

Jądrowe reaktory energetyczne 2



dr inż. Mariusz Kopec

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



Zagadnienia

- Reakcja rozszczepienia
- Mnożenie neutronów - k_{eff}
- Współczynniki temperaturowe
- Procesy zmieniające reaktywność
- Wypalanie paliwa
- Sterowanie reaktorem
- Operacje mocy
- Elementy bezpieczeństwa

Początki

- 2 mld lat temu – naturalny reaktor w Oklo



Sir James Chadwick
(1891-1974)

- 1938 – odkrycie reakcji rozszczepienia przez O. Hahna i F. Strassmanna



- 1932 – odkrycie neutronu przez J. Chadwicka

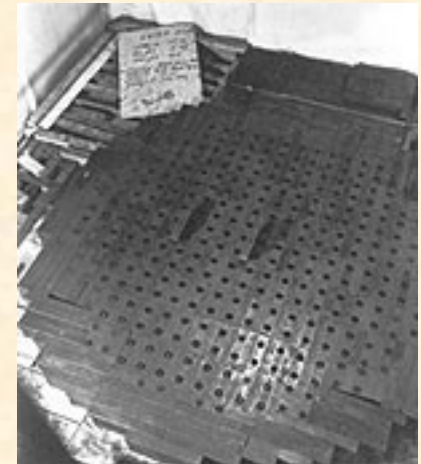


Początki

- 1939 – R. Oppenheimer przewiduje reakcję łańcuchową

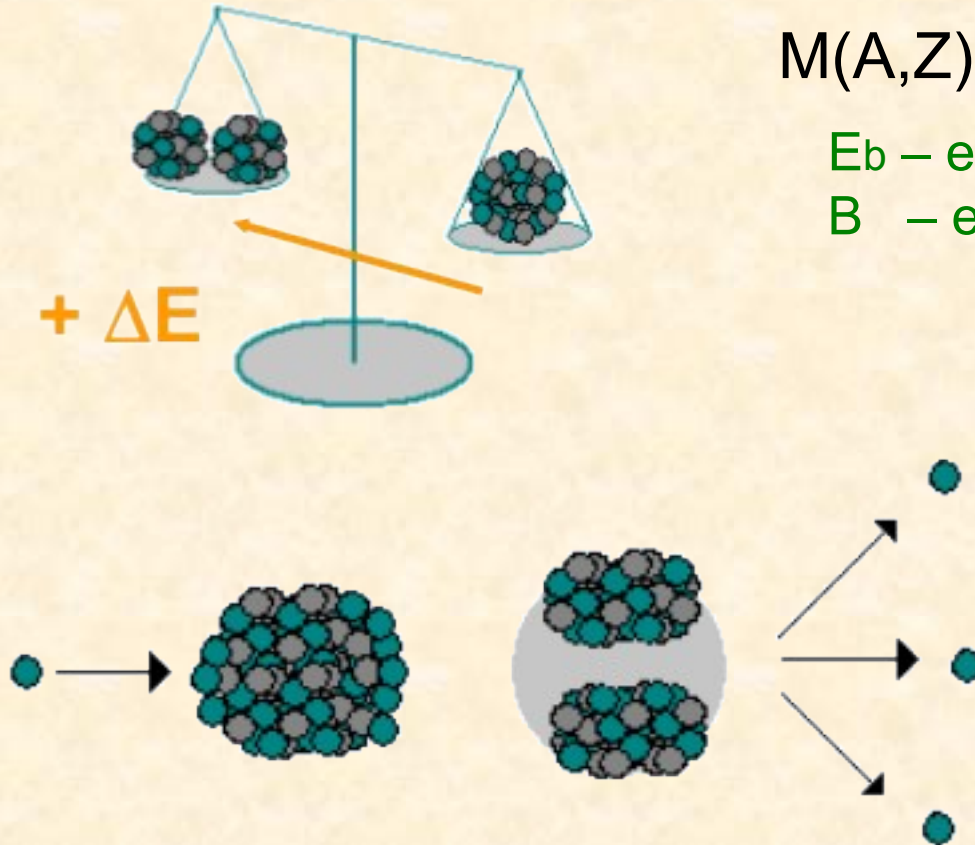


- 1940 – odkrycie plutonu przez G. Seaborga



- 1942 – 2 grudnia pierwszy reaktor CP1 budowany przez E. Fermiego osiąga stan krytyczny

Reakcja rozszczepienia



$$M(A,Z) = ZM_p + NM_n - E_b(A,Z)$$

E_b – energia wiązania (>0)

B – energia wiązania na nukleon

Masa przed:

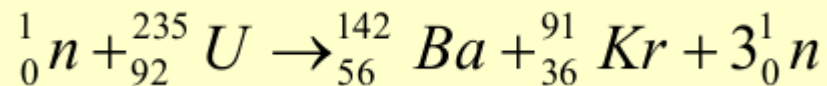
$$M_1 = M_{\text{nukl}} - A B(A)$$

Masa po:

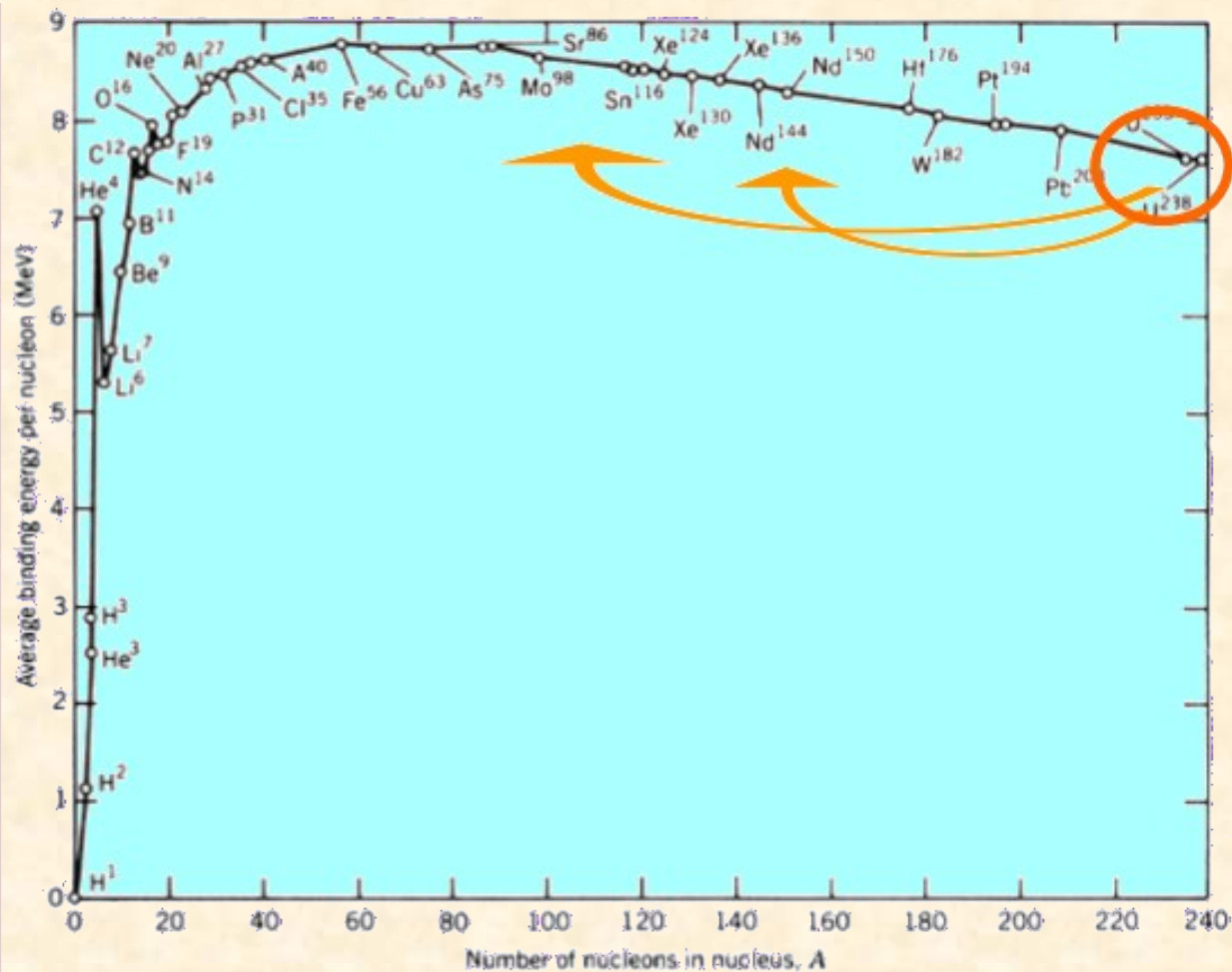
$$M_2 = M_{\text{nukl}} - A_1 B(A_1) - A_2 B(A_2)$$

Różnica mas (=E):

$$\Delta M = A_1 B(A_1) + A_2 B(A_2) - A B(A)$$

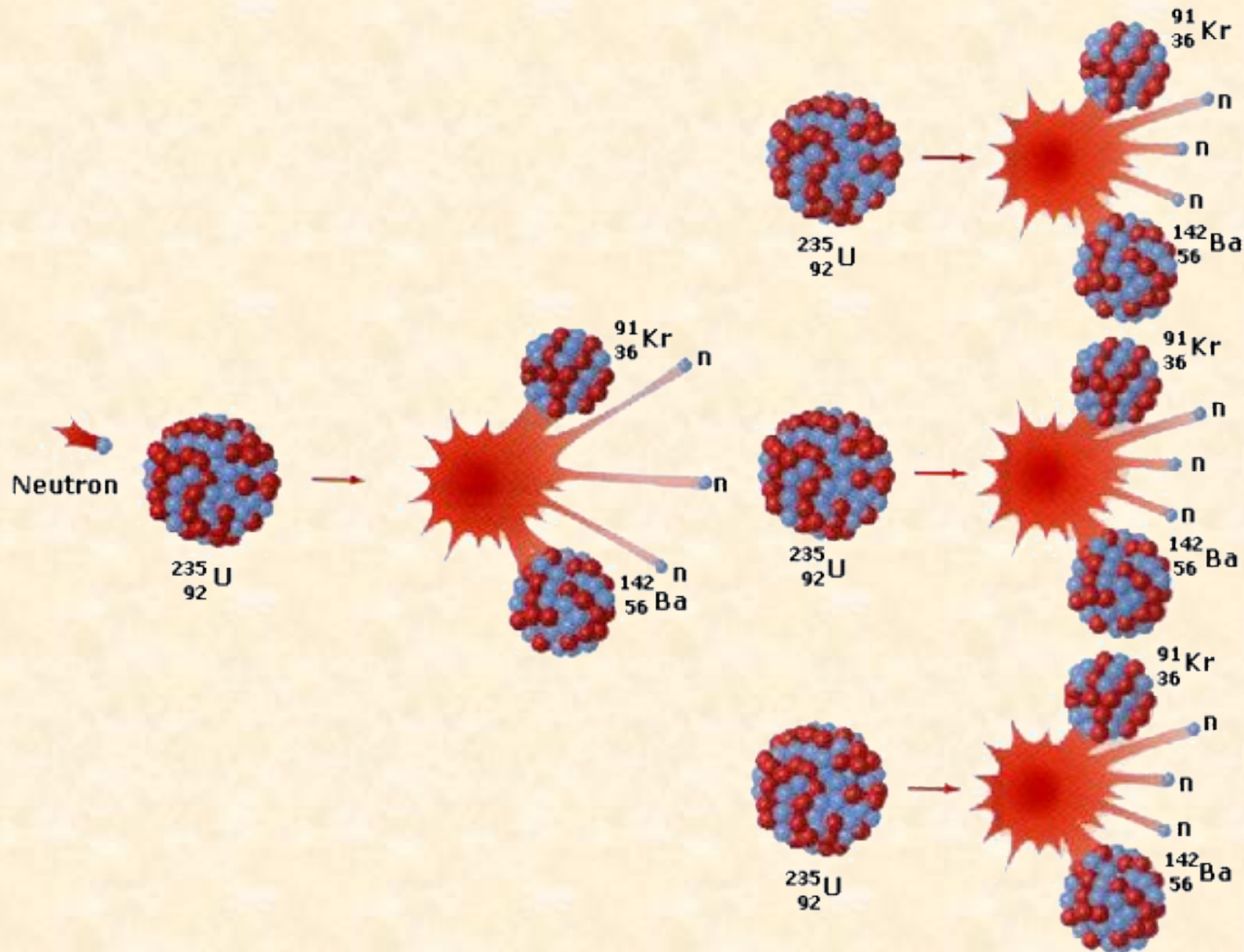


Reakcja rozszczepienia



Energia wiązania na nukleon

Reakcja łańcuchowa



Reakcja łańcuchowa

	1 fission of ^{235}U (MeV)	1 fission of ^{239}Pu (MeV)
Fission Products	166,2	172,8
neutrons	4,8	5,9
γ (prompt)	8	7,7
β - of the F.P.	7	6,1
γ of the F.P.	7,2	6,1
TOTAL from fission	193,2	198,6
γ from neutron capture	10	10
TOTAL	203	209

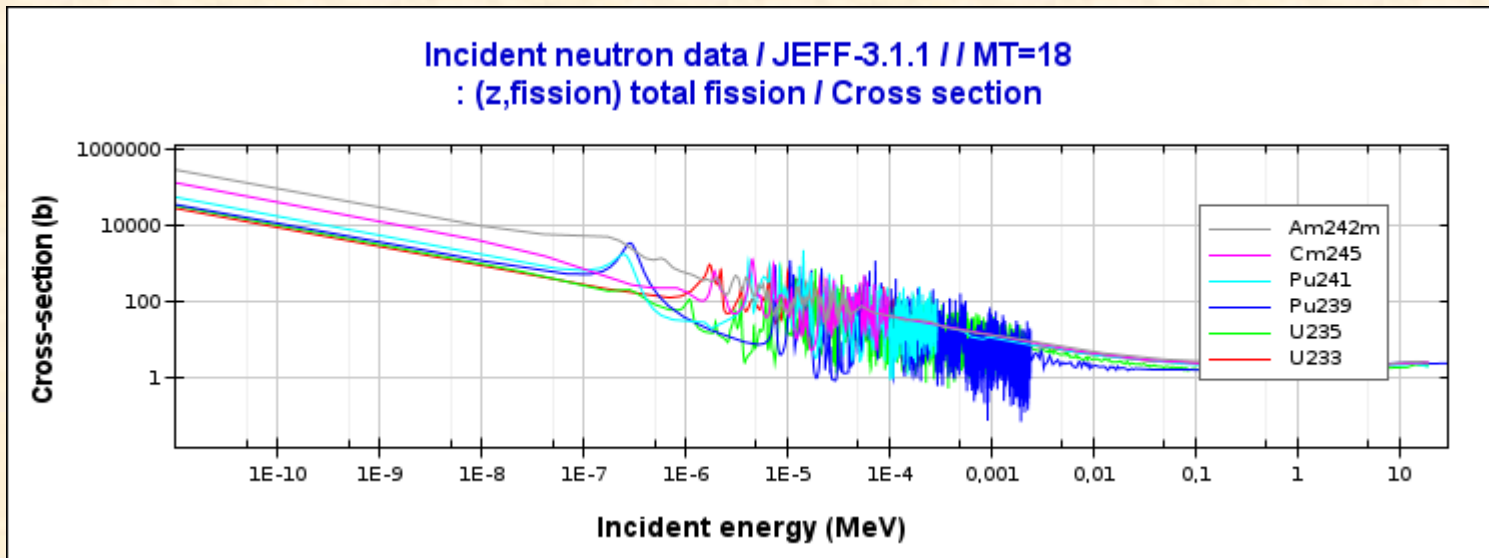
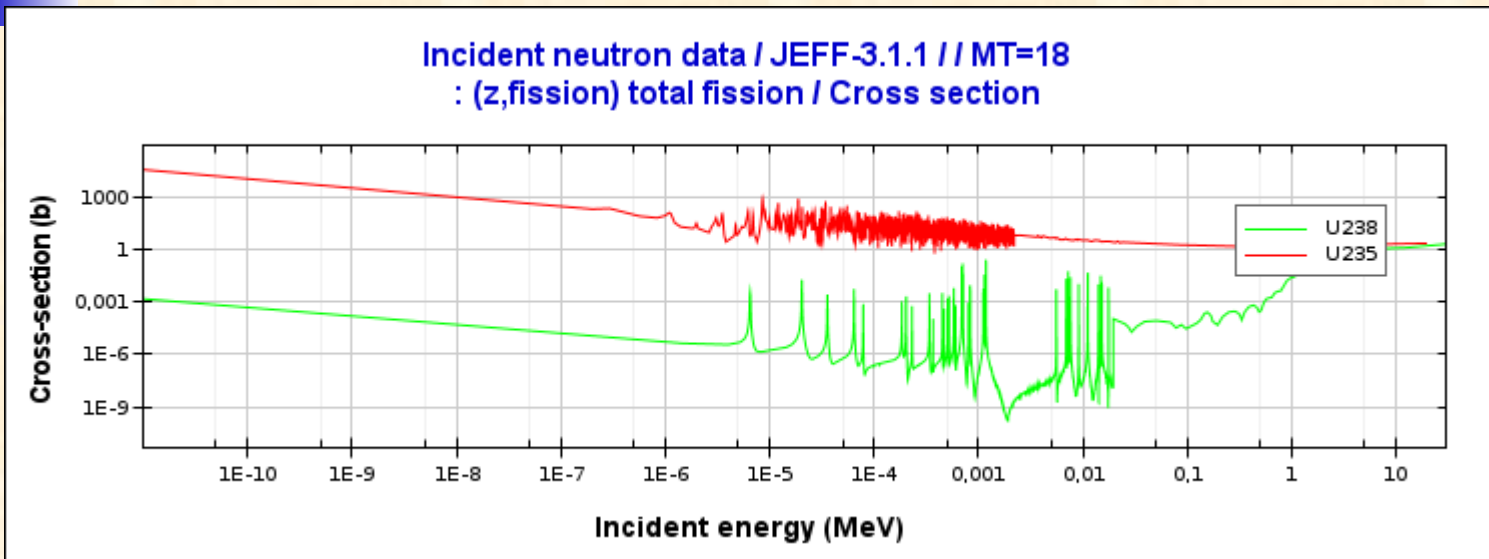
Neutrino unoszą ok 10 MeV – nie ujęte w zestawieniu

Target Nucleus	$^{232}_{90}\text{Th}$	$^{233}_{92}\text{U}$	$^{234}_{92}\text{U}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$^{241}_{94}\text{Pu}$
$E_{c\text{-threshold}}$ (MeV)	1,05	0	0,28	0	1,2	0	0
Nb. neutrons	142	141	142	143	146	145	147

