

Wydział Fizyki UW
Podstawy bezpieczeństwa energetyki
jądrowej, 2018

5. ZMIANY REAKTYWNOŚCI I
DYNAMIKA REAKTORA

Prof. NCBJ dr inż. A. Strupczewski

Spis treści wykładu (1)

Równanie dyfuzji,

Zalety jądrowe układu
niejednorodnego
(heterogenicznego)

Korzyści z reflektora
reaktorowego

Spłaszczenie rozkładu strumienia
pozwała uzyskać z reaktora
większą moc

Eksploatacyjne zmiany
reaktywności

Wpływ efektu temperaturowego na
moc reaktora po wprowadzeniu
reaktywności dodatniej

Efekty w rdzeniu jako wynik
zwiększonej temperatury

Współczynnik temperaturowy
paliwa

Wpływ temperatury na efektywny
współczynnik mnożenia

Zatrucie produktami
rozszczenia w toku pracy
reaktora

Wpływ produktów rozszczepienia
na zatrucie reaktora.

Spis treści wykładu (2)

Akumulacja Xe-135

Ile ksenonu Xe-135 jest w reaktorze?

Koncentracja równowagi Xe-135

Akumulacja ksenonu po wyłączeniu reaktora

Jama jodowa – wyjść z niej można dopiero po rozpadzie ksenonu

Inne zatrucia - samar-149

Efekty zatruc w reaktorze MARIA

Wypalenie paliwa

Produkcja plutonu

Akumulacja Pu w PWR,

Zmiany reaktywności wskutek wypalania paliwa i produkcji Pu

Zmiany dynamiki reaktora przy wypalaniu paliwa i produkcji Pu

Równanie dyfuzji

Szybkość zmiany ilości neutronów = szybkość produkcji – szybkość pochłaniania – szybkość ucieczki

W stanie ustalonym szybkość zmiany liczby neutronów równa jest zeru.

Szybkość produkcji S na przykład szybkość produkcji neutronów rozszczepienia.

Szybkość absorpcji - makroskopowy przekrój czynny na absorpcję razy strumień neutronów $\Sigma_a \varphi$,

Szybkość ucieczki otrzymujemy całkując liczbę neutronów netto przechodzących na zewnątrz powierzchni A pewnej objętości, co można opisać wyrażeniem $\text{div } J$, gdzie J to prąd netto, który można określić z prawa Ficka, $J = -D \delta\varphi/\delta x$ gdzie D jest współczynnikiem dyfuzji

Równanie dyfuzji w stanie ustalonym ma postać

$$\text{div } D (\delta\varphi/\delta x + \delta\varphi/\delta y + \delta\varphi/\delta y) - \Sigma_a \varphi + S = 0$$

Ucieczka neutronów z reaktora

Współczynnik mnożenia k_{∞} zwiększamy przez zwiększenie $\epsilon \eta p f$.

Neutrony tracimy także, gdy uciekają z reaktora. Ucieczkę neutronów można zmniejszyć :

- Zwiększając rozmiary rdzenia
- Stosując reflektor.

Przypadek reaktora kulistego

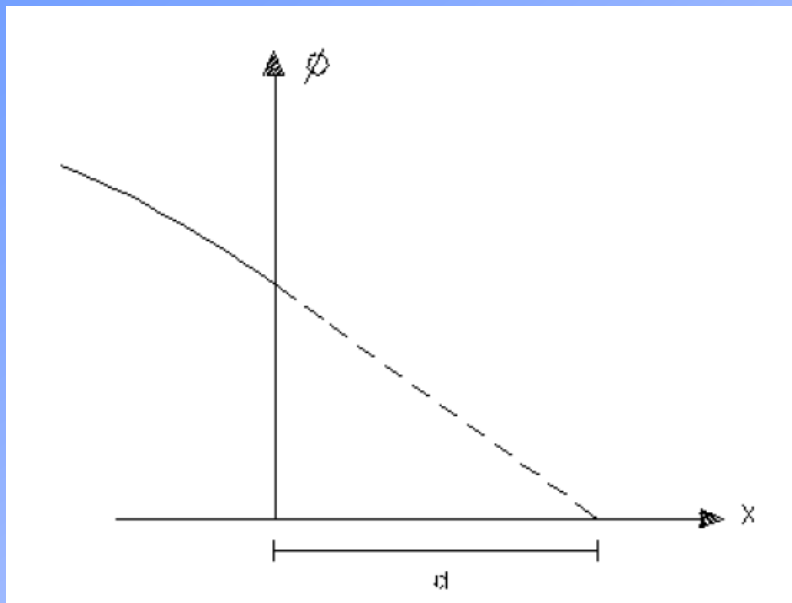
Objętość kuli wynosi $V = 4/3 \pi r^3$
(produkcja i absorpcja są proporcjonalne do objętości rdzenia) a powierzchnia kuli wynosi $S = 4\pi r^2$
(ucieczka jest proporcjonalna do powierzchni rdzenia)

Stosunek S/V maleje ze wzrostem promienia i w związku z tym maleje także procentowy udział ucieczki neutronów

Sześcian ma większy stosunek S/V przy danej objętości, jeśli porównuje się go z optymalnymi wymiarami dla cylindra. Tak więc ucieczkę neutronów można zmniejszyć dobierając optymalny kształt reaktora i zwiększając jego rozmiary

Gdy rozmiary reaktora są dostatecznie duże by podtrzymać reakcję łańcuchową mówimy, że reaktor ma rozmiary krytyczne.

Warunki brzegowe na powierzchni styku dwóch różnych ośrodków

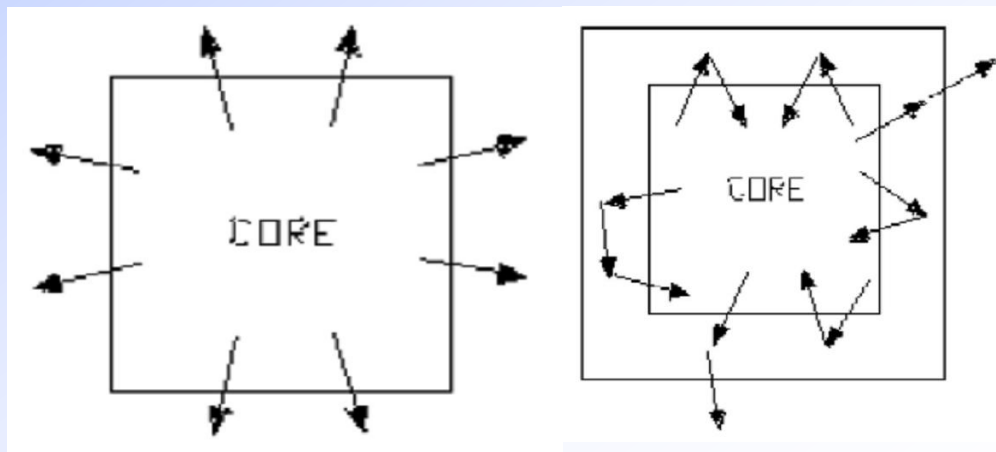


Reflektor to substancja umieszczona naokoło rdzenia reaktora w celu zatrzymania neutronów w rdzeniu

ciągłość strumienia i

- składowej prostopadłej do powierzchni styku.
- Gdy ośrodek ma powierzchnię zewnętrzną jako warunek brzegowy przyjmuje się, że strumień zanika do wartości zerowej w niewielkiej odległości d od powierzchni

Odległość d znana jest jako długość ekstrapolacji. Można ją obliczyć ze wzoru $d = 2,13 D$.



Ucieczka neutronów z reaktora

Współczynnik mnożenia k_{∞} zwiększamy przez zwiększenie $\epsilon \eta p f$.

Neutrony tracimy także, gdy uciekają z reaktora. Ucieczkę neutronów można zmniejszyć :

- Zwiększając rozmiary rdzenia
- Stosując reflektor.

