

Część V - kontrola reaktora

Trucizny reaktorowe

Trucizny reaktorowe to nuklidy, które posiadają wyjątkowo duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów. Poniższa tabela przedstawia izotopy o najwyższym znanym przekroju na wychwytywanie neutronów termicznych (powyżej 10^4 b)

Izotop	σ (b)	$T_{1/2}$
^{135}Xe	2.66×10^6	9.14 h
^{88}Zr	8.61×10^5	83.4 h
^{155}Gd	6.07×10^4	stabilny
^{149}Sm	4.05×10^4	stabilny
^{157}Gd	2.54×10^4	stabilny
^{153}Gd	2.23×10^4	240.4 d
^{113}Cd	2.07×10^4	8×10^{15} y
^{105}Rh	1.58×10^4	35.36 h
^{152}Eu	1.28×10^4	13.52 y

Trucizny dodawane

Niektóre z trucizn powstają jako efekt uboczny rozszczepienia, inne są celowo dodawane do reaktora, w szczególności:

- *Wypalające się trucizny*. Reaktor podczas działania zużywa paliwo. Oznacza to, że początkowo ma go więcej niż pod koniec okresu działania, a jego reaktywność musi być najpierw dodatnia. Jego stan można kontrolować prętami kontrolnymi, ale nie zawsze jest to pożądane (np. konieczne są duże i kosztowne układy sterowania), oraz nie działa korzystnie na rozkład neutronów. Zamiast tego do paliwa można dodać trucizny, które stopniowo będą ulegać wypalaniu i utrzymywać reaktywność reaktora na tym samym poziomie. Zwykle są to związki boru lub gadolinu.

Trucizny dodawane

Niektóre z trucizn powstają jako efekt uboczny rozszczepienia, inne są celowo dodawane do reaktora, w szczególności:

- *Wypalające się trucizny.* Reaktor podczas działania zużywa paliwo. Oznacza to, że początkowo ma go więcej niż pod koniec okresu działania, a jego reaktywność musi być najpierw dodatnia. Jego stan można kontrolować prętami kontrolnymi, ale nie zawsze jest to pożądane (np. konieczne są duże i kosztowne układy sterowania), oraz nie działa korzystnie na rozkład neutronów. Zamiast tego do paliwa można dodać trucizny, które stopniowo będą ulegać wypalaniu i utrzymywać reaktywność reaktora na tym samym poziomie. Zwykle są to związki boru lub gadolinu.
- *Rozpuszczalne trucizny.* Typowym przykładem rozpuszczalnej trucizny jest kwas borowy, stosowany w reaktorach PWR jako dodatek do wody chłodzącej, którego stężenie jest zmieniane wraz z wypalaniem się paliwa.

Trucizny dodawane

Niektóre z trucizn powstają jako efekt uboczny rozszczepienia, inne są celowo dodawane do reaktora, w szczególności:

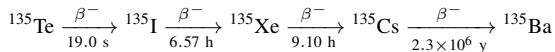
- *Wypalające się trucizny.* Reaktor podczas działania zużywa paliwo. Oznacza to, że początkowo ma go więcej niż pod koniec okresu działania, a jego reaktywność musi być najpierw dodatnia. Jego stan można kontrolować prętami kontrolnymi, ale nie zawsze jest to pożądane (np. konieczne są duże i kosztowne układy sterowania), oraz nie działa korzystnie na rozkład neutronów. Zamiast tego do paliwa można dodać trucizny, które stopniowo będą ulegać wypalaniu i utrzymywać reaktywność reaktora na tym samym poziomie. Zwykle są to związki boru lub gadolinu.
- *Rozpuszczalne trucizny.* Typowym przykładem rozpuszczalnej trucizny jest kwas borowy, stosowany w reaktorach PWR jako dodatek do wody chłodzącej, którego stężenie jest zmieniane wraz z wypalaniem się paliwa.
- *Niewypalające się trucizny.* Izotopy hafnu mają taką właściwość, że wychwyt neutronu prowadzi do powstania izotopu o równie dużym przekroju na wychwyt kolejnych neutronów. W związku z tym nie ulegają one wypalaniu. Tego typu materiałów używa się do formowania profilu neutronów np. ograniczania jego maksimum w pewnych obszarach reaktora.

Ksenon-135

Prawdopodobieństwo bezpośredniego powstania ^{135}Xe w rozszczepieniu ^{235}U wywołanego neutronami termicznymi to 0.257%, ale pojawia się on także w wyniku przemiany β^- ^{135}I (2.93%), który jest zasilany także przez rozpad β^- ^{135}Te (3.22%). Sumaryczne prawdopodobieństwo otrzymania tego jądra w rozszczepieniu to 7.78%, co oznacza, że jest jednym z najczęściej powstających jąder.