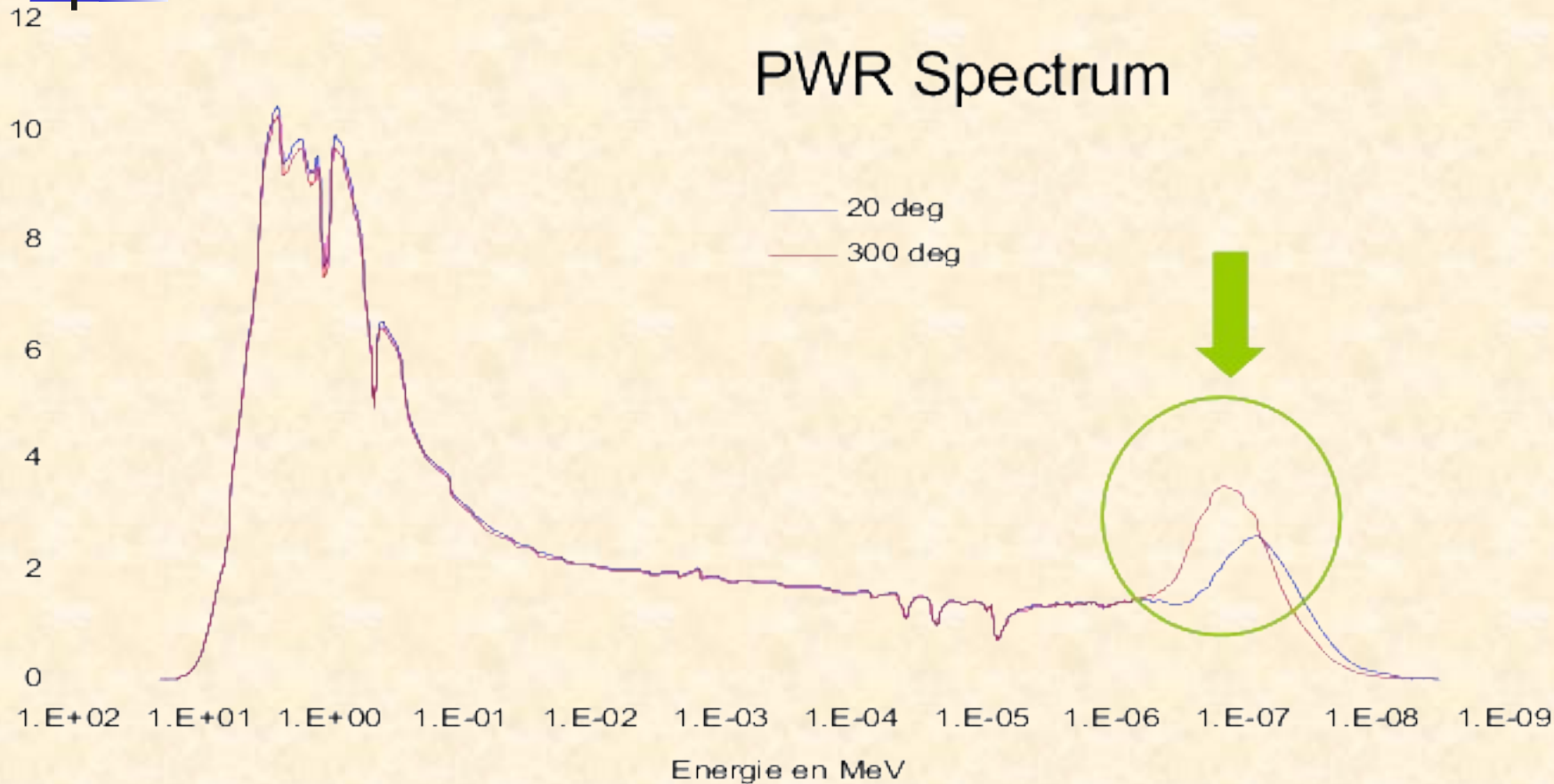
[Period (years)]

[1,6 10^5] [2,4 10^7] [7,2 10^8] [4,5 10^9] [2,4 10^4] [6,6 10^3]

Przekroje czynne



Widmo neutronów



Widmo neutronów w reaktorze PWR



Współczynnik mnożenia k_{eff}

$$k_{eff} = \frac{\text{neutrony powstające}}{\text{neutrony tracone}}$$

neutrony tracone: ucieczka lub pochłonięcie

- $k_{eff} = 1$ ilość neutronów powstających jest równa ilości neutronów traconych **reaktor jest krytyczny**
- $k_{eff} < 1$ ilość neutronów powstających jest mniejsza niż ilość neutronów traconych **reaktor jest podkrytyczny**
- $k_{eff} > 1$ ilość neutronów powstających jest większa niż ilość neutronów traconych **reaktor jest nadkrytyczny**



Reaktywność

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

$\rho = 0$ reaktor jest krytyczny

$\rho < 0$ reaktor jest podkrytyczny

$\rho > 0$ reaktor jest nadkrytyczny

Reaktywność jest wielkością bezwymiarową jednak dla potrzeb praktycznych wprowadzony został specjalny „wymiar”

$$1 \text{ pcm} = 0.00001$$

$$k_{\text{eff}} = 1.002 \quad \rightarrow \quad \rho = 199.6 \text{ pcm}$$

$$k_{\text{eff}} = 0.998 \quad \rightarrow \quad \rho = -200.4 \text{ pcm}$$



Neutrony opóźnione

- Neutrony natychmiastowe pojawiają się bezpośrednio z reakcji rozszczepienia w czasie 10^{-13} s
- Neutrony opóźnione pochodzą z rozpadu prekursorów, średnio dla ^{235}U pojawiają się po 12.5 s
- Udział neutronów opóźnionych, oznaczany przez β , jest mały (0.0065 dla ^{235}U), ale ich znaczenie jest decydujące
- Czas życia neutronu natychmiastowego jest rzędu $5 \cdot 10^{-5}$ s
- Średni czas życia neutronu:

$$T_{\text{sr}} = 5 \cdot 10^{-5} * (1 - 0.0065) + 12.5 * 0.0065 = 0.00813 \text{ s}$$

Dzięki neutronom opóźnionym można sterować reaktorem!



Wzór 4-czynnikowy

Założenia:

- Reaktor nieskończony (brak ucieczki)
- Model 2-grupowy: tylko neutrony prężdkie i termiczne

$$k_{\infty} = \varepsilon p f \eta$$

ε – czynnik rozszczepienia prężdkiego PWR: 1.07

p – prawdop. uniknięcia wychwytu PWR: 0.77

f – prawdop. absorpcji w paliwie PWR: 0.92

η – $(\nu\sigma_f/\sigma_a)$ czynnik reprodukcji PWR: 1.78



Wzór 4-czynnikowy

	PWR	BWR	PHWR	HTGR
ϵ	1.07	1.31	1.08	1.12
P	0.77	0.59	0.84	0.67
f	0.92	0.94	0.98	0.96
η	1.78	1.89	1.32	1.95
k_{∞}	1.35	1.47	1.13	1.46

Typowe wartości współczynników dla różnych typów reaktorów



Wpływ temperatury

T_F – współczynnik temperaturowy paliwa

- poszerzenie dopplerowskie rezonansów
- termiczne przekroje czynne rozpraszania

T_M – współczynnik temperaturowy moderatora

- zmiana gęstości
- zmiana koncentracji boru(!)
- zmiana widma neutronów

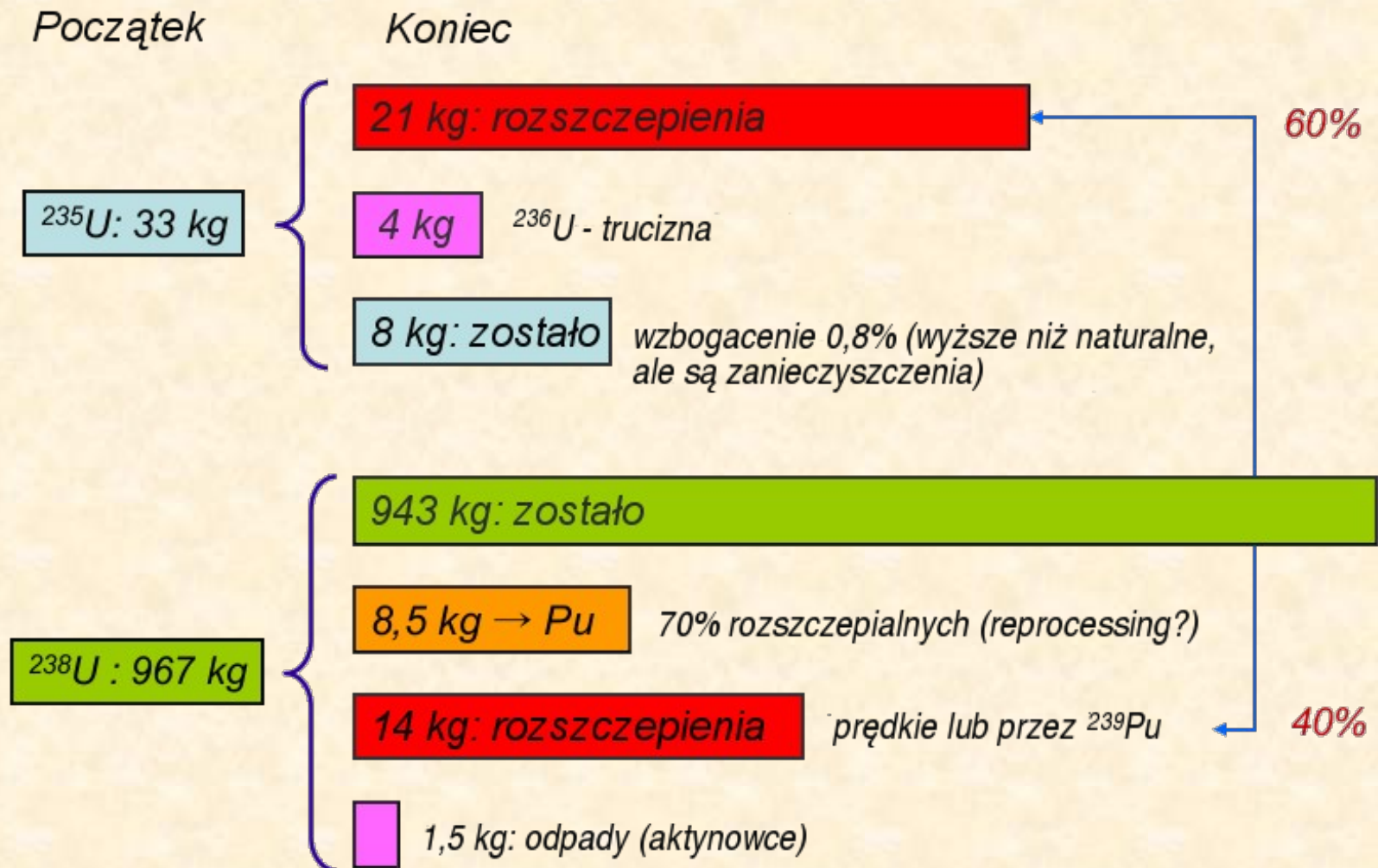
Wymaganie: współczynniki temperaturowe muszą być ujemne (z dodatkowym marginesem bezpieczeństwa) w całym zakresie pracy reaktora

Wpływ temperatury

System	Doppler Coefficient (pcm / °C)	Moderator coefficient (pcm / °C)
PWR	-3	-1 – -3 BoC -40 EoC
BWR	-2,8	-70 BoC -15 EoC
SFR (SPX)	-1,2	+0,5 (coolant)

Typowe współczynniki temperaturowe dla różnych typów reaktorów: **zależność od poziomu wypalenia**

Wykorzystanie paliwa





Paliwo wypalone

Reaktor PWR o mocy 1000 MWe pracujący na paliwie UOX w ciągu 1 roku produkuje ~6TWh energii elektrycznej i 21 ton odpadów:

- 20 ton U (o wzbogaceniu 0.8% ^{235}U)
- 200 kg Pu
- 760 kg produktów rozszczepienia
 - 35 kg ^{135}Cs , ^{137}Cs
 - 18 kg ^{99}Tc
 - 16 kg ^{99}Zr
 - 5 kg ^{107}Pd
 - 3 kg ^{129}I
 - *i mniejsze ilości innych*
- 21 kg aktynowców (MA – minor actinides)
 - 10.4 kg Np
 - 9.8 kg Am
 - 0.8 kg Cm

Paliwo wypalone

Isotope	Decay process	Period Decay (y)	Energy (MeV)	σ_f (b) Thermal	σ_c (b) Thermal
U235	α	$7 \cdot 10^8$	4,4	582,6	98,9
U236	α	$2,3 \cdot 10^7$	4,5	0	5,1
U238	α	$4,5 \cdot 10^9$	4,3	0	2,7
Np237	α	$2,1 \cdot 10^6$	4,8	21,5	175,9
Pu238	α	87,7	5,6	17,9	54,0
Pu239	α	$2,41 \cdot 10^4$	5,2	747,3	270,4
Pu240	α	$6,56 \cdot 10^3$	5,2	0,056	288,8
Pu241	β^-	14,4	0,005	1012,3	358,2
Pu242	α	$3,76 \cdot 10^5$	5	< 0,2	18,5
Am241	α	432,6	5,5	3,2	587
Pu242	α	$3,76 \cdot 10^5$	5	< 0,2	18,5

Najważniejsze aktywnowce w wypalonym paliwie

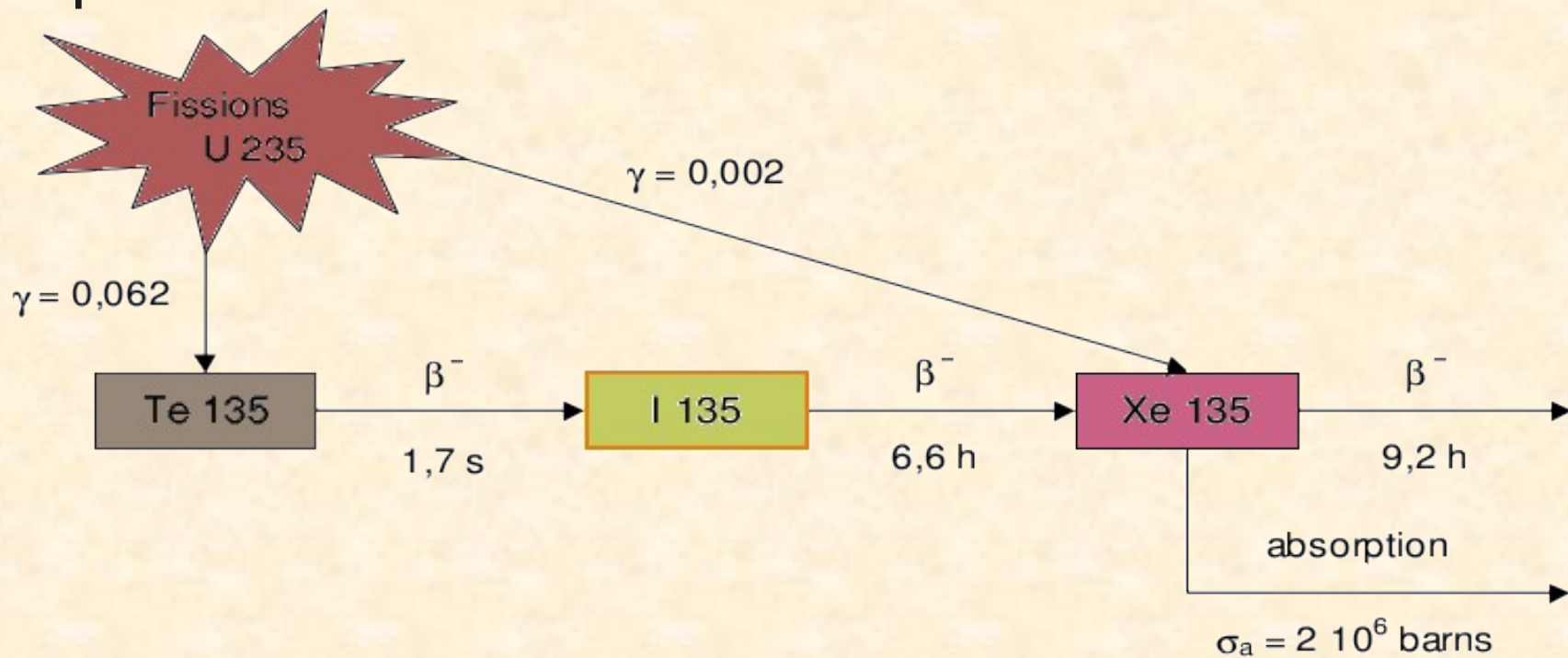


Paliwo wypalone

isotope	Absorption cross-section (barn)	Period	Fission yield (U235)
Rh103	143	stable	2.8
Nd143	341	stable	5.9
Xe131	120	stable	2.9
Cs133	29	stable	6.5
Tc99	22	2.1 10 ⁵ years	6
Sm152	213	stable	0.28
Pm147	140	2.6 years	2.7
Sm151	14800	90 years	0.47
Eu153	400	Stable	0.15
Nd145	49	stable	3.8

Najważniejsze trucizny w wypalonym paliwie bez ¹³⁵Xe i ¹⁴⁹Sm

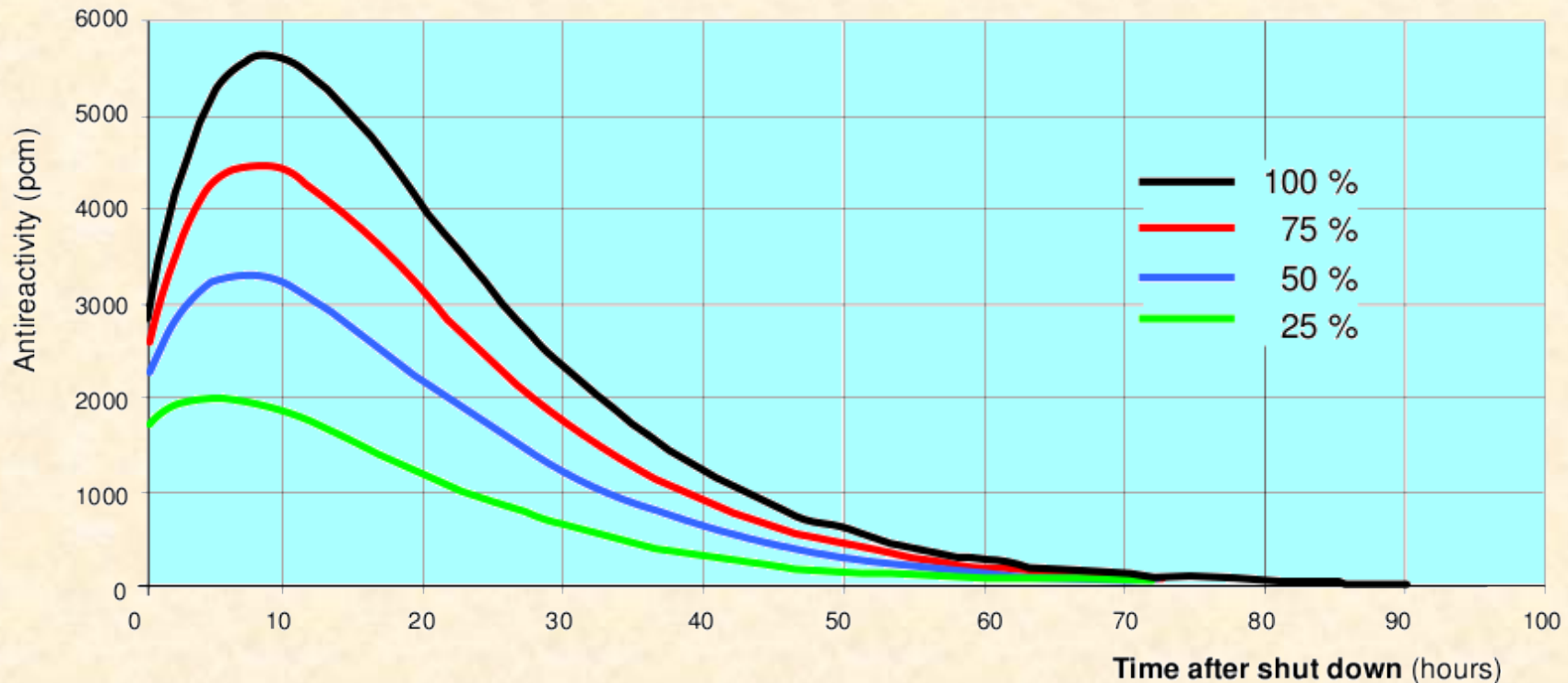
Zatrucie ^{135}Xe



- ^{135}Xe jest najważniejszą trucizną reaktorową, która bardzo mocno wpływa na dynamikę reaktora
- Efekt z nim związany pojawia się przy zmianach mocy
- ^{135}Xe na szczęście rozpada się dość szybko i po dwóch dniach przestaje mieć znaczenie