Przypadek reaktora kulistego

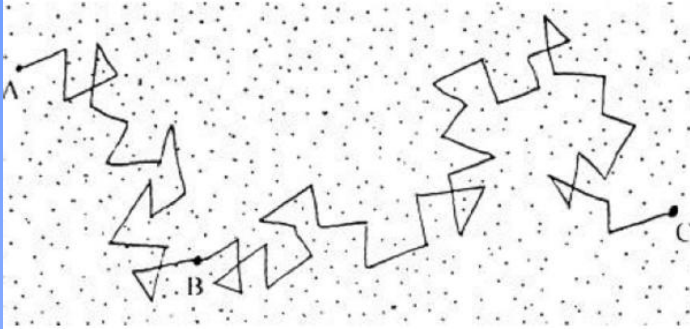
Objętość kuli wynosi $V = 4/3 \pi r^3$
(produkcja i absorpcja są proporcjonalne do objętości rdzenia) a powierzchnia kuli wynosi $S = 4\pi r^2$
(ucieczka jest proporcjonalna do powierzchni rdzenia)

Stosunek S/V maleje ze wzrostem promienia i w związku z tym maleje także procentowy udział ucieczki neutronów

Sześcian ma większy stosunek S/V przy danej objętości, jeśli porównuje się go z optymalnymi wymiarami dla cylindra. Tak więc ucieczkę neutronów można zmniejszyć dobierając optymalny kształt reaktora i zwiększając jego rozmiary

Gdy rozmiary reaktora są dostatecznie duże by podtrzymać reakcję łańcuchową mówimy, że reaktor ma rozmiary krytyczne.

Dyfuzja neutronów w moderatorze



Droga neutronu spowalnianego do energii termicznej
Neutron rozszczepieniowy powstający w punkcie A zostaje spowolniony do energii termicznej w $18,2/\xi$ zderzeniach by dojść do punktu B. Średnia kwadratowa długość przelotu na odległości AB jest określona wzorem

$$6L_s^2 = \overline{(AB)^2}$$

L_s nosi nazwę *długości spowalniania*

Gdy neutron zostanie spowolniony w punkcie B, będzie on nadal poruszał się z energią termiczną w moderatorze, dopóki nie zostanie pochłonięty w punkcie C. Można napisać

$$6L^2 = \overline{(BC)^2}$$

gdzie L - długość dyfuzji.

Moderator	L_s (cm)	L (cm)
H ₂ O	5.6	2.76
D ₂ O*	11.0	100
Be	9.2	21
Grafit	18.7	64.2

Reaktor krytyczny prędkości homogeniczny, bez reflektora

$$D \nabla^2 \varphi - \sum_a \varphi = -S = -v \sum_f \varphi$$

$$\nabla^2 \varphi + (v \sum_f - \sum_a) / D \varphi = 0$$

$$\nabla^2 \varphi + B^2 \varphi = 0$$

ostatnie równanie nosi nazwę *równania reaktora*

Porównując dwa ostatnie równania widzimy, że jedynym możliwym rozwiązaniem jest

$$B^2 = (v \sum_f - \sum_a) / D$$

a dla geometrii płytowej $B^2 = (\pi/a)^2$

$$K_{\text{eff}} = 1 = v \sum_f / (\sum_a + D B^2) = K_{\text{inf}} / (1 + L^2 B^2)$$

Parametr (buckling) materiałowy musi być równy *parametrowi (bucklingowi) geometrycznemu* by system był w stanie krytycznym.

Tak więc układ jednorodny o następujących parametrach:

$v \sum_f$ -przekrój czynny na rozszczepienie,

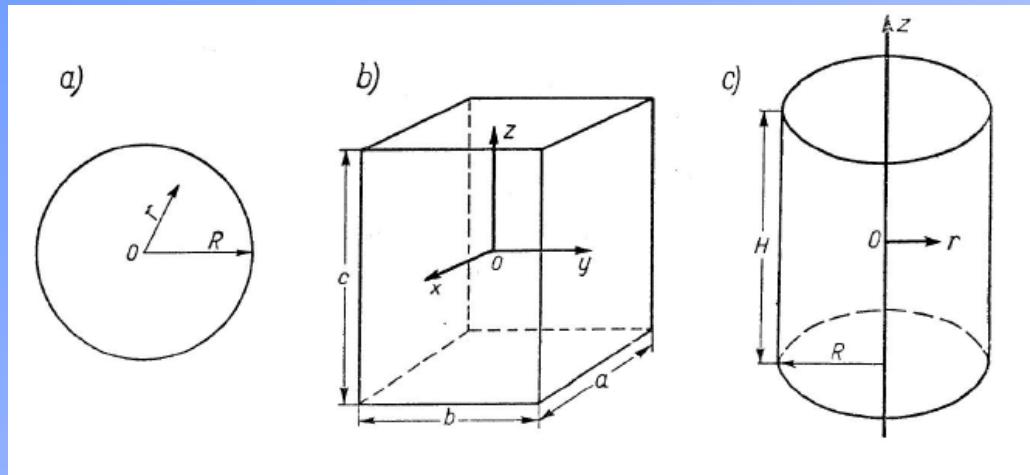
\sum_a -przekrój czynny na absorpcję,

D , - stała dyfuzji,

będzie krytyczny w geometrii płytowej tylko wtedy, gdy grubość płyty wyniesie "A"

$$A = (\pi^2 * D / (v \sum_f - \sum_a))^{1/2}$$

Parametr geometryczny B2 i rozkład strumienia dla różnych geometrii reaktora



Wymiary krytyczne reaktorów o kształcie:
 a) kuli;
 b) prostopadłościanu prostokątnego;
 c) walca o długości skończonej)

Geometria	Wymiar	B2	Rozkład strumienia
Płyta nieskończona	Grubość a	$(\pi/a)^2$	$\cos(Bx)$
Równoległoscian prostokątny	$a * b * c$	$(\pi/a)^2 + (\pi/b)^2 + (\pi/c)^2$ $B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$	$\cos(B_x x) \cos(B_y y)$ $\cos(B_z z)$
Cylinder nieskończony, promień	R	$(2.405 / R)^2$	$J_0(B r)$
Cylinder skończony	$R * H$	$(2.405/R)^2 + (\pi/H)^2 B_R^2 + B_z^2$	$J_0(B_R r) \cos(B_z z)$
Kula, promień	R	$(\pi/R)^2$	$\sin(B r) / r$

Efektywny współczynnik mnożenia k_{eff}

- Zdefiniowaliśmy $k_{\infty} = \epsilon \eta f p$ dla reaktora o rozmiarach nieskończonych, a teraz zdefiniujemy k_{eff} dla reaktora o rozmiarach skończonych z uwzględnieniem członu ucieczki.

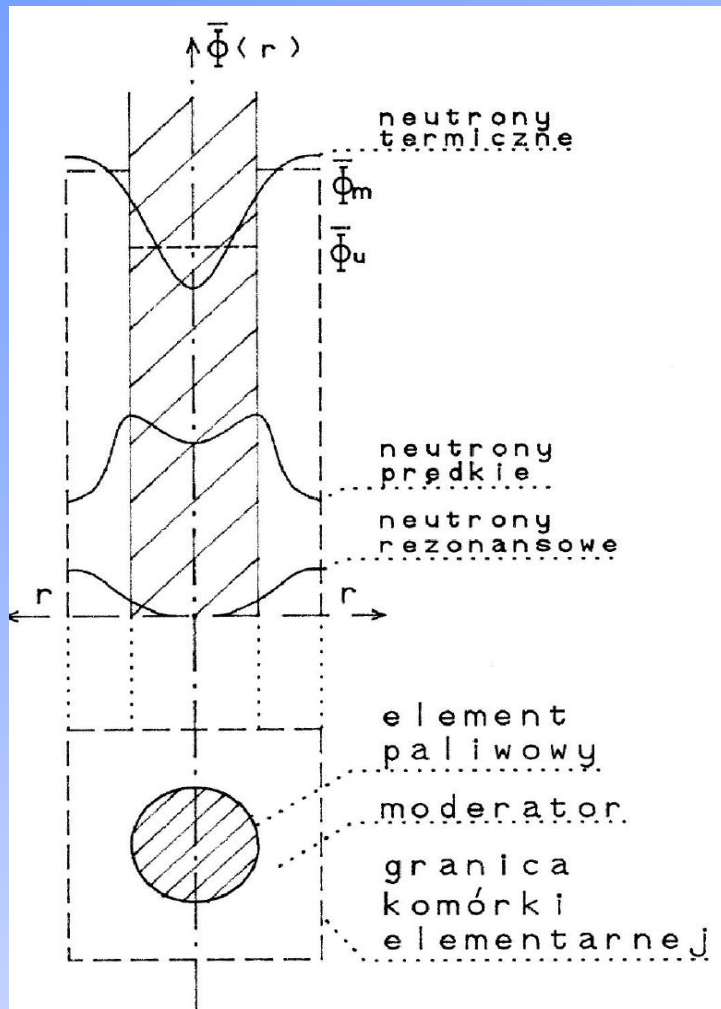
$$k_{\text{eff}} = \epsilon \cdot \eta \cdot f \cdot p \cdot P_t \cdot P_f = k_{\infty} \cdot P_t \cdot P_f = 1$$

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty}}{(1 + B^2 L^2) (1 + B^2 L_s^2)} = 1$$

B = parametr geometryczny (Buckling)
 L_s = Długość spowalniania neutronów prędkich
 L = Długość dyfuzji

P_f i P_t zależą od kształtu i rozmiarów reaktora. W przypadku reaktora cylindrycznego o promieniu (R) i wysokości (H), mamy

Zalety jądrowe układu niejednorodnego (heterogenicznego)



Wartość ϵ nieco rośnie, ponieważ neutrony emitowane w pręcie paliwowym mogą spowodować rozszczepienia U-238 na neutronach prędkich zanim opuszczą paliwo. Ta wartość ϵ wynosi od 1.02 do 1.03

Prawdopodobieństwo uniknięcia wychwytu rezonansowego „p” rośnie znacznie wskutek dwóch czynników:

Większość neutronów spowalniana poniżej energii rezonansowych przed wejściem do elementu paliwowego.