Ba 135 6.592 7.7e-6	Ba 136 7.854 4.7e-6	Ba 137 11.232 1.9e-6	Ba 138 71.698 6e-3	Ba 139 83.13 m 0.07	Ba 140 12.7527 d 0.49
Cs 134 2.0652 y 7.7e-3	Cs 135 1.33 My 4.9e-6	Cs 136 13.16 d 5.5e-3	Cs 137 30.08 y 0.06	Cs 138 33.41 m 0.44	Cs 139 9.27 m 1.31
Xe 133 5.2475 d 2.5e-3	Xe 134 10.4357 0.13	Xe 135 9.14 h 0.06	Xe 136 8.8573 2.30	Xe 137 3.818 m 3.20	Xe 138 14.14 m 4.82
I 132 2.295 h 0.02	I 133 20.83 h 0.15	I 134 52.5 m 0.87	I 135 6.58 h 2.93	I 136 83.4 s 2.58	I 137 24.13 s 2.62
Te 131 25.0 m 0.33	Te 132 3.204 d 1.53	Te 133 12.5 m 4.14	Te 134 41.8 m 6.23	Te 135 19.0 s 3.22	Te 136 17.63 s 1.32
Sb 130 39.5 m 0.57	Sb 131 23.03 m 1.66	Sb 132 2.79 m 2.17	Sb 133 2.34 m 2.26	Sb 134 780 ms 0.72	Sb 135 1.679 s 0.14

Ksenon-135



Zmianę skupienia izotopów w łańcuchu możemy zapisać w formie układu równań.
 ^{135}Te , ^{135}I i ^{135}Xe .

$$\frac{dN_{\text{Te}}}{dt} = \gamma_{\text{Te}} N_f \sigma_f \Phi - \lambda_{\text{Te}} N_{\text{Te}} - \sigma_{\text{Te}} N_{\text{Te}} \Phi$$

$$\frac{dN_{\text{I}}}{dt} = \gamma_{\text{I}} N_f \sigma_f \Phi - \lambda_{\text{I}} N_{\text{I}} - \sigma_{\text{I}} N_{\text{I}} \Phi + \lambda_{\text{Te}} N_{\text{Te}}$$

$$\frac{dN_{\text{Xe}}}{dt} = \gamma_{\text{Xe}} N_f \sigma_f \Phi - \lambda_{\text{Xe}} N_{\text{Xe}} - \sigma_{\text{Xe}} N_{\text{Xe}} \Phi + \lambda_{\text{I}} N_{\text{I}}$$

gdzie

- N_i - skupienie i-tego izotopu w $1/\text{cm}^3$
- γ_i - prawdopodobieństwo powstania i-tego izotopu w rozszczepieniu
- N_f - skupienie paliwa w $1/\text{cm}^3$
- σ_f - przekrój czynny na rozszczepienie dla paliwa
- Φ - strumień neutronów w $1/\text{cm}^2/\text{s}$
- λ_i - stała rozpadu i-tego izotopu
- σ_i - przekrój czynny na wychwytywanie neutronu dla i-tego izotopu

Rozwiązanie równań

- Dla uproszczenia zajmiemy się tylko ^{135}I i ^{135}Xe - prawdopodobieństwo powstania ^{135}Te wliczymy do ^{135}I , bo ten rozpad jest dużo szybszy niż pozostałe.

$$\frac{dN_I}{dt} = P_I - \alpha_I N_I$$
$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = P_{Xe} - \alpha_{Xe} N_{Xe} + \lambda_I N_I$$

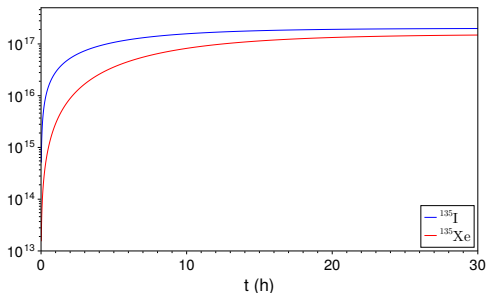
gdzie $P_i = \gamma_i N_f \sigma_f \Phi$, $\alpha_i = \lambda_i + \sigma_i \Phi$.

