

Neutronika

semestr letni 2024/25

Krzysztof Miernik

Część V - Kontrola reaktora

Trucizny reaktorowe

Trucizny reaktorowe to nuklidy, które posiadają wyjątkowo duży przekrój czynny na wychwyt neutronów. Poniższa tabela przedstawia izotopy o najwyższym znanym przekroju na wychwyt 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:

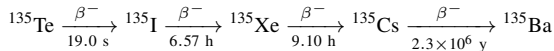
- *Wypalające się trucizny.* Reaktor podczas działania zużywa paliwo. Oznacza to, że początkowo ma go więcej niż pod koniec okresu działania, a jego reaktywność musi być najpierw dodatnia. Jego stan można kontrolować prętami kontrolnymi, ale nie zawsze jest to pożądane (np. konieczne są duże i kosztowne 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 4e-3	Ba 139 83.13 m 0.07	Ba 140 12.7527 d 0.40
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 0.47	Cs 139 9.27 m 1.31
Xe 133 5.2475 d 2.5e-3	Xe 134 10.4357 0.1e-3	Xe 135 9.14 h 0.005	Xe 136 8.8573 2.20	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 0.11	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 0.11	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 0.17	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. Dla uproszczenia zajmiemy się tylko ^{135}Te , ^{135}I i ^{135}Xe .

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

$$\frac{dN_I}{dt} = \gamma_I N_f \sigma_f \Phi - \lambda_I N_I - \sigma_I N_I \Phi + \lambda_{Te} N_{Te}$$

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

gdzie

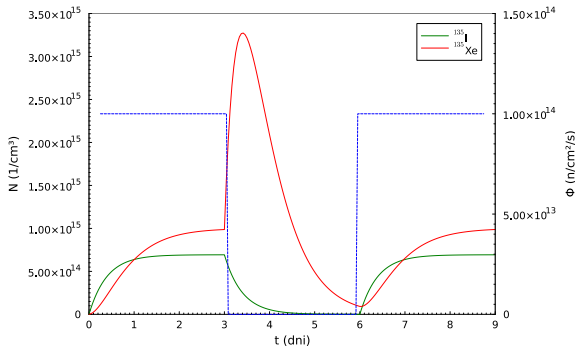
- N_i - skupienie i-tego izotopu w $1/\text{cm}^3$
- γ_i - prawdopodobieństwo powstania i-tego izotopu w rozszczepieniu
- N_f - skupienie paliwa w $1/\text{cm}^3$
- σ_f - przekrój czynny na rozszczepienie dla paliwa
- Φ - strumień neutronów w $1/\text{cm}^2/\text{s}$
- λ_i - stała rozpadu i-tego izotopu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

Zadanie

Znaleźć poziom równowagi dla ^{135}Xe dla reaktora działającego przez dłuższy czas ze stałym strumieniem neutronów.

Ksenon-135

Po wyłączeniu reaktora jedynym mechanizmem jest rozpad, jod nie jest usuwany przez neutrony i cały rozpada się do ksenonu.



Po około 10 godzinach jego koncentracja osiąga maksimum. Do czasu rozpadu ksenonu do odpowiednio niskiego poziomu może się okazać, że reaktor nie może ponownie być uruchomiony (ksenonowy czas martwy), ponieważ nie ma odpowiednio dużego zapasu reaktywności, aby zniwelować ujemną reaktywność od ksenonu.

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 rosnąć.

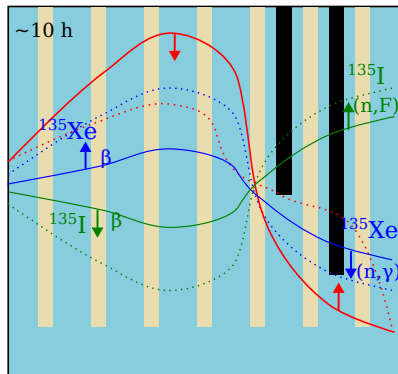
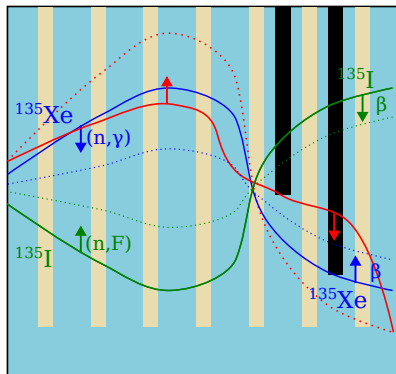
Oscylacje ksenonowe