Samoekranowanie w paliwie - największy rezonans w U-238 przy energii 6,7 eV ma przekrój czynny na absorpcję równy 8000 barnów. Pochłanianie przy tej energii występuje na powierzchni prętów paliwowych i wewnątrz prętów już nie „widzi” neutronów o energii 6,7 eV.

W układzie heterogenicznym $p = 0,9$.

Korzyści z reflektora reaktorowego

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H} \right)^2$$

Dla reaktora o rozmiarach nieskończonych, $B^2 = 0$, prawdopodobieństwo uniknięcia ucieczki podczas spowalniania wyniesie $P_f P_t = 1$, a *warunek krytyczny* $k_\infty = 1$.
Przez dodanie reflektora zwiększamy k_{eff} .
Dodatkową korzyścią ze stosowania reflektora jest spłaszczenie rozkładu strumienia neutronów, a to pozwala na lepsze wykorzystanie paliwa

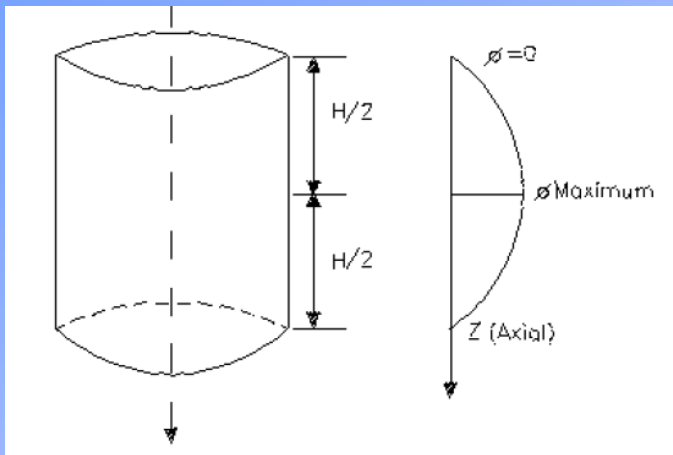
Idealny reflektor powinien być taki sam jak idealny moderator. Lekkie jądra są najbardziej skuteczne w odbijaniu neutronów w stronę rdzenia. Najlepszymi reflektorami są D_2O , grafit i H_2O .

Oszczędność reflektorowa,

Redukcja wymiarów krytycznych rdzenia reaktora osiągnięta wskutek zastosowania reflektora

jeśli R_0 jest promieniem kulistego rdzenia bez reflektora, a R promieniem krytycznym rdzenia z reflektorem, to oszczędność reflektorowa δ jest równa różnicy dwóch promieni, $\delta = R_0 - R$.

Rozkład strumienia neutronów w reaktorze cylindrycznym



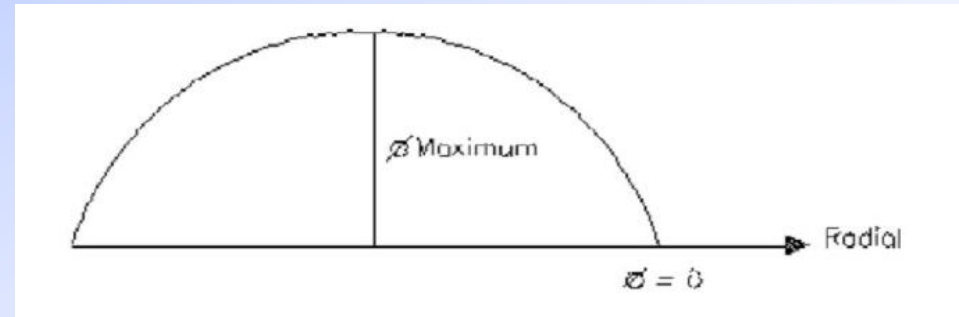
Rozkład strumienia wzdłuż osi

$$\phi_z = A \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right)$$

Rozkład strumienia wzdłuż promienia ma podobną postać. Nie jest ona dokładnie cosinusowa, ale można wyrazić ją jako Wzdłuż obwodu przyjmujemy, że $r = R$. Dlatego $\phi_r = 0$

Strumień ma inną wielkość w każdym punkcie reaktora, jego rozkład ma ważne znaczenie, bo określa on rozkład mocy w reaktorze.

Zwykle strumień neutronów termicznych ma maksymalną wartość w środku reaktora i maleje do zera na obwodzie reaktora, wobec tego, że poza reaktorem nie ma źródeł neutronów



$$\phi_r = B \cdot J_0\left(\frac{2.405r}{R}\right)$$

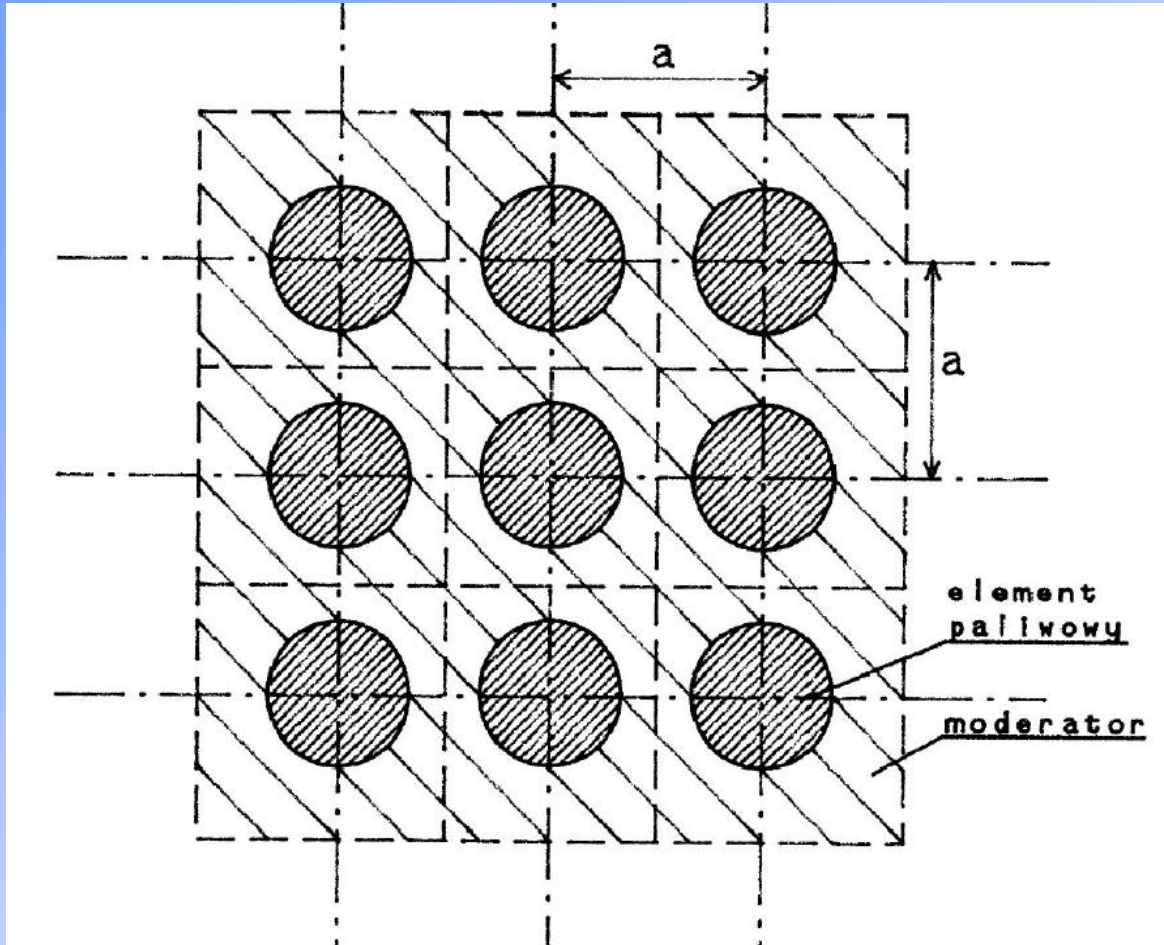
gdzie J_0 – funkcja Bessela

Rozkład strumienia neutronów w rdzeniu cylindrycznym

- Wzdłuż obwodu rdzenia przyjmuje się, że $Z = H/2$ i $Z = -H/2$, a więc że $\cos(\pi/2) = 0$, stąd
- $\varphi_z = 0$
- φ nie może spaść do zera na linii obwodu geometrycznego, a dopiero w odległości d , zwanej *długością ekstrapolacji*
- Po połączeniu obu rozkładów otrzymamy strumień w zależności od (z, r) w dowolnym punkcie reaktora.