Zatrucie ^{135}Xe

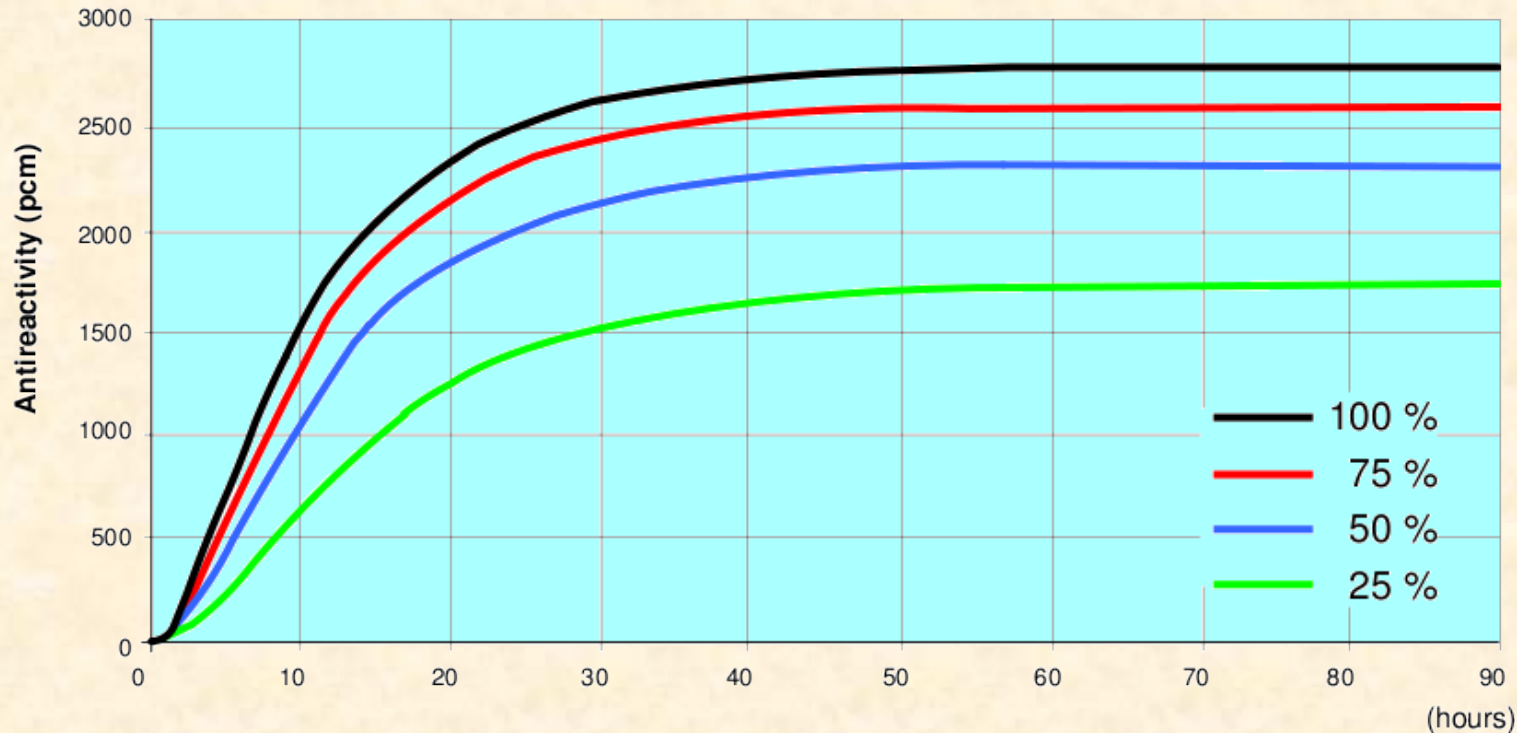
Wyłączenie reaktora (var \rightarrow 0% NP)



- Wyłączenie reaktora z poziomu mocy nominalnej powoduje powstanie zatrucia, którego maksimum jest po ok. 8 godzinach
- Szybkie uruchomienie reaktora nie jest możliwe

Zatrucie ^{135}Xe

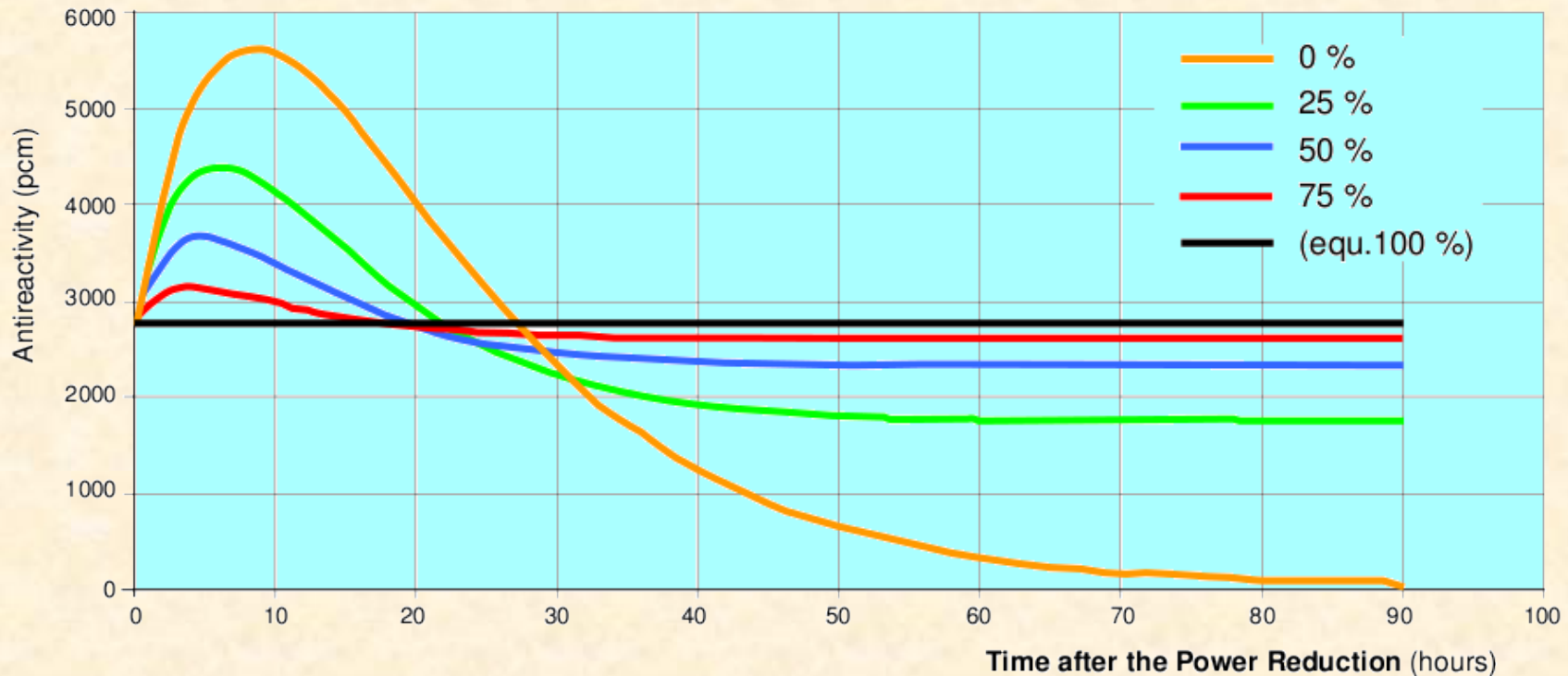
Włączenie reaktora (0% NP → var)



- Negatywna reaktywność pochodząca od ksenonu stabilizuje się po dwóch dniach na poziomie zależnym od poziomu mocy

Zatrucie ^{135}Xe

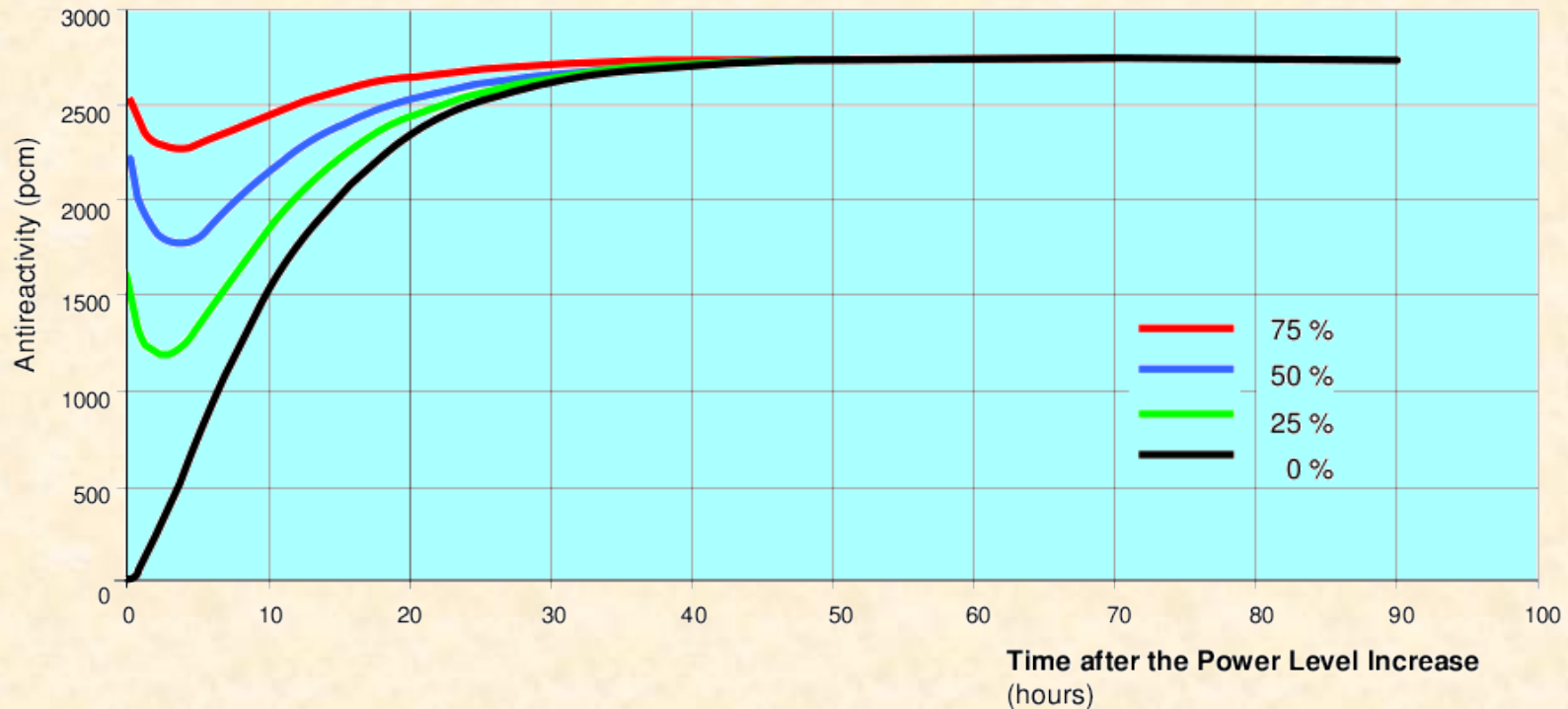
Obniżenie mocy reaktora (100% NP → var)



- Pojawiająca się negatywna reaktywność pochodząca od ksenonu musi być kompensowana odpowiednim zapasem reaktywności

Zatrucie ^{135}Xe

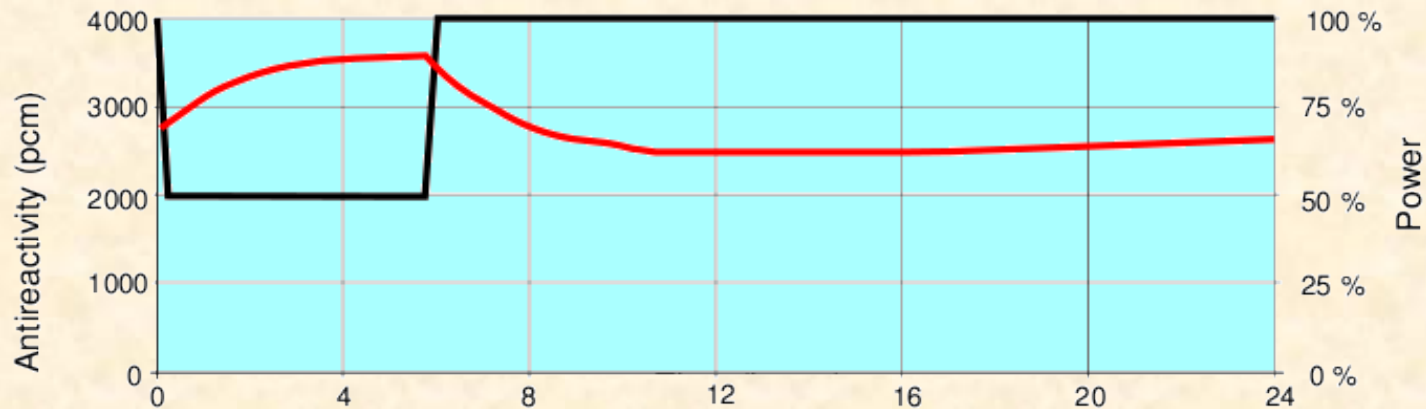
Podwyższenie mocy reaktora (var \rightarrow 100% NP)



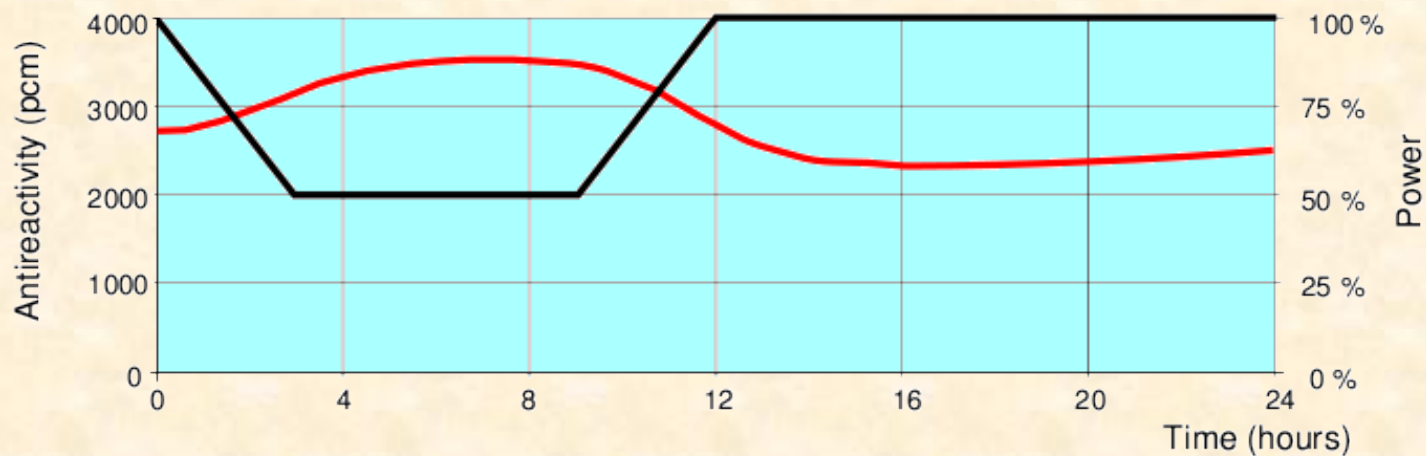
- Pojawiające się obniżenie negatywnej reaktywności powoduje zwiększanie mocy reaktora i musi być kontrolowane

Zatrucie ^{135}Xe

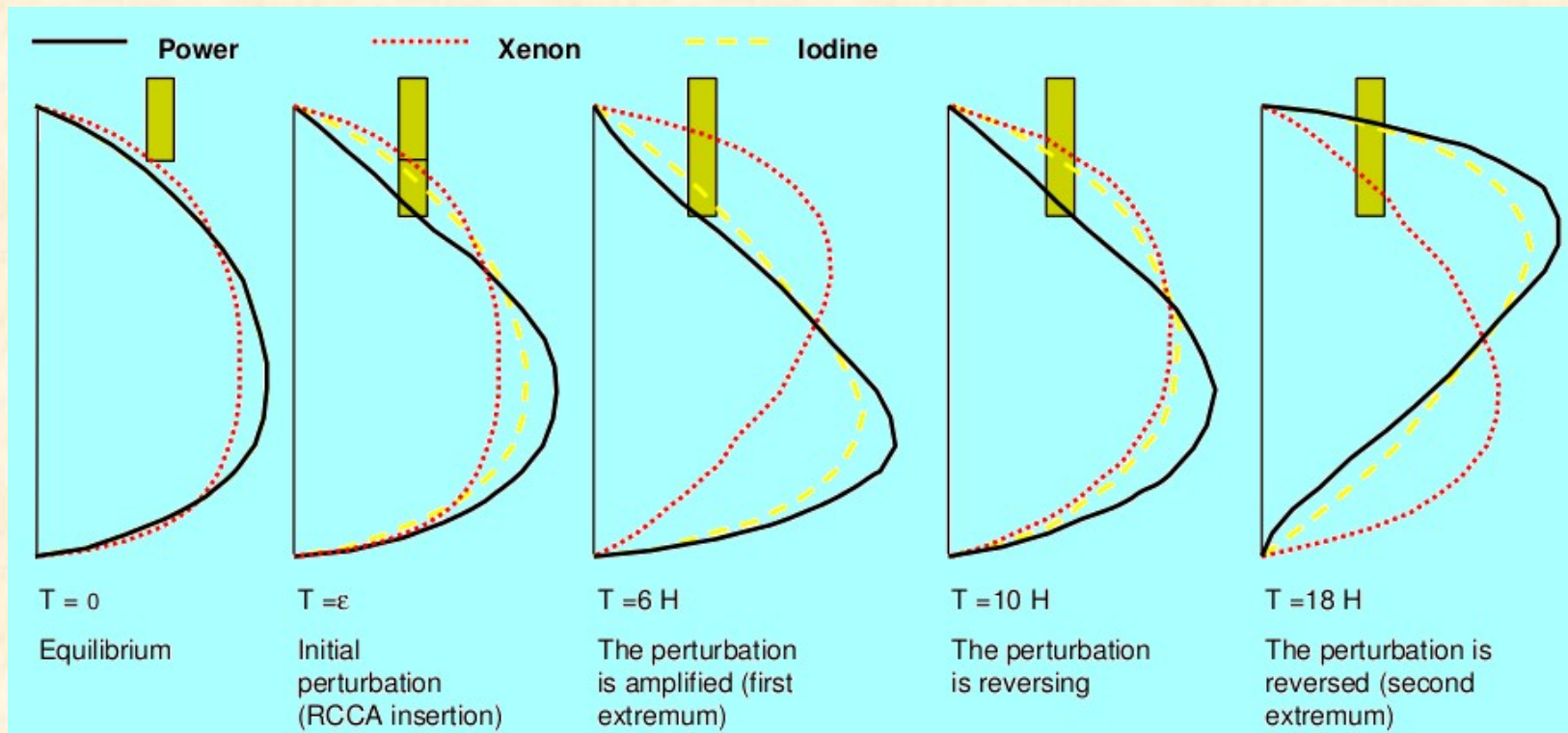
Xenon poisoning during a 18-6 load follow