- Rozwiązanie dla warunków początkowych ($t = 0$): N_0^{Xe} , N_0^I

$$N_I(t) = \frac{P_I}{\lambda_I} (1 - \exp(-\alpha_I t)) + N_0^I \exp(-\alpha_I t)$$
$$N_{Xe}(t) = \left(\frac{P_{Xe}}{\alpha_{Xe}} + \lambda_I \frac{P_I}{\alpha_I \alpha_{Xe}} \right) (1 - \exp(-\alpha_{Xe} t))$$
$$+ \left(\frac{\lambda_I N_0^I}{\alpha_{Xe} - \alpha_I} - \frac{\lambda_I P_I}{\alpha_I (\alpha_{Xe} - \alpha_I)} \right) (\exp(-\alpha_I t) - \exp(-\alpha_{Xe} t))$$
$$+ N_0^{Xe} \exp(-\alpha_{Xe} t)$$

Uruchamianie reaktora

- Po uruchomieniu świeżego reaktora, po około 20-30 godzinach jod i ksenon osiągną pewien poziom nasycenia.



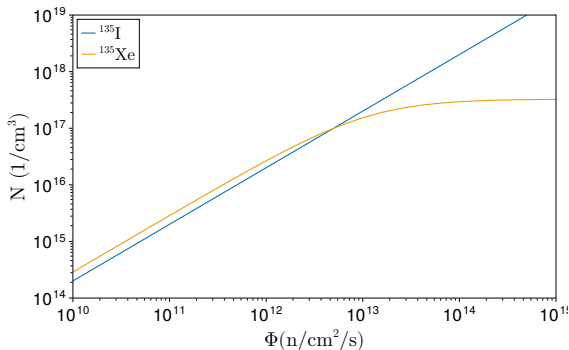
- Wartość nasycenia można policzyć bezpośrednio z równań opisujących zmiany. Zauważmy, że dla $t \rightarrow \infty$, $\frac{dN}{dt} \rightarrow 0$.

$$N_I^\infty = \frac{\gamma_I \sigma_f N_f \Phi}{\lambda_I + \sigma_I \Phi}$$

$$N_{Xe}^\infty = \frac{\gamma_I \sigma_f N_f \Phi + \lambda_I \frac{\gamma_I \sigma_f N_f \Phi}{\lambda_I + \sigma_I \Phi}}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi}$$

Poziom nasycenia

- Sprawdźmy jak wyglądają występujące w równaniach stałe
 - $\gamma_I = 0.0293 + 0.0322$, $\gamma_{Xe} = 0.00178$,
 - $\lambda_I = 4.24 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$, $\lambda_{Xe} = 3.03 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$,
 - $\sigma_I = 80.5 \text{ b}$, $\sigma_{Xe} = 2.67 \times 10^6 \text{ b}$,
 - $\sigma_f = 590.6 \text{ b}$, $N_f = 10.5/270N_A$.
- Biorąc pod uwagę, że strumienie Φ w reaktorach są rzędu $10^{11} - 10^{14} \text{ 1/cm}^2/\text{s}$ możemy sprawdzić, że nasycenie jodu jest proporcjonalne do strumienia (wyraz $\sigma_I \Phi$ jest bardzo mały), a nasycenie ksenonu dla największych strumieni jest stałe (bo dominuje wyraz $\sigma_{Xe} \Phi$).

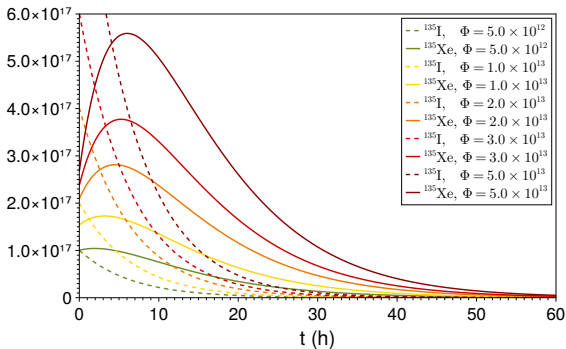


Maksimum ksenonu

- Po wyłączeniu reaktora jod ulega tylko rozpadowi, ale ksenon powstaje także z jodu

$$\frac{dN_I}{dt} = -\lambda_I N_I$$
$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = -\lambda_{Xe} N_{Xe} + \lambda_I N_I.$$

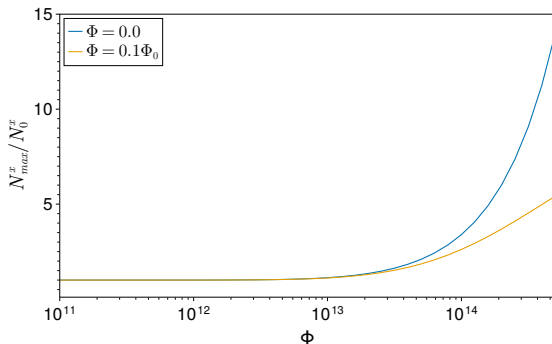
- W efekcie, po paru godzinach koncentracja ksenonu osiąga maksimum.



- Wysokość i położenie maksimum zależy od uprzedniego strumienia.