$$\phi(z, r) = \phi_{\max} \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \cdot J_0\left(\frac{2.405 r}{R}\right)$$

Reaktor niejednorodny

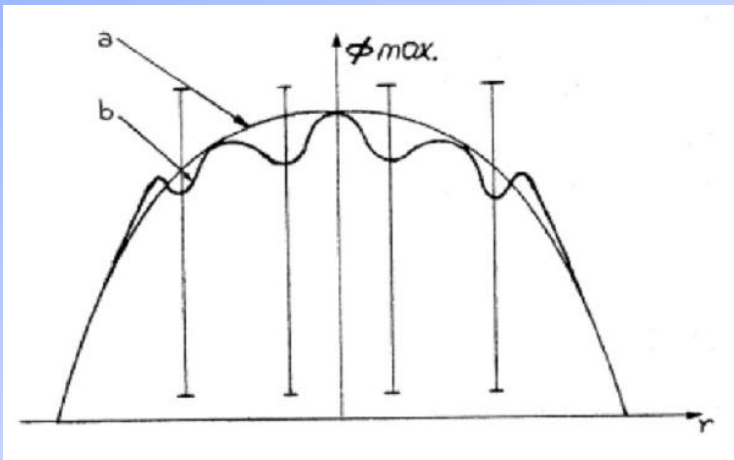
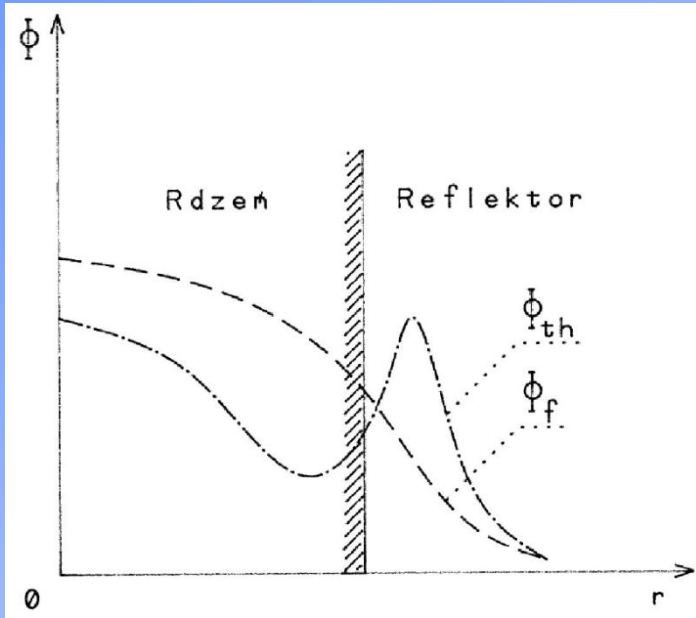


Każdy pręt paliwowy jest otoczony przez moderator.

Rozszczepienia zachodzą w paliwie i neutrony ulegają częściowemu rozpraszaniu niesprężystemu dopóki nie uciekną z paliwa,

Następnie zaczyna się rozpraszanie sprężyste na jądrach moderatora, dopóki neutron nie powróci do paliwa.

Spłaszczenie rozkładu strumienia pozwala uzyskać z reaktora większą moc



1 *Efekt reflektorowy* Wobec tego, że w reflektorze nie ma paliwa, które pochłaniałoby neutrony, reflektor zachowuje się tak jak źródło neutronów termicznych.

2. *Spłaszczenie rozkładu strumienia dzięki pochłaniaczom neutronów.* Pręty regulacyjne są wprowadzane do środkowego obszaru rdzenia obniżając strumień neutronów termicznych i spłaszczając rozkład strumienia.

a) *strumień bez prętów regulacyjnych*, b) *strumień z wprowadzonym prętami regulacyjnymi*

3 *Spłaszczenie strumienia dzięki strefowej wymianie paliwa* – w centrum paliwo o większym wypaleniu

Eksploatacyjne zmiany reaktywności

Zmiany reaktywności następują wskutek następujących przyczyn:

- 1. Gdy moc reaktora rośnie, rośnie także temperatura paliwa, chłodziwa i moderatora, Te zmiany temperaturowe wpływają na reaktywność.
- 2. Akumulacja produktów rozszczepienia, zależna od poziomu mocy reaktora, powoduje wzrost absorpcji neutronów i obniża reaktywność
- 3. Wypalenie paliwa powoduje spadek ilości atomów U-235 i produkcję Pu-239. Wobec tego, że przekroje czynne na rozszczepienie dla tych nuklidów są różne, następują zmiany reaktywności.

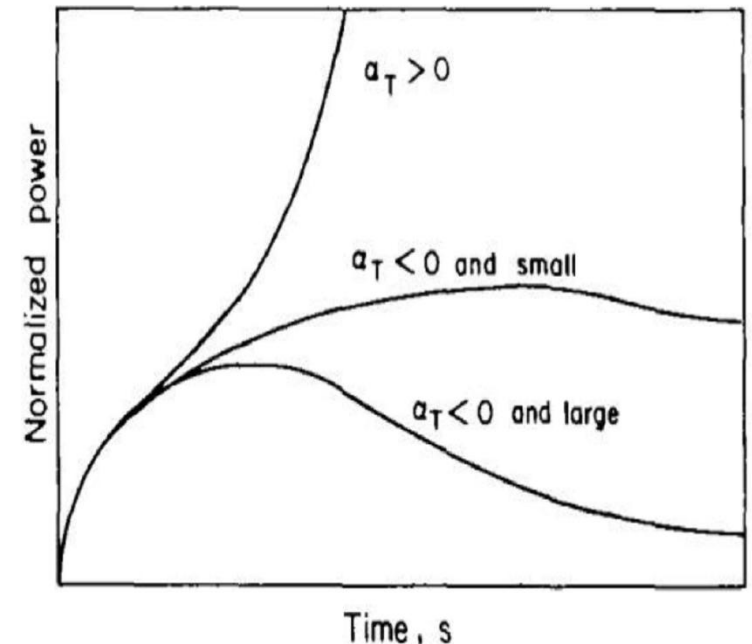
Wpływ efektu temperaturowego na moc reaktora po wprowadzeniu reaktywności dodatniej

Gdy α_T jest dodatni, poziom mocy rośnie, co powoduje wzrost temperatury. To powoduje wzrost mocy, który powoduje dalszy wzrost temperatury itd. Jeśli nie nastąpi interwencja z zewnątrz (układu sterowania) to moc reaktora będzie rosła nieograniczenie, To właśnie zaszło w Czarnobylu.

Gdy α_T jest ujemny reaktywność maleje przy wzroście temperatury i mocy.

Jeśli α_T jest mały a odbiór ciepła z reaktora następuje szybko, to moc reaktora osiągnie pewien poziom, przy którym wzrost temperatury redukuje reaktywność do zera. Moc reaktora rośnie do pewnego poziomu po czym stabilizuje się i reaktor pozostaje krytyczny..

Gdy α_T jest duży i ujemny, a odbiór ciepła powolny, to wzrost temperatury odpowiadający początkowemu wzrostowi mocy może spowodować zmniejszenie reaktywności, co sprowadzi reaktor do stanu podkrytycznego zanim ciepło nagromadzone w systemie nie zostanie odprowadzone na zewnątrz.



$\alpha_T = \text{współczynnik temperaturowy reaktywności} = dk/dT$

Przy ujemnych dk/dT reaktor jest samostabilny.