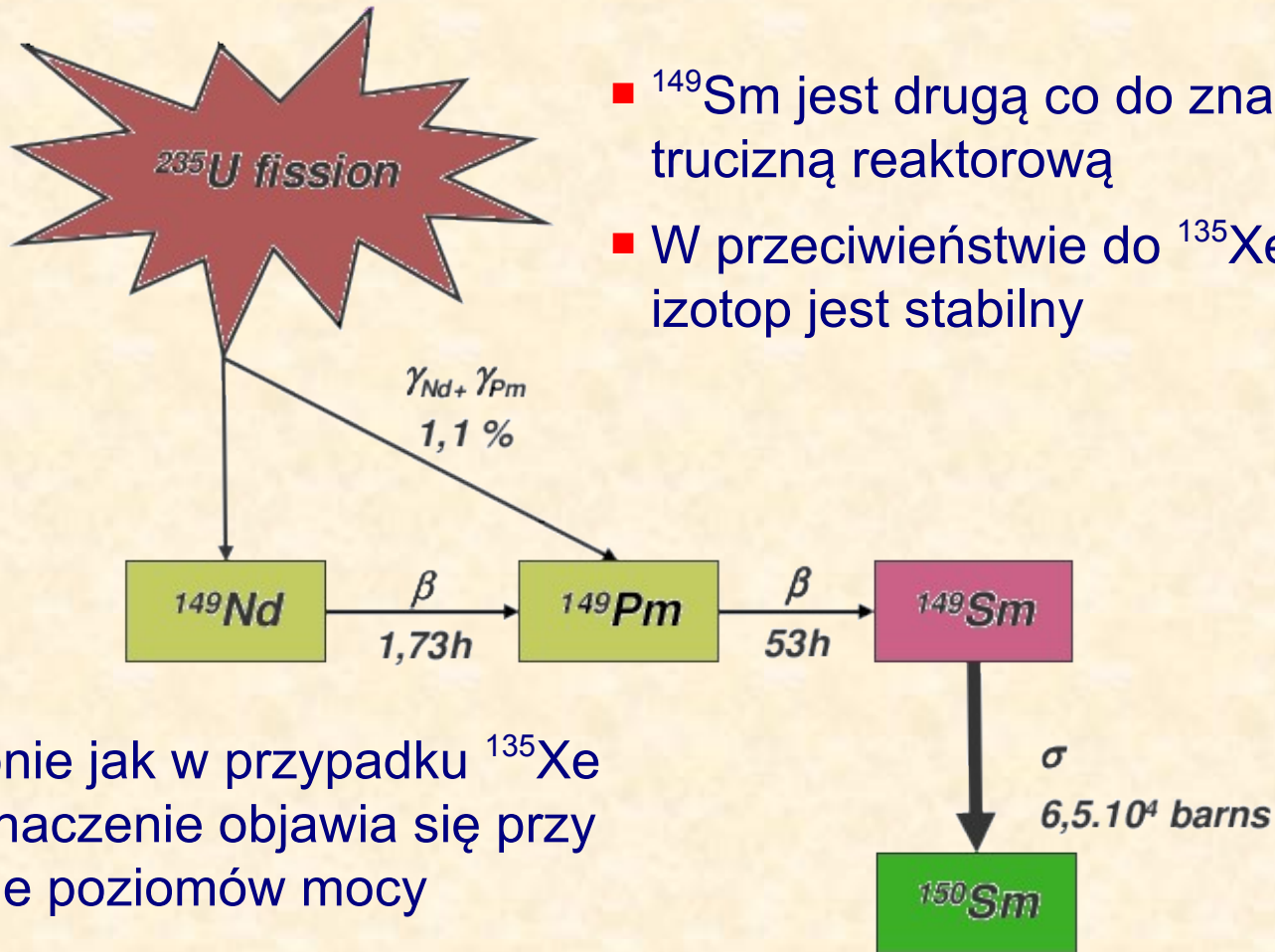
Xenon poisoning during a 12-3-6-3 load follow



Oscylacje ksenonowe



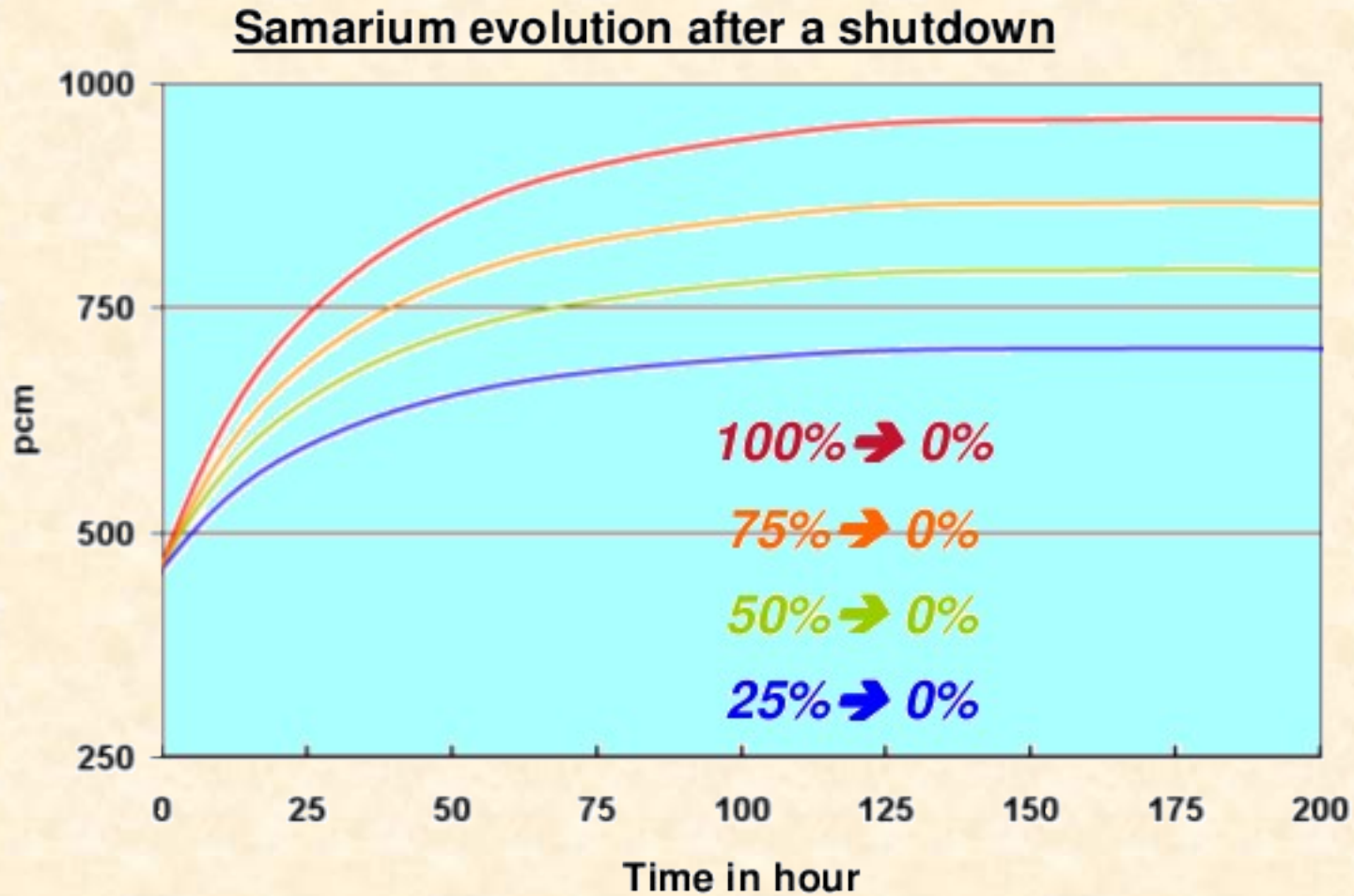
Zatrucie ^{149}Sm



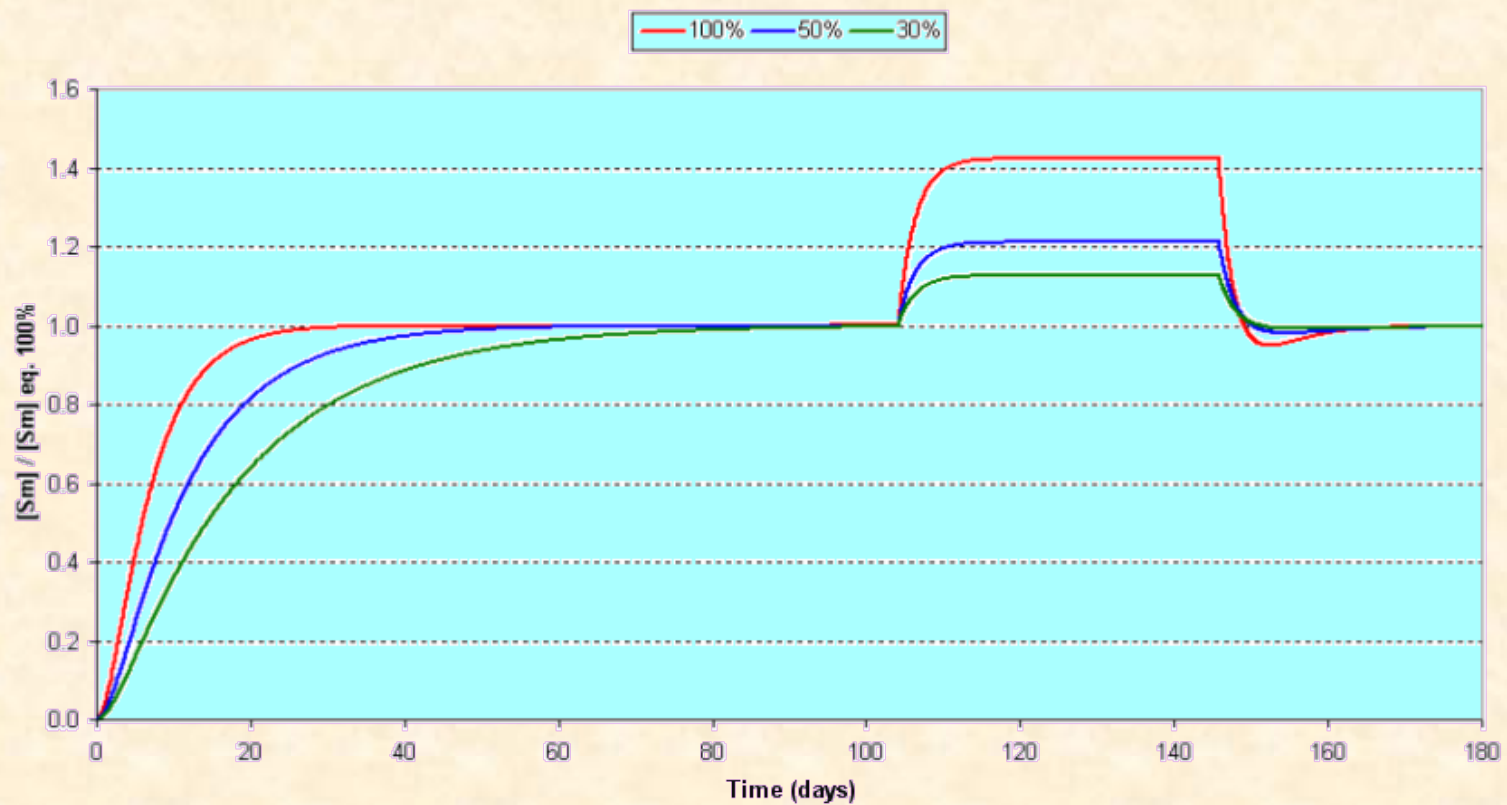
- ^{149}Sm jest drugą co do znaczenia trującą reaktorową
- W przeciwieństwie do ^{135}Xe ten izotop jest stabilny

- Podobnie jak w przypadku ^{135}Xe jego znaczenie objawia się przy zmianie poziomów mocy
- Następuje stabilizacja na nowym poziomie

Zatrucie ^{149}Sm



Zatrucie ^{149}Sm





Zmiany reaktywności

Różne skale czasowe zjawisk:

■ Krótkoterminowe (sekundy, minuty)

- efekty temperaturowe
- regulacje poziomu mocy
- scram

■ Średnioterminowe (godziny, dni)

- efekty związane z ksenonem i samarem

■ Sterowanie odbiorem ciepła

- wypalanie paliwa

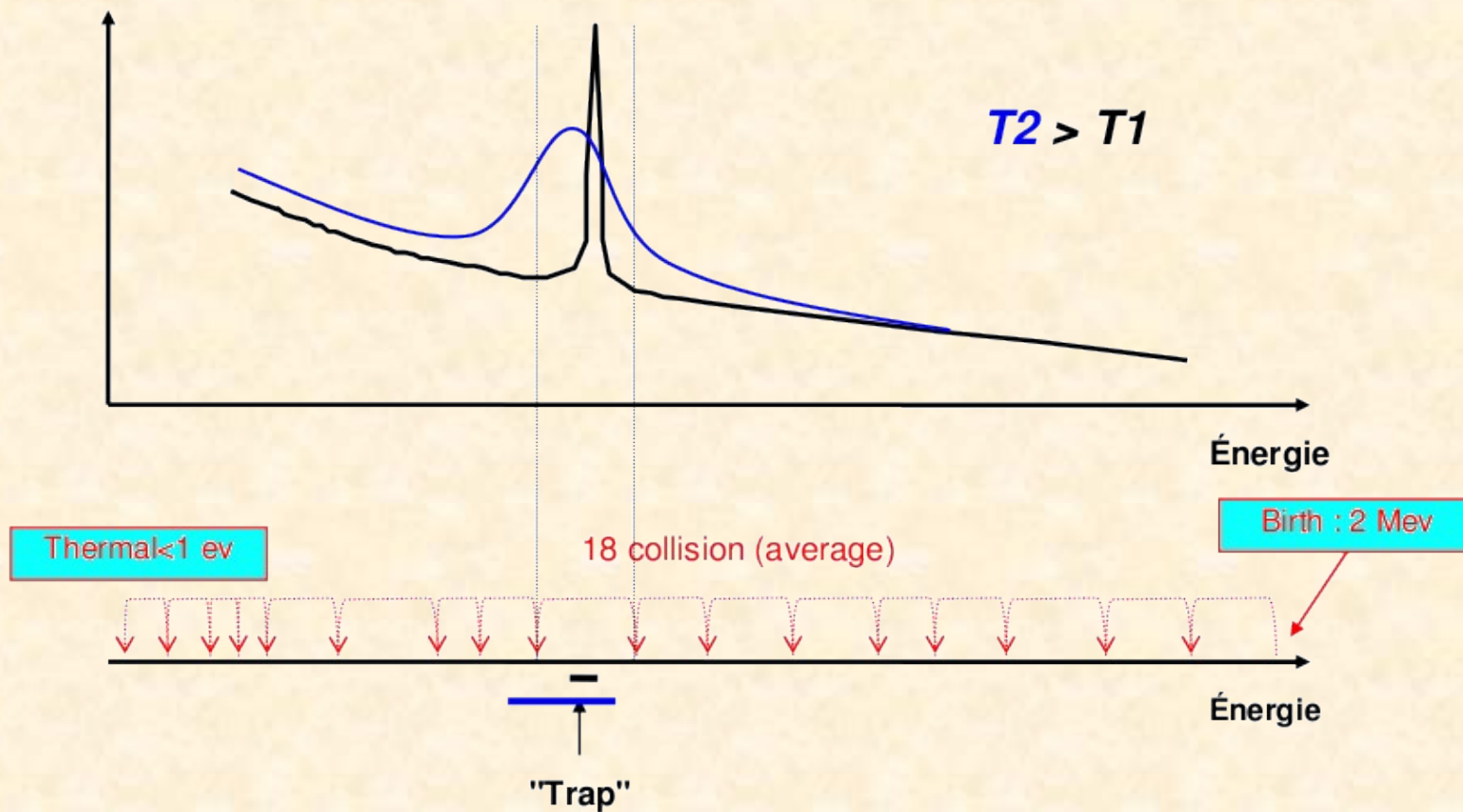
PWR –	10000	pcm / 285 EFPD	35 pcm/dzień
BWR –	7000	pcm / 280 EFPD	25 pcm/dzień
SFR –	3000	pcm / 310 EFPD	10 pcm/dzień

