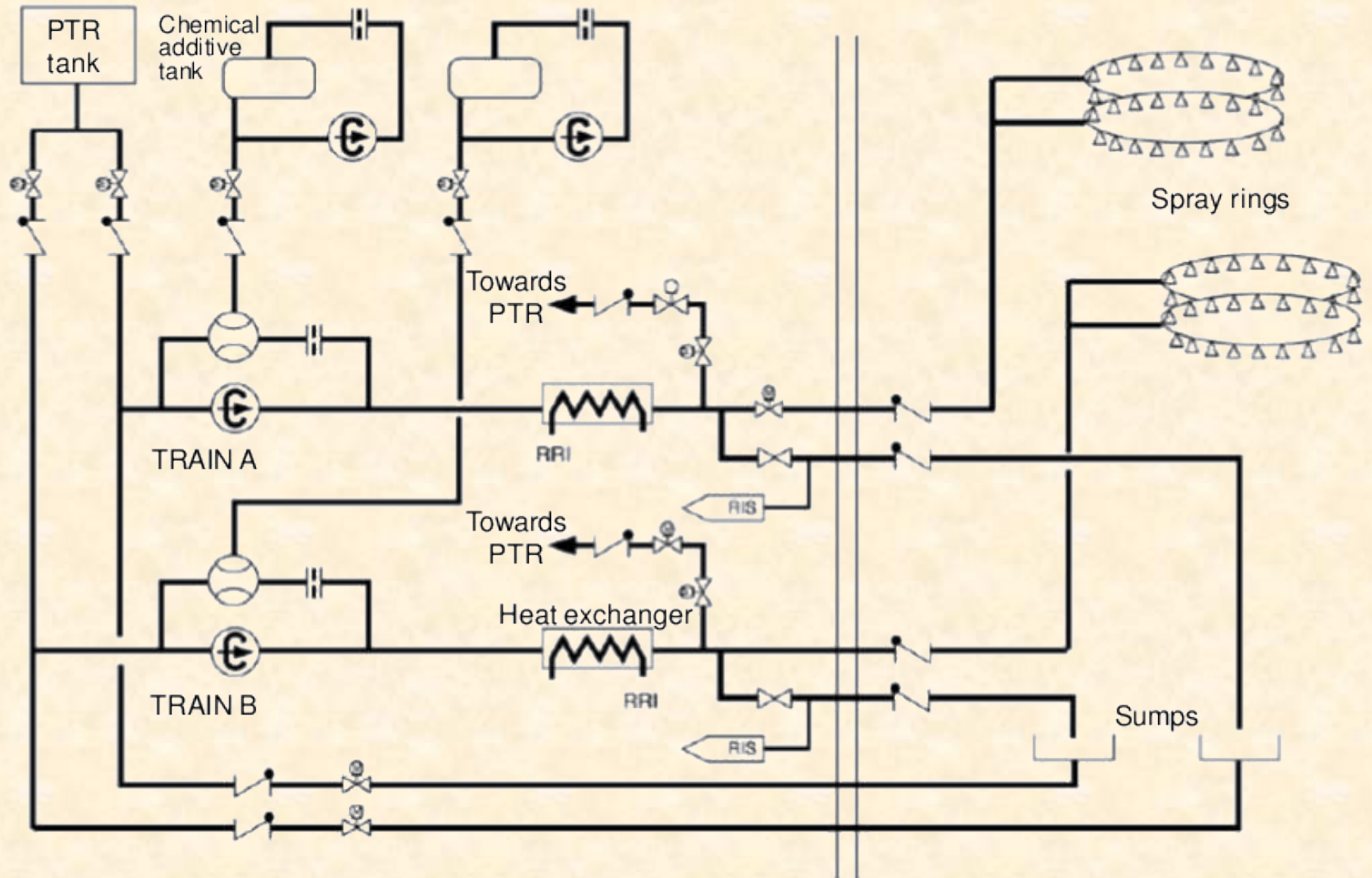
Funkcje CSS

- Obniżenie temperatury i ciśnienia w budynku reaktora w przypadku uszkodzenia pierwotnego lub wtórnego obiegu wewnątrz budynku reaktora skutkującego wypływem pary
 - automatycznie uruchamiane są zraszacze umieszczone w górnej części budynku
 - woda do zraszaczy pobierana jest z RWST (podobnie jak w przypadku ECCS)
 - po wyczerpaniu zapasu zgromadzonego z RWST następuje recyrkulacja

Działanie systemu przypomina działanie stabilizatora ciśnienia obniżającego ciśnienie w układzie pierwotnym



CSS





Zraszacze



Funkcje AFWS

Auxiliary Feedwater System – Emergency Feedwater System

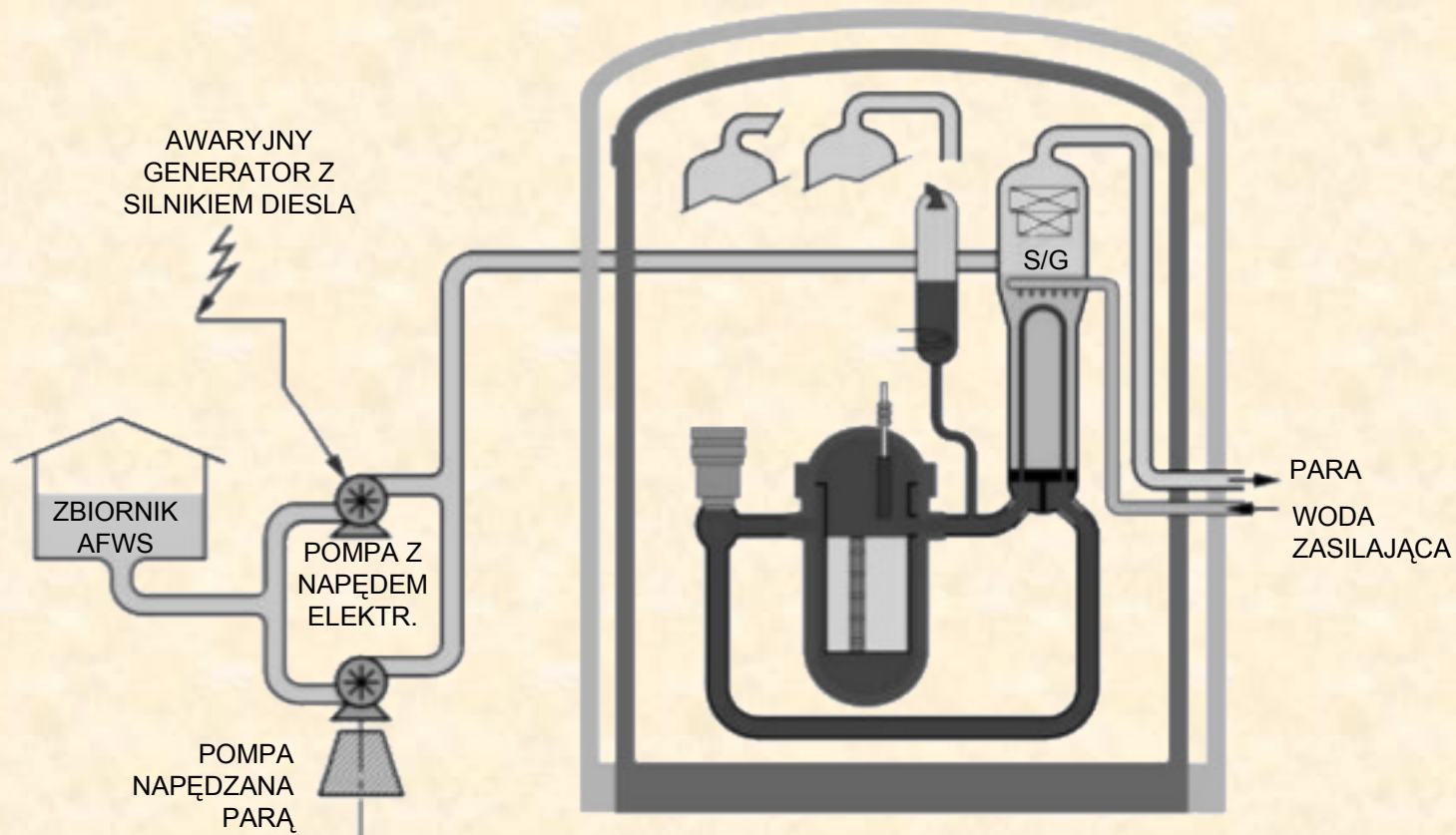
- Zapewnia dostarczanie wody do wytwornicy pary w przypadku wyłączenia i startu reaktora
- Umożliwia usuwanie ciepła powyłączeniowego przez wytwornicę pary

Ponieważ w sytuacji awaryjnej może nie być zewnętrznego zasilania energią elektryczną, AFWS jest wyposażony w:

- pompy zasilane parą z wytwornic pary
- pompy zasilane energią elektryczną z generatorów diesla

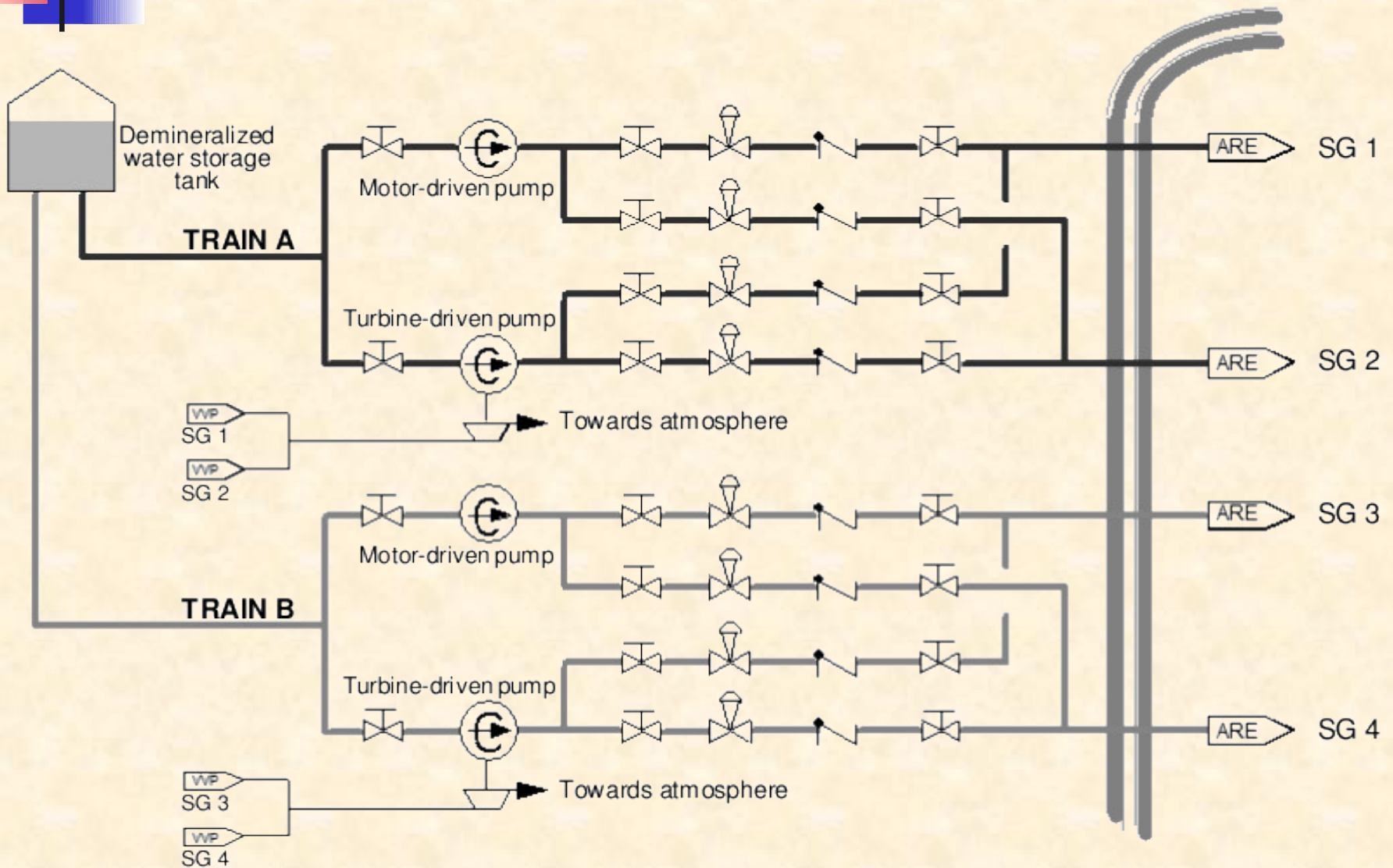
Woda pobierana jest ze zbiornika, a w przypadku jej braku może być pobierana awaryjnie ze źródła zewnętrznego (Uwaga: możliwe zanieczyszczenie i uszkodzenie SG)