Efekty w rdzeniu jako wynik zwiększonej temperatury

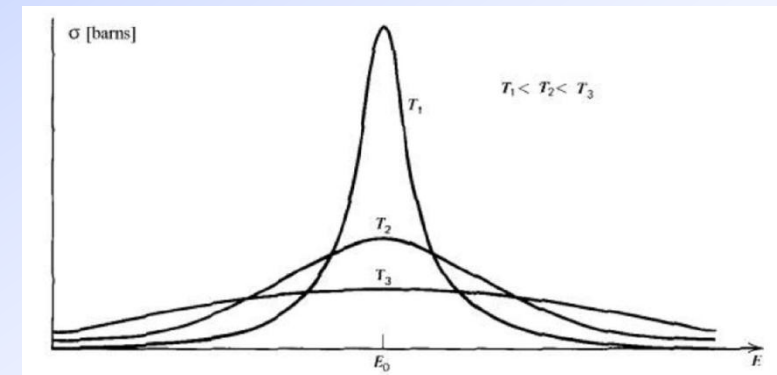
Gdy temperatura rośnie, gęstość moderatora i chłodziwa maleje - wzrost ucieczki neutronów.

Paliwo rozszerza się, co zmniejsza ilość chłodziwa. Jeśli nośnikiem ciepła jest woda zwykła, to wychwyty neutronów znacznie zmniejszą się, gdy tylko dojdzie do ekspansji paliwa.

Przy pewnych energiach neutronów występuje silny wychwyty w jądrach U238

Rezonanse są określone przez względną prędkość neutronu i jądra. Gdy paliwo nagrzewa się, atomy uranu drgają szybciej. Neutron, którego szybkość jest mniejsza od rezonansowej, gdy atomy uranu są w stanie spoczynku, może po nagrzaniu uranu, spotkać atom poruszający się z pewną prędkością i wypadkowa ich prędkości może odpowiadać energii rezonansowej.

Tak więc, neutron, który przeszedłby przez zimne paliwo, może zostać pochłonięty w paliwie gorącym. Oznacza to rozszerzenie zakresu energii rezonansowej. Innymi słowy, podgrzew paliwa powoduje obniżenie reaktywności.



Współczynnik temperaturowy paliwa

Uwaga- rozważamy tu tylko efekty w paliwie $k_{eff} = \epsilon \eta f p P_t P_f$

ϵ = współczynnik rozszczepienia prędkiego

η = współczynnik rozszczepień termicznych. Oba one są zależne od rodzaju paliwa i nie zmieniają się wyraźnie z temperaturą.

f = współczynnik wykorzystania cieplnego; Mikroskopowy przekrój czynny na absorpcję wielu materiałów w reaktorze zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z temperatury. W miarę wzrostu temperatury zmiany przekrojów czynnych wywierają ujemny wpływ na reaktywność.

p = prawdopodobieństwo uniknięcia wychwytu rezonansowego, to jest frakcja neutronów, które nie zostaną pochłonięte w procesie spowalniania przez obszar wysokich wychwyty rezonansowych w U-238. Występują one głównie w rejonie 5 -100 eV, gdzie mogą być o rzędy wielkości większe niż w innych rejonach energetycznych. Jeśli $T(U-238)$ rośnie, to względne ruchy neutronów i atomów U-238 powodują rozszerzenia obszaru rezonansowego (efekt Dopplera). Zwiększa to prawdopodobieństwo wychwytu neutronu i obniża p .

Wpływ temperatury na efektywny współczynnik mnożenia

- *Wzór sześciu czynników* $k_{eff} = \epsilon \eta f p P_t P_f$

P_f = prawdopodobieństwo uniknięcia ucieczki neutronu prędkiego w procesie termalizacji; W rdzeniach zaprojektowanych jako niedomoderowane przy wzroście temperatury wiek neutronów rośnie, co obniża wartość P_f .

P_t = prawdopodobieństwo uniknięcia ucieczki przez neutrony termiczne- zachowuje się tak samo jak P_t .

Ujemny współczynnik temperaturowy paliwa (α_{FT}) bardzo korzystny ponieważ zapewnia on samoregulację mocy reaktora. Małe zmiany reaktywności wprowadzone do reaktora są kompensowane przez wzrost temperatury paliwa i powodowane tym późniejsze obniżenie reaktywności.

Temperatura moderatora ma znacznie większy wpływ na widmo neutronów niż temperatura paliwa i chłodziwa. Współczynnik temperaturowy moderatora jest znacznie większy niż inne współczynniki temperaturowe reaktywności. W reaktorach moderowanych i chłodzonych wodą zwykłą H_2O utrata chłodziwa oznacza jednocześnie utratę moderatora i powoduje gwałtowny spadek reaktywności i natychmiastowe wyłączenie reaktora.

Zatrucie produktami rozszczepienia w toku pracy reaktora

Długoterminowe zmiany reaktywności są powodowane przez:

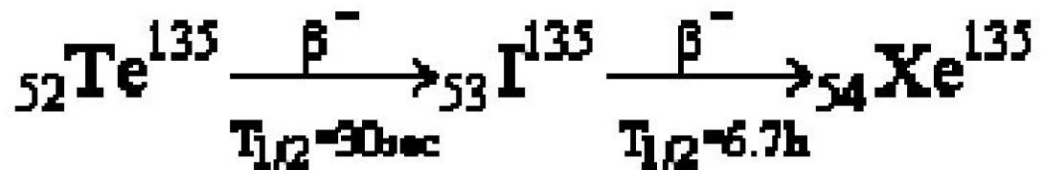
- a. Akumulację w paliwie produktów rozszczepienia, które pochłaniają neutrony.
 - b. Wypalenie U-235 i akumulację plutonu.
- a) najważniejszym zatruciem jest Xe-135 ze względu na jego ogromny przekrój czynny na pochłanianie σ_c , którego wartość wynosi około **3 000 000 barnów**. Ten przekrój czynny Xe-135 jest dużo większy niż przekroje czynne wszystkich innych produktów rozszczepienia. Jest on także znacznie większy od przekroju czynnego na rozszczepienie σ_f dla **U-235** wynoszącego **582 barny**.

Wpływ produktów rozszczepienia na zatrucie reaktora.

Izotop	Przekrój czynny na absorpcję (barn)	Procentowy udział w produktach rozszczepienia i z rozpadu produktów rozszczepienia (%)
Xe-135	2.7×10^6	6.4
Gd-157	2.5×10^5	~ 0.01
Gd-155	6.1×10^4	~ 0.08
Sm-149	4.2×10^4	1.1
Cd-113	2.0×10^4	~ 0.01
Sm-151	1.0×10^4	~ 0.6
Eu-151	7.7×10^3	~ 0.6
B-10	3.8×10^3	<0.0001

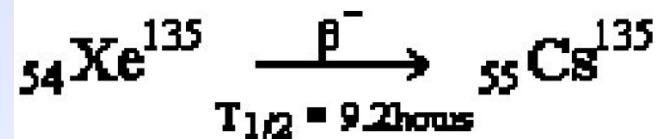
Akumulacja Xe-135

- Xe-135 produkowany jest w paliwie dwoma drogami:
- 1. Bezpośrednio, z rozszczepienia (około 5% Xe-135).
- 2. Pośrednio, poprzez rozpad radioaktywny I-135, który jest bezpośrednim produktem rozpadu Te-135. Około 95% Xe-135 powstaje w ten sposób. Wobec tego, że okres połowicznego zaniku Te-135 jest bardzo krótki w porównaniu z okresem połowicznego zaniku jodu I-135, można przyjąć, że I-135 pochodzący z rozpadu telluru Te-135 powstaje natychmiast po rozszczepieniu



Xe-135 rozpada się dwoma drogami:

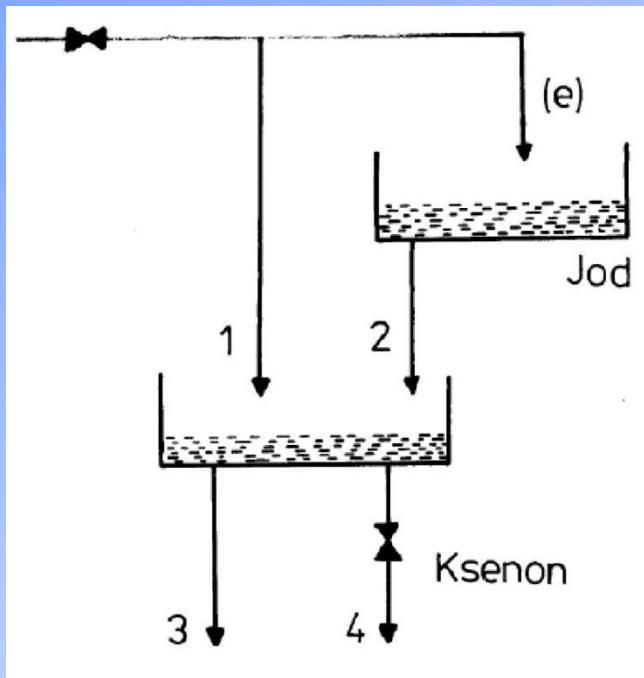
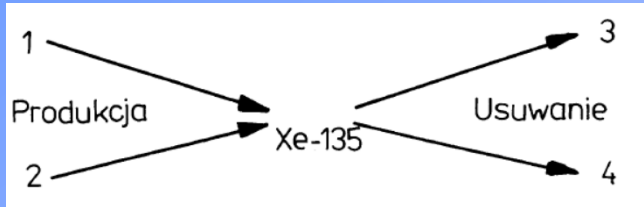
3. Przez emisję beta do Cs-135



4. Przez wychwył neutronu termicznego



Ile ksenonu Xe-135 jest w reaktorze?