PWR – bor i pręty

BWR i SFR – pręty sterujące

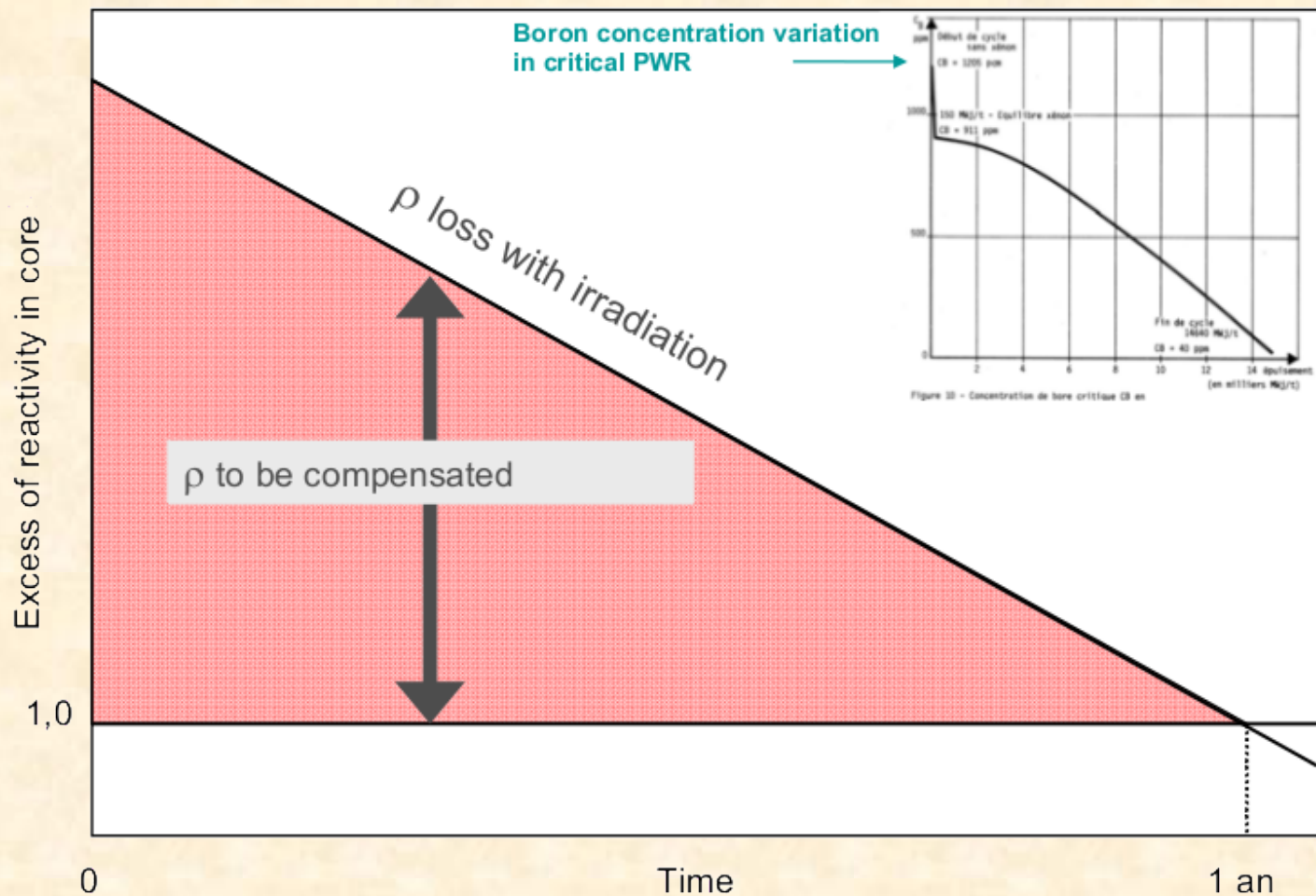
Zmiany reaktywności

σ_a Larger apparent resonance => larger trap



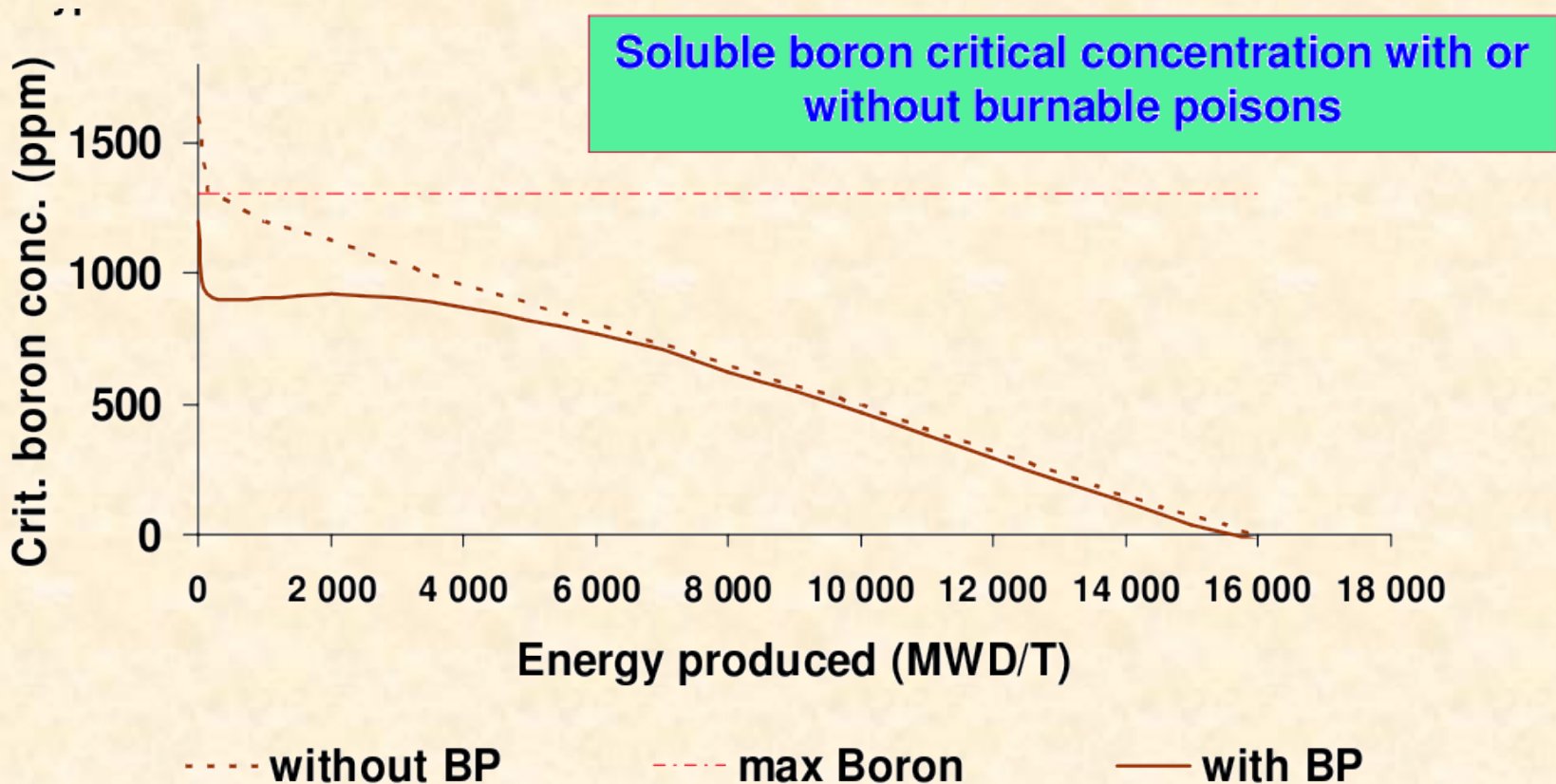
Dopplerowskie poszerzenie rezonansów

Zmiany reaktywności



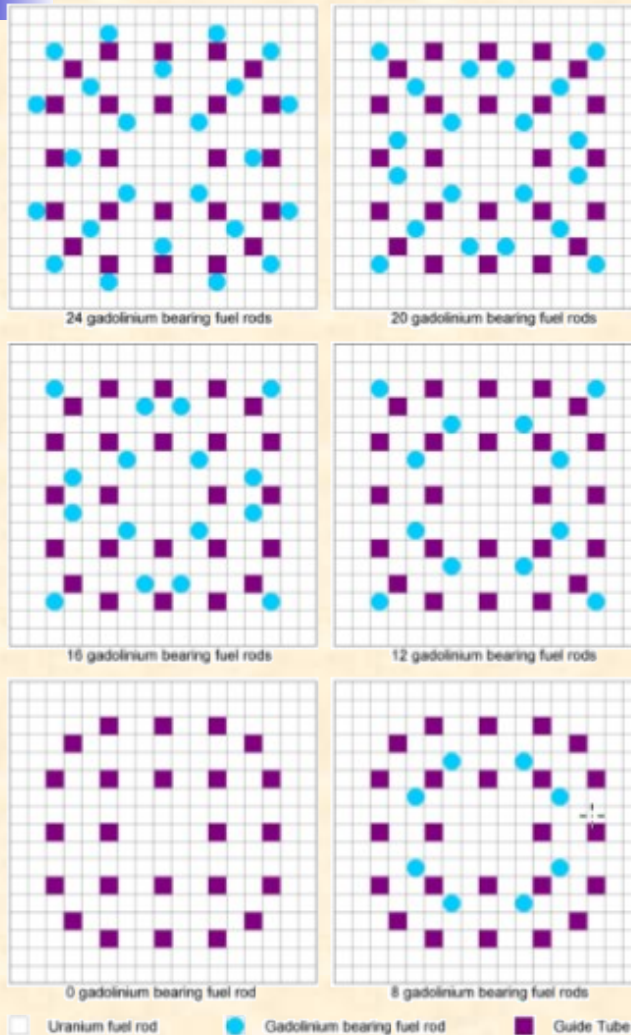
Początkowy nadmiar reaktywności musi być kompensowany

Zmiany koncentracji boru



Wypalane trucizny pomagają wyplaszczyć koncentrację boru w czasie

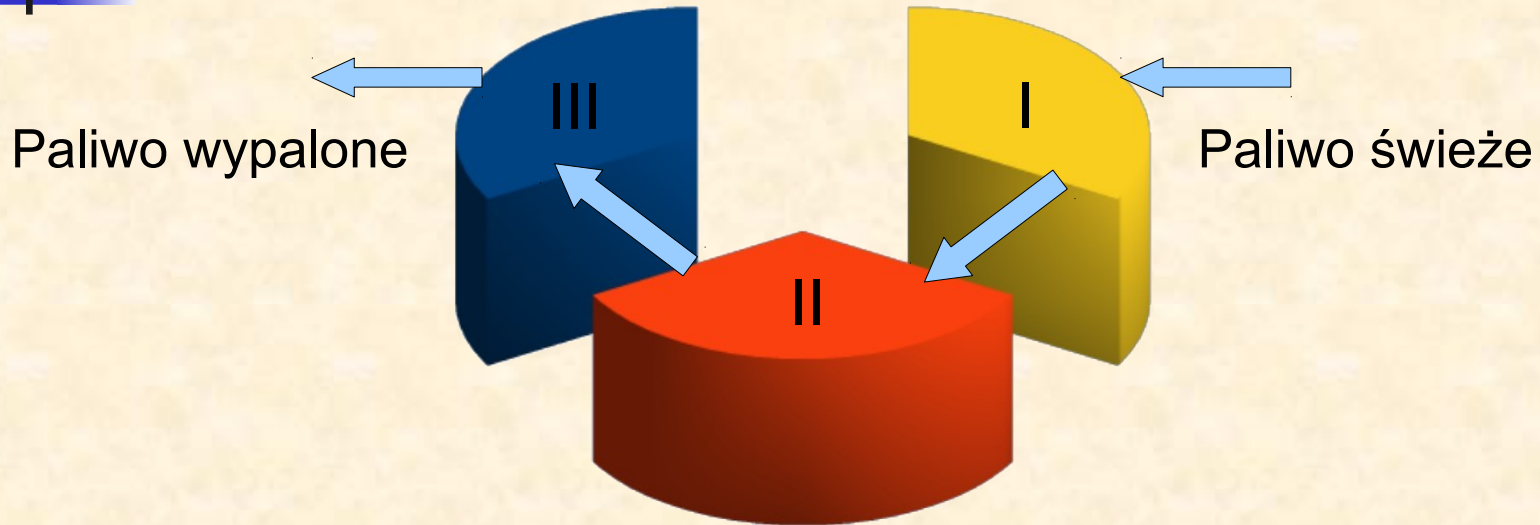
Trucizny



Dodane do świeżego paliwa specjalne trucizny (Gd) wypalają się z czasem, przez co likwidowana jest stopniowo wprowadzana przez nie negatywna reaktywność

Różne konfiguracje rozkładu gadolinu w kasetach paliwowych

Shuffling



- Zwykle stosowany cykl 3x18 miesięcy
- Shuffling radialny
 - świeże na zewnątrz
 - + lepiej wyrównany radialny rozkład strumienia
 - większe uszkodzenia radiacyjne RPV
 - świeże do środka
 - + mniejsze uszkodzenia radiacyjne RPV
 - gorszy rozkład radialny strumienia

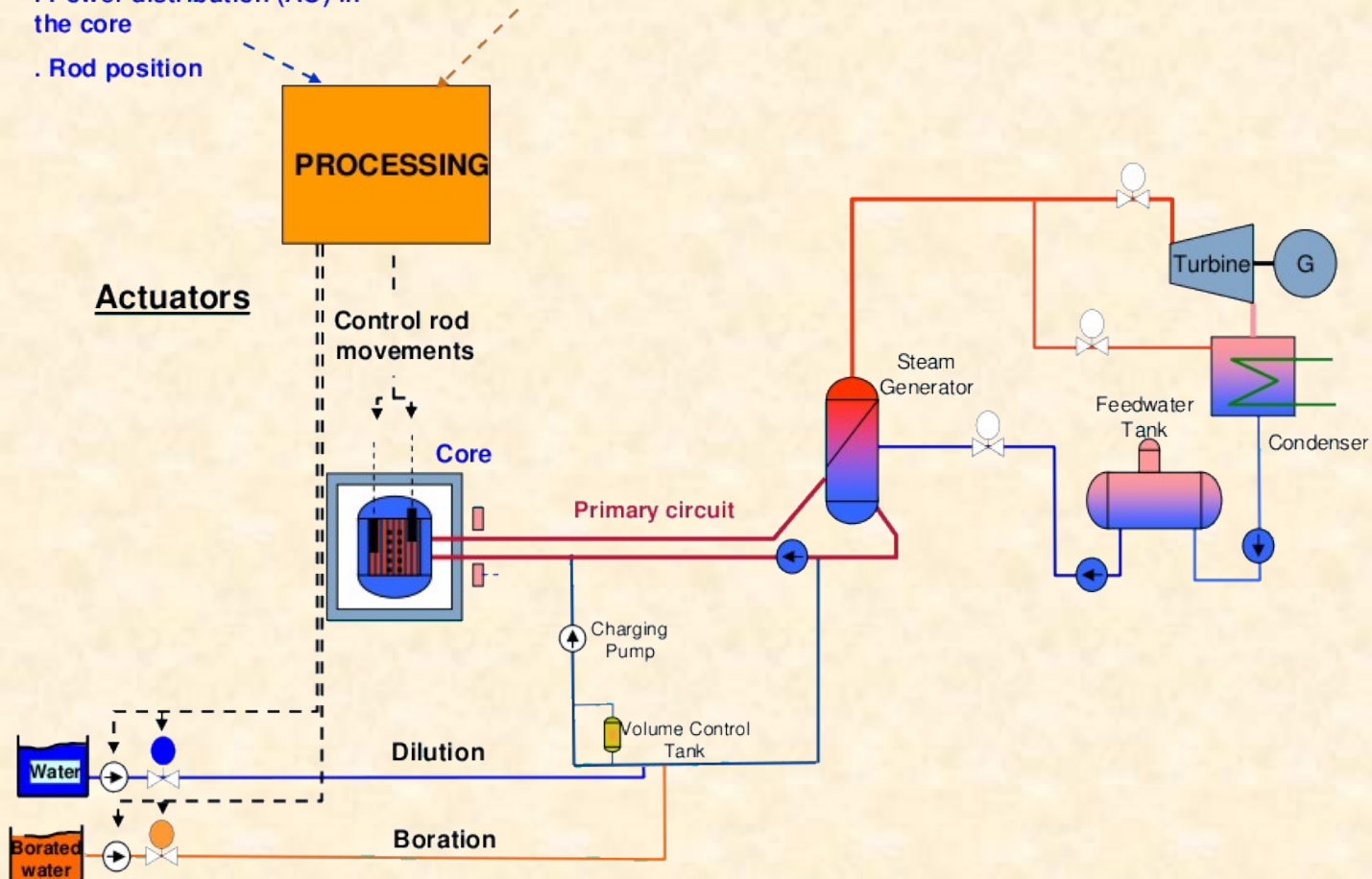
Sterowanie reaktorem

Measurements

- . Average temperature
- . Power distribution (AO) in the core
- . Rod position

Operator command

Actuators





Sterowanie reaktywnością

■ Pręty sterujące

- + szybkie działanie
- ryzyko uszkodzenia (w szczególności jeżeli często używane przy regulacji mocy w pracy nadążnej)
- zaburzenie osiowego rozkładu mocy i możliwość powodowania osiowych oscylacji ksenonowych

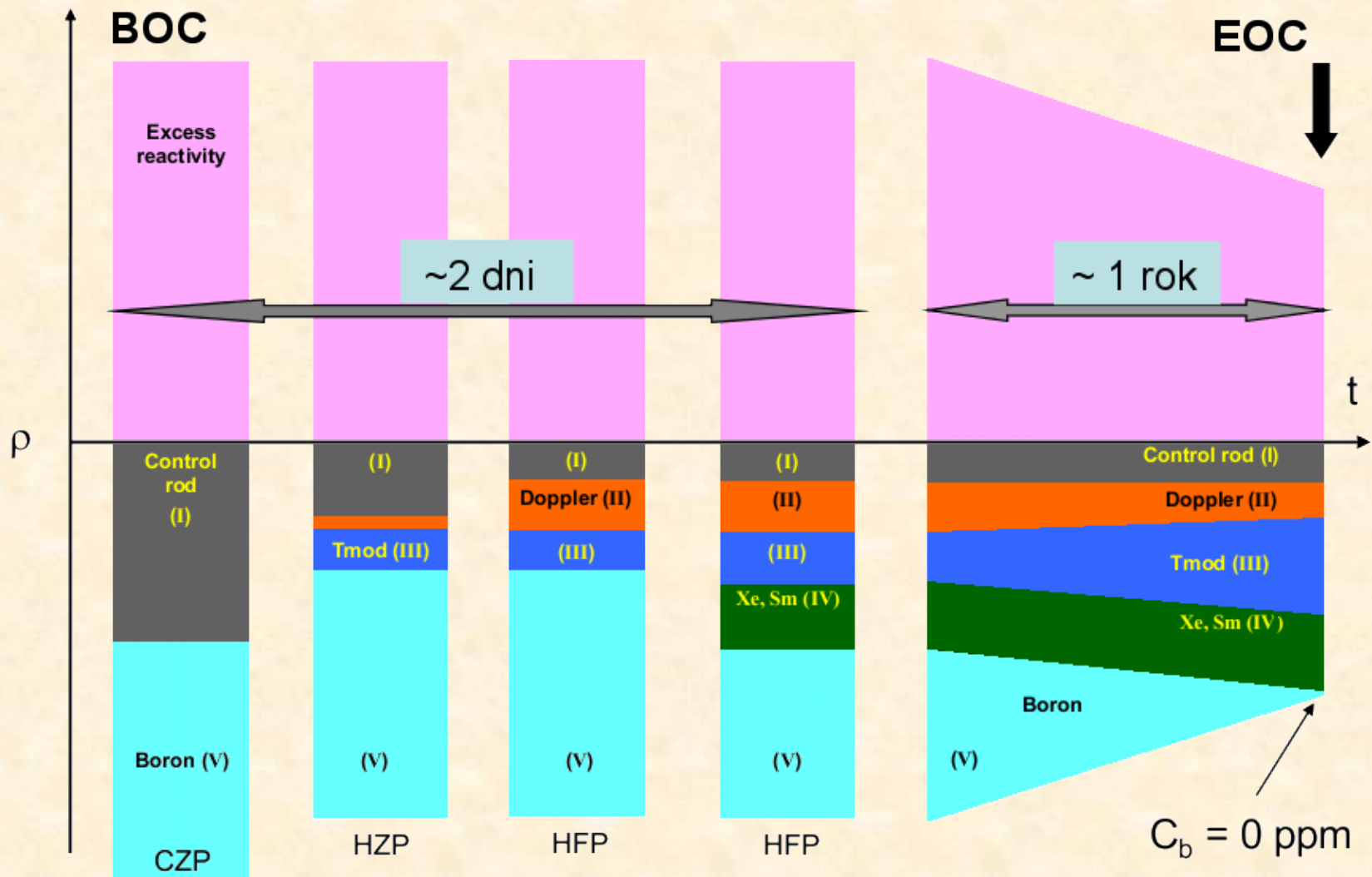
■ Sterowanie stężeniem boru

- + słabe zaburzenie osiowego rozkładu mocy
- wolne lub bardzo wolne działanie (EOC)
- powstawanie odpadów płynnych