AFWS



Uproszczony schemat AFWS

AFWS



AFWS



Napędzana parą pompa AFWS

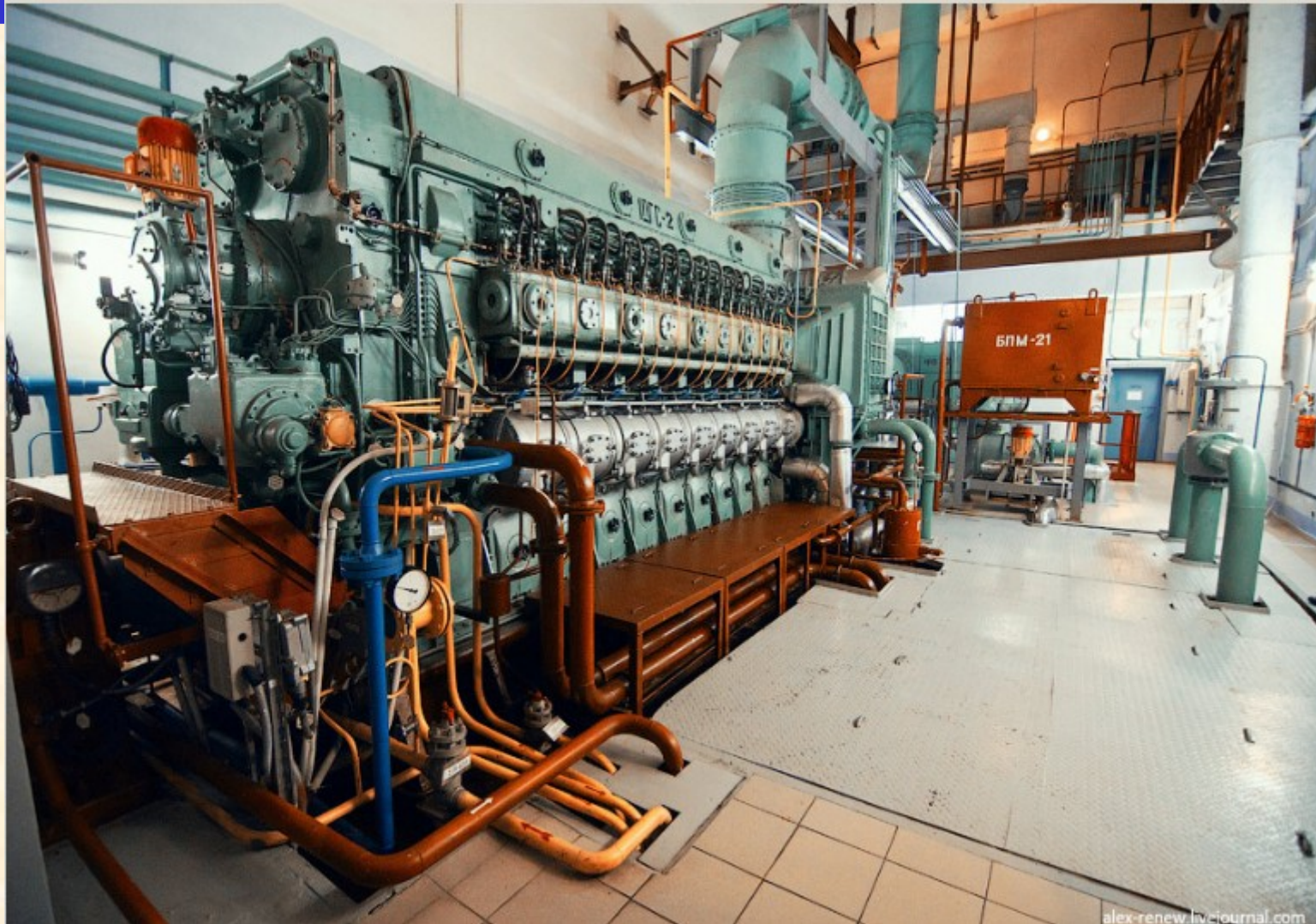


Funkcje EES

Emergency Electrical Systems

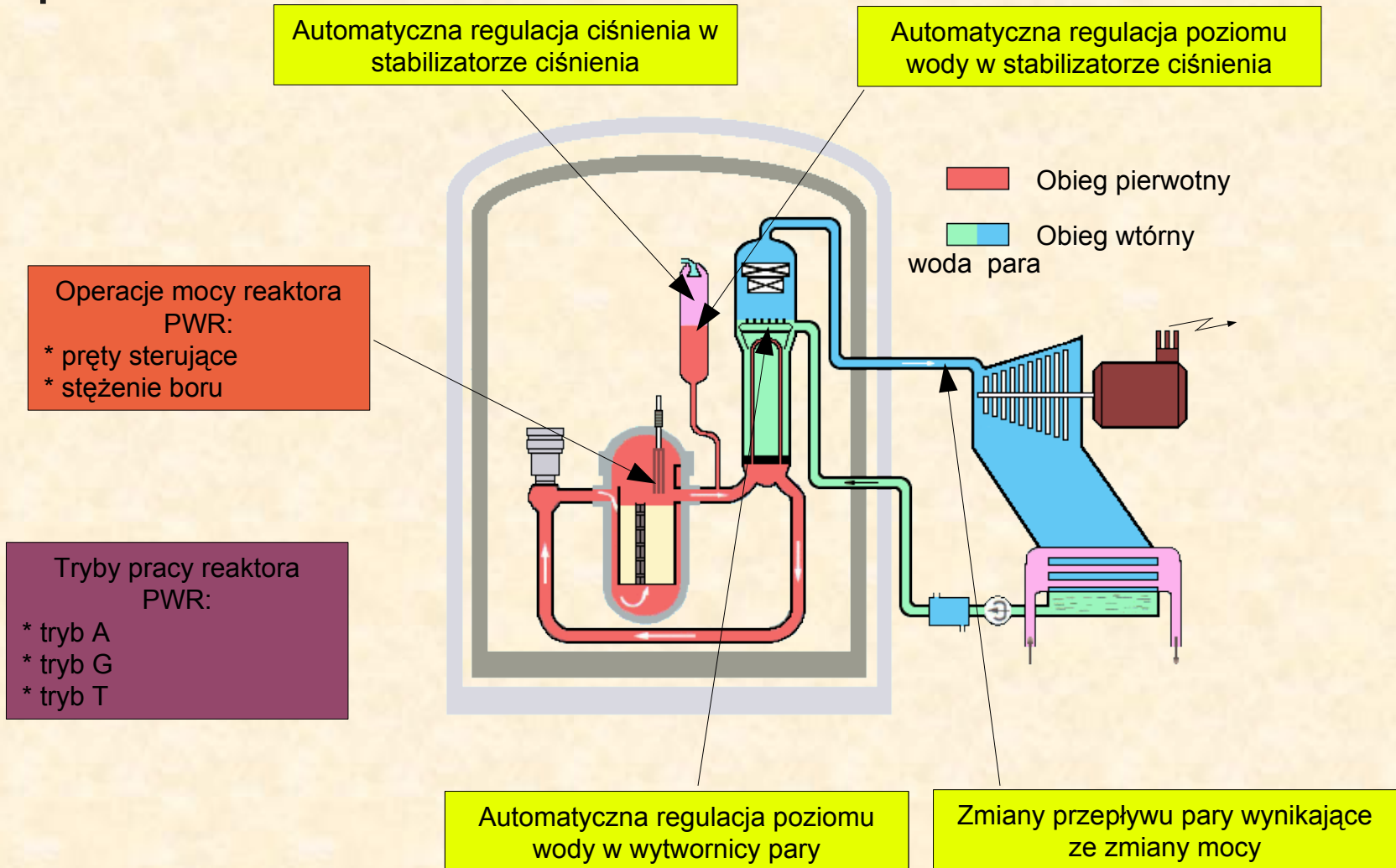
- Zapewniają dopływ energii elektrycznej w przypadku odcięcia dopływu energii z zewnątrz
- Wykorzystuje się:
 - generatory napędzane silnikami diesla
 - generatory napędzane kołem zamachowym (flywheel)
 - systemy baterii i akumulatorów

Brak energii elektrycznej stanowi duże zagrożenie dla bezpieczeństwa reaktora głównie ze względu na brak możliwości odprowadzania ciepła powyłaczeniowego. Ze względu na stosowane pasywne systemy bezpieczeństwa najnowsze reaktory wytrzymują brak zasilania do 72 godzin (AP1000, ESBWR).

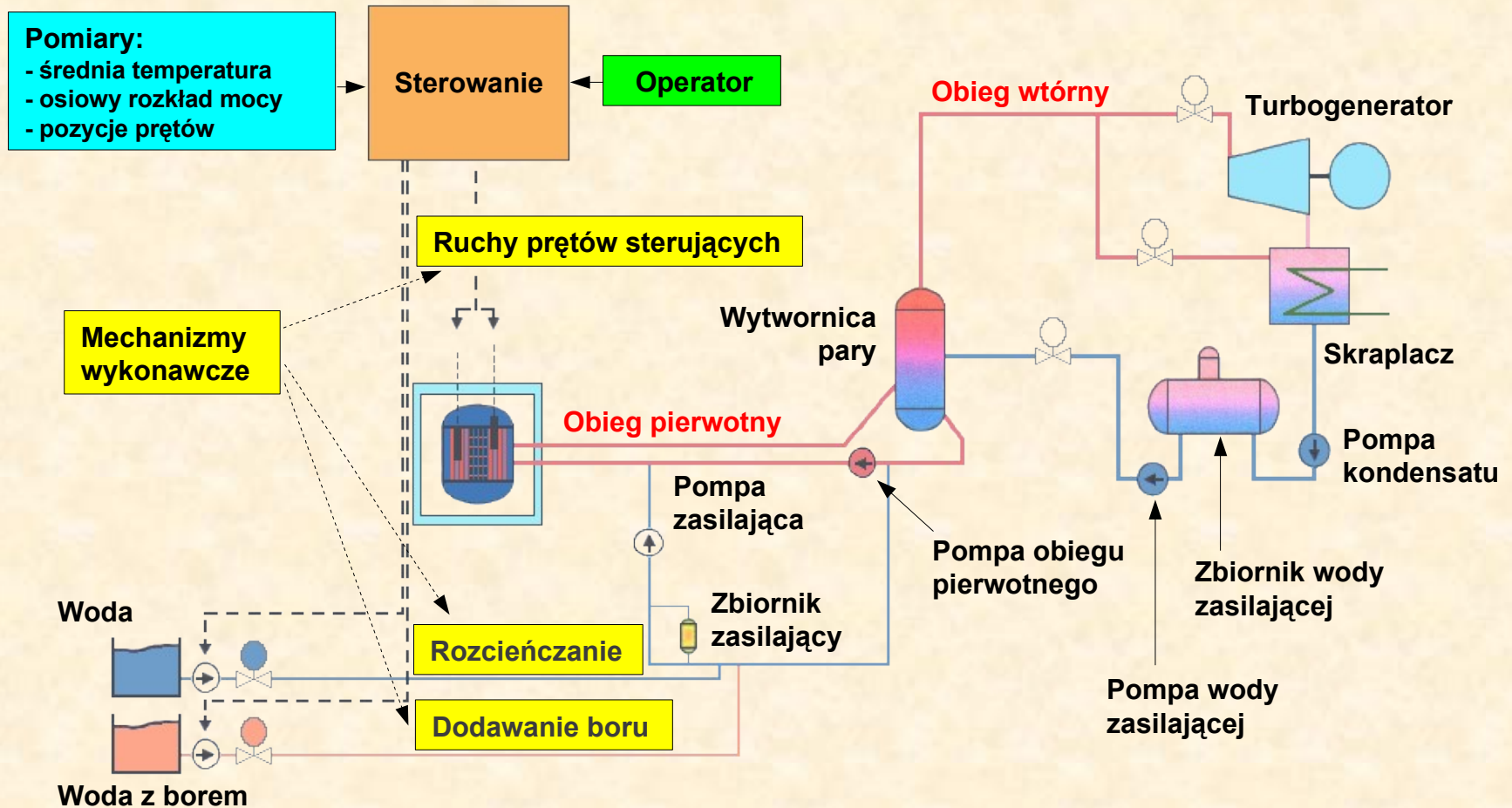


Generator z silnikiem diesla

Sterowanie reaktorem PWR

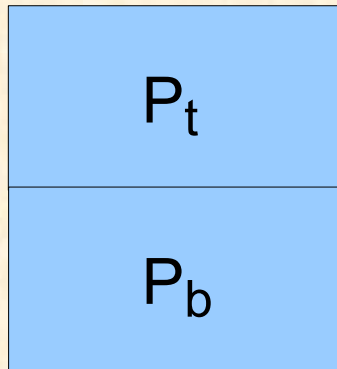


Sterowanie reaktorem PWR



Operacje mocy

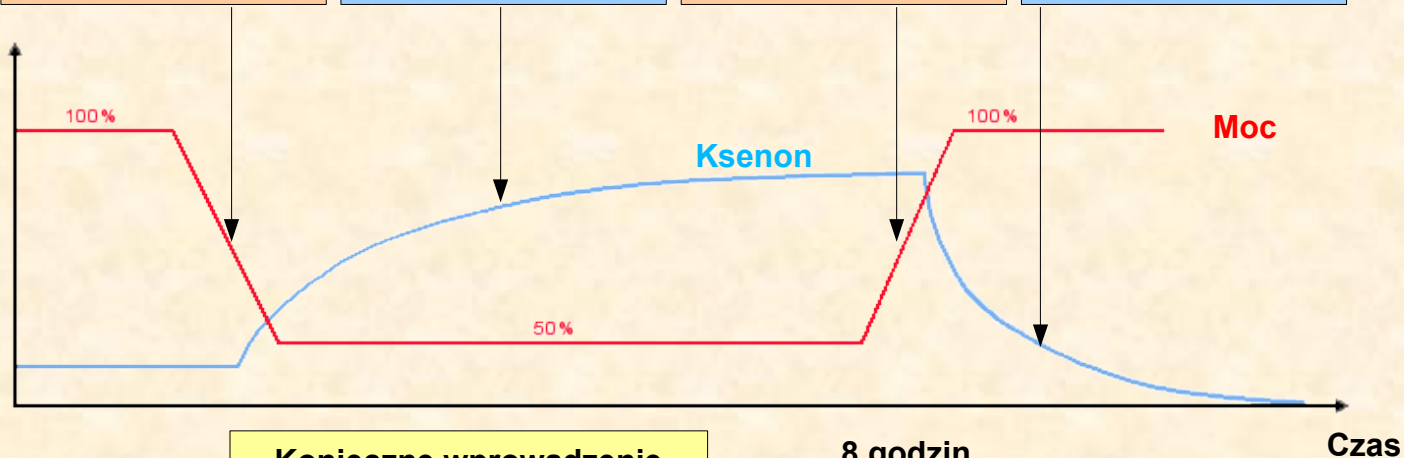
- **Axial Offset (AO)** – podstawowy wskaźnik osiowego rozkładu mocy



$$AO = \frac{P_t - P_b}{P_t + P_b} \times 100\%$$

- **Defekt mocy (dla p% mocy nominalnej PN)** – spadek reaktywności przy wzroście mocy $0\% \rightarrow p\%PN$
powodowany ujemnymi współczynnikami temperaturowymi oraz redystrybucją mocy w rdzeniu

Typowy profil mocy





Operacje mocy PWR

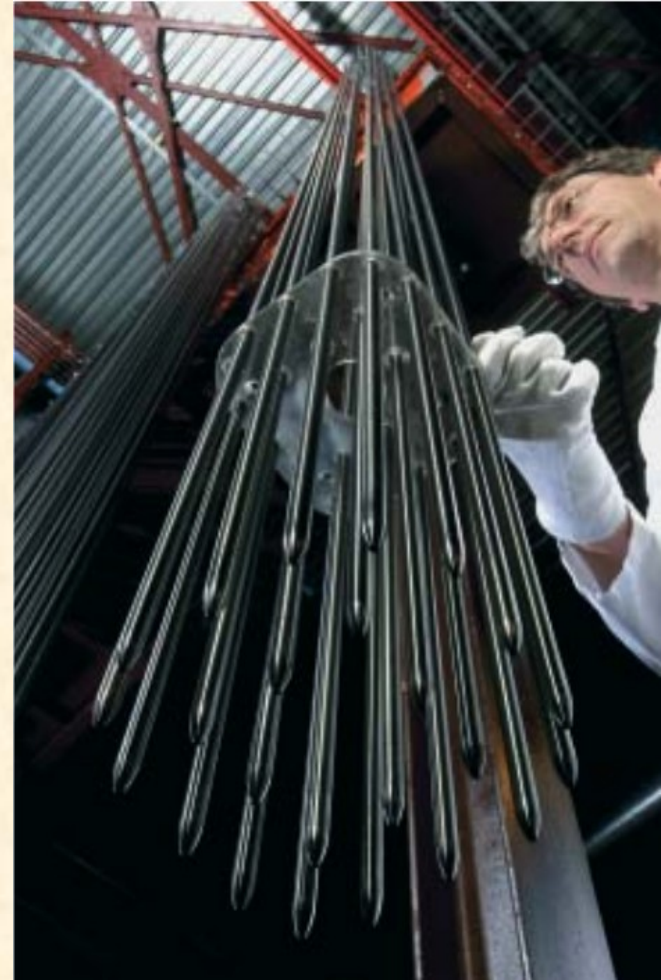
Wyjaśnienia pojęć używanych w dalszej części