Reaktor zaczął pracę i pracuje na stałej mocy. Załóżmy, że I-135 jest produkowany bezpośrednio.

Gdy reaktor startuje, powstają I-135 i Xe-135.

W naszej analogii woda przepływa do naczynia z jodem i trochę wody płynie linią 1 do naczynia z ksenonem (bezpośrednia produkcja około 5%).

W czasie gdy poziom jodu rośnie, woda przepływa linią 2 do naczynia z ksenonem (rozpad jodu z emisją beta)

Nadchodzi moment, gdy poziom wody w naczyniu z jodem pozostaje stały. Mówimy wtedy, że I-135 osiągnął stan nasycenia lub równowagi (rozpada się równie szybko jak powstaje)

Woda napływa do naczynia z ksenonem szybciej niż następuje wypływ i poziom wody w naczyniu z ksenonem rośnie. Ale im wyżej sięga poziom wody, tym szybciej woda wypływa przez linie 3 i 4. W wyniku tego naczynie z ksenonem napelnia się coraz wolniej. Innymi słowy, im wyższy poziom ksenonu, tym wolniejsze jego podnoszenie.

Po osiągnięciu pewnego poziomu, woda będzie napływała i wypływała w tym samym tempie i poziom Xe-135 pozostanie stały.

Koncentracja równowagi Xe-135

Poziom Xe-135 będzie rósł dopóki szybkość usuwania ksenonu przez rozpad i wychwyty neutronów nie wzrośnie tak bardzo, że będzie dokładnie równa szybkości produkcji ksenonu. Od tej pory koncentracja ksenonu pozostanie stała. Ta koncentracja znana jest pod nazwą koncentracji równowagi Xe-135.

Koncentracja równowagi Xe-135 zależy od strumienia neutronów.

Jeśli np. reaktor pracuje na połowie mocy znamionowej to produkowana jest tylko połowa I-135 i usuwanie ksenonu przez rozpad będzie także następowało w tempie połowy maksymalnej możliwej szybkości.

Do osiągnięcia stanu równowagi potrzeba około dwóch dni (45 godzin). Ale tempo akumulacji w pierwszym okresie jest dość szybkie. W typowym reaktorze energetycznym Xe-135 osiąga 50% stężenia równowagi w ciągu około 10 godzin, a 90% w ciągu około 24 godzin pracy na stałej mocy

Akumulacja ksenonu po wyłączeniu reaktora

Atomy Xe^{135} wychwytyją neutrony. Dlatego reaktor który jest krytyczny bez Xe^{135} będzie podkrytyczny z ksenonem. To zmniejszenie reaktywności nosi nazwę *efektu ksenonowego*. Obecność ksenonu w stanie równowagi oznacza, że musimy mieć duży zapas reaktywności w reaktorze, by układ sterowania mógł skompensować straty reaktywności wywołane efektem ksenonowym.

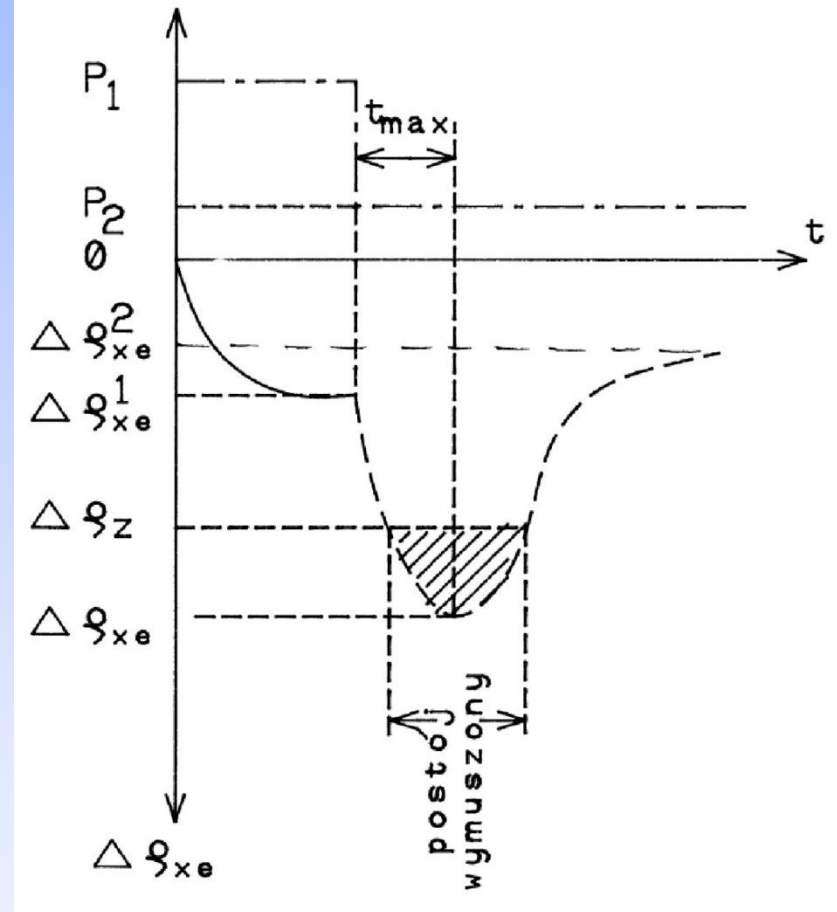
Co stanie się z ksenonem po wyłączeniu reaktora?

Gdy strumień spadnie do bardzo małych wartości, możemy przyjąć, że nie ma już bezpośredniej produkcji ksenonu z rozszczepień i nie ma usuwania ksenonu przez wychwyt neutronów. Wracając do naszej poprzedniej analogii, dla odwzorowania wyłączenia reaktora należy zamknąć dwa zawory, a ksenon $Xe-135$ będzie nadal produkowany przez rozpad $I-135$ i będzie znikał wskutek rozpadu radioaktywnego z emisją beta, przekształcając się do postaci $Cs-135$. Ostatecznie okaże się, że $Xe-135$ jest produkowany szybciej niż usuwany. Daje to wzrost koncentracji $Xe-135$ po wyłączeniu reaktora.

Jama jodowa – wyjść z niej można dopiero po rozpadzie ksenonu

Ale rozpad I-135 będzie stopniowo coraz mniejszy, bo w reaktorze nie powstaje już jod. Z czasem szybkość rozpadu ksenonu będzie równa szybkości jego powstawania z jodu, a następnie dominować będzie rozpad ksenonu.

Jeśli zapas reaktywności w rdzeniu reaktora jest niedostateczny by skompensować akumulację ksenonu po wyłączeniu reaktora, to reaktor znajdzie się w sytuacji określanej przez operatorów mianem "jamy jodowej" z której można wyjść dopiero po rozpadzie ksenonu.



Zmiany reaktywności po wyłączeniu reaktora powodowane zatruciem ksenonem

Inne zatrucia - samar-149

Z pośród stabilnych produktów rozszczepienia, najważniejszym zatruciem reaktora jest samar-149. Strata zapasu reaktywności $\Delta\rho_{Sm}$ w stanie ustalonym, w reaktorze wysokostrumieniowym, nie zależy od gęstości strumienia neutronów. Jest ona równa: $\Delta\rho_{Sm} = -1.1 \$$. Od gęstości strumienia neutronów zależy natomiast czas ustalania się koncentracji Sm-149 na stałym poziomie. Dla reaktora MARIA czas ten wynosi około 5 dni.