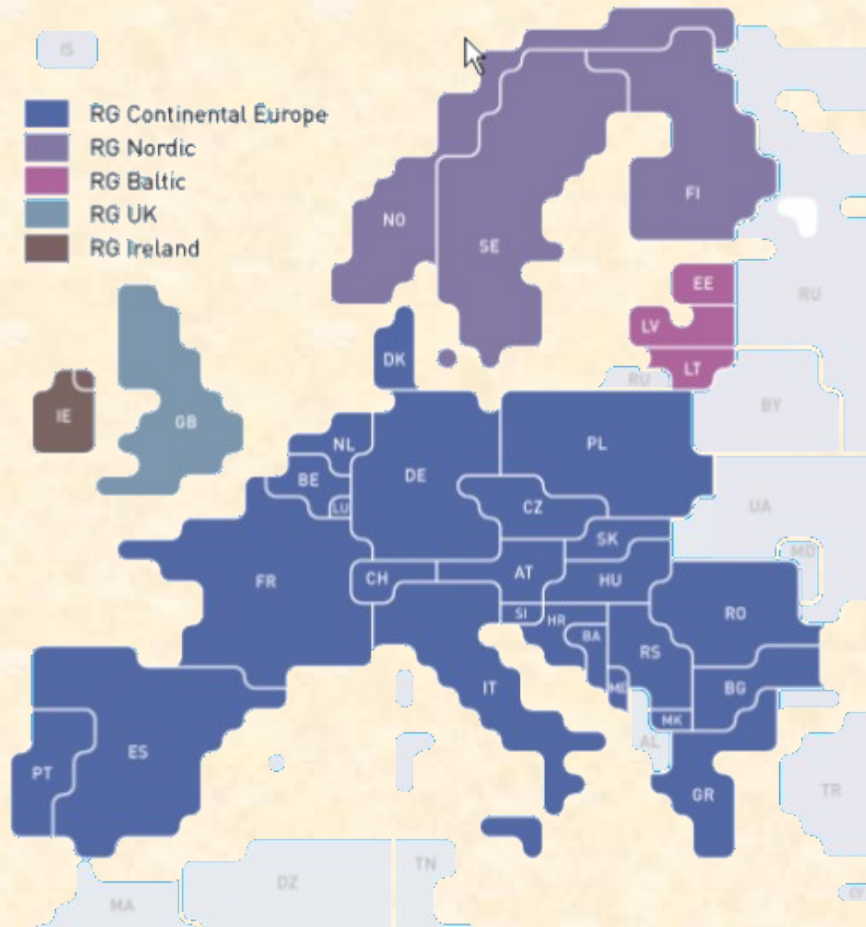
■ Sterowanie odbiorem ciepła

- + działanie na zasadzie sprzężenia zwrotnego

Sterowanie reaktywnością

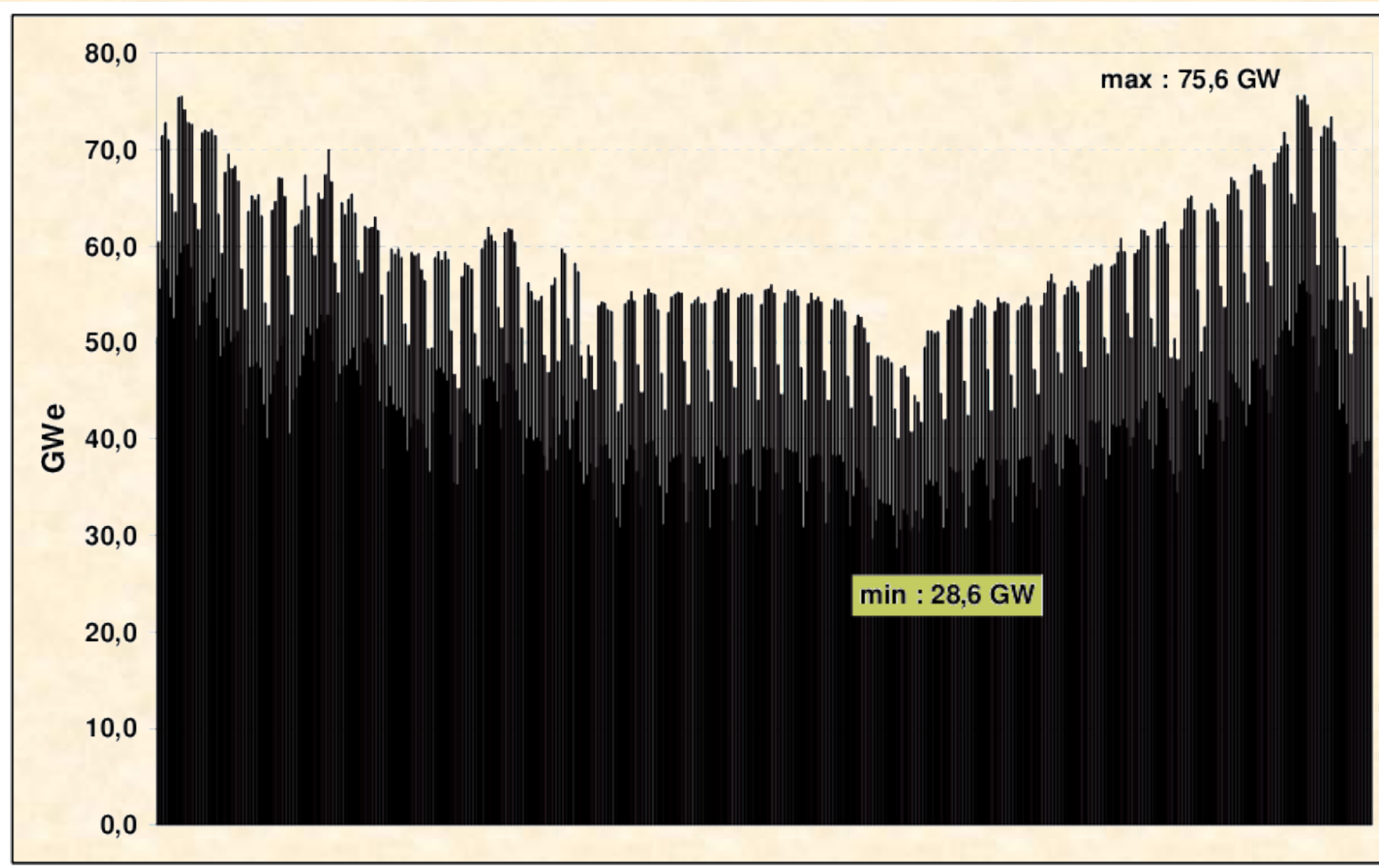


Reaktory energetyczne



Regiony energetyczne w Europie

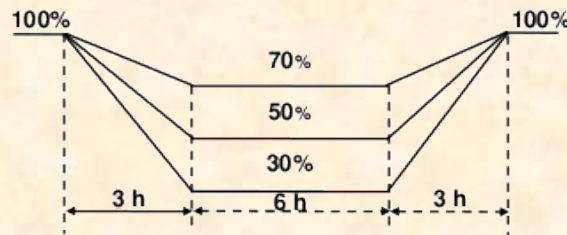
Reaktory energetyczne



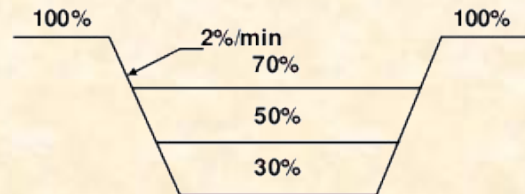
Typowe zapotrzebowanie na moc

Reaktory energetyczne

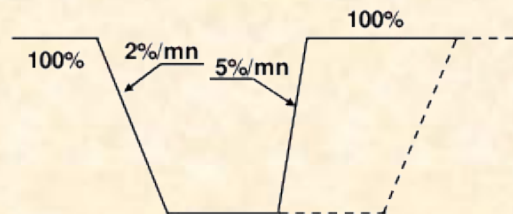
Typical load follow profile



Low transient (12 - 3 - 6 - 3)



Fast transient (16 - 8)



Fast transient followed by
an unscheduled return to full power



Reaktory energetyczne

Swobodna dynamika reaktora

- Zwiększenie nastawy generatora
- Otwarcie zaworu pary na turbiny
- Obniżenie temperatury i ciśnienia w wytwornicy pary
- Szybsze odprowadzanie ciepła z rdzenia
- Obniżenie temperatury rdzenia
- Zwiększenie reaktywności przez ujemne współczynniki temperaturowe reaktora
- Reaktor zwiększa moc i temperaturę
- Następuje stabilizacja



Swobodna dynamika reaktora

- Moc reaktora dopasowuje się poprzez temperaturowe sprzężenia zwrotne do mocy odbieranej z generatora

Wady swobodnej dynamiki reaktora

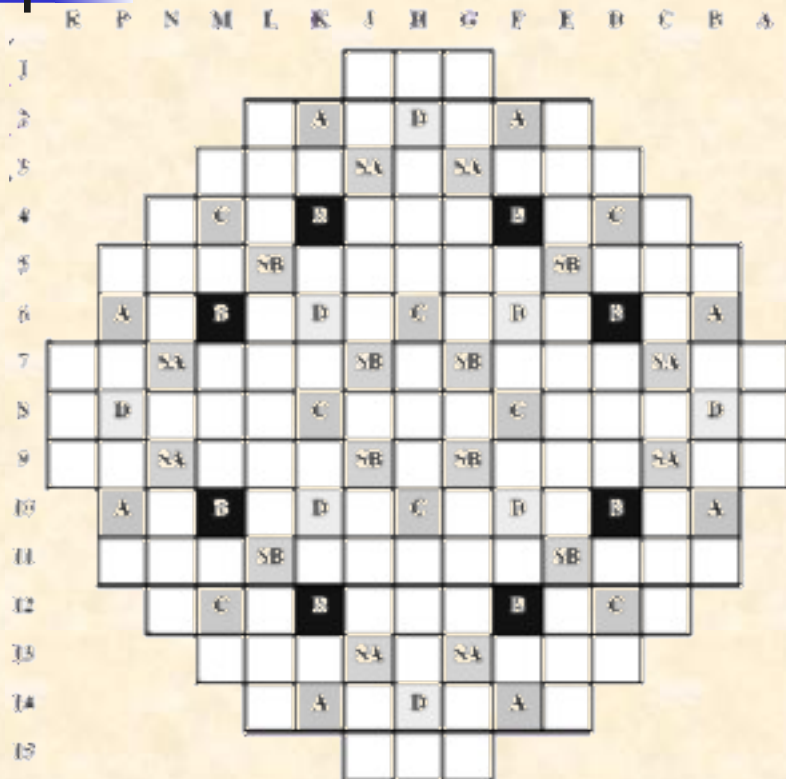
- Brak kontroli temperatury chłodziwa w obiegu pierwotnym
- Nadmierne obniżenie temperatury i ciśnienia w wytwornicy pary obniża jakość pary kierowanej na turbiny (wilgoć) i przyspiesza uszkodzenia łopatek turbiny HP
- Gwałtowne zmiany parametrów w układzie pierwotnym mogą prowadzić do uszkodzenia stabilizatora ciśnienia



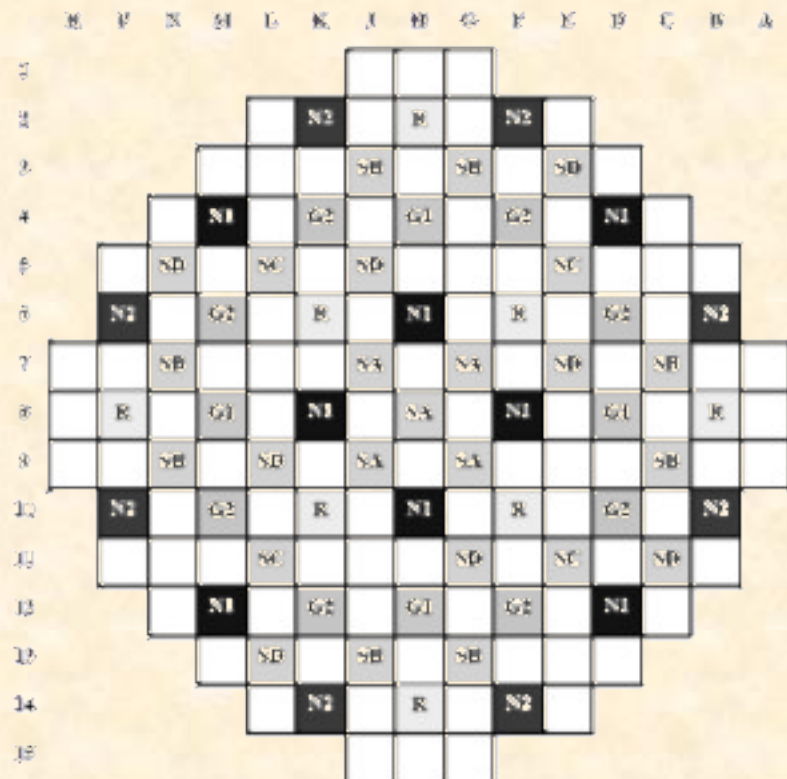
Sterowanie temperaturą

- W rzeczywistości średnia temperatura chłodziwa w reaktorze PWR jest sterowana
- Docelowa temperatura jest rosnącą funkcją mocy
- Moc jest ustalana na podstawie ciśnienia na pierwszej turbinie
- Mechanizmem sterującym są grupy prętów sterujących w reaktorze CP0 są to grupy A, B, C, D, w reaktorze PWR 1300 są to grupy R
- Temperatura jest zatem regulowana prętami sterującymi

Sterowanie temperaturą



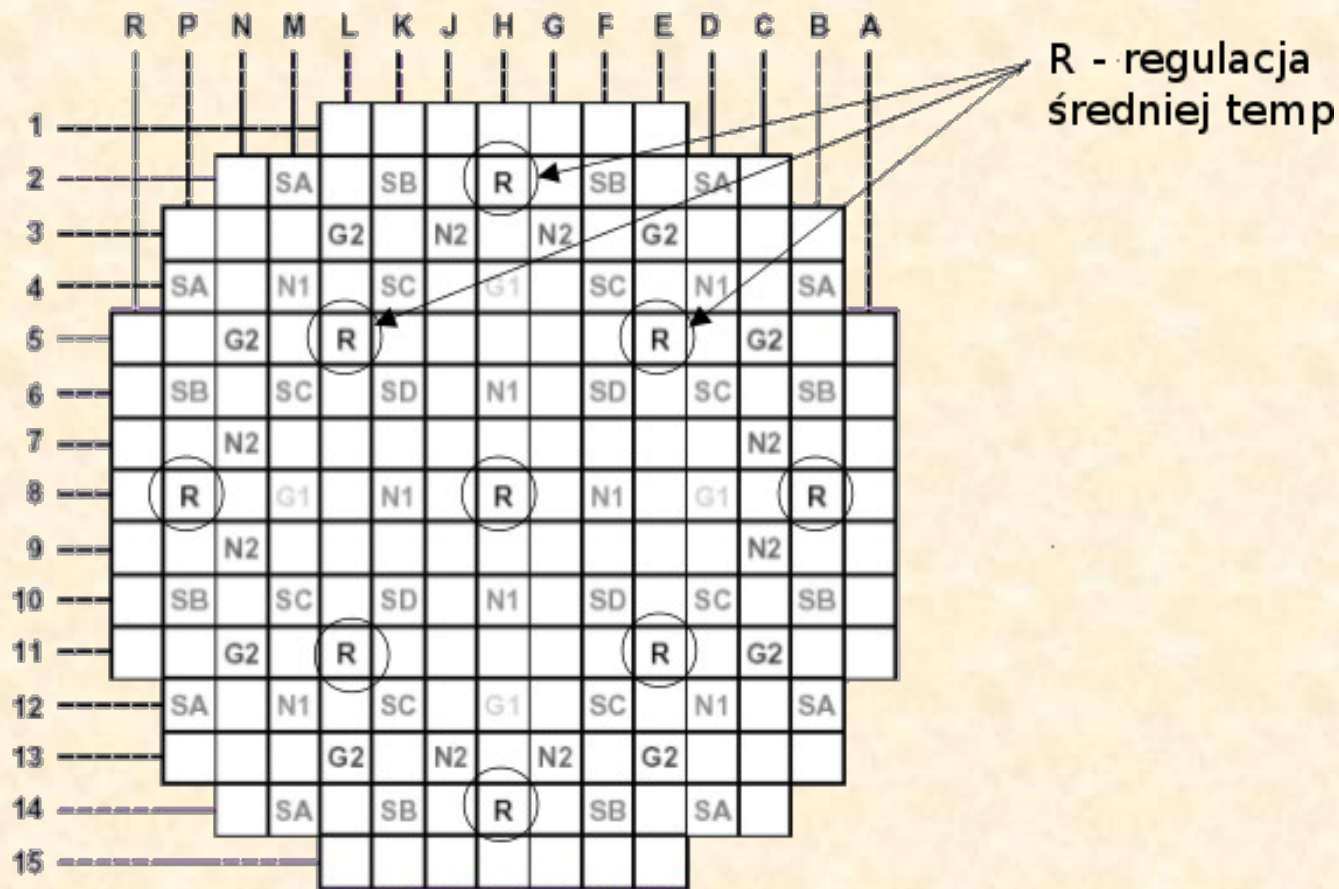
PWR 900 MW UO₂ – A mode
157 assemblies and 48 RCCA



PWR 900 MW MOX - G mode
157 assemblies and 61 RCCA

Grupy prętów sterujących reaktorów CP0 i CPY

Sterowanie temperaturą



Grupy prętów sterujących reaktora PWR 1300



Sterowanie temperaturą

Przykład

- Moc na turbinie spada 100% NP → 50% NP
- Docelowa temperatura spada 306.4°C → 302.0°C
- Na skutek działania ujemnego sprzężenia zwrotnego reaktywność wzrasta o +600 do +1100 pcm
- Dodatnia reaktywność jest kompensowana przez pręty sterujące

ale

- Pręty zaburzają osiowy rozkład strumienia
- Mogą powstać oscylacje ksenonowe



Sterowanie temperaturą

Wobec tego sterowanie koncentracją boru

- Zwiększenie koncentracji obniży reaktywność

ale

- Jeżeli moc spada, to wypłaszcza się osiowy rozkład temperatury i górna część rdzenia staje się bardziej reaktywna
- Jeżeli pręty nie są zaangażowane, to strumień przesuwają się do górnej części rdzenia

wobec tego

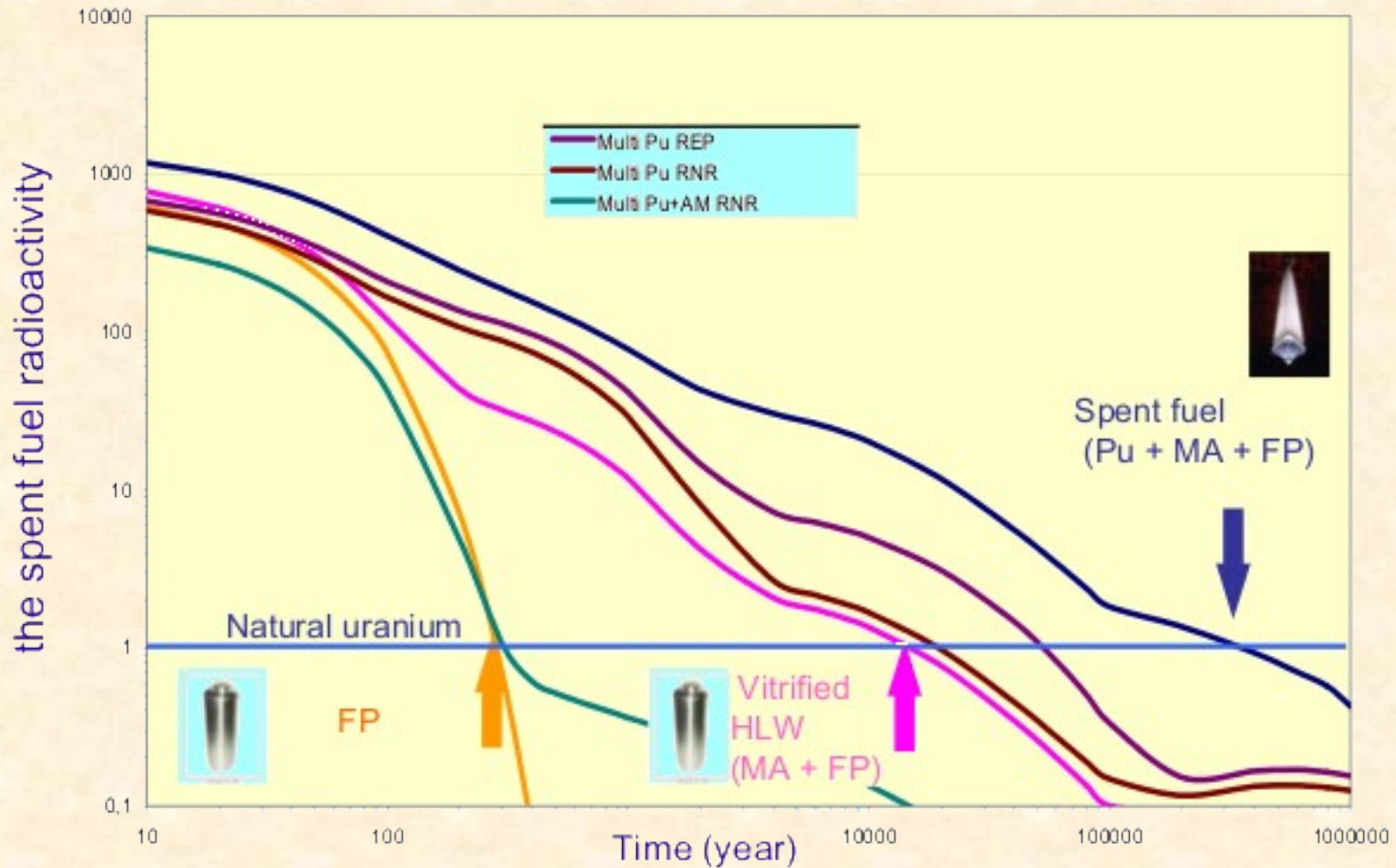
- Stosujemy i pręty sterujące i zmiany koncentracji boru



