GEN IV International Forum℠
Expertise | Collaboration | Excellence

Pb-208アイソトープを含有する鉛:
高速中性子炉の安全性向上のための新型反射体

概要 / 目的:

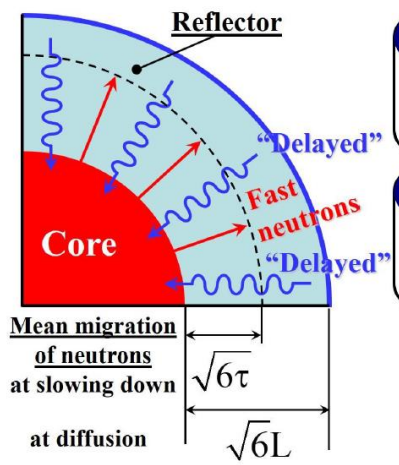
本ウェビナーでは、出力暴走の速度を抑えることで高速炉の安全性を向上させる技術について紹介します。原子量が重く中性子吸収が非常に少ないPb-208製の中性子反射体で炉心を取り囲む技術を採用することで、炉心から漏れた中性子が反射体から炉心に戻るまでの距離が長くなるため、出力暴走のスピードが抑えられるのです。これにより、即発中性子の平均寿命を約3桁延ばすことができると実証されています。

講演者紹介:

Dr. Evgeny Kulikov (エフゲニー・クリコフ博士) は2010年にモスクワの国立原子力研究大学MEPhIで博士号を取得し、現在は核物理工学研究所の准教授を務めています。専門分野は燃料燃焼、核燃料サイクル、核不拡散、高速の安全性の向上などがあります。彼の科学研究はロシア科学財団の支援を受けています。原子炉の理論的側面について講義を行い、実験炉物理学の研究を行っています。現在、第四世代国際フォーラム教育訓練タスクフォースのメンバーを務めています。

連鎖反応を遅くするというアイデア:

このアイデアは、連鎖反応を遅くすることによる安全性の向上である。連鎖反応を遅くするために必要な条件は、中性子寿命を可能な限り長く、拡散距離を中性子寿命の平方根よりも大きくすることです。つまり、高速中性子が反射体の奥深くまで進み、減速され、有意な時間遅れで炉心に戻ってくることです。



1 "Penetrate deeply into reflector"
Neutron age τ ($E_{fis} \rightarrow E_{th}$) as large as possible

2 "High probability to return to the core"
Diffusion length L larger than $\sqrt{\tau}$

Reactor	Thermal	Fast
Λ	~ ms	~ μs
β	0.65%	0.36%

Safety improvement by slowing down chain reaction

- How we can slow down chain reaction
  - fast neutrons from the core should penetrate deeply into reflector
  - they should have high probability to return to the core as a result of diffusion (in some way "delayed" neutrons)

5

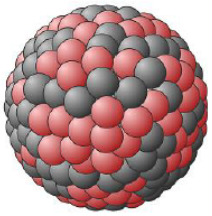
連鎖反応の特徴:

このアイデアの中性子反射体の素材に求められるものは、中性子寿命を長くするための大きな原子量、拡散距離及び中性子寿命を長くするための小さな吸収断面積である。これらの条件を満たす素材としては、鉛208が好適である。

1 Neutron age $\tau(E) \sim A \int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{\Sigma_s^2} \cdot \frac{dE}{E}$ $\boxed{\tau \uparrow A \uparrow}$

$\sqrt{6\tau}$ – mean migration of neutrons at slowing down

2 Diffusion length $L \sim \frac{1}{\sqrt{\Sigma_a^{th} \cdot \Sigma_s^{th}}}$ $\boxed{L \uparrow \Sigma_a^{th} \downarrow}$



^{208}Pb

$\sqrt{6}L$ – mean migration of neutrons at diffusion

3 Lifetime of thermal neutrons $T_{th} \sim \frac{1}{\Sigma_a^{th}}$ $\boxed{T_{th} \uparrow \Sigma_a^{th} \downarrow}$

反射体としての特性:

鉛208の中性子寿命と拡散距離は非常に長い。熱中性子寿命の長さは安全のために非常に重要である。鉛208反射体の熱中性子寿命は、他のどの材料よりも長い。

Material	$\sqrt{6\tau}$ (cm)	$\sqrt{6}L$ (cm)	Slowing down probability (2 MeV → 0.025 eV)	Lifetime of thermal neutrons (ms)
^{208}Pb	213	843 !	0.993	597 !
Pb_{nat}	213	33	0.304	0.9
Na	227	43	0.297	0.3
Bi	223	96	0.160	4.7
C	49	138	0.998	13

減速材としての特性:

エネルギー減少量は、衝突あたりの平均エネルギー損失を記述したもので、エネルギーに依存せず、原子量にのみ依存する。鉛208はエネルギー減少量が低く、減速能力も低い。しかし、鉛208の吸収断面積は非常に小さいため、鉛208の減速比は、軽水やバリウム酸化物や黒鉛よりも優れています。