Po wyłączeniu reaktora zatrucie Sm-149 rośnie i osiąga w reaktorze MARIA wartość: - 2,6 \$.

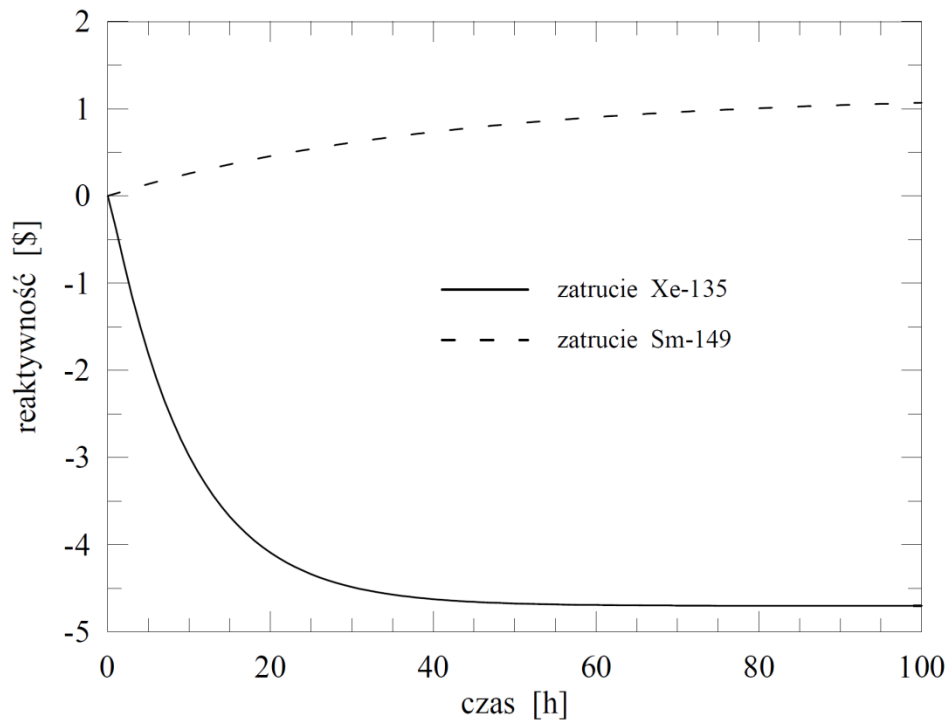
Efekt wypalania Sm-149 po uruchomieniu reaktora może w znacznym stopniu kompensować wzrost zatrucia Xe-135. Łączny efekt zatrucia reaktora MARIA może zmieniać się w ciągu pierwszych 5-ciu dni pracy reaktora o:

$$\Delta\rho_z = \Delta\rho_{Xe} + (\Delta\rho_{Sm} - \Delta\rho'_{Sm}) \cong -3.2\$$$

Jeśli przerwa między cyklami pracy reaktora była krótka, wówczas zmiana zatrucia jest zdominowana przez efekt ksenonowy i wynosi:

Efekty zatruc w reaktorze MARIA

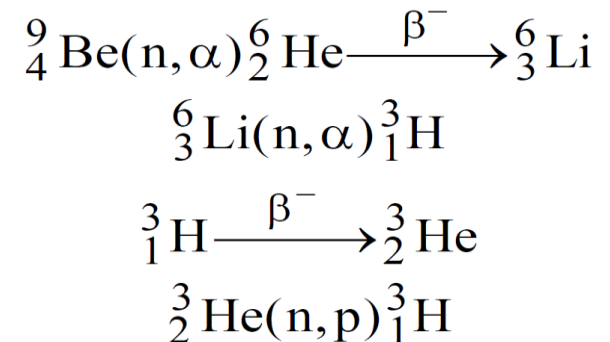
Typowy przebieg zmian strat reaktywności, wywołanych zatruciem Xe-135 i Sm-149, w ciągu pierwszych kilkudziesięciu godzin pracy reaktora MARIA



${}^6\text{Li}$ i ${}^3\text{He}$, mają duże przekroje czynne na pochłanianie neutronów termicznych -w miarę narastania ich koncentracji prowadzi do strat zapasu reaktywności. Po kilku tysiącach godzin pracy reaktora, koncentracja ${}^6\text{Li}$ w Be ustala się na stałym poziomie; strata reaktywności wywołana tym efektem wynosi: 8.3\$
Koncentracja ${}^3\text{He}$ wzrasta natomiast liniowo w czasie i związany z tym efekt reaktywnościowy może przewyższyć zatrucie ${}^6\text{Li}$.

Strata zapasu reaktywności wywołana litem-6 i helem-3

W matrycy berylowej, wskutek oddziaływania neutronów termicznych i prędkich zachodzą następujące reakcje:



Wypalenie paliwa

Reaktywność zmienia się z czasem, w miarę jak rozszczepione atomy U-235 ulegają wypaleniu, a atomy U-238 zamieniają się w rozszczepialny pluton Pu-239. Szybkość wypalania zależy od strumienia neutronów φ :

$$\frac{dN}{dt} = -N\sigma_a \varphi$$

Otrzymujemy stąd szybkość destrukcji materiału wskutek pochłaniania neutronów. Iloczyn $\sigma_a \varphi$ jest równy stałej rozpadu, gdzie $\ln 2 / \sigma_a \varphi$ jest okresem połowicznego zaniku. Załóżmy, że $\varphi = 0.52 \cdot 10^{14}$ n/cm²·s i $\sigma_a = 680$ b (U-235). Wtedy :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\varphi \sigma_a} = \frac{\ln 2}{0.52 \cdot 10^{14} \cdot 680 \cdot 10^{-24}} = 1.95 \cdot 10^7 \text{ s (7½ months)}$$

Im większe φ tym szybsze zużycie paliwa.

Produkcja plutonu

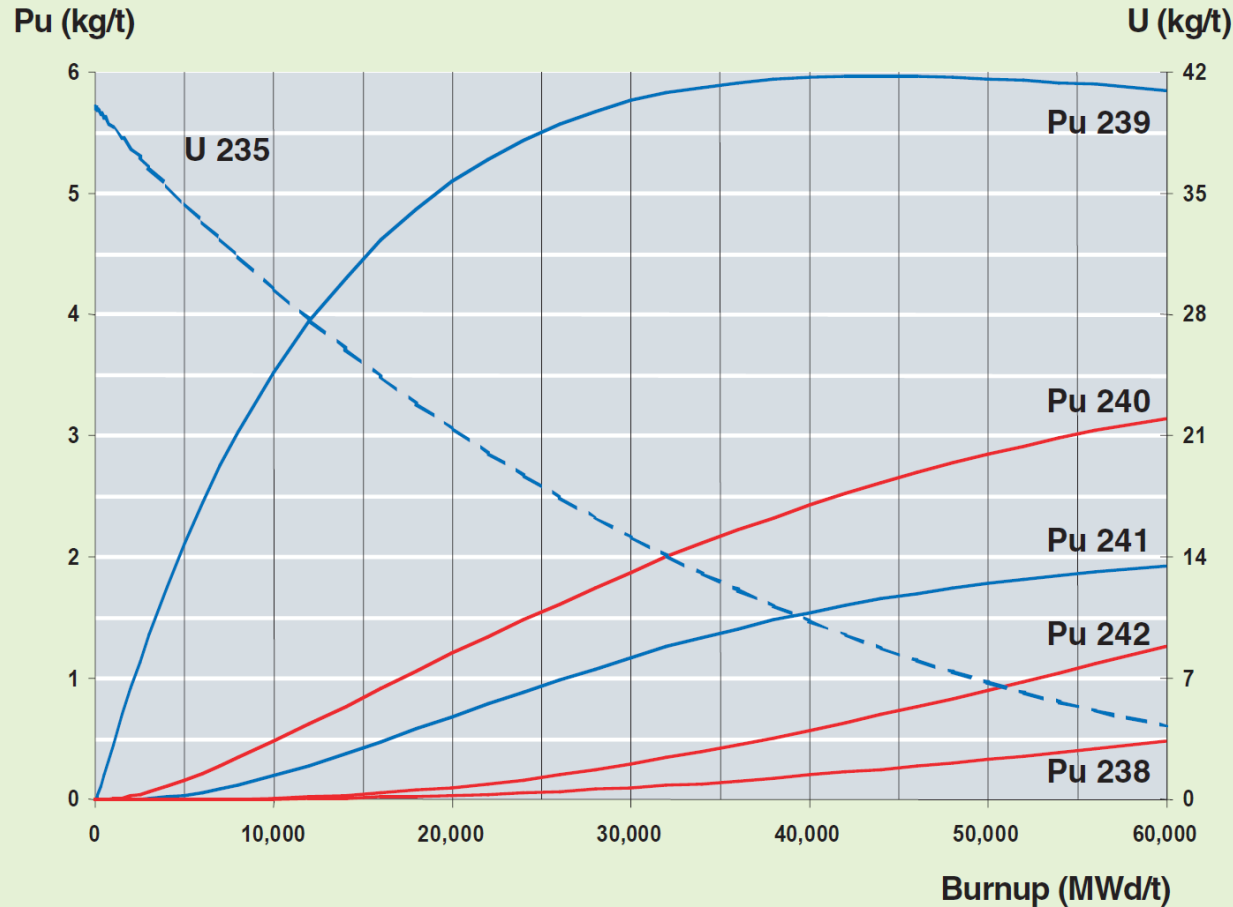
Wypalanie U-235 jest częściowo równoważone przez tworzenie Pu-239. Wobec tego, że Pu-239 powstaje poprzez wychwyt jednego neutronu w U-238, i wobec tego, że stężenie U-238 nie zmienia się znacząco podczas cyklu paliwowego, możemy założyć, że szybkość produkcji Pu-239 jest stała.