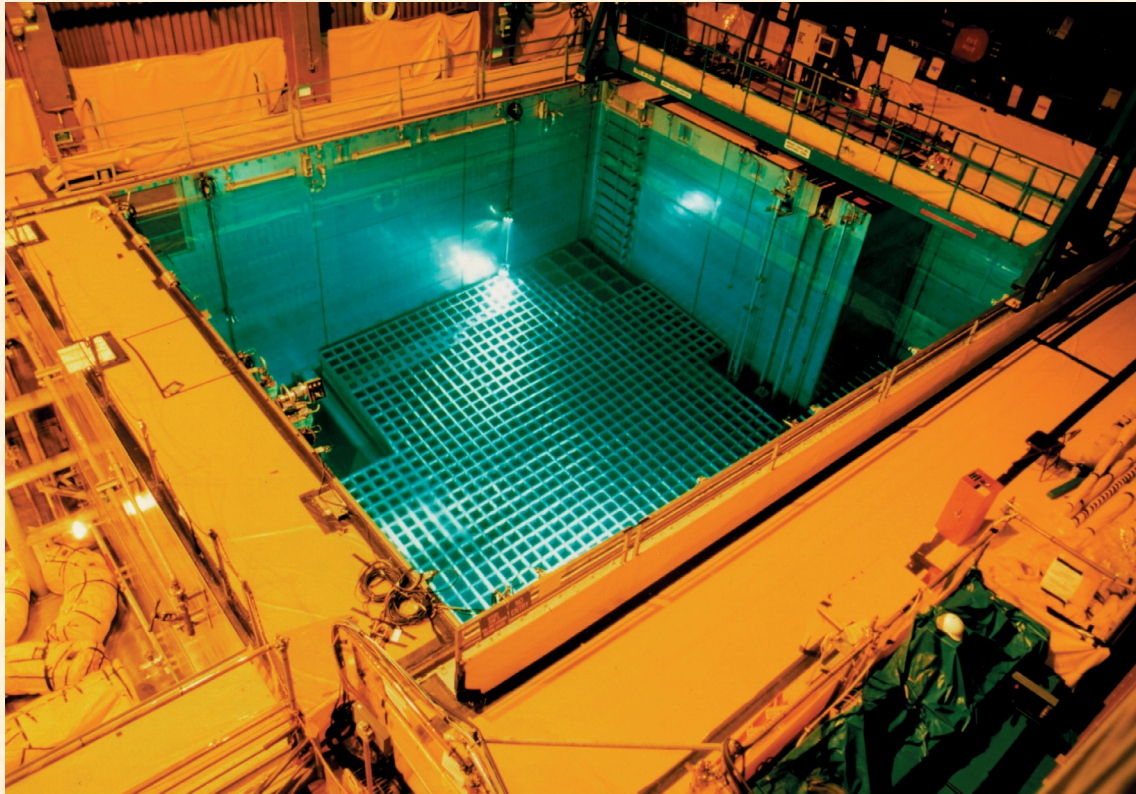
Sterowanie temperaturą

- Kiedy moc na generatorze wzrasta naturalna tendencja polega na chłodzeniu moderatora
- Pręty działają **wbrew** naturalnej tendencji i wysuwając się powodują zwiększenie temperatury moderatora
- Wysunięte pręty pozostają w górnej części rdzenia zaburzając osiowy rozkład strumienia
- Manualne dodawanie boru wspomaga część pracy prętów sterujących, które są ustawiane tak, by wyrównać osiowy rozkład strumienia
- Jest to tzw. „MOD A”, opracowany przez Westinghouse'a

Paliwo wypalone



Paliwo wypalone



Wypalone paliwo po wyjęciu z reaktora
trafia do basenu wypalonego paliwa

Paliwo wypalone



Transport wypalonego paliwa

Paliwo wypalone



Suche składowisko wypalonego paliwa
na terenie elektrowni

Paliwo wypalone



Suche składowisko (Diablo Canyon NPP)



Bezpieczeństwo reaktorów

Skala INES

- 0 – bez znaczenia dla bezpieczeństwa
- 1 – anomalia
- 2 – incydent
- 3 – poważny incydent
- 4 – awaria bez znaczącego zagrożenia poza obiektem
- 5 – awaria z zagrożeniem poza obiektem
- 6 – poważna awaria
- 7 – wielka awaria

Stany pracy elektrowni jądrowej

- C1 – normalne warunki pracy w stanie ustalonym lub przejściowym
- C2 – zdarzenia awaryjne o $P < 10^{-2}$ /rok/reaktor
- C3 – mało prawdopodobne wypadki o $P < 10^{-3}$ /rok/reaktor
- C4 – wypadki hipotetyczne o $P < 10^{-4}$ /rok/reaktor



Bezpieczeństwo reaktorów

Najpoważniejsze rodzaje wypadków

- **Przechłodzenie** – nadmierny odbiór ciepła w obiegu wtórnym
- **Przegrzanie** – niewystarczający odbiór ciepła w obiegu wtórnym
- **LOCC** – utrata zdolności chłodzenia
- **LOCA** – przerwanie pierwotnego obiegu chłodzenia
- **Reaktywność** – niekontrolowane zwiększenie reaktywności
- **ATWS** – stan awaryjny bez wyłączenia reaktora
- **Obsługa paliwa** – uszkodzenie/błędne umieszczenie paliwa
- **Czynnik ludzki** – związane z błędem lub działaniem celowe człowieka
- **Zewnętrzne** – związane z działaniem czynników zewnętrznych



Wypadki - LOCC

Utrata zdolności chłodzenia

(Loss Of Cooling Capacity)

■ Co się dzieje

- w układzie pierwotnym: następuje zablokowanie (ograniczenie) przepływu w (np. uszkodzenie pompy) – Loss Of Flow Accident (LOFA)
- w układzie wtórnym: następuje zablokowanie (ograniczenie) możliwości odprowadzania ciepła na zewnątrz – Loss Of Heat Sink

■ Zagrożenie

Rozszczelnienie obiegu pierwotnego, przegrzanie i uszkodzenie paliwa, możliwość odstonięcia rdzenia, możliwość uwolnienia radioaktywności z uszkodzonego paliwa

■ Skutki

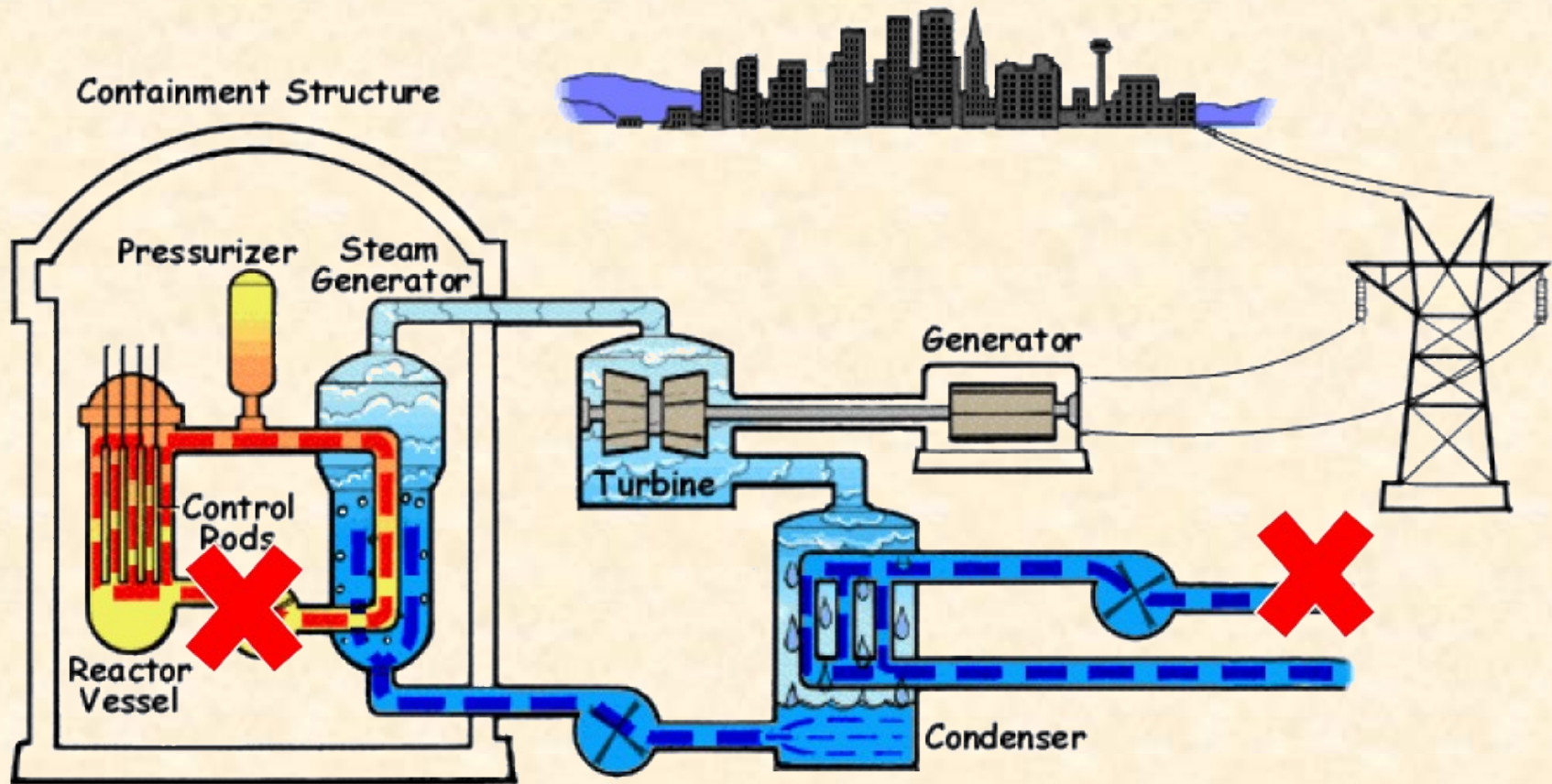
Wyłączenie reaktora, ale ciepło powyłączeniowe może doprowadzić do uszkodzenia rdzenia

■ Zapobieganie (ograniczanie skutków)

- zwielokrotnione obiegi pierwotne
- awaryjny system chłodzenia rdzenia (ECCS)

Wypadki - LOCC

Utrata zdolności chłodzenia
(Loss Of Cooling Capacity)





Wypadki - LOCA

Utrata chłodziwa (w obiegu pierwotnym) (Loss Of Coolant Accident)

■ Co się dzieje

Następuje przerwanie pierwotnego obiegu chłodzenia, z którego para ucieka

■ Zagrożenie

Przegrzanie i uszkodzenie paliwa, uwolnienie energii zgromadzonej w chłodziwie poza obiegiem, skażenia, uwolnienie radioaktywności z uszkodzonego paliwa

■ Skutki

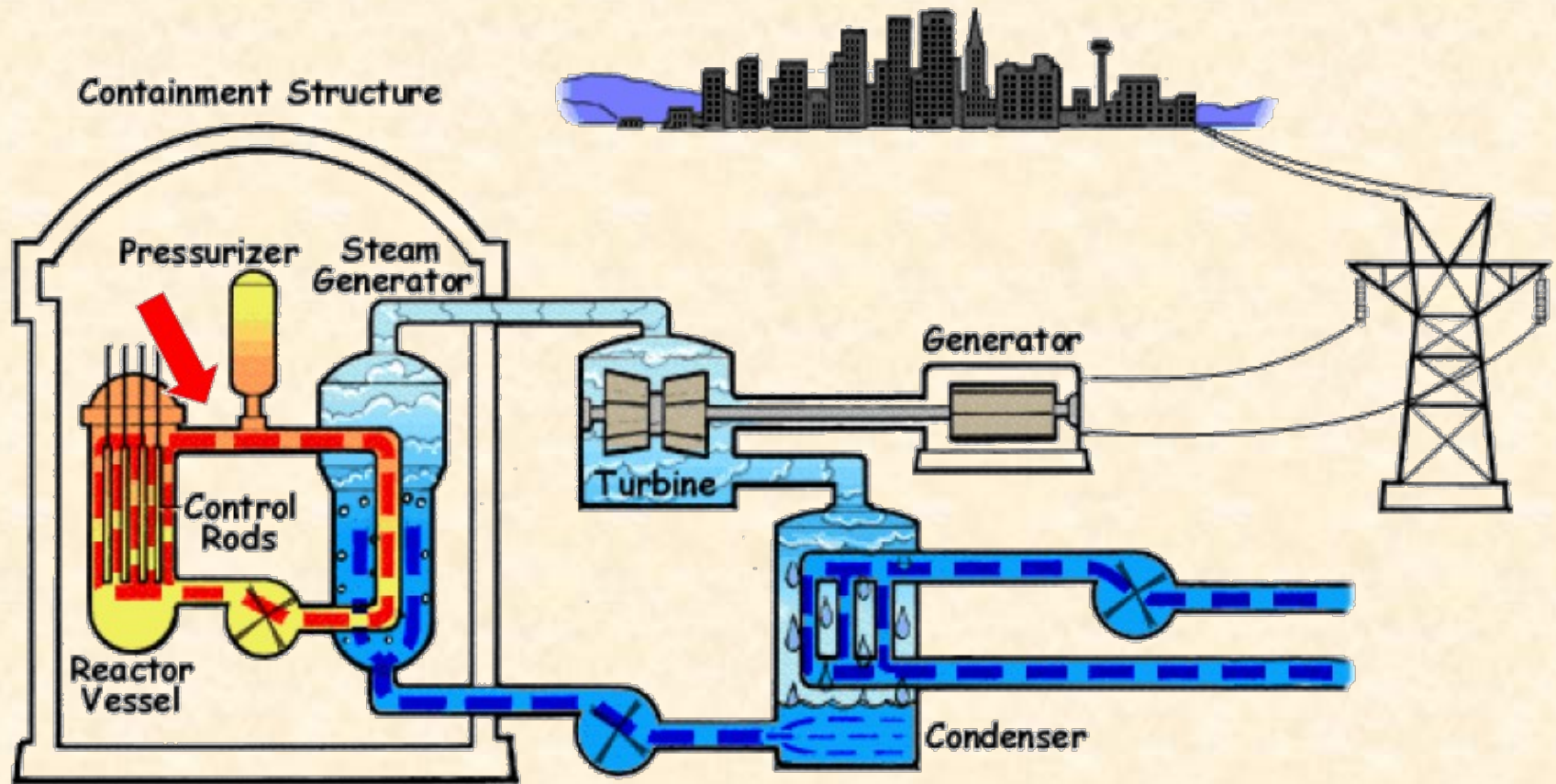
W zależności od miejsca wystąpienia i rozmiarów skutki mogą być różne. Large Break LOCA połączona z całkowitym przerwaniem „hot leg” jest jednym z najpoważniejszych wypadków

■ Zapobieganie (ograniczanie skutków)

- zwielokrotnione obiegi pierwotne
- zbiorniki wody w budynku reaktora
- „core catcher”

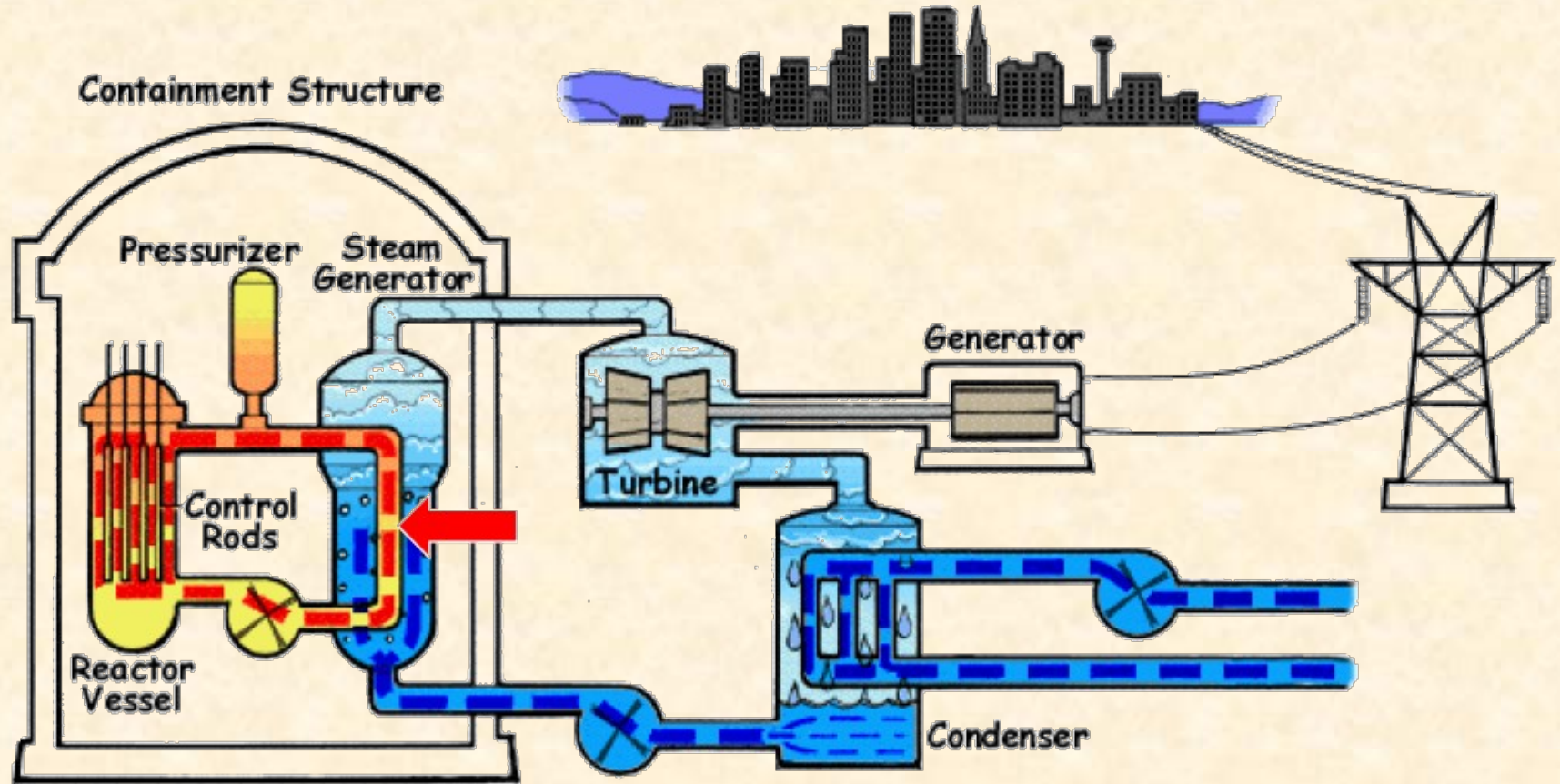
Wypadki - LOCA

Przerwanie „hot leg”



Wypadki - LOCA

Przerwanie obiegu wewnątrz wytwornicy pary
(Steam Generator Tube Rupture)





Wypadki – reaktywność

Niekontrolowany wzrost reaktywności (Reactivity Accidents)

■ Scenariusze szczegółowe

- zdarzenia związane z prętami sterującymi:
 - niekontrolowane usunięcie
 - wyrzucenie – CR Ejection (PWR)
 - opadnięcie – CR Drop (BWR)
- wtargnięcie wody bez boru – boron-free water ingres
- błąd załadunku paliwa – fuel loading error

■ Kiedy może wystąpić

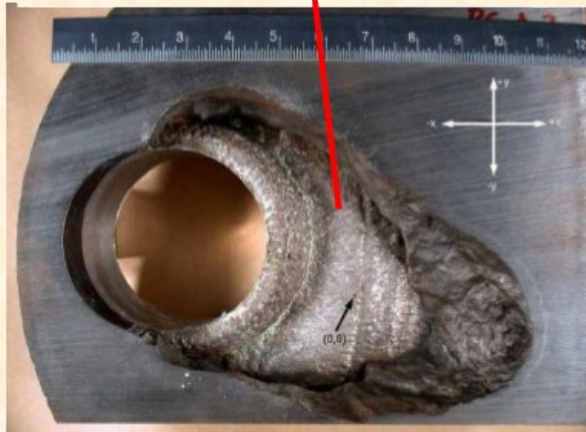
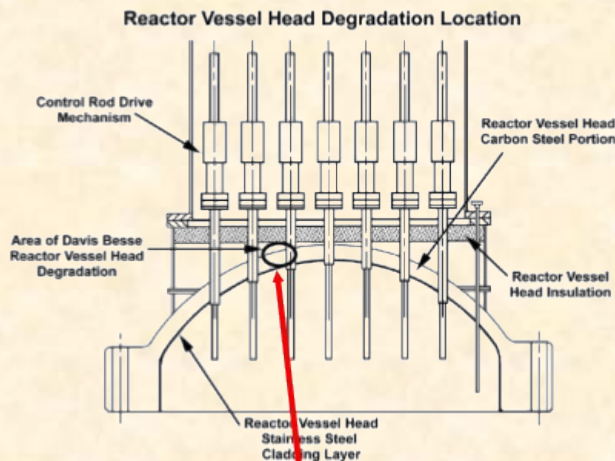
- w trakcie załadunku paliwa
- przy zerowej mocy reaktora
- przy pełnej mocy reaktora

■ Zagrożenie

Niebezpieczeństwo niekontrolowanego wzrostu mocy, przegrzania i uszkodzenie paliwa, uwolnienie radioaktywności z uszkodzonego paliwa