- CR - Control Rod pręt sterujący
- RCCA - Rod Cluster Control Assembly
grupa prętów sterujących znajdujących się w kasecie paliwowej połączonych razem i poruszanych za pomocą jednego mechanizmu (nie we wszystkich kasetach są pręty sterujące)
- RCCA bank albo CR bank
zespół kilku RCCA pełniących takie same funkcje i zwykle poruszanych jednocześnie
- Shutdown RCCA
grupy prętów sterujących używanych do wyłączania reaktora
- Control RCCA
grupy prętów sterujących używanych do sterowania reaktora

Operacje mocy PWR

RCCA

- Zespół 24 identycznych prętów umocowanych do wspólnej głowicy (spider)
- Budowa („czarny RCCA”)
 - górna część: spiekane pelety B_4C
 - dolna część: AIC (Ag+In+Cd)
 - koszulka: stal nierdzewna
 - wypełnienie: He pod ciśnieniem
- W niektórych reaktorach stosowane są „szare RCCAs” których pręty wykonane są w całości ze stali nierdzewnej





Operacje mocy PWR - Mod A

- Oryginalne opracowanie - Westinghouse
- Większość reaktorów PWR na świecie pracuje w modzie A
- Zaprojektowany do pracy podstawowej (base load) z wolnymi zmianami mocy (> 3h)
- Podstawowe zasady:
 - banki CR utrzymywane są w pobliżu górnej krawędzi rdzenia ze względu na:
 - optymalizację wypalenia (burnup)
 - minimalizację zakłóceń osiowego rozkładu mocy
 - sterowanie reaktywnością: zmiany stężenia boru
 - sterowanie osiowym rozkładem mocy: banki prętów sterujących (CR)

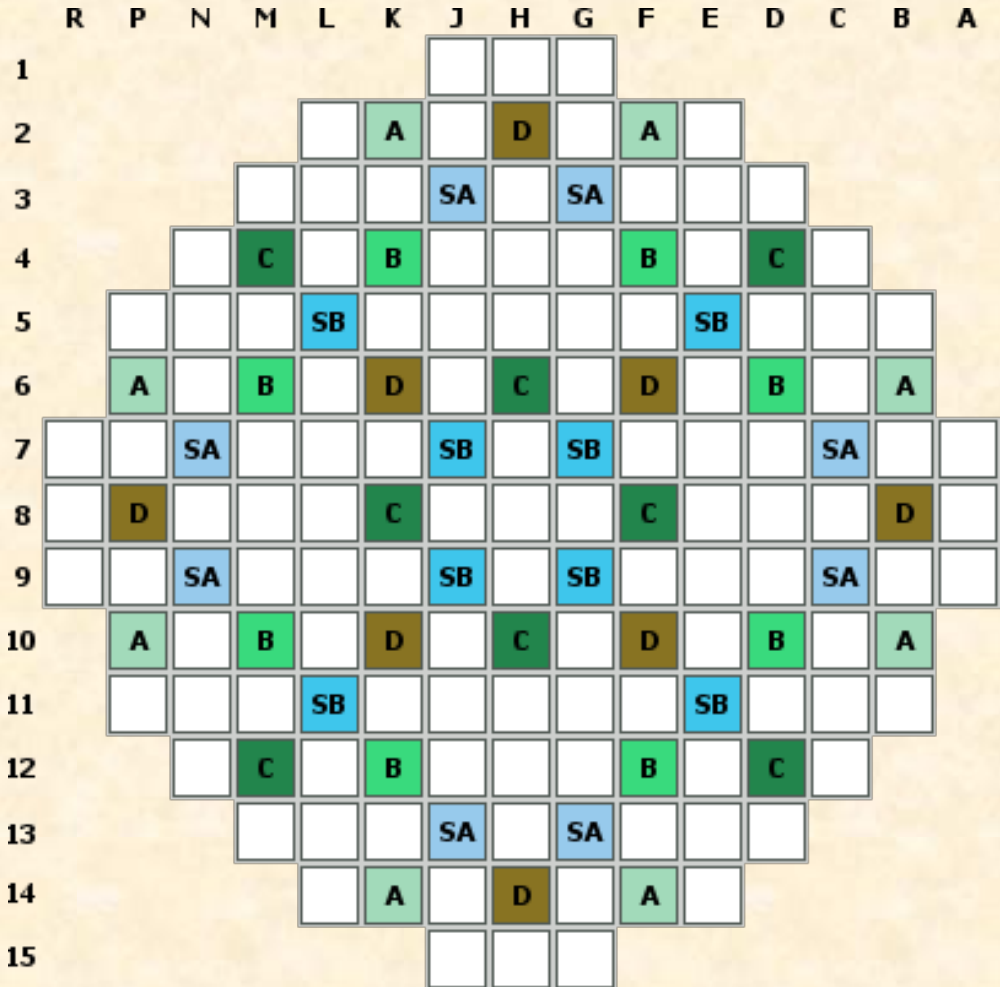
Reaktory francuskie pracujące w modzie A:

- 900 MWe CP0 - Fessenheim 1&2, Bugey 2,3,4&5
- 1500 MWe N4 - Chooz B 1&2, Civaux 1&2

Operacje mocy PWR - Mod A

Banki prętów sterujących reaktora 900 MWe CP0

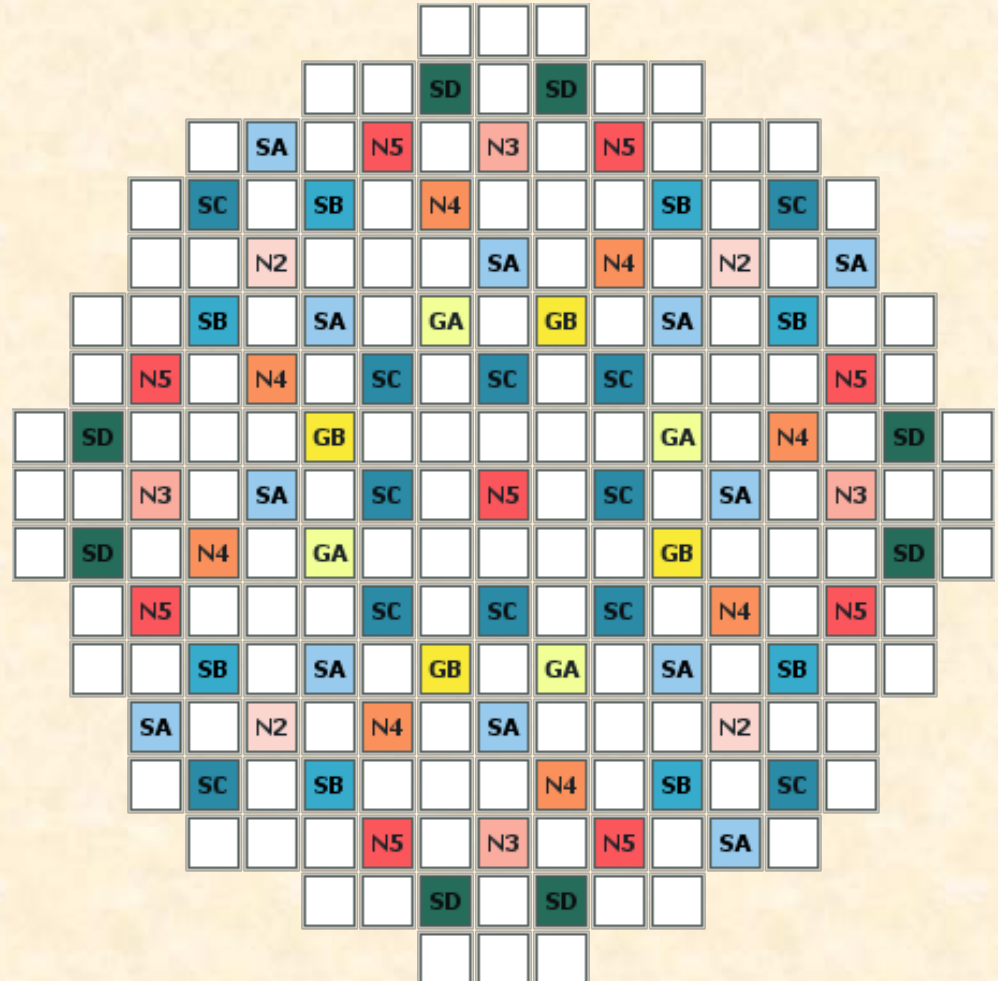
- ▶ 48 RCCAs, w tym:
 - ▶ 16 wyłączeniowych
 - bank SA: 8 RCCS
 - bank SB: 8 RCCS
 - ▶ 32 sterujące
 - bank D: 8 RCCS
 - bank C: 8 RCCS
 - bank B: 8 RCCS
 - bank A: 8 RCCS



Operacje mocy PWR - Mod A

Banki prętów sterujących reaktora 1500 MWe N4

- ▶ **73 RCCAs**, w tym:
 - 8 gray RCCAs - GA i GB
 - 65 black RCCAs
- ▶ **40 wyłączeniowych**
 - bank SA: 12 RCCS
 - bank SB: 8 RCCS
 - bank SC: 12 RCCS
 - bank SD: 8 RCCS
- ▶ **33 sterujące**
 - bank GA: 4 RCCS
 - bank GB: 4 RCCS
 - bank N2: 4 RCCS
 - bank N3: 4 RCCS
 - bank N4: 8 RCCS (C)
 - bank N5: 9 RCCS (B)



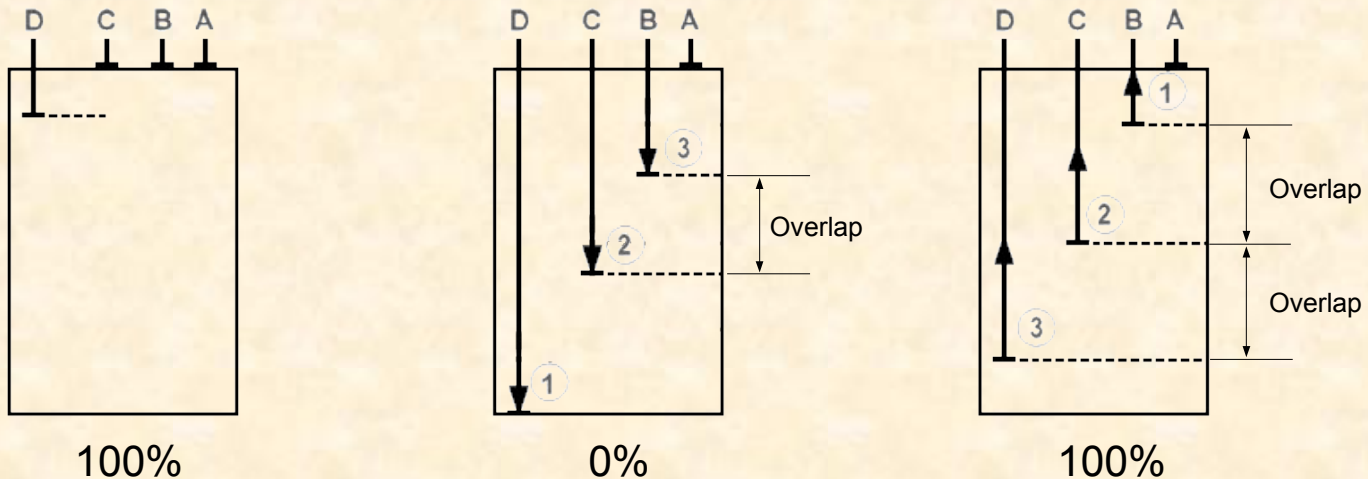
Operacje mocy PWR - Mod A

Kontrola średniej temperatury:

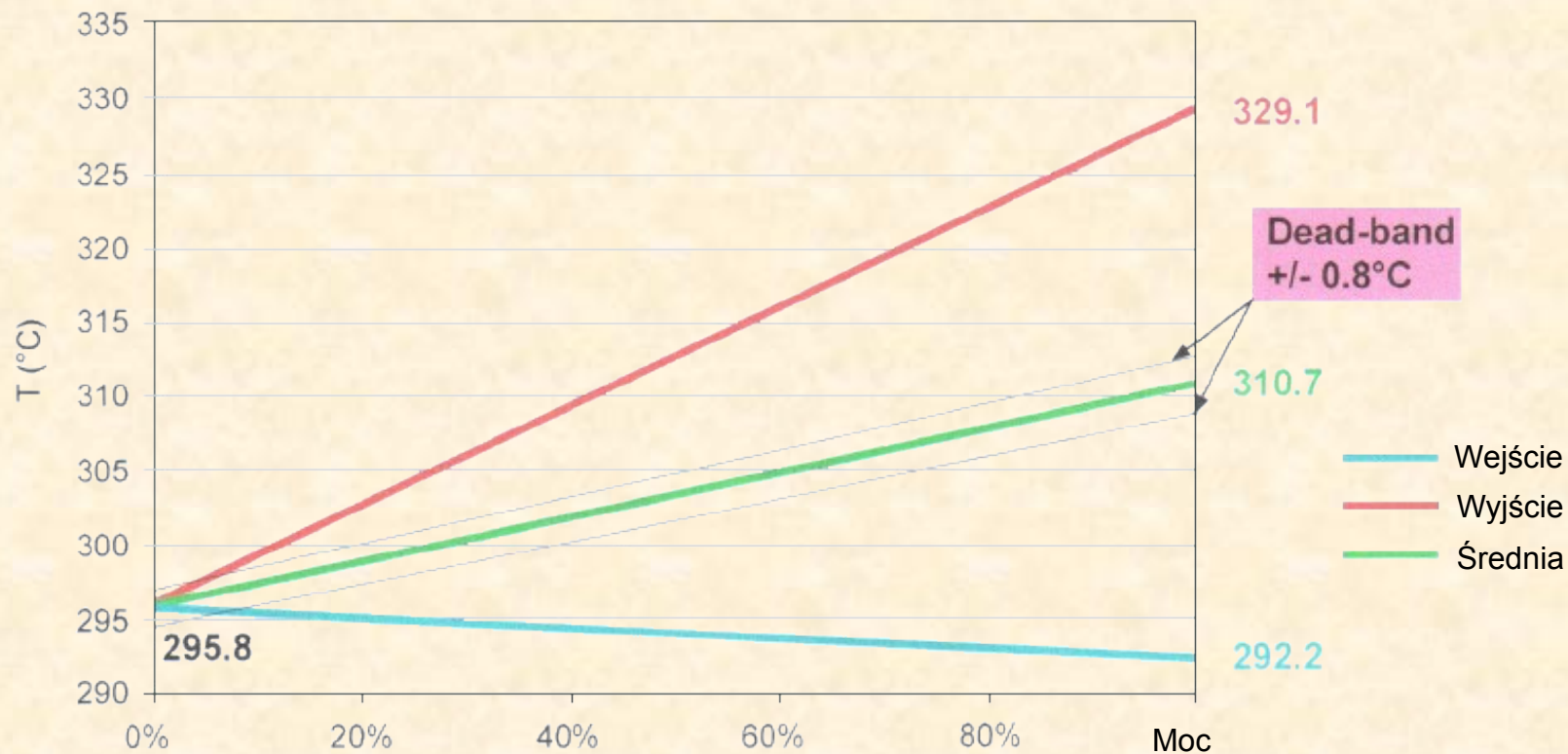
- przez ruchy banków
- przez nakładanie się działania banków na siebie