Maksimum ksenonu

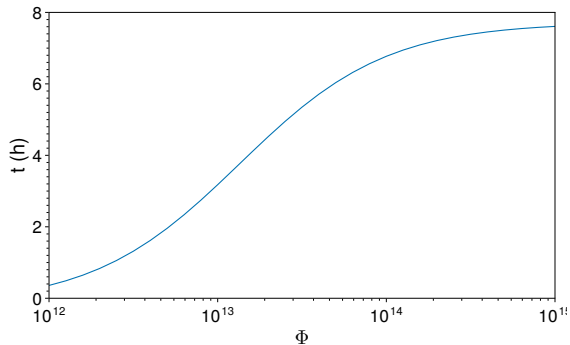
- Stosunek wysokości maksimum do koncentracji przed wyłączeniem rośnie wraz ze strumieniem.



- Dla reaktorów pracujących przy strumieniach powyżej 10^{14} ksenonu jest 5-10 razy więcej, a ponieważ jest to silna trucizna, dostajemy bardzo dużą ujemną reaktywność (nawet 0.02-0.03). Zapas reaktywności do ponownego uruchomienia może być zbyt mały i wtedy trzeba czekać, aż ksenon rozpadnie się do mniejszego poziomu.

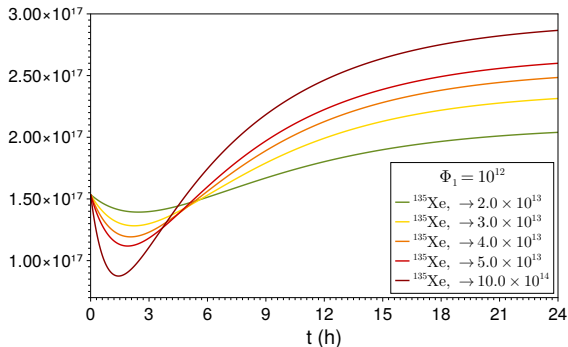
Maksimum ksenonu

- Czas po jakim reaktor osiąga maksymalną koncentrację ksenonu również zależy od wcześniejszego strumienia, dla dużych strumieni dąży do wartości około 7.7 h.



Zwiększanie strumienia

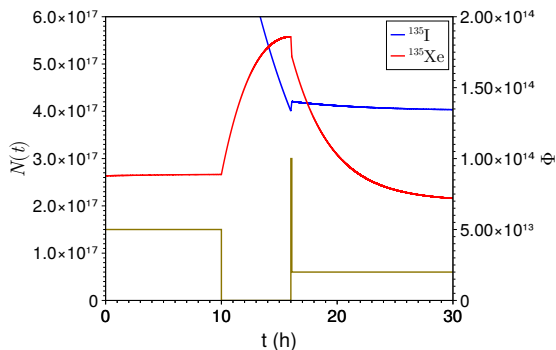
- Po zwiększeniu strumienia ksenon reaguje odwrotnie - po pewnym czasie osiąga minimum, aby powrócić do poziomu nasycenia.



- Im większy skok strumienia, tym większa różnica. Ten efekt - dodatniej reaktywności pojawiającej się z powodu wypalania ksenonu - oczywiście trzeba brać pod uwagę i odpowiednio regulować reaktor.

Awaryjne przerwanie pracy

- Wyobraźmy sobie scenariusz, w którym stabilnie pracujący reaktor zostaje gwałtownie wyłączony. Wbrew pozorom taka sytuacja (SCRAM), ze względów bezpieczeństwa lub z powodu awarii podsystemów zdarza się około raz na rok. (<https://www.nukeworker.com/outages/scrams/>)
- Poziom ksenonu zaczyna rosnąć i operatorzy mają trzy wyjścia
 - Uruchomić reaktor zanim ksenonu będzie za dużo
 - Poczekać aż poziom opadnie
 - Wysunąć odpowiednią ilość prętów kontrolnych (ale w granicach bezpieczeństwa), doprowadzić reaktor do krytyczności i wsunąć pręty z powrotem



Katastrofa Czarnobylska

- Podobny scenariusz został zrealizowany w Czarnobylu - podczas pracy z bardzo małą mocą operatorzy próbowali zrestartować reaktor wysuwając pręty (zasadniczo wszystkie, niezgodnie z procedurami).