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 rosnąć.
- 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

Sm 149 13.42 90 g	Sm 150 7.34 4.26 g	Sm 151 90 g	Sm 152 26.75 46.264 h	Sm 153 9.36 g	Sm 154 22.75
Pm 148 5.269 h 2.62 g	Pm 149 53.68 h 3.59 g	Pm 150 2.948 h 2.05 g	Pm 151 28.49 h 4.46 g	Pm 152 4.52 m 2.95 g	Pm 153 4.29 m 3.05 g
Nd 147 10.98 d 5.76 g	Nd 148 5.766 6.56 g	Nd 149 1.728 h 6.56 g	Nd 150 6.438 10.08	Nd 151 12.44 m 10.08	Nd 152 11.4 m
Pr 146 34.15 m 2.56 g	Pr 147 13.4 m	Pr 148 2.29 m 0.08	Pr 149 2.26 m	Pr 150 6.59 s	Pr 151 18.96 s
Ce 145 2.07 m	Ce 146 13.52 h	Ce 147 16.4 h	Ce 148 16.8 h	Ce 149 4.96 s	Ce 150 1.69 s

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

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

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

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

Samar-149

Sm 149 13.42 13.42	Sm 150 7.34 7.34	Sm 151 90 g 6.22	Sm 152 26.75 26.75	Sm 153 66.264 h 6.264	Sm 154 22.75 22.75
Pm 148 9.269 h 9.269	Pm 149 53.08 h 53.08	Pm 150 2.048 h 2.048	Pm 151 28.40 h 28.40	Pm 152 4.52 m 4.52	Pm 153 1.236 m 1.236
Nd 147 10.98 d 10.98	Nd 148 5.756 5.756	Nd 149 1.728 h 1.728	Nd 150 5.638 5.638	Nd 151 12.48 m 12.48	Nd 152 11.4 m 11.4
Pr 146 34.15 m 34.15	Pr 147 13.4 m 13.4	Pr 148 2.29 m 2.29	Pr 149 2.26 m 2.26	Pr 150 6.59 s 6.59	Pr 151 18.96 s 18.96
Ce 145 3.05 m 3.05	Ce 146 13.52 h 13.52	Ce 147 16.4 h 16.4	Ce 148 16.8 h 16.8	Ce 149 4.96 s 4.96	Ce 150 1.695 h 1.695

Ponieważ czasy 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 wychwyt neutronu. Oznacza to, że po wyłączeniu reaktora jego stężenie 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 wychwyt 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 wychwyt 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 wychwyt 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 wychwyt 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 wychwyt 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.

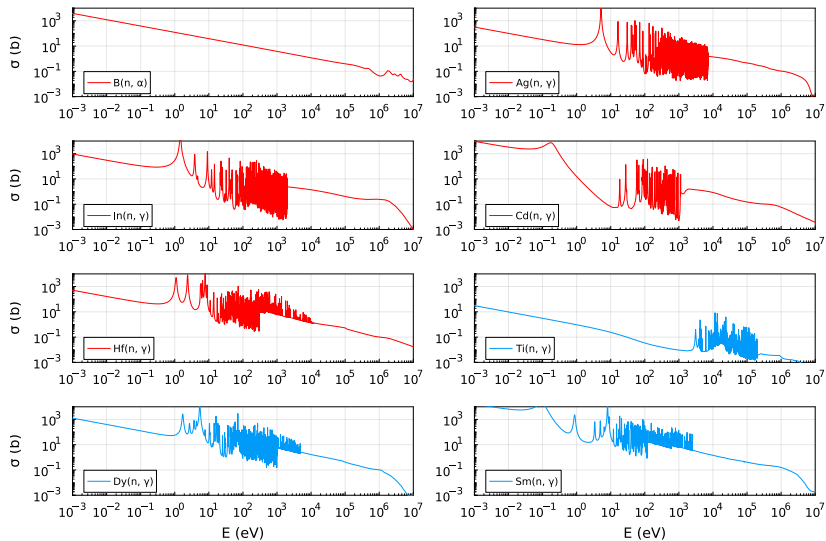
Pręty kontrolne

- 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 wychwyt 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 wychwyt 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 wychwyt 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 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 można zmierzyć eksperymentalnie i uzyskać całkowitą i różniczkową wartość