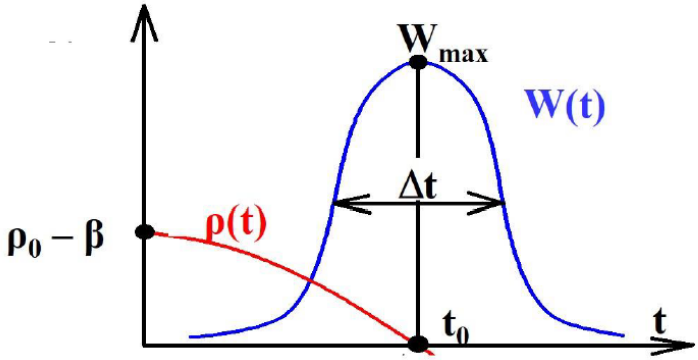
Material	Logarithmic energy decrement ξ	Moderating ability $\xi \cdot \Sigma_s$ (cm^{-1})	Moderating ratio $\xi \cdot \Sigma_s / \Sigma_a$
H_2O	0.95	1.39	70
D_2O	0.57	0.18	4590
BeO	0.17	0.12	247
C	0.16	0.063	242
Pb_{nat}	0.01	0.004	0.61
^{208}Pb	0.01	0.004	477

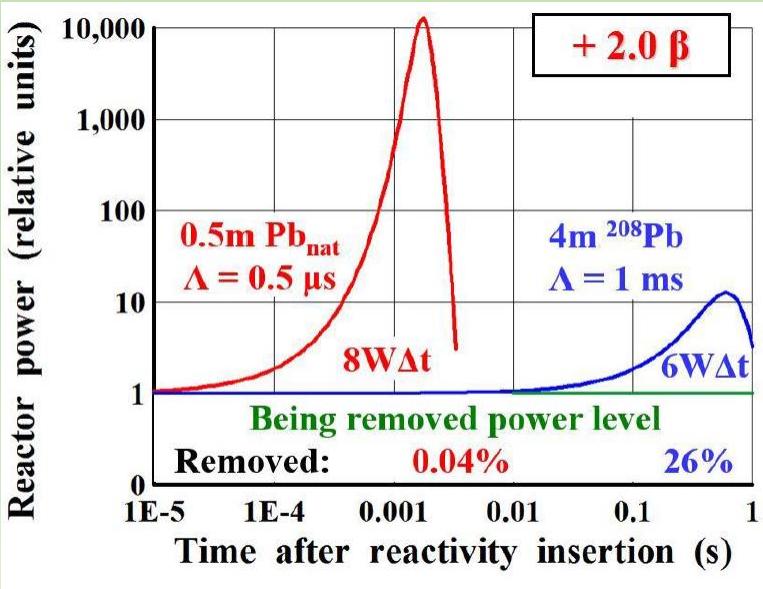
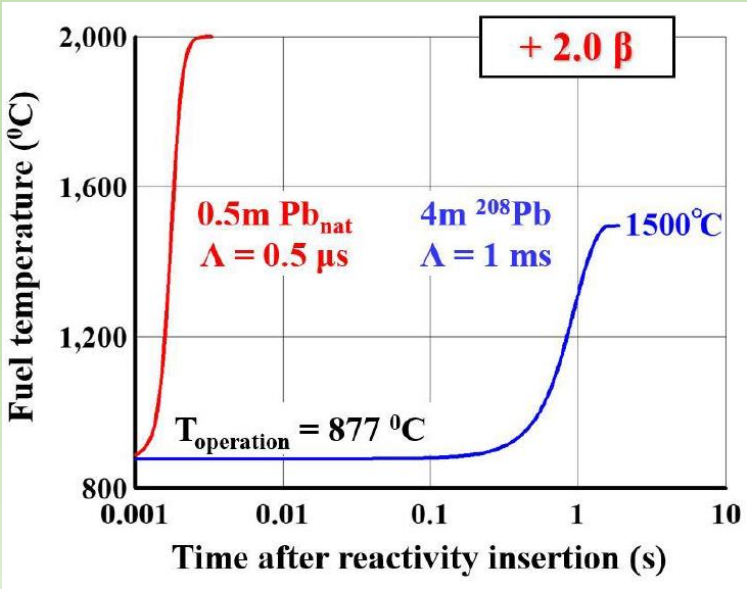
^{208}Pb is an effective moderator

中性子フラッシュモデルの概要 (p0 > B):

中性子フラッシュモデルによれば、反応度が遅延中性子割合を超えた場合は、即発超臨界状態となる。また、ドップラー効果が作用する時間は充分あり、中性子フラッシュの持続時間は中性子の寿命に比例する。

- this is the state of prompt super-criticality
- heat does not have time to reach the coolant
- only Doppler effect has enough time to act
- duration of neutron flash $\Delta t \sim \Lambda$ neutron lifetime
- energy yield of neutron flash $Q \sim W_{max} \cdot \Delta t \neq f(\Lambda)$



中性子フラッシュにおける原子炉出力と燃料温度:

中性子の寿命は、天然鉛製反射体の場合は約1マイクロ秒、鉛208製反射体の場合は約1ミリ秒である。原子炉出力では、天然鉛製反射体に比べてピーク出力は千倍低く、タイミングは千倍遅い。燃料から冷却材への熱伝達には十分な時間がある。また、燃料温度は、天然鉛製反射体に比べてピーク温度が低く、タイミングも千倍遅い。