Wypadki – reaktywność

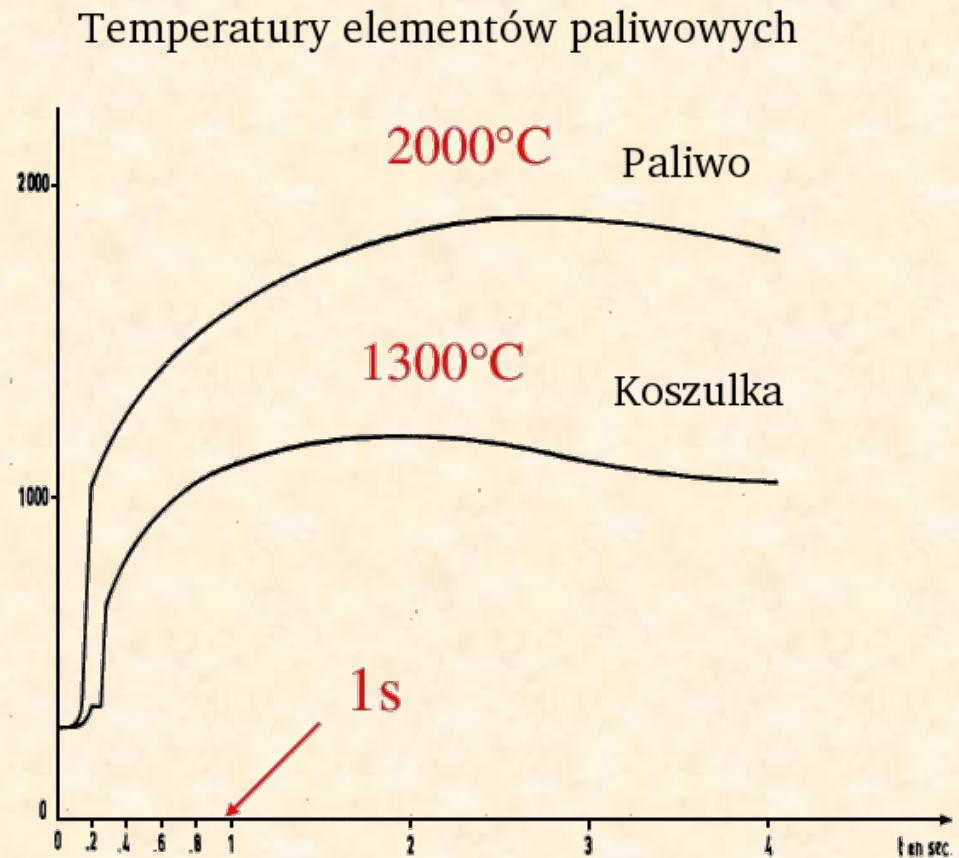
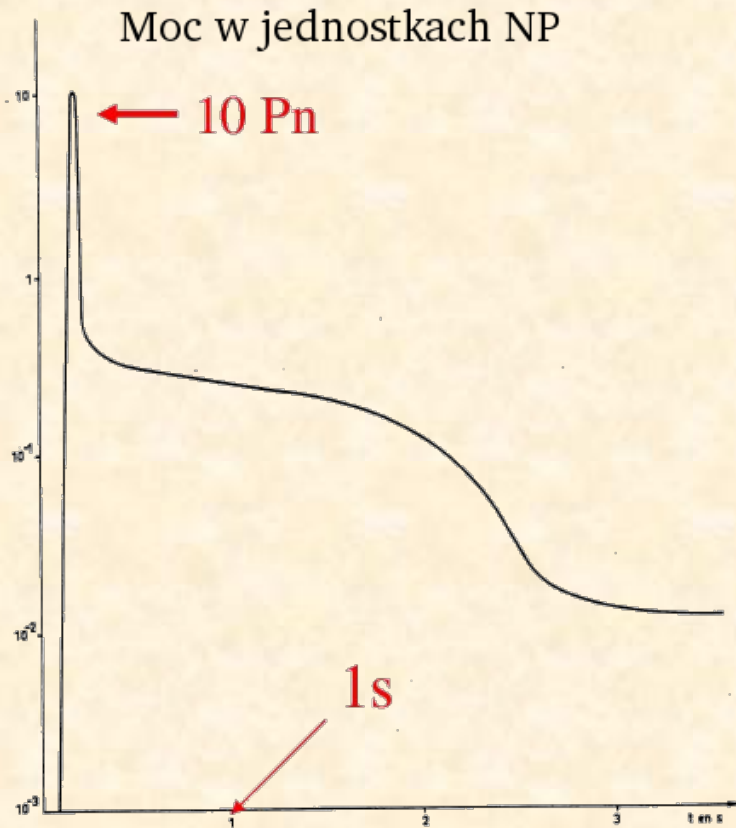
Wyrzucenie pręta sterującego



- Spowodowane uszkodzeniami korozyjnymi w miejscach przechodzenia przewodnic prętów sterujących przez pokrywę reaktora
- Ciśnienie wewnątrz reaktora 155 bar
- Wyrzucenie prętów sterujących jednej kasety trwa poniżej 1s
- Zmiana poziomu mocy powoduje awaryjne wyłączenie reaktora (scram)

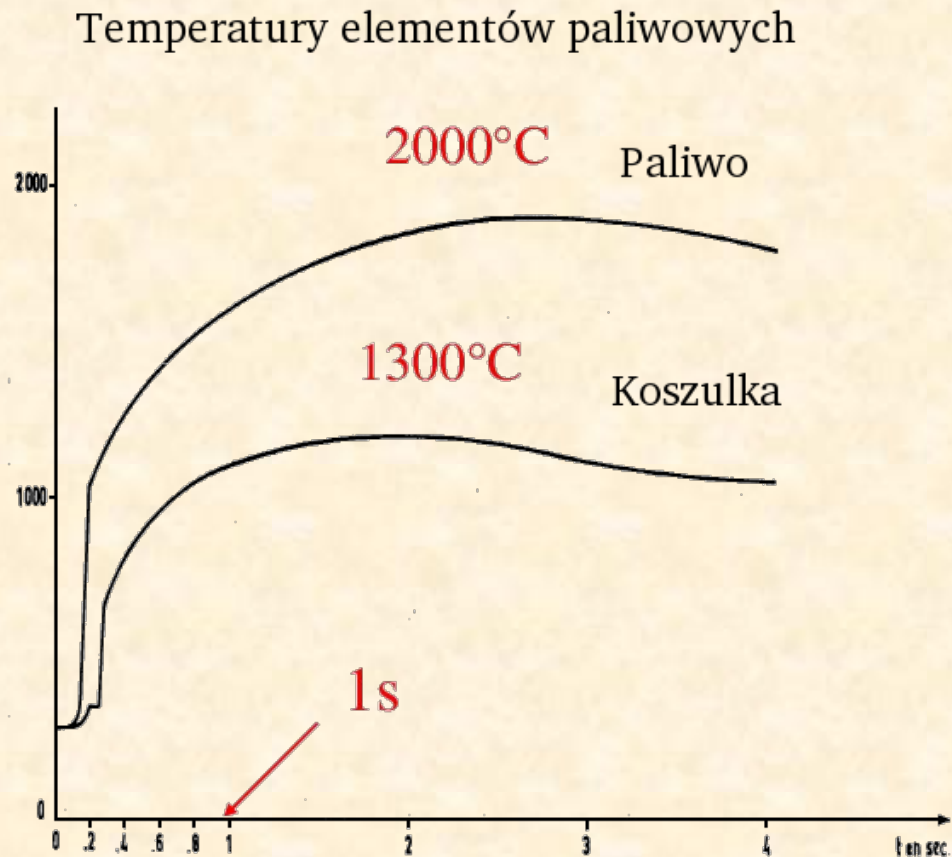
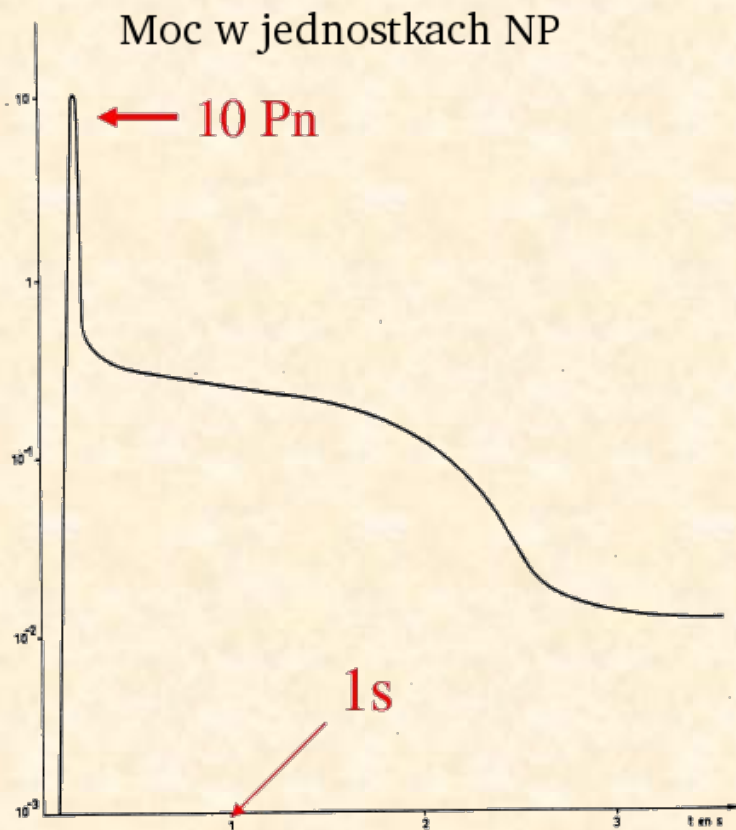
Wypadki – reaktywność

Wyrzucenie pręta sterującego



Wypadki – reaktywność

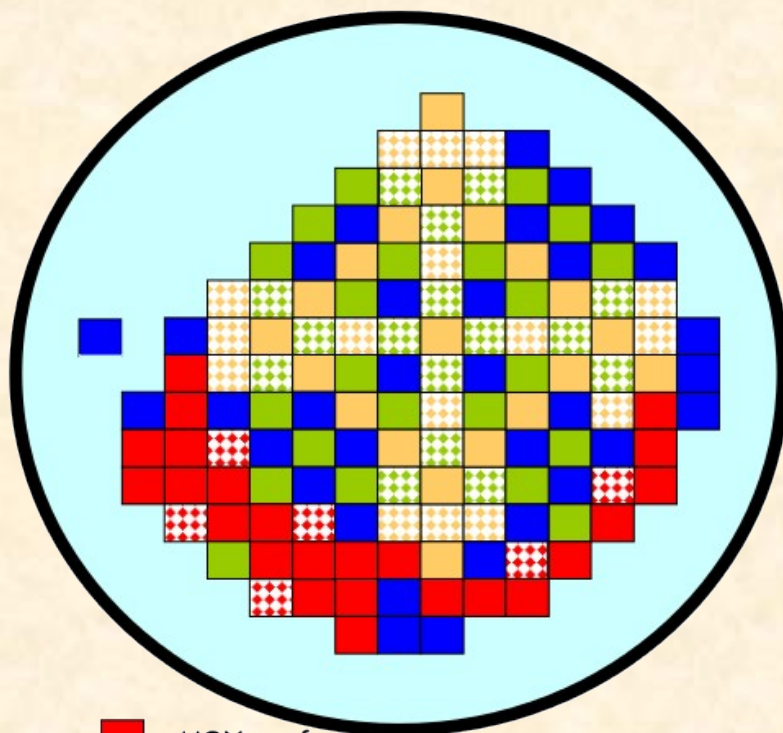
Wyrzucenie pręta sterującego



Wypadki - reaktywność

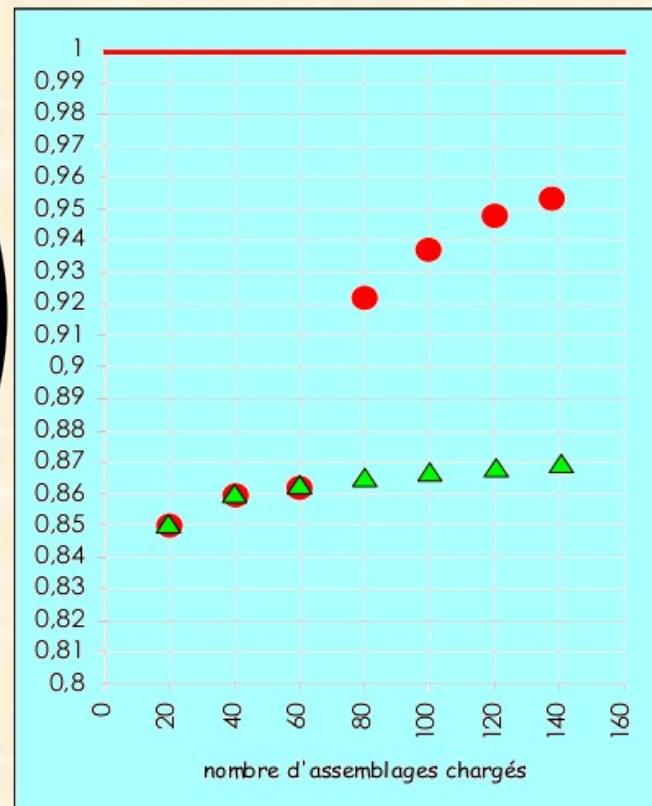
Błąd przeładunku paliwa

Loading pattern



Eigen value (calculations APOLLO-CRONOS)

▲ Normal Sequence ● Perturbated sequence





Wypadki - ATWS

Stan awaryjny bez wyłączenia reaktora (Anticipated Transient Without Scram)

■ Co się dzieje

W awaryjnym stanie przejściowym nie następuje wyłączenie reaktora (nie zostają wpuszczone pręty sterujące/wyłączeniowe)

■ Zagrożenie

Jedna z najpoważniejszych rozpatrywanych awarii, gdyż zachodzi w momencie wystąpienia innego stanu awaryjnego (utrata chłodzenia, odcięcie turbiny, odcięcie generatora, itp.)

■ Skutki

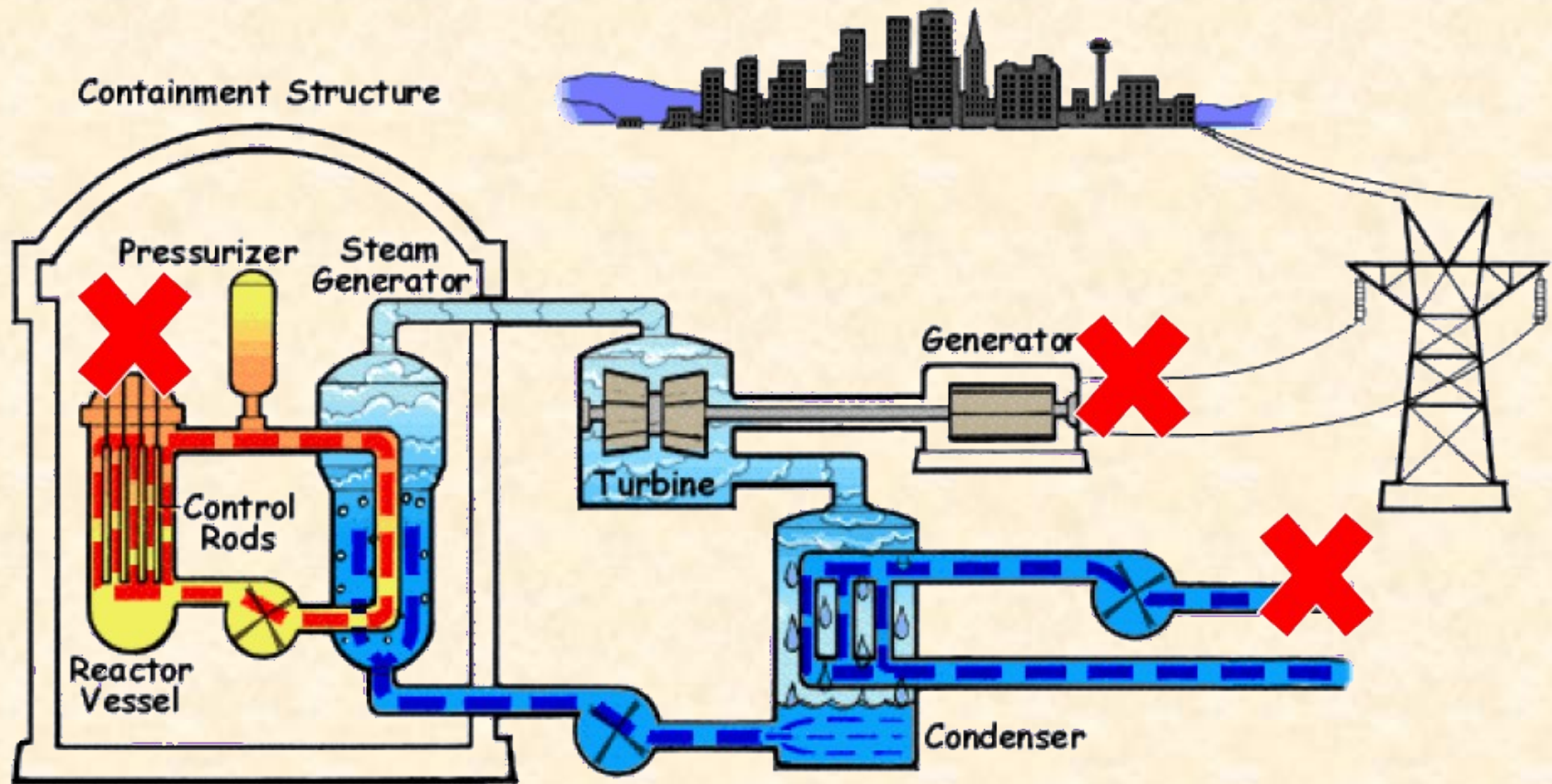
Niekontrolowany wzrost ciśnienia i temperatury w reaktorze, uszkodzenie paliwa

■ Zapobieganie

- stosowanie alternatywnych systemów wyłączenia reaktora (np. iniekcja ^{10}B)
- ujemne współczynniki temperaturowe
- bezpieczne mechanizmy napędów prętów sterujących

Wypadki - ATWS

Awaryjne stany przejściowe poprzedzające ATWS





Wypadki – czynniki zewnętrzne

Przyczyny leżą poza elektrownią

■ Możliwe scenariusze

- katastrofy naturalne
 - trzęsienie ziemi
 - tsunami
 - powódź
 - tornado
- uderzenie samolotu
- brak zewnętrznego dopływu energii elektrycznej

■ Możliwe skutki

- uszkodzenia systemów reaktora lub obiegów chłodzenia
- odsłonięcie i uszkodzenie (stopienie) rdzenia
- uwolnienie skażeń radioaktywnych do otoczenia
- narażenia dla pracowników



Wypadki inne

Wypadki nie związane bezpośrednio z reaktorem

- Wypadki związane z obsługą wypalonego paliwa
 - uszkodzenia basenów wypalonego paliwa (Fukushima)
 - uszkodzenia wypalonego paliwa w trakcie transportu
 - uszkodzenia termiczne wypalonego paliwa (brak chłodzenia)
- Wypadki związane z generatorami awaryjnymi i pomocniczymi
 - pożar
 - zalanie
- Wypadki transportowe
 - związane z transportem materiałów promieniotwórczych
 - nie związane z transportem materiałów promieniotwórczych
- Wypadki pracowników (przy pracy)



Dziękuję za uwagę

Neutrony opóźnione

Fuel	Enrichment	Moderator	Collant	System
U (Metal)	0.72 (nat)	Graphite	Gas (CO ₂)	AGR, UNGG
U oxide	8%	Graphite	Gas (CO ₂)	HTR
U oxide	0.72 (nat)	D ₂ O	D ₂ O	CANDU
U oxide	3 to 4%	H ₂ O	H ₂ O	PWR
U oxide	2%	Graphite	H ₂ O (boiling)	RBMK
U oxide	3%	H ₂ O	H ₂ O (boiling)	BWR
U (Si)	19.75%	H ₂ O	H ₂ O	OSIRIS
U (Metal)	90%	H ₂ O	H ₂ O	ORPHEE
U+Pu oxide	15%	-	Sodium	SFR