Typowe ruchy banków przy założeniu stałego stężenia bory (zwykle jednak tak nie jest)

Działania banków nakładają się na siebie (overlap)



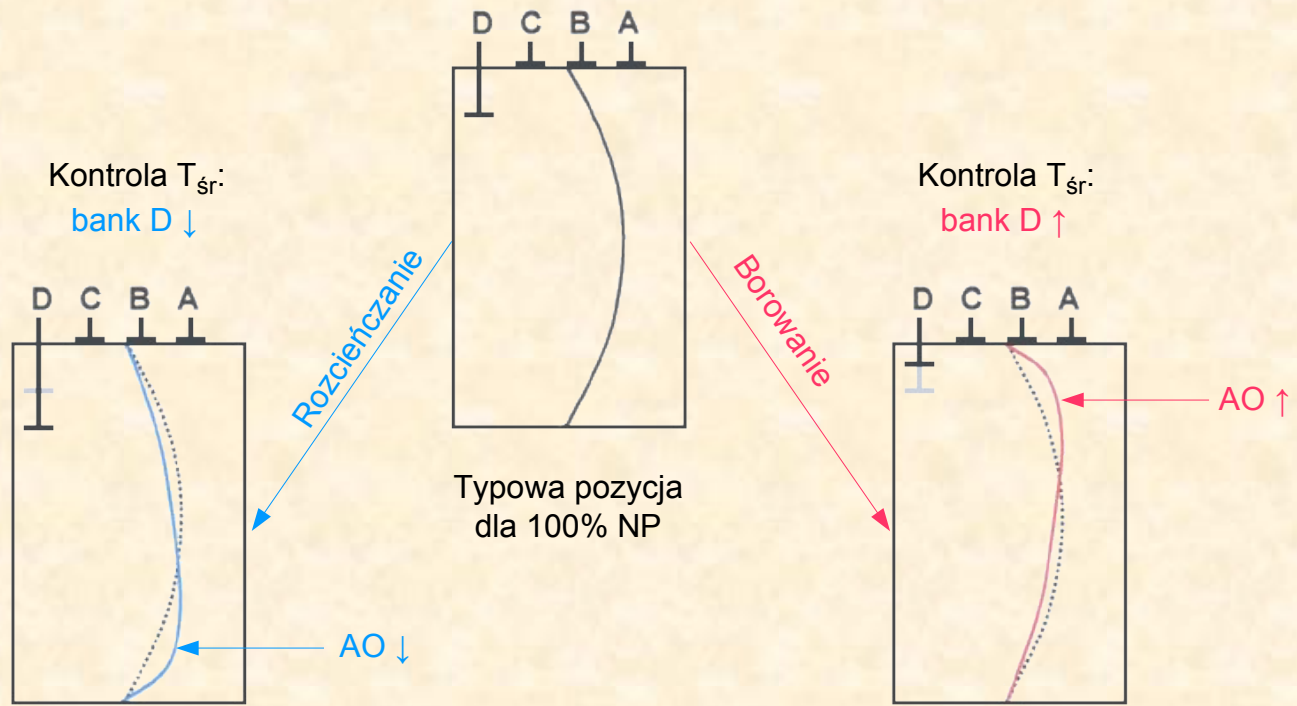
Operacje mocy PWR - Mod A



Program temperaturowy reaktora N4

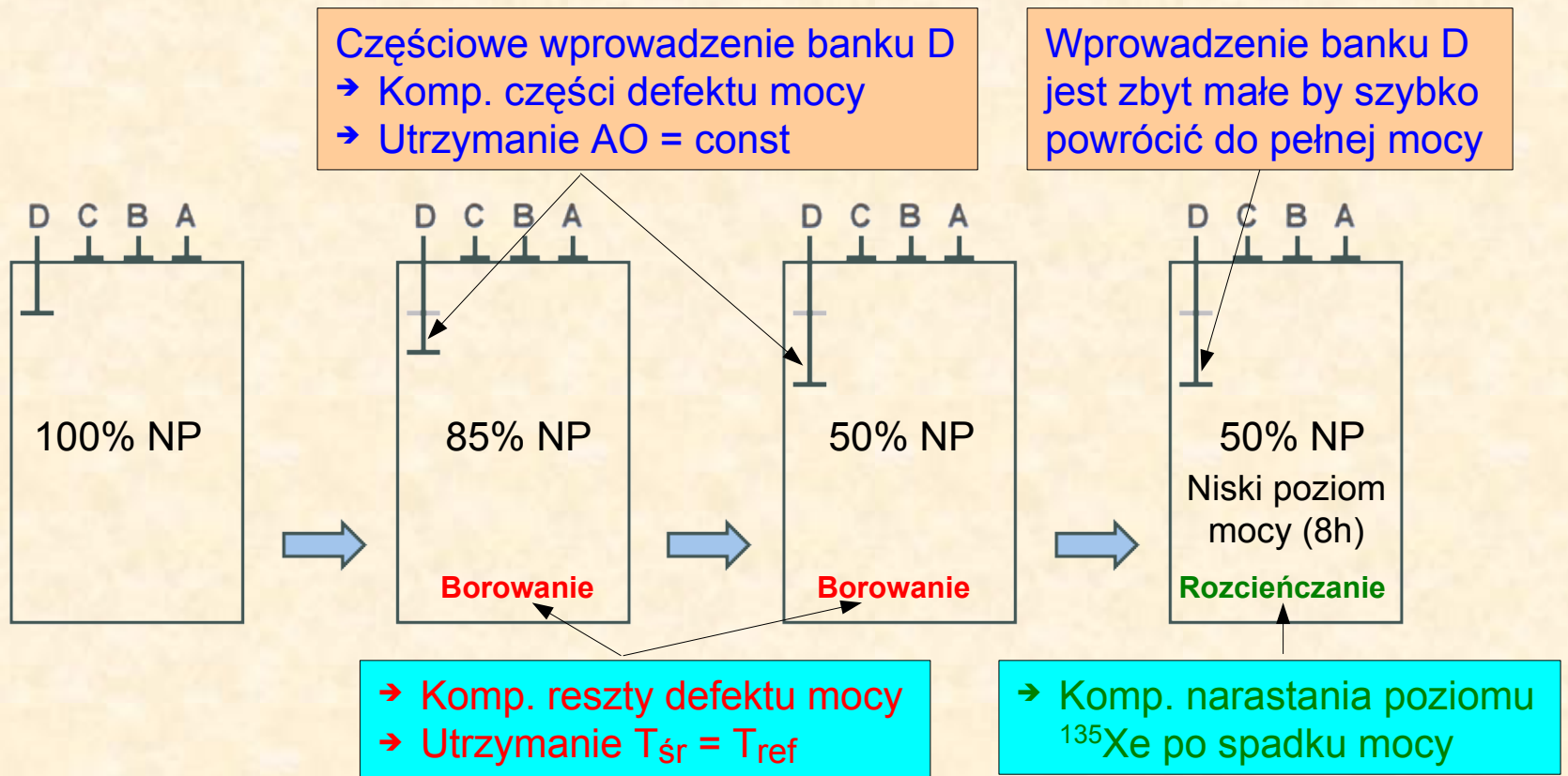
Operacje mocy PWR - Mod A

Sterowanie osiowym rozkładem mocy (AO):
- manualne borowanie/rozcieńczenie
- cel: $AO = AO_{ref} \pm 5\%$



Operacje mocy PWR - Mod A

Typowe zachowanie przy obniżaniu mocy





Operacje mocy PWR - Mod A

Powrót do 100% NP - odwrotne działanie:

- Rozcieńczanie - dla zwiększenia mocy
- Częściowe wysunięcie banku D - dla zachowania $AO = \text{const}$
- Borowanie w trakcie wysokiego poziomu mocy - dla kompensacji wypalenia ^{135}Xe

Wnioski:

- Możliwości pracy nadążnej ograniczone możliwościami szybkiego rozcieńczania boru:
 - $\text{max} = 1,5\% \text{ NP/min}$ na początku cyklu (BOL - $C_b = 1000 \text{ ppm}$)
- Klasyczne tempo zmian równe $2\% \text{ NP/min}$ nie jest możliwe
- Satysfakcjonujące możliwości dla pracy podstawowej (base load)
- Niewystarczające możliwości dla pracy nadążnej (load follow)



Operacje mocy PWR - Mod G

- Opracowany w roku 1975
- Dostosowany do wymogów systemu francuskiego
 - umożliwia szybkie operacje zmiany mocy w pracy nadążnej do 5%/min
 - umożliwia regulację częstotliwościową
- Wykorzystuje specjalny bank „szarych” prętów o małym wpływie na AO do operacji zmiany mocy
- Dokładne regulacje T_{sr} i AO są realizowane przez bank R

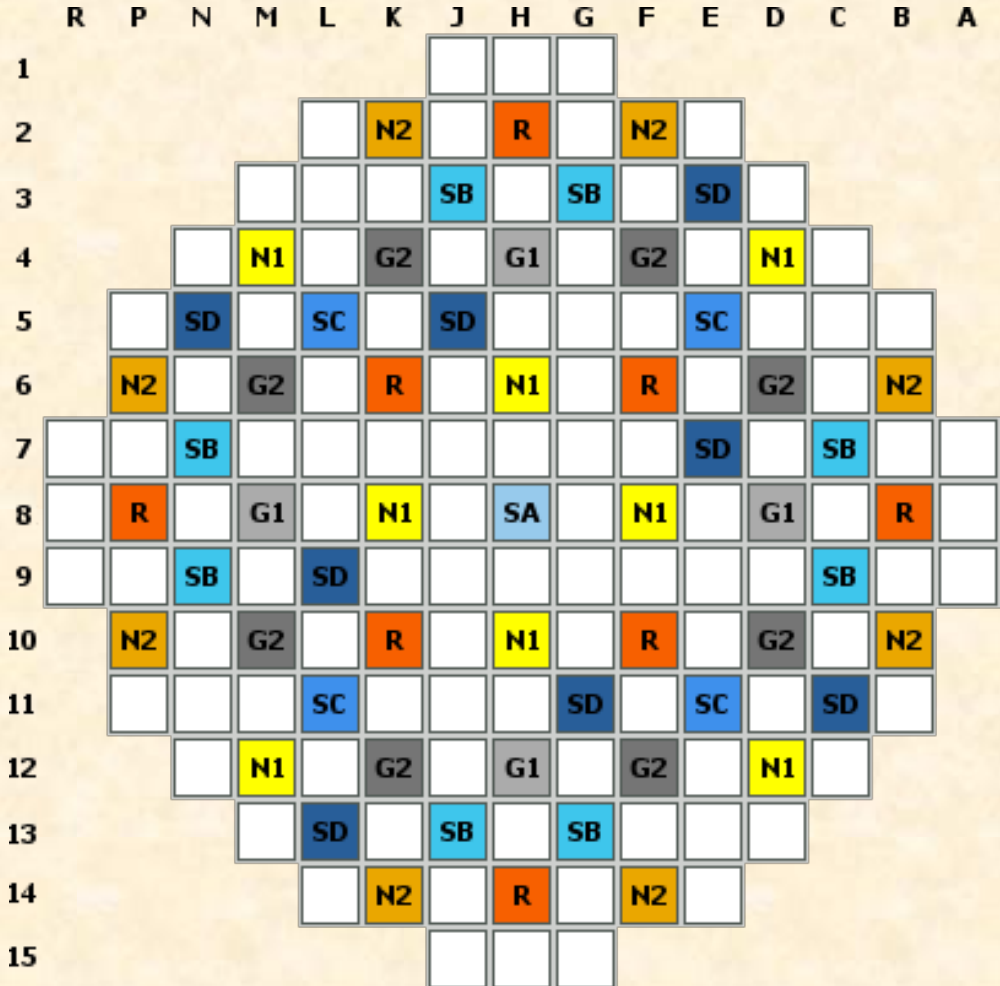
Reaktory pracujące w modzie G:

- Francja
 - 28 CPY 900 MWe (3 pętle chłodzenia)
 - 20 DPT&PQY 1300 MWe (4 pętle chłodzenia)
- Chiny
 - 4 reaktory 1000 MWe (3 pętle chłodzenia)

Operacje mocy PWR - Mod G

Banki prętów sterujących reaktora 900 MWe CPY

- ▶ **57 RCCAs**, w tym:
 - 12 gray RCCAs - G1 i G2
 - 45 black RCCAs
- ▶ **21 wyłączeniowych**
 - bank SA: 1 RCCS
 - bank SB: 8 RCCS
 - bank SC: 4 RCCS
 - bank SD: 8 RCCS
- ▶ **36 sterujących**
 - bank G1: 4 RCCS
 - bank G2: 8 RCCS
 - bank N1: 8 RCCS
 - bank N2: 8 RCCS
 - bank R: 8 RCCS



Operacje mocy PWR - Mod G

Banki prętów sterujących reaktora 1300 MWe P4

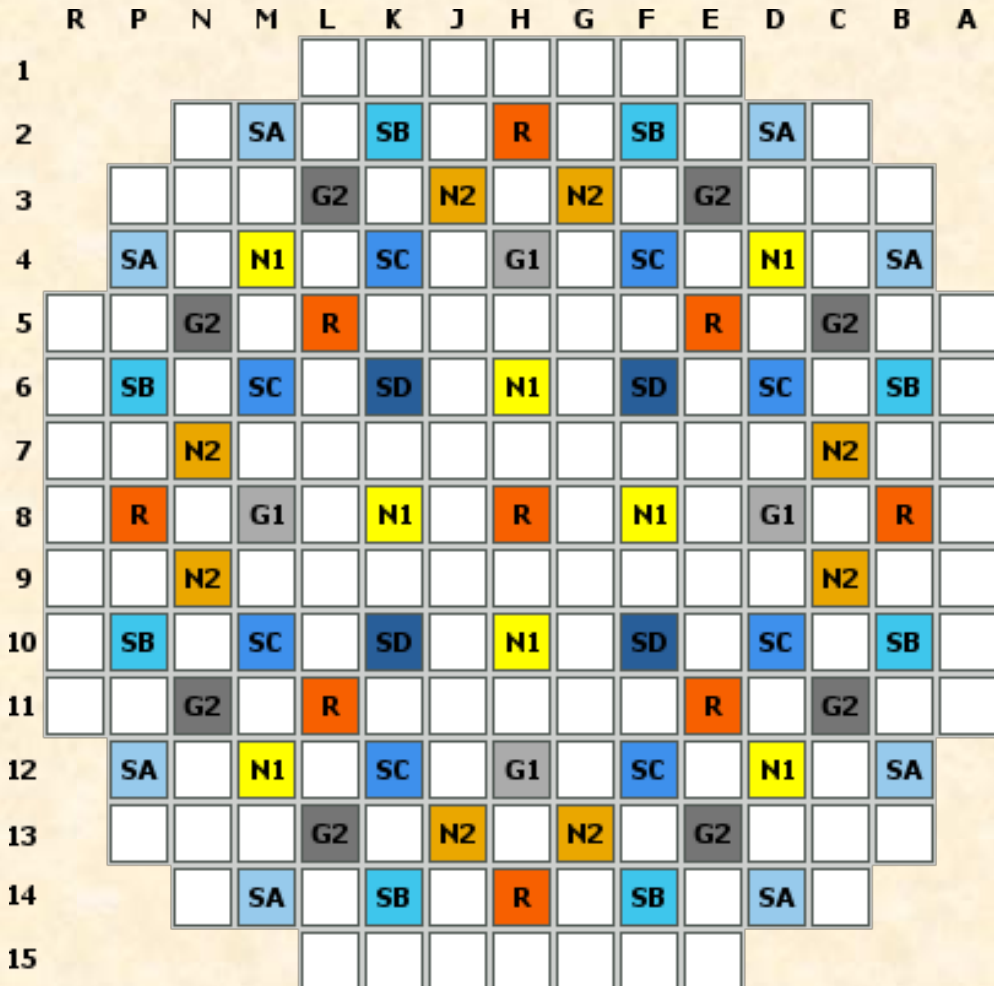
- ▶ **65 RCCAs**, w tym:
 - 12 gray RCCAs - G1 i G2
 - 49 black RCCAs