Tak więc, w miarę jak powstaje coraz więcej plutonu, paliwo pochłania coraz więcej neutronów ($\sigma_f = 742$ b; $\sigma_{(n,\gamma)} = 271$ b) i nadchodzi moment, gdy tempo produkcji staje się równe szybkości absorpcji (wychwyt i rozszczepienie).

Jądra Pu-239, które pochłaniają neutrony ($\sigma_{(n,\gamma)}$) mogą stać się jądrami Pu-240 (o własnościach podobnych do własności U-238), a gdy ten materiał pochłonie neutron zostaje przetransformowany w Pu-241, który, jak widzieliśmy jest rozszczepialny ($\sigma_f = 1007$ b i $\sigma_{(n,\gamma)} = 368$ b).

Dlatego po pewnym okresie pracy reaktora, w jego paliwie znajdować się będą trzy różne izotopy rozszczepialne: U-235, Pu-239 and Pu-241.

Akumulacja Pu w PWR



Ewolucja składu izotopowego plutonu utworzonego w paliwie o wzbogaceniu 4% U-235 w funkcji wypalenia (burnup, MWd/t)

Zmiany w składzie paliwa będą wpływały głównie na η i ϕ i będą miały niewielki wpływ na ϵ i ρ , które zależą od koncentracji U238 w paliwie.

Koncentracja ta nie zmienia się w istotny sposób w czasie całego cyklu paliwowego.

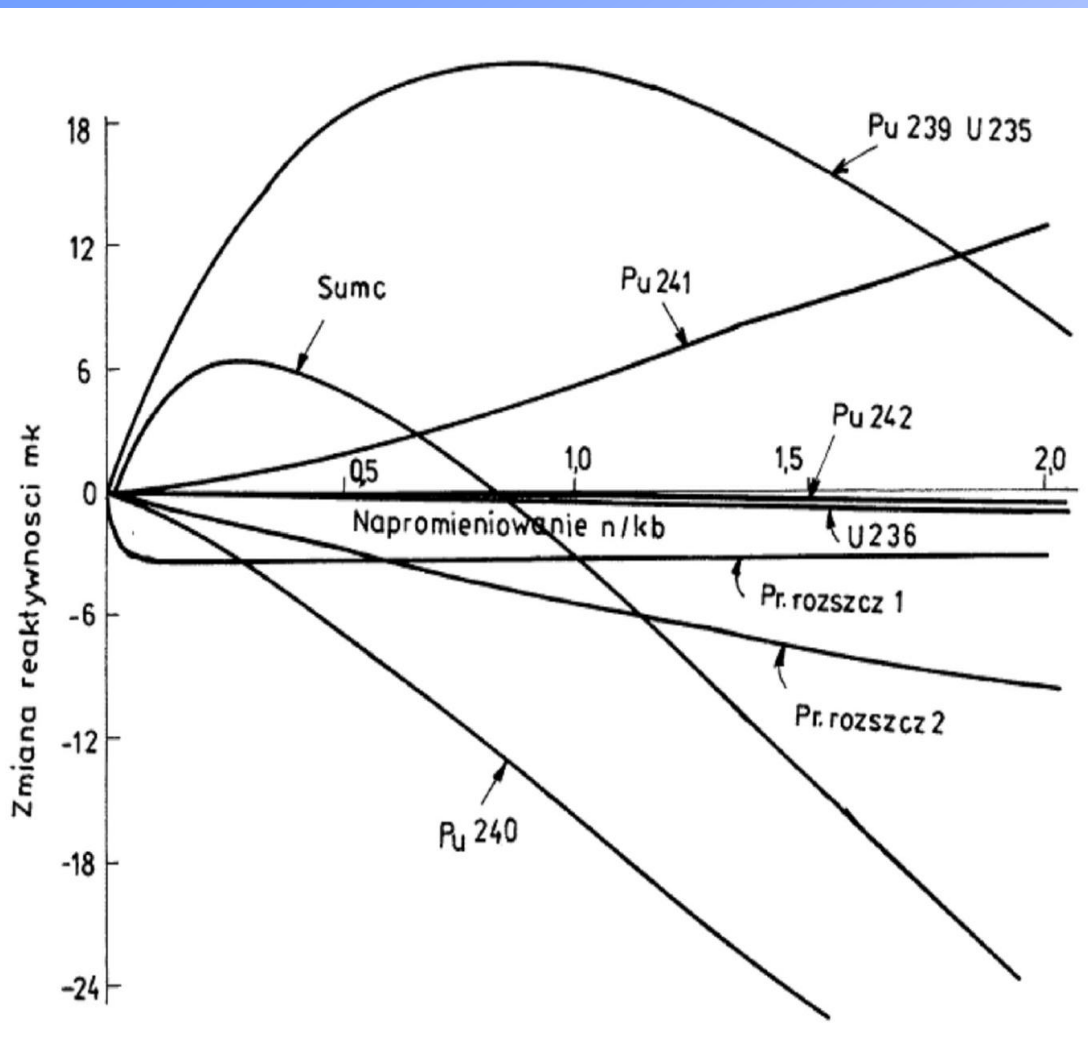
Tym niemniej akumulacja Pu-240 spowoduje spadek ρ , kompensowany przyrostem powodowanym przez Pu 239.

Zauważmy, że w reaktorze zasób Pu 239 stabilizuje się przy wypaleniu około 40,000 MWd/t;

Paliwo zawiera wówczas 1% Pu, 0,1% aktynowców i około 4% produktów rozszczepienia.

Pu-240 ulega samoistnemu rozpadowi, nie nadaje się do bomby

Zmiany reaktywności wskutek wypalania paliwa i produkcji Pu.



Początkowo wypalanie U-235 jest kompensowane powstawaniem atomów Pu-239, co powoduje wzrost reaktywności. Jest to spowodowane faktem, że σ_f plutonu Pu-239 jest większy niż uranu U-235. Przy wyższych poziomach wypalenia U-235, wypalanie trwa nadal, ale akumulacja Pu-239 staje się wolniejsza (tzn osiąga stan równowagi) i w wyniku liczba jąder rozszczepialnych maleje i reaktywność maleje.

Gdy reaktywność osiągnie $\sim 10\%$, zaczyna się wymiana paliwa

Zmiany dynamiki reaktora przy wypalaniu paliwa i produkcji Pu

Czemu zmienia się dynamika reaktora?

Neutrony opóźnione wpływają na czas życia neutronów,

$L = 0.086$ s dla U-235.

Dla rozszczepień Pu-239 , $L = 0.034$

W przypadku równowagi paliwowej, mamy w przybliżeniu tę samą ilość U-235 i Pu-239. Dlatego: **$L \sim 0.06$ s.**

Tak więc ten sam poziom reaktywności odpowiada krótszemu okresowi reaktora i wobec tego wzrost mocy w rdzeniu w stanie równowagi będzie szybszy niż w rdzeniu ze świeżym paliwem.

Wypalenie paliwa powoduje zmiany w rozkładzie strumienia neutronów w rdzeniu ϕ . Strumień w centrum reaktora większy, szybkość wypalania paliwa wyższa w centrum i wystąpi tam większe obniżenie strumienia niż na peryferiach. Wpływa to na program tasowania paliwa