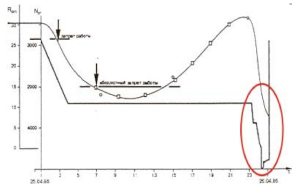
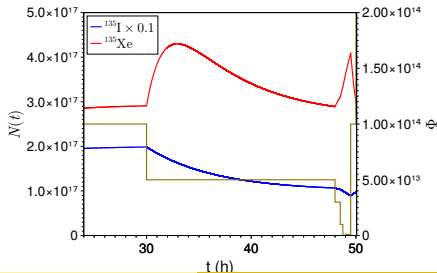


Fig. 1. The power (N_p) and the operational reactivity margin (R_{op}) of the Unit-4 reactor in diapason of the time from 25.04.1986 to the official moment of the accident 26.04.1986 [12]. The pre-accident and accident diapason of the time was marked by oval.

- W tej sytuacji krytyczność reaktora była utrzymywana przez tylko przez ksenon, co w połączeniu z dodatkim sprzężeniem zwrotnym reaktora RBMK, innymi błędami konstrukcyjnymi i operatorów spowodowało katastrofę.



Oscylacje ksenonowe

W dużych reaktorach, gdzie strumień neutronów może mieć pewne nieoddziałujące ze sobą regiony, może pojawić się zjawisko oscylacji ksenonowych w związku z nierównomiernym rozkładem tego izotopu. Mechanizm kształtuje się następująco

- Początkowa asymetria rozkładu strumienia neutronów (np. ze względu na ustawienie prętów, paliwa), powoduje asymetrię w prędkości rozszczepień w rdzeniu.

Oscylacje ksenonowe

W dużych reaktorach, gdzie strumień neutronów może mieć pewne nieoddziałujące ze sobą regiony, może pojawić się zjawisko oscylacji ksenonowych w związku z nierównomiernym rozkładem tego izotopu. Mechanizm kształtuje się następująco

- Początkowa asymetria rozkładu strumienia neutronów (np. ze względu na ustawienie prętów, paliwa), powoduje asymetrię w prędkości rozszczepień w rdzeniu.
- W regionach o dużym strumieniu wypalanie ^{135}Xe powoduje dalsze zwiększenie strumienia termicznego, w regionach o niskim strumieniu ksenon dodatkowo go obniża. W regionach o wysokim strumieniu akumuluje się ^{135}I , a w regionach o niskim jest go mało.

Oscylacje ksenonowe

W dużych reaktorach, gdzie strumień neutronów może mieć pewne nieoddziałujące ze sobą regiony, może pojawić się zjawisko oscylacji ksenonowych w związku z nierównomiernym rozkładem tego izotopu. Mechanizm kształtuje się następująco

- Początkowa asymetria rozkładu strumienia neutronów (np. ze względu na ustawienie prętów, paliwa), powoduje asymetrię w prędkości rozszczepień w rdzeniu.
- W regionach o dużym strumieniu wypalanie ^{135}Xe powoduje dalsze zwiększenie strumienia termicznego, w regionach o niskim strumieniu ksenon dodatkowo go obniża. W regionach o wysokim strumieniu akumuluje się ^{135}I , a w regionach o niskim jest go mało.
- Rozpad ^{135}I (9.1 h) powoduje powstawanie nadmiaru ^{135}Xe i hamowanie strumienia w regionach o poprzednio jego nadmiarze. Odwrotne zjawisko ma miejsce w regionach o niskim strumieniu, gdzie zaczyna rosnać.

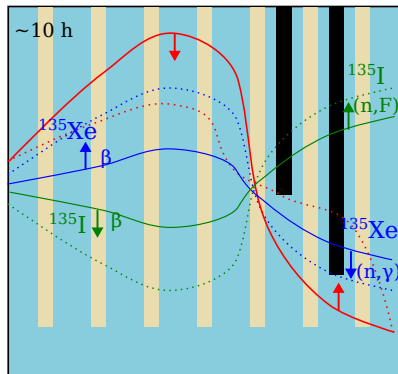
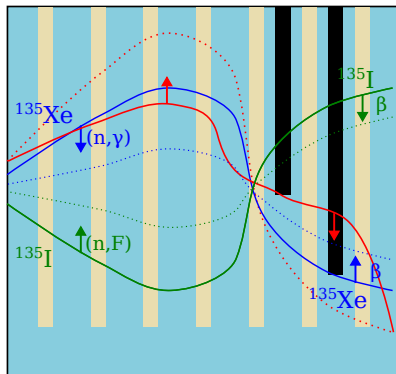
Oscylacje ksenonowe

W dużych reaktorach, gdzie strumień neutronów może mieć pewne nieoddziałujące ze sobą regiony, może pojawić się zjawisko oscylacji ksenonowych w związku z nierównomiernym rozkładem tego izotopu. Mechanizm kształtuje się następująco

- Początkowa asymetria rozkładu strumienia neutronów (np. ze względu na ustawienie prętów, paliwa), powoduje asymetrię w prędkości rozszczepień w rdzeniu.
- W regionach o dużym strumieniu wypalanie ^{135}Xe powoduje dalsze zwiększenie strumienia termicznego, w regionach o niskim strumieniu ksenon dodatkowo go obniża. W regionach o wysokim strumieniu akumuluje się ^{135}I , a w regionach o niskim jest go mało.
- Rozpad ^{135}I (9.1 h) powoduje powstawanie nadmiaru ^{135}Xe i hamowanie strumienia w regionach o poprzednio jego nadmiarze. Odwrotne zjawisko ma miejsce w regionach o niskim strumieniu, gdzie zaczyna rosnać.
- Ten schemat powtarza się z okresem około 15 godzin.