- ▶ **28 wyłączeniowych**

- bank SA: 8 RCCS
- bank SB: 8 RCCS
- bank SC: 8 RCCS
- bank SD: 4 RCCS

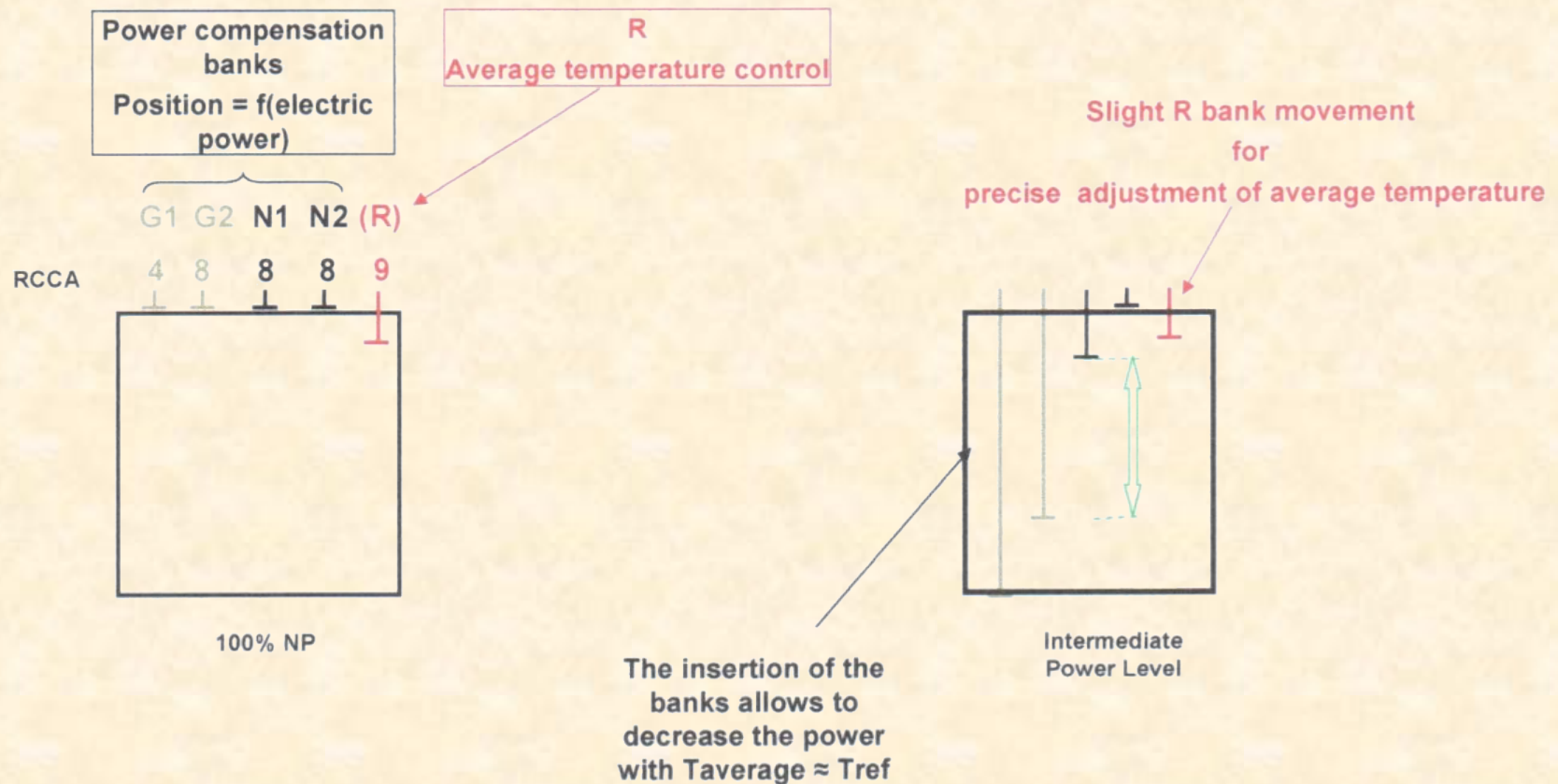
- ▶ **37 sterujących**

- bank G1: 4 RCCS
- bank G2: 8 RCCS
- bank N1: 8 RCCS
- bank N2: 8 RCCS
- bank R: 9 RCCS



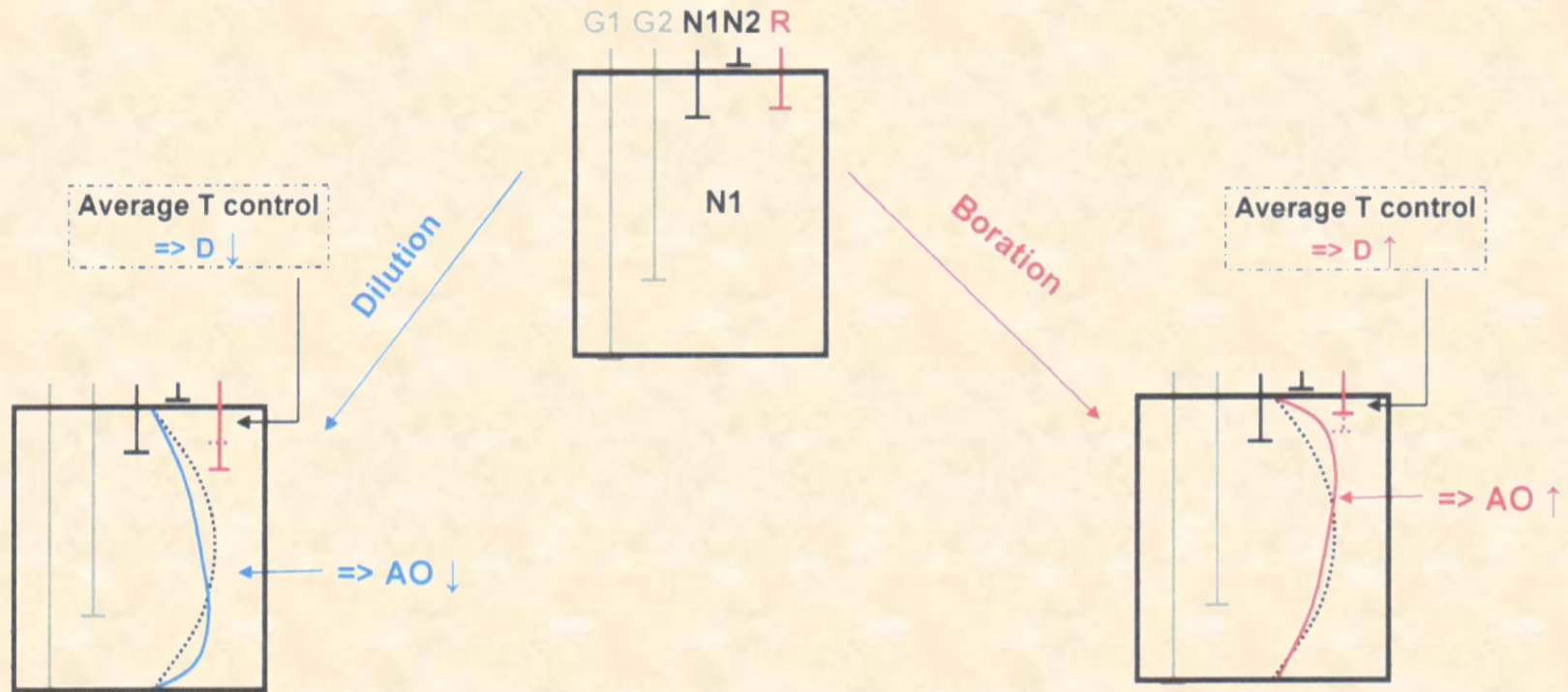
Operacje mocy PWR - Mod G

Zasady ruchu banków w modzie G



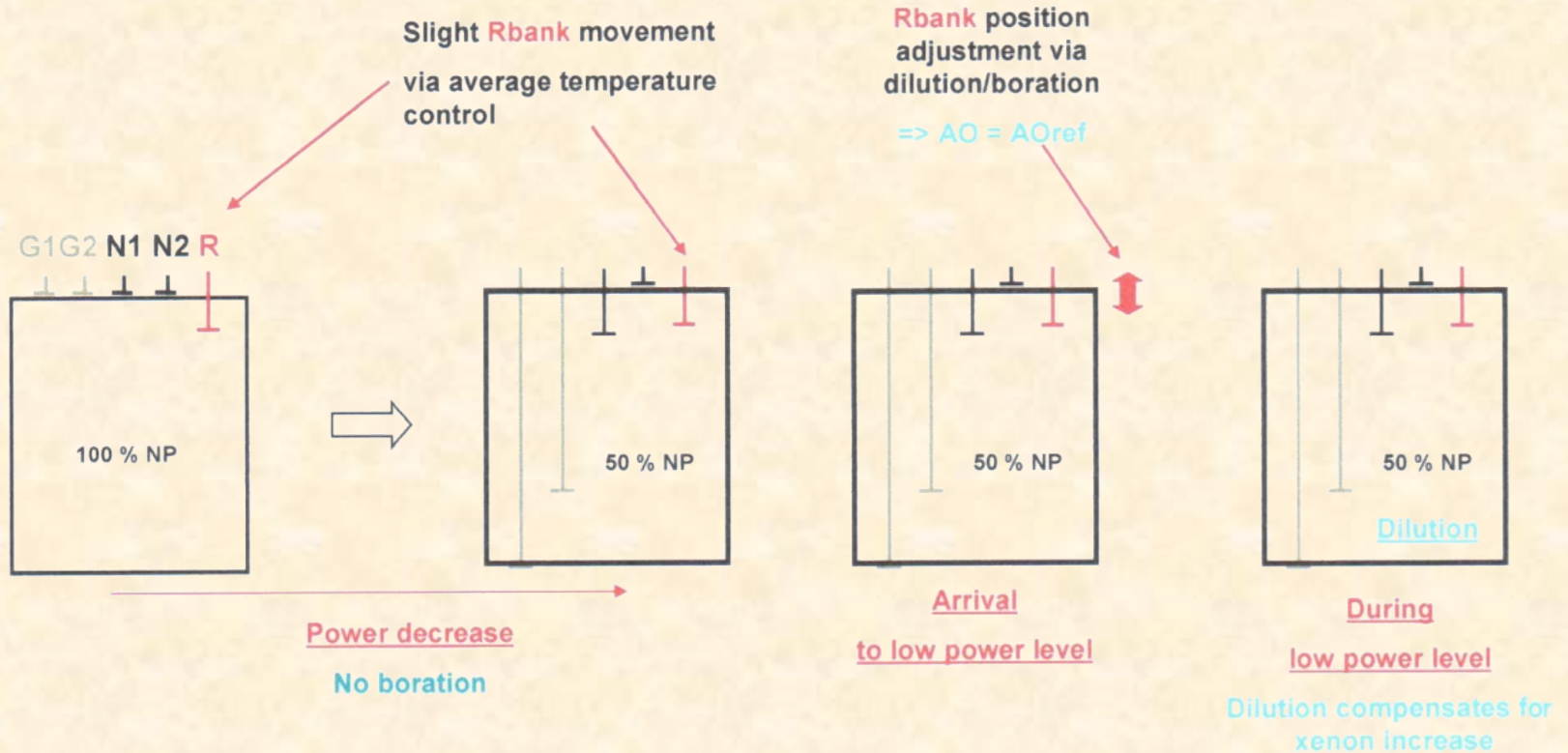
Operacje mocy PWR - Mod G

- Mniejsze zaburzenia osiowego rozkładu mocy niż w modzie A dzięki użyciu szarych prętów
- Zasada kontrolowania AO podobna jak w modzie A – ręczne borowanie/rozcieńczanie przez operatora
- Cel: $AO = AO_{ref} \pm 3\%$



Operacje mocy PWR - Mod G

Typowa sekwencja przy obniżaniu mocy



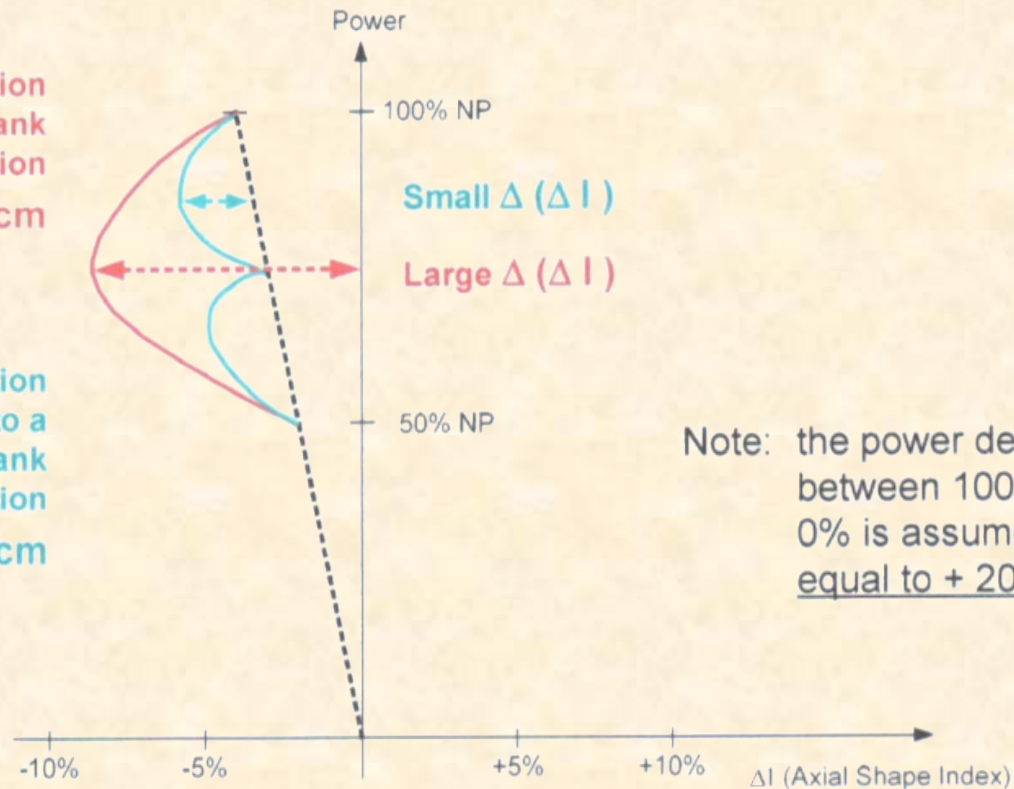
Podnoszenie mocy - sekwencja odwrotna

Operacje mocy PWR - Mod G

Wpływ czarnych i szarych prętów na AO (tu ASI)

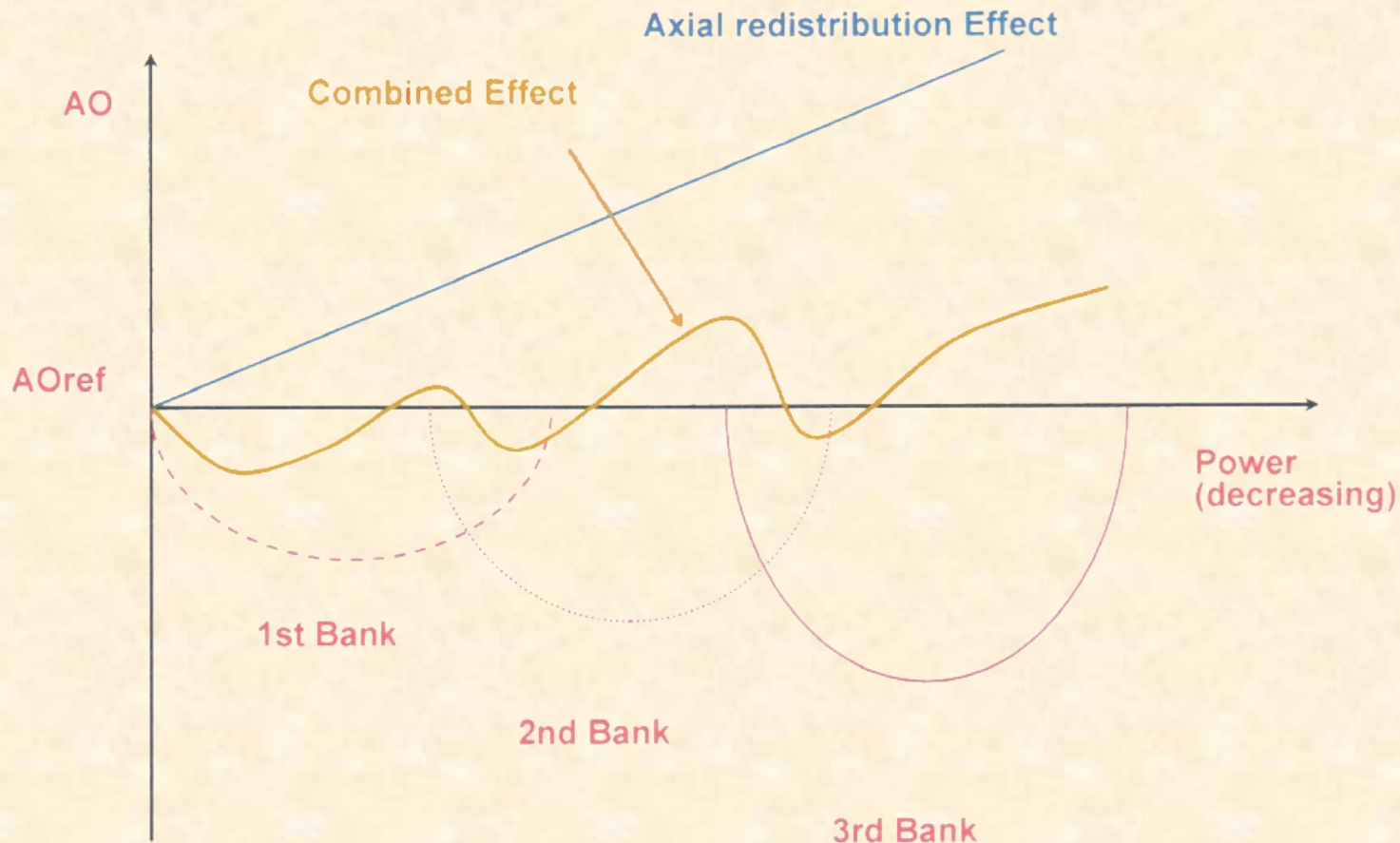
Axial Power distribution perturbation
due to a « Black » Control Bank
insertion
Bank Insertion = - 1000 pcm

Axial Power Distribution
Perturbation due to a
« Gray » Control Bank
Insertion
 $\Delta\rho = - 500$ pcm



Operacje mocy PWR - Mod G

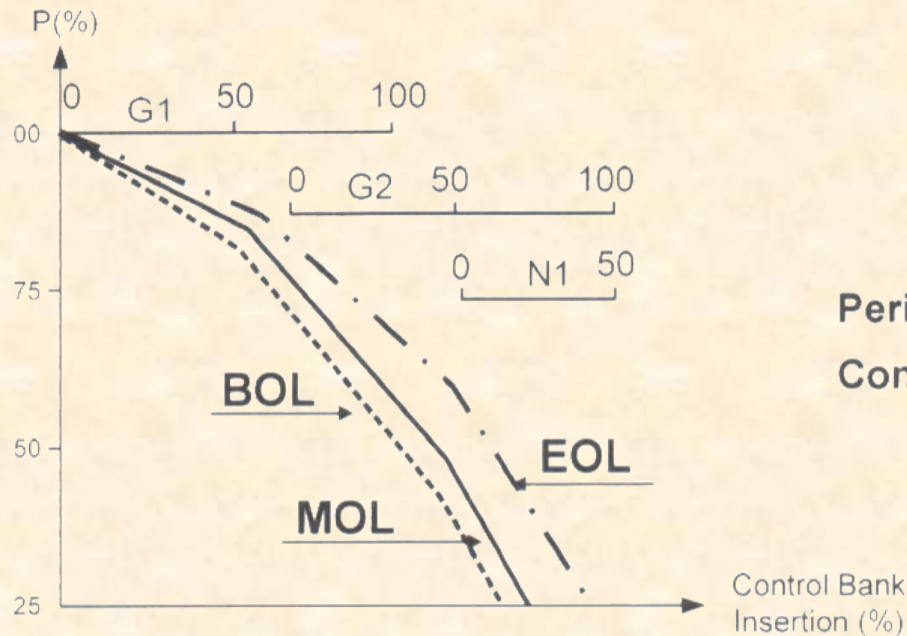
Wpływ nakładania działania banków (overlap)



Operacje mocy PWR - Mod G

Sekwencje działania banków i overlap są funkcją mocy i zależą od poziomu wypalenia (w którym momencie cyklu jesteśmy)

Kalibracja przeprowadzana jest co 3 miesiące



Periodic Calibration : 3 months

Control Banks Max Speed : 60 steps/mn



Operacje mocy PWR - Mod G

Mod G - podsumowanie

- Przystosowany do pracy w trybie nadążnym z szybkimi zmianami mocy do 5%/min przez 80% czasu cyklu
- Specjalny układ banków umożliwia szybki powrót do 100% np.

ale

- Operacje borowania/rozcieńczania ciągle przeprowadzane są manualnie przez operatora



Operacje mocy PWR - Mod T

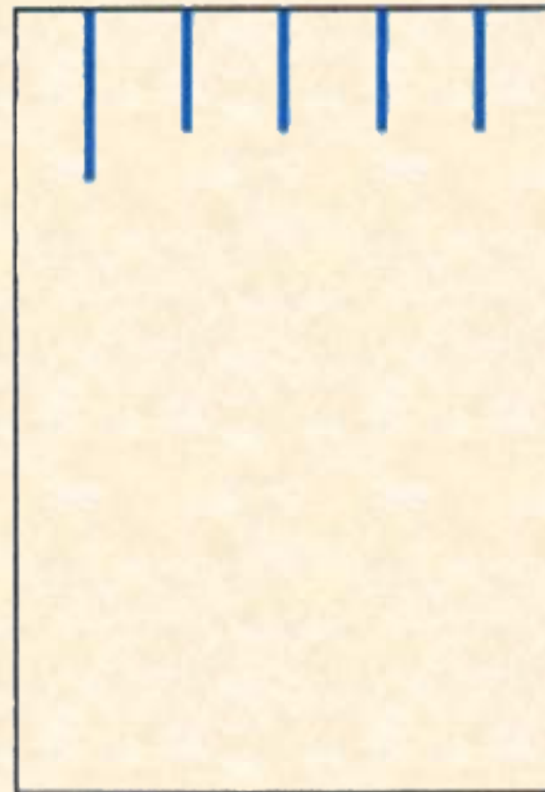
- Opracowany dla reaktora EPR
- Wysoka wydajność zmian mocy (co najmniej jak mod G)
- Pozwala na:
 - szybkie operacje zmiany mocy w pracy nadążnej do 5%/min
 - pracę krokową $\pm 10\%$ NP
 - regulację częstotliwościową $\pm 12,5\%$ NP ($\pm 2,5\%$ pierwotna, $\pm 10\%$ wtórna)
- Wszystkie regulacje automatyczne (T_{sr} , AO, P_{max})
- Mniej operacji z borem (więcej z bankami prętów), przez co:
 - możliwy szybki powrót do mocy nominalnej
 - mniej odpadów płynnych związanych z borem

Budowane reaktory EPR:

- | | |
|-------------|---------------|
| ➤ Francja | Flamanville |
| ➤ Finlandia | Olkiluoto |
| ➤ Chiny | Taishan (1&2) |

Operacje mocy PWR - Mod T

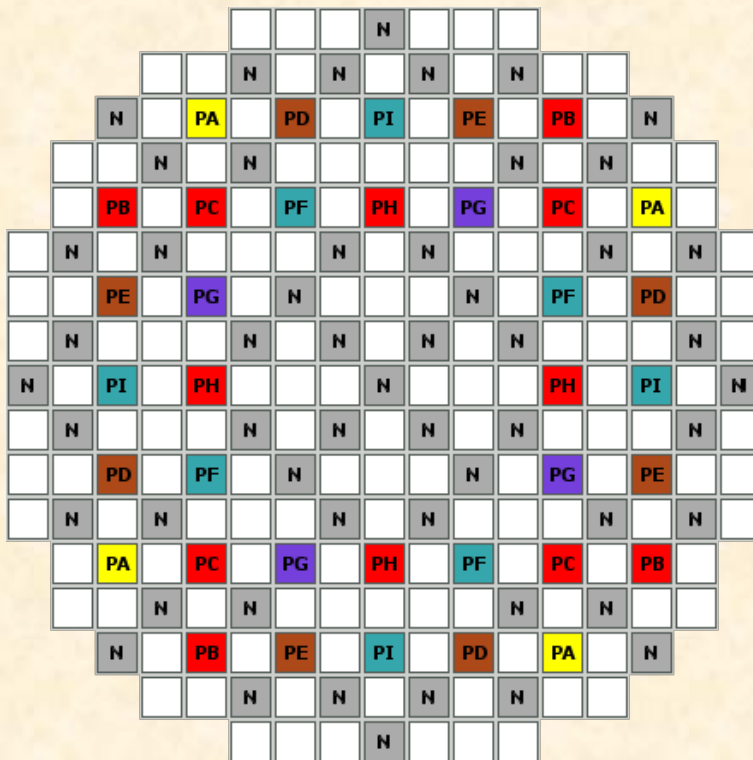
P1 P2 P3 P4 P5



- 89 „czarnych” RCCAs:
 - 36 sterujących Tśr, AO, Pmax
 - P1: 4 RCCAs
 - P2: 4 RCCAs
 - P3: 8 RCCAs
 - P4: 8 RCCAs
 - P5: 12 RCCAs
 - 53 wyłączeniowe
 - N1: 25 RCCAs
 - N2: 28 RCCAs
- W reaktorze EPR nie stosuje się prętów „szarych”

Operacje mocy PWR - Mod T

Zmiany banków prętów sterujących reaktora EPR



Sekwencja 1

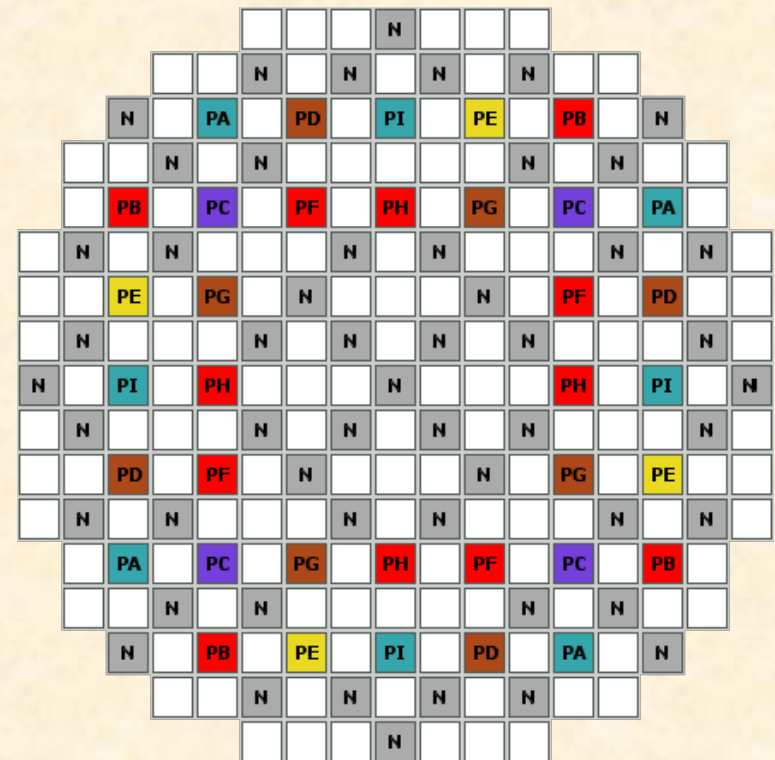
P1

P2

P3

P4

P5



Sekwencja 2

Operacje mocy PWR - Mod T

Zmiany banków prętów sterujących reaktora EPR



Sekwencja 3

P1

P2

P3

P4

P5

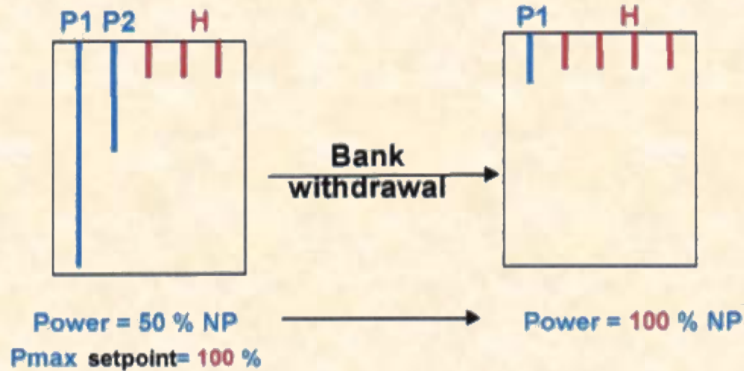


Sekwencja 4

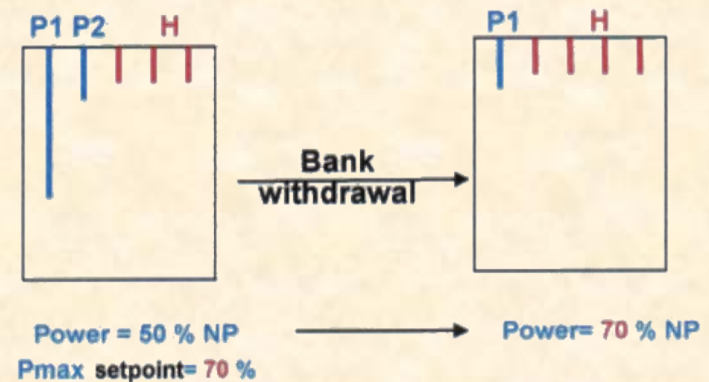
Operacje mocy PWR - Mod T

■ Sterowanie mocą (Pmax control)