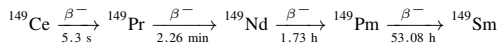
Bez zmian w całkowitej mocy, lokalny poziom mocy może się w ten sposób wahać o trzykrotną wartość. W reaktorach o ujemnym współczynniku temperaturowym oscylacje ksenonowe są szybko wygaszane.

Oscylacje ksenonowe



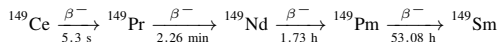
Samar-149

- Drugą najważniejszą trucizną reaktorową jest ^{149}Sm ($\sigma_{\gamma} = 4.1 \times 10^4$ b). Podobnie jak ^{135}Xe powstaje głównie z rozpadu innych jąder



Samar-149

- Drugą najważniejszą trucizną reaktorową jest ^{149}Sm ($\sigma_{\gamma} = 4.1 \times 10^4$ b). Podobnie jak ^{135}Xe powstaje głównie z rozpadu innych jąder



- Sumaryczne prawdopodobieństwo otrzymania tego jądra w rozszczepieniu to 1.08%.

Sm 149 13.82 $1.7\text{e-}10$	Sm 150 7.38 $1.2\text{e-}8$	Sm 151 90 y $4.7\text{e-}7$	Sm 152 26.75 $9.7\text{e-}6$	Sm 153 46.284 h $8.6\text{e-}5$	Sm 154 22.75 $4.7\text{e-}4$
Pm 148 5.368 d $1.2\text{e-}8$	Pm 149 53.08 h $3.9\text{e-}6$	Pm 150 2.698 h $3.0\text{e-}5$	Pm 151 28.40 h $6.4\text{e-}4$	Pm 152 4.12 m $2.8\text{e-}3$	Pm 153 5.25 m $8.8\text{e-}3$
Nd 147 10.98 d $6.7\text{e-}5$	Nd 148 5.756 $1.7\text{e-}4$	Nd 149 1.728 h $6.8\text{e-}3$	Nd 150 5.638 $1.1\text{e-}3$	Nd 151 12.44 m 0.08	Nd 152 11.4 m $3.1\text{e-}3$
Pr 146 24.15 m $3.6\text{e-}3$	Pr 147 13.4 m $8.3\text{e-}3$	Pr 148 2.29 m 0.08	Pr 149 2.26 m $1.3\text{e-}3$	Pr 150 6.19 s $3.2\text{e-}3$	Pr 151 18.90 s $4.2\text{e-}3$
Ce 145 3.01 m 0.08	Ce 146 13.52 m $8.5\text{e-}3$	Ce 147 56.4 s 1.00	Ce 148 56.8 s 1.24	Ce 149 4.94 s $8.7\text{e-}3$	Ce 150 6.05 s $8.3\text{e-}3$

- Ponieważ czas życia ^{149}Ce i ^{149}Pr są krótkie, dla uproszczenia możemy przyjąć, że zaczynamy łańcuch rozpadów od ^{149}Nd , z sumarycznym prawdopodobieństwem $\gamma'_{Nd} = 1.08\%$.

$$\frac{dN_{Nd}}{dt} = \gamma_{Nd}N_f\sigma_f\Phi - \lambda_{Nd}N_{Nd} - \sigma_{Nd}N_{Nd}\Phi$$

$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = \gamma_{Pm}N_f\sigma_f\Phi - \lambda_{Pm}N_{Pm} - \sigma_{Pm}N_{Pm}\Phi + \lambda_{Nd}N_{Nd}$$

$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \gamma_{Sm}N_f\sigma_f\Phi - \sigma_{Sm}N_{Sm}\Phi + \lambda_{Pm}N_{Pm}$$