- Pmax – maksymalna moc, która może być osiągnięta przez zmianę położenia banków (związana ze stężeniem boru)
- Wartość docelowa Pmax jest ustawiana przez operatora
- W danym momencie Pmax zależy od głębokości wprowadzenia banków



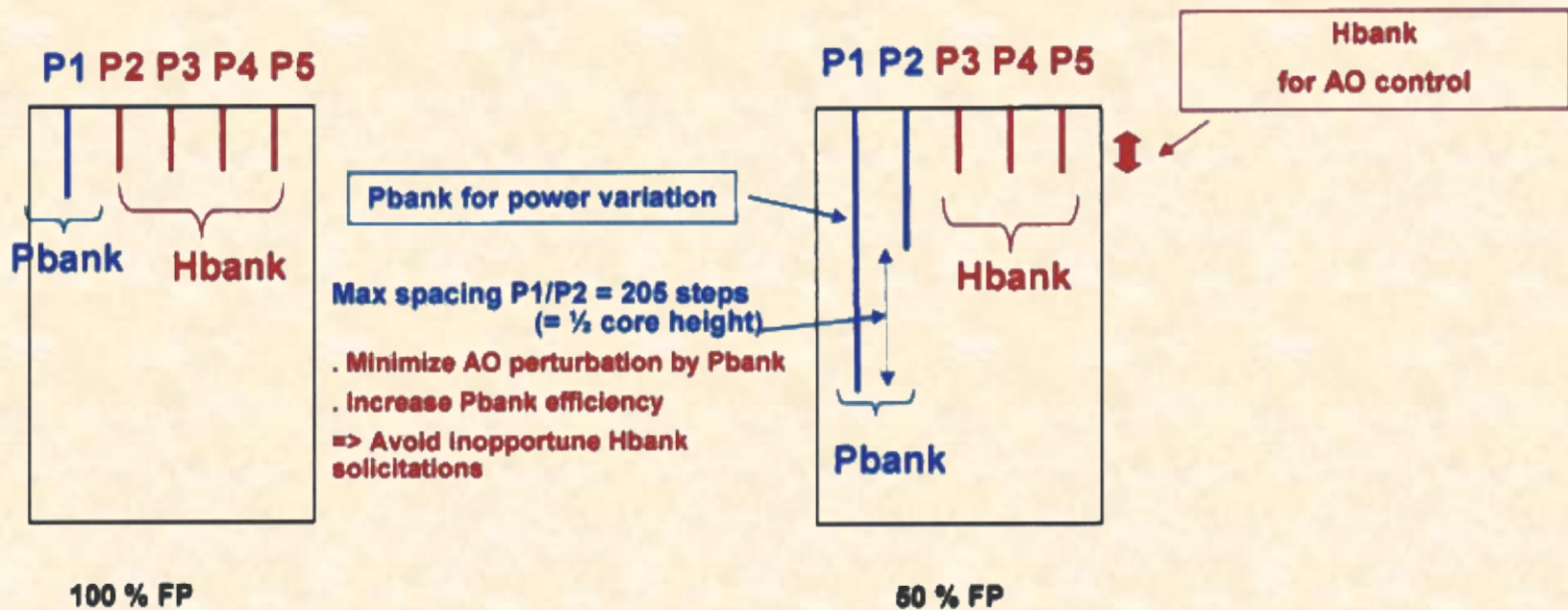
Example 1



Example 2

Operacje mocy PWR - Mod T

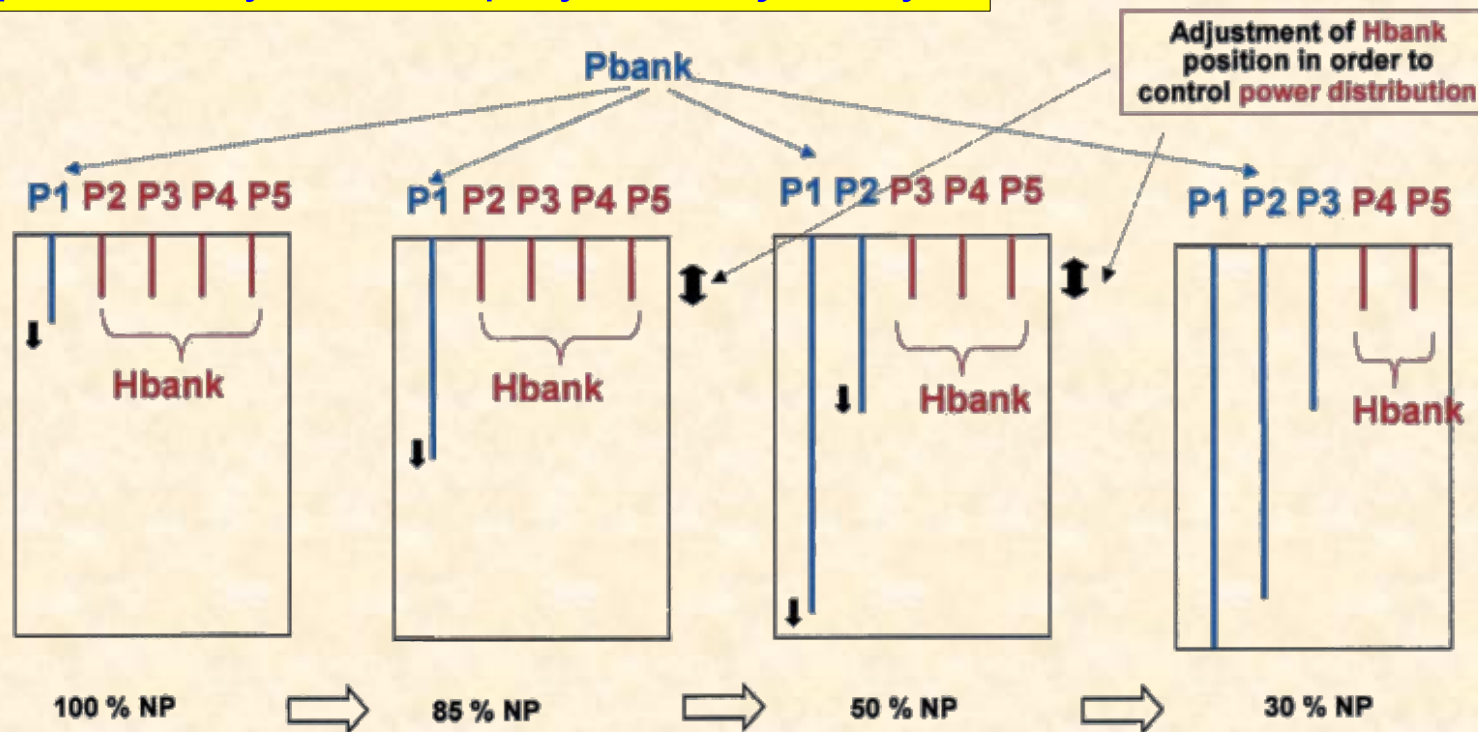
- ◆ Banki P1-P5 są podzielone na 2 grupy:
 - **Pbank** (Power bank) reagujący na zmiany **T_{sr}** i zmiany **mocy**
 - **Hbank** (Heavy bank) reagujący na zmiany **AO**
- ◆ Kompozycja **Pbank** i **Hbank** jest zmienna



Typical composition of Pbank and Hbank at 100% and 50% FP

Operacje mocy PWR - Mod T

Typowe ruchy banków przy redukcji mocy



Pbank – kompensuje zmiany mocy (nie ma operacji z borem)

Hbank – dopasowuje ustawienie kompensując zmiany AO

Operacje mocy PWR - Mod T

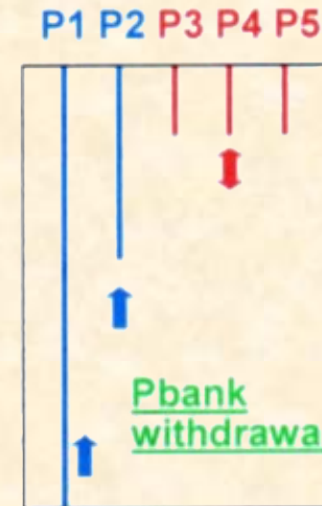
Dwie strategie operacji przy małej mocy

Maksymalna manewrowość
 $P_{max} = 100\%$

Minimum odpadów płynnych
 $P_{max} = 30\%$



30 % NP



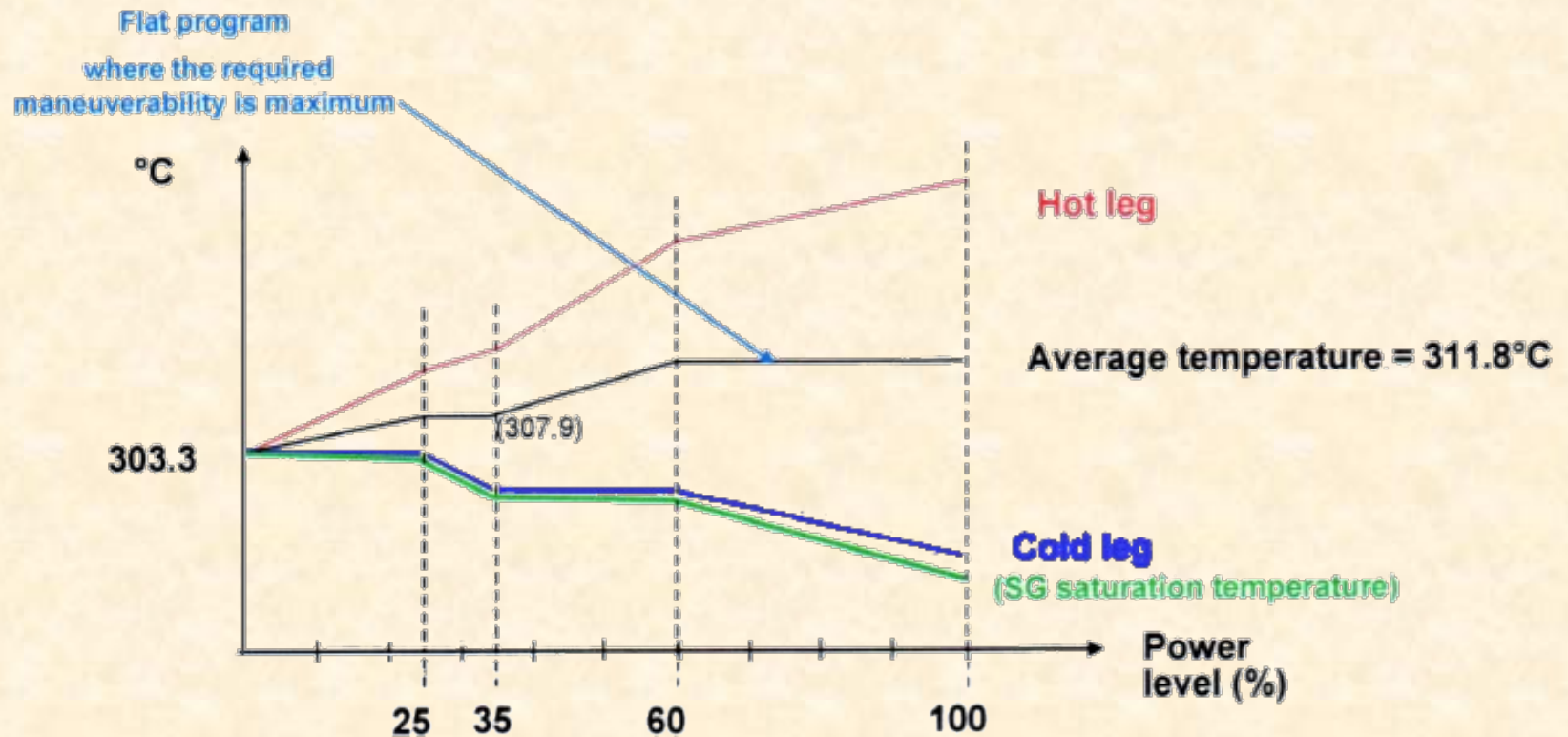
Ksenon kompensowany
rozcieńczaniem

Ksenon kompensowany
prętami (Pbank)

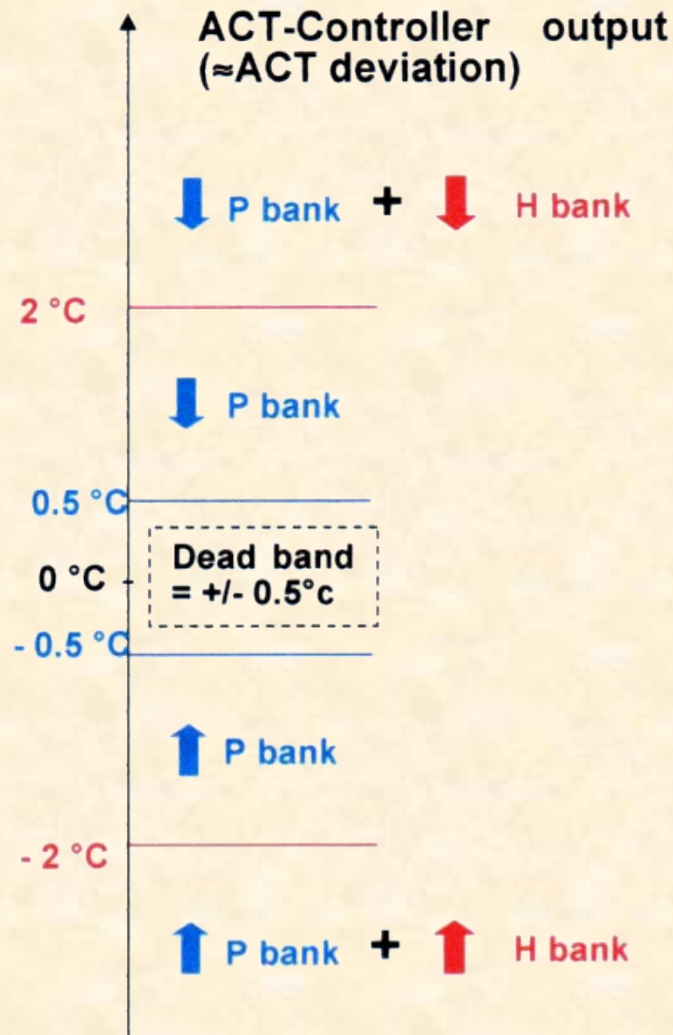
Hbank – kompensuje zmiany AO

Operacje mocy PWR - Mod T

Program temperaturowy



Operacje mocy PWR - Mod T



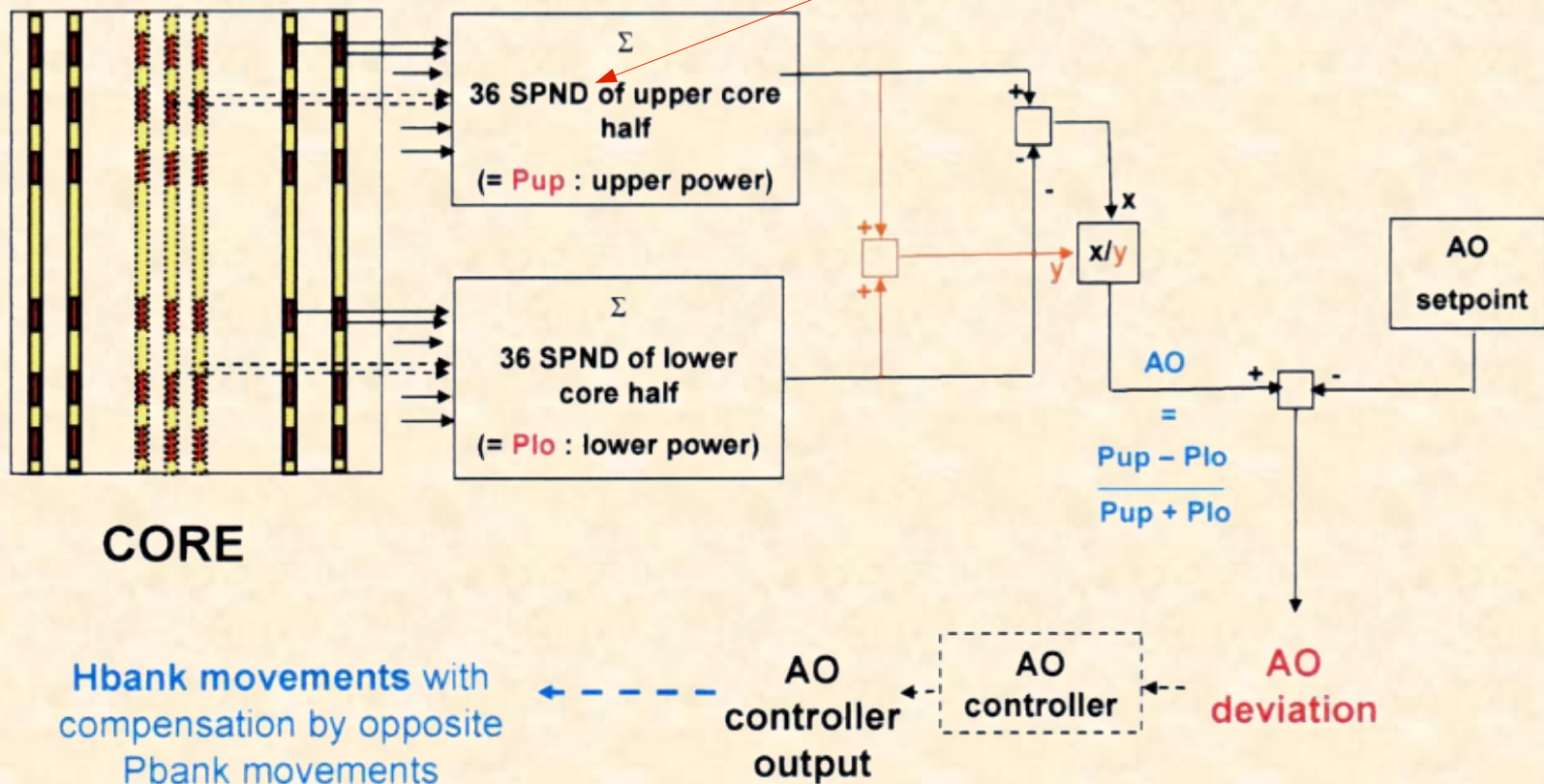
Ruchy banków
Pbank i Hbank
przy kontroli T_{sr}

Uwaga:
T_{sr} docelowa (setpoint)
wynika z programu
temperaturowego i w
szerokim zakresie mocy
wynosi 311,8°C
(poprzedni slajd)

Operacje mocy PWR - Mod T

Kontrola AO

SPND – self powered neutron detector

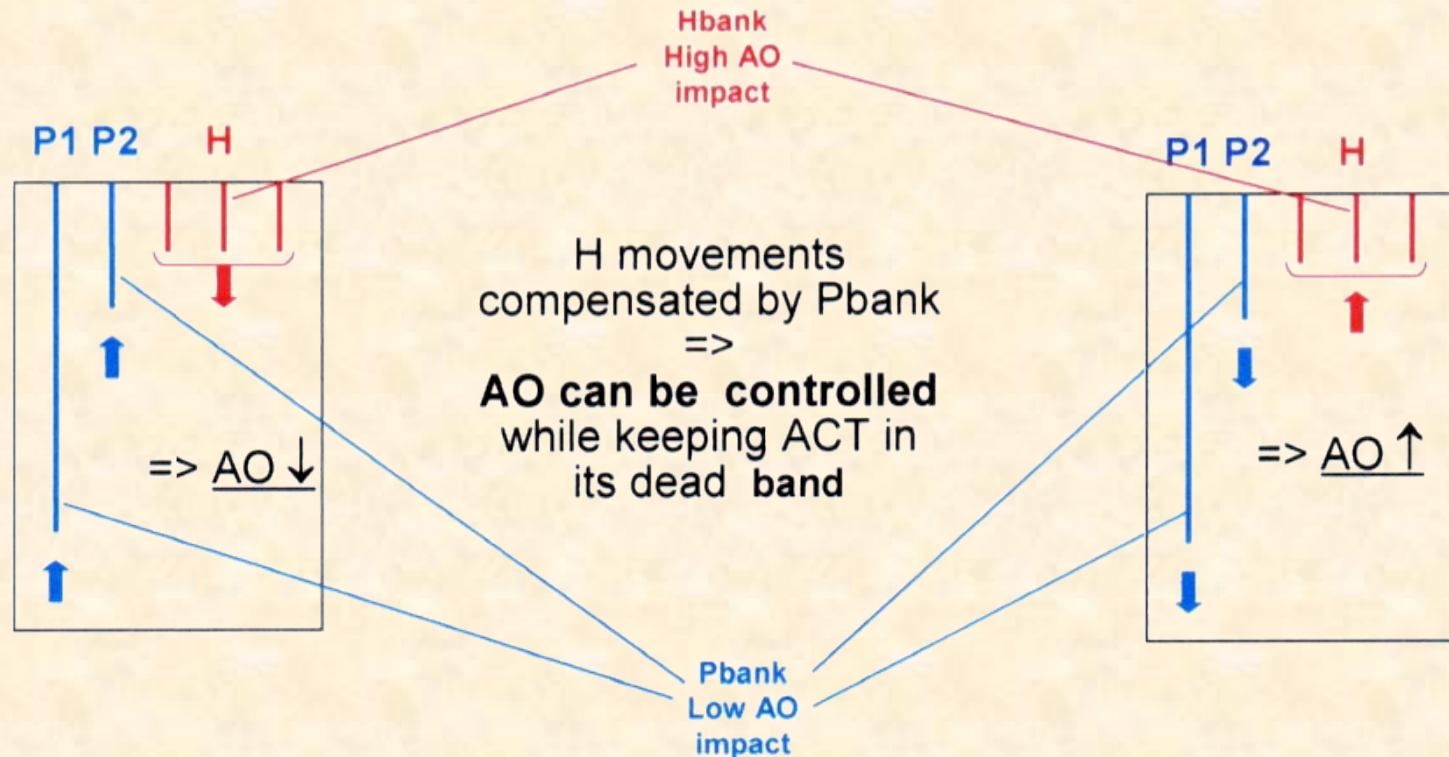


Operacje mocy PWR - Mod T

AO jest regulowany przez **Hbank**

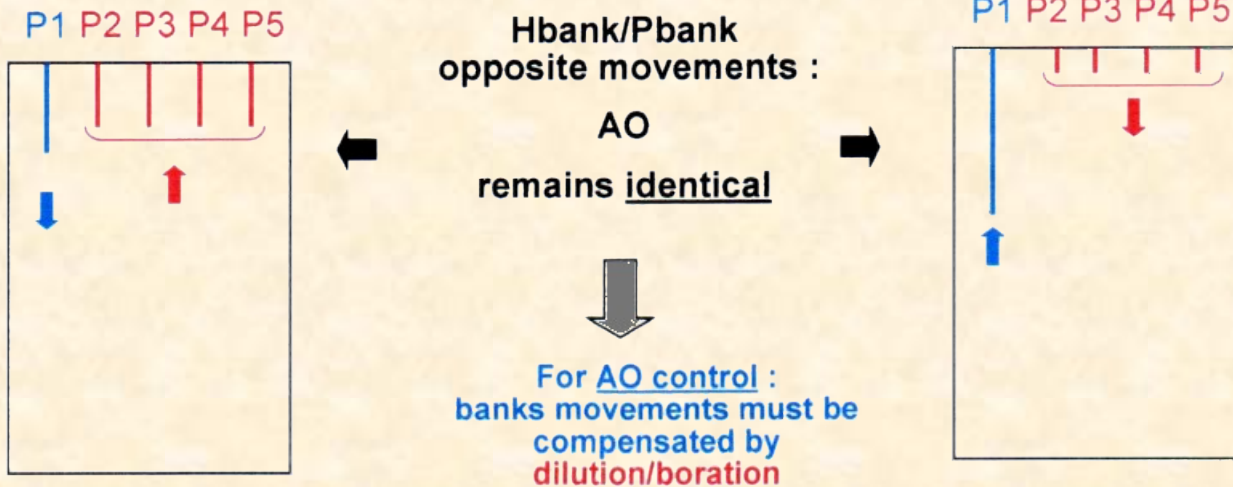
Jego ruchy kompensuje **Pbank**

Kompensacja pozwala utrzymać Tsr w zakresie martwym



Operacje mocy PWR - Mod T

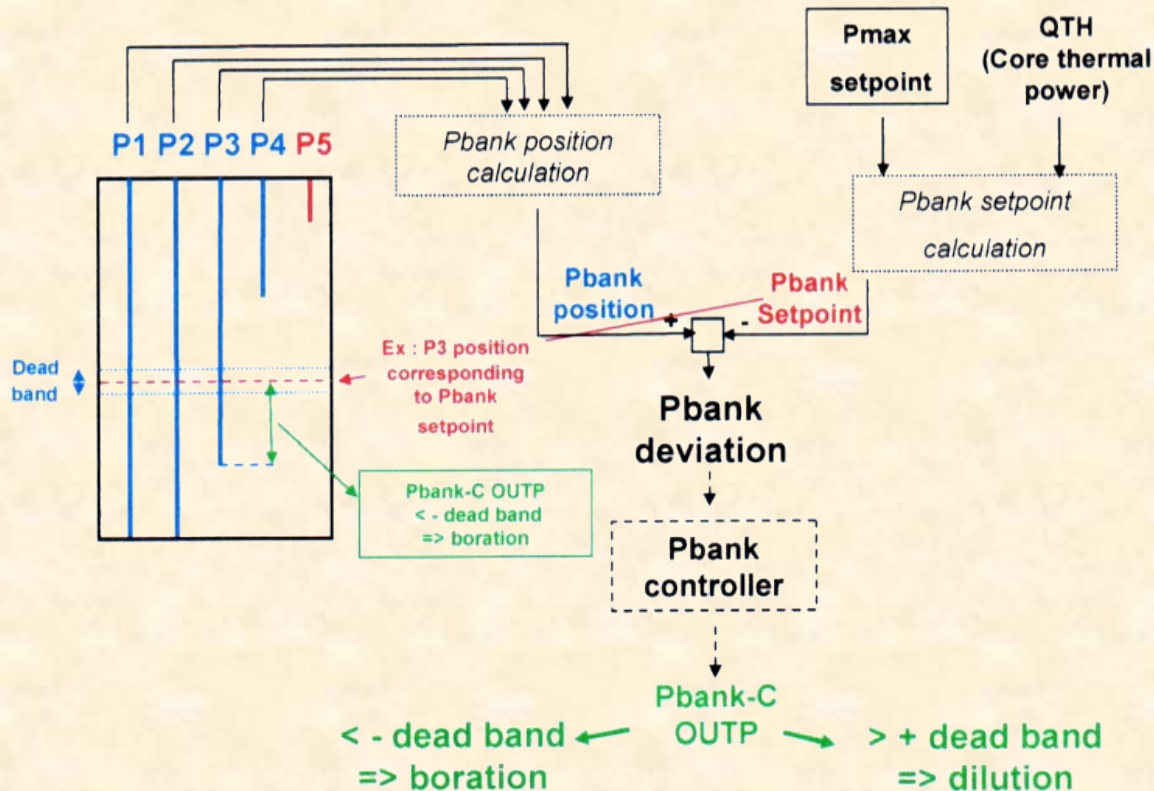
Regulacja AO z bankami w górze rdzenia



Operacje mocy PWR - Mod T

Regulacja Pmax przez ustawienie Pbank

- Ustawiona przez operatora wartość Pmax jest przeliczana przez sterownik na setpoint Pbanku
- Jeżeli położenie banku wychodzi poza zakres martwy uruchamiane jest borowanie/rozcieńczanie





Operacje mocy PWR

Podsumowanie modów A, G, T

- **Mod A** stosowany jest w reaktorach pracujących w trybie podstawowym (base load)
 - nie pozwala na szybkie zmiany mocy
 - operacje wykonywane manualnie
- **Mod G** stosowany jest w reaktorach francuskich pracujących w trybie nadążnym (większość floty reaktorów)
 - pozwala na operacje zmiany mocy do 5%/minutę przez 80% cyklu pracy
 - pozwala na szybki powrót do mocy nominalnej
 - operacje borowania/rozcieńczania wykonywane manualnie
- **Mod T** zaprojektowany został dla reaktorów EPR z myślą o pracy w trybie nadążnym
 - pozwala na szybkie operacje zmiany mocy
 - pozwala na ograniczenie ilości odpadów płynnych przez zmniejszenie operacji z borem na rzecz operacji prętami
 - poprawia równomierność wypalenia paliwa
 - wszystkie operacje wykonywane automatycznie



Dziękuję za uwagę