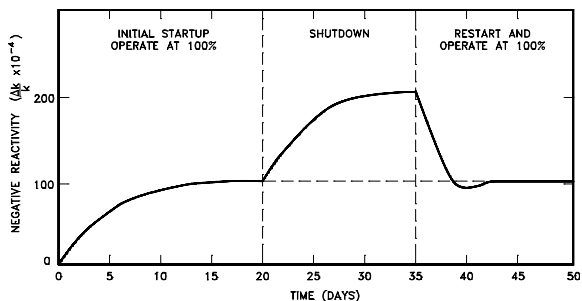
- Ponieważ czas życia ^{149}Ce i ^{149}Pr są krótkie, dla uproszczenia możemy przyjąć, że zaczynamy łańcuch rozpadów od ^{149}Nd , z sumarycznym prawdopodobieństwem $\gamma'_{Nd} = 1.08\%$.

$$\frac{dN_{Nd}}{dt} = \gamma_{Nd}N_f\sigma_f\Phi - \lambda_{Nd}N_{Nd} - \sigma_{Nd}N_{Nd}\Phi$$

$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = \gamma_{Pm}N_f\sigma_f\Phi - \lambda_{Pm}N_{Pm} - \sigma_{Pm}N_{Pm}\Phi + \lambda_{Nd}N_{Nd}$$

$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \gamma_{Sm}N_f\sigma_f\Phi - \sigma_{Sm}N_{Sm}\Phi + \lambda_{Pm}N_{Pm}$$

- ^{149}Sm jest stabilny, więc jedyną drogą jego usunięcia jest wychwyty neutronu.



Po wyłączeniu reaktora stężenie ^{149}Sm będzie powoli wzrastać (z rozpadu ^{149}Pm , $T_{1/2} = 53 \text{ h}$) i osiągnie pewne nasycenie. Po włączeniu reaktora poziom nasycenia będzie mniejszy, ze względu na wypalanie. Pomimo, iż zatrucie samarem ma dużo mniejsze znaczenie niż ksenonem, jego zachowanie po wyłączeniu i ponownym uruchamianiu musi być brane pod uwagę przy projektowaniu reaktorów.

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwyty neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).
- Typowo są wykonane z pierwiastków takich jak srebro, ind, kadm, bor oraz hafn, w zależności od typu reaktora i projektu.

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).
- Typowo są wykonane z pierwiastków takich jak srebro, ind, kadm, bor oraz hafn, w zależności od typu reaktora i projektu.
- "Czarny" pręt kontrolny jest nieprzezroczysty dla neutronów - absorbuje praktycznie wszystkie

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).
- Typowo są wykonane z pierwiastków takich jak srebro, ind, kadm, bor oraz hafn, w zależności od typu reaktora i projektu.
- "Czarny" pręt kontrolny jest nieprzezroczysty dla neutronów - absorbuje praktycznie wszystkie
- "Szary" pręt kontrolny absorbuje neutrony częściowo

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).
- Typowo są wykonane z pierwiastków takich jak srebro, ind, kadm, bor oraz hafn, w zależności od typu reaktora i projektu.
- "Czarny" pręt kontrolny jest nieprzezroczysty dla neutronów - absorbuje praktycznie wszystkie
- "Szary" pręt kontrolny absorbuje neutrony częściowo
- Szare pręty są często bardziej pożądane, ponieważ profil strumienia neutronów zmienia się w ich otoczeniu bardziej łagodnie, ale potrzeba ich więcej niż czarnych, aby osiągnąć ten sam efekt.

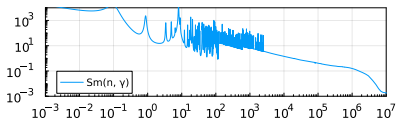
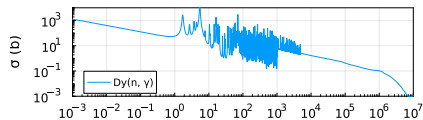
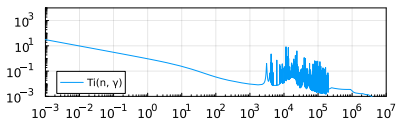
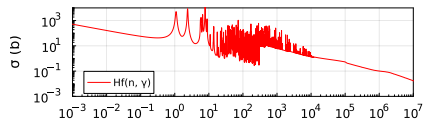
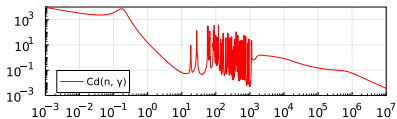
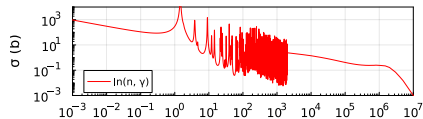
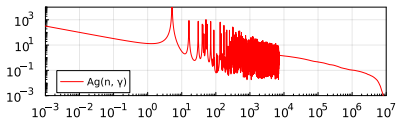
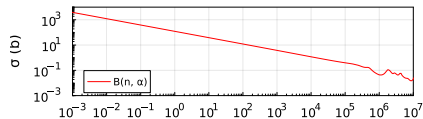
Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).
- Typowo są wykonane z pierwiastków takich jak srebro, ind, kadm, bor oraz hafn, w zależności od typu reaktora i projektu.
- "Czarny" pręt kontrolny jest nieprzezroczysty dla neutronów - absorbuje praktycznie wszystkie
- "Szary" pręt kontrolny absorbuje neutrony częściowo
- Szare pręty są często bardziej pożądane, ponieważ profil strumienia neutronów zmienia się w ich otoczeniu bardziej łagodnie, ale potrzeba ich więcej niż czarnych, aby osiągnąć ten sam efekt.
- Szare pręty można osiągnąć poprzez zmniejszenie ilości materiału absorbującego w pręcie lub poprzez użycie pierwiastków o mniejszym przekroju czynnym. Ta druga metoda ma dodatkową zaletę w postaci większej żywotności pręta.

Pręty kontrolne

- Pręty wykonane z materiału absorbującego neutrony są używane w większości reaktorów do precyzyjnej, regulowanej kontroli reaktywności.
- Materiał na pręt powinien mieć duży przekrój czynny na wychwytywanie neutronów oraz długi czas życia (nie wypalać się zbyt szybko).
- Typowo są wykonane z pierwiastków takich jak srebro, ind, kadm, bor oraz hafn, w zależności od typu reaktora i projektu.
- "Czarny" pręt kontrolny jest nieprzezroczysty dla neutronów - absorbuje praktycznie wszystkie
- "Szary" pręt kontrolny absorbuje neutrony częściowo
- Szare pręty są często bardziej pożądane, ponieważ profil strumienia neutronów zmienia się w ich otoczeniu bardziej łagodnie, ale potrzeba ich więcej niż czarnych, aby osiągnąć ten sam efekt.
- Szare pręty można osiągnąć poprzez zmniejszenie ilości materiału absorbującego w pręcie lub poprzez użycie pierwiastków o mniejszym przekroju czynnym. Ta druga metoda ma dodatkową zaletę w postaci większej żywotności pręta.
- Do produkcji prętów dobrze jest także wykorzystać materiały o dużym przekroju na wychwytywanie neutronów rezonansowych, które mają większą drogę swobodną w reaktorze niż termiczne. Dzięki temu zasięg oddziaływania przestrzennego pręta jest większy niż dla absorbenta czysto termicznego.

Materiały prętów kontrolnych



Typy prętów kontrolnych

- Pręty regulacji zgrubnej (*shim rods*) używane do dodawania lub usuwania reaktywności w relatywnie dużych porcjach

Typy prętów kontrolnych

- Pręty regulacji zgrubnej (*shim rods*) używane do dodawania lub usuwania reaktywności w relatywnie dużych porcjach
- Pręty regulacji precyzyjnej (*regulating rods*) do dokładnej regulacji i utrzymywania docelowej mocy i temperatury

Typy prętów kontrolnych

- Pręty regulacji zgrubnej (*shim rods*) używane do dodawania lub usuwania reaktywności w relatywnie dużych porcjach
- Pręty regulacji precyzyjnej (*regulating rods*) do dokładnej regulacji i utrzymywania docelowej mocy i temperatury
- Pręty bezpieczeństwa (*safety rods*) do szybkiego wyłączenia awaryjnego. Procedura gwałtownego dodania prętów o dużej ujemnej reaktywności to SCRAM (lub trip).

Typy prętów kontrolnych

- Pręty regulacji zgrubnej (*shim rods*) używane do dodawania lub usuwania reaktywności w relatywnie dużych porcjach
- Pręty regulacji precyzyjnej (*regulating rods*) do dokładnej regulacji i utrzymywania docelowej mocy i temperatury
- Pręty bezpieczeństwa (*safety rods*) do szybkiego wyłączenia awaryjnego. Procedura gwałtownego dodania prętów o dużej ujemnej reaktywności to SCRAM (lub trip).
- W zależności od reaktora pręty mogą mieć podwójną lub potrójną rolę.

Wartość prętów kontrolnych

- Wydajność pręta kontrolnego głównie zależy od strumienia neutronów w miejscu jego położenia i wynika z projektu reaktora. Zmiana reaktywności spowodowana jego położeniem jest nazywana wartością pręta (*rod worth*).

Wartość pręta kontrolnych

- Wydajność pręta kontrolnego głównie zależy od strumienia neutronów w miejscu jego położenia i wynika z projektu reaktora. Zmiana reaktywności spowodowana jego położeniem jest nazywana wartością pręta (*rod worth*).
- Wartość pręta można zmierzyć eksperymentalnie i uzyskać całkowitą i różniczkową wartość

