事故耐性制御棒（ATCR）の紹介

-制御棒の高度化による炉心安全性・経済性の向上-

EX研究本部
電力中央研究所　材料科学研究部門
樽見 直樹

ATF-PF 共通技術基盤SWG　第2回会合

2026年4月24日

電力中央研究所

© CRIEPI 2026

目次

01. 事故耐性制御棒（ATCR）の必要性と基本コンセプト

02. 事故耐性制御棒（ATCR）の期待効果と開発の方向性

© CRIEPI

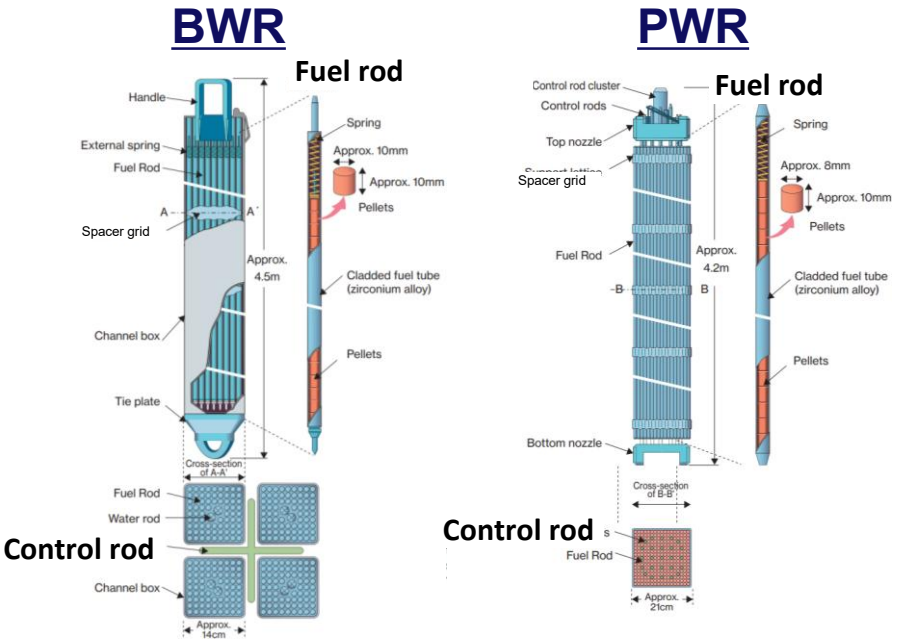
目次

01. 事故耐性制御棒（ATCR）の必要性と基本コンセプト

02. 事故耐性制御棒（ATCR）の期待効果と開発の方向性

© CRIEPI

炉心を構成する材料の整理とATFの概念



炉心を構成する材料

- ◆ 燃料棒（燃料ペレット＋被覆管）
  - ➢ 原子炉で熱を生み出す部材
- ◆ 制御棒
  - ➢ 原子炉の出力調整と停止
- ◆ グリッドスペーサー
  - ➢ 燃料棒を支持

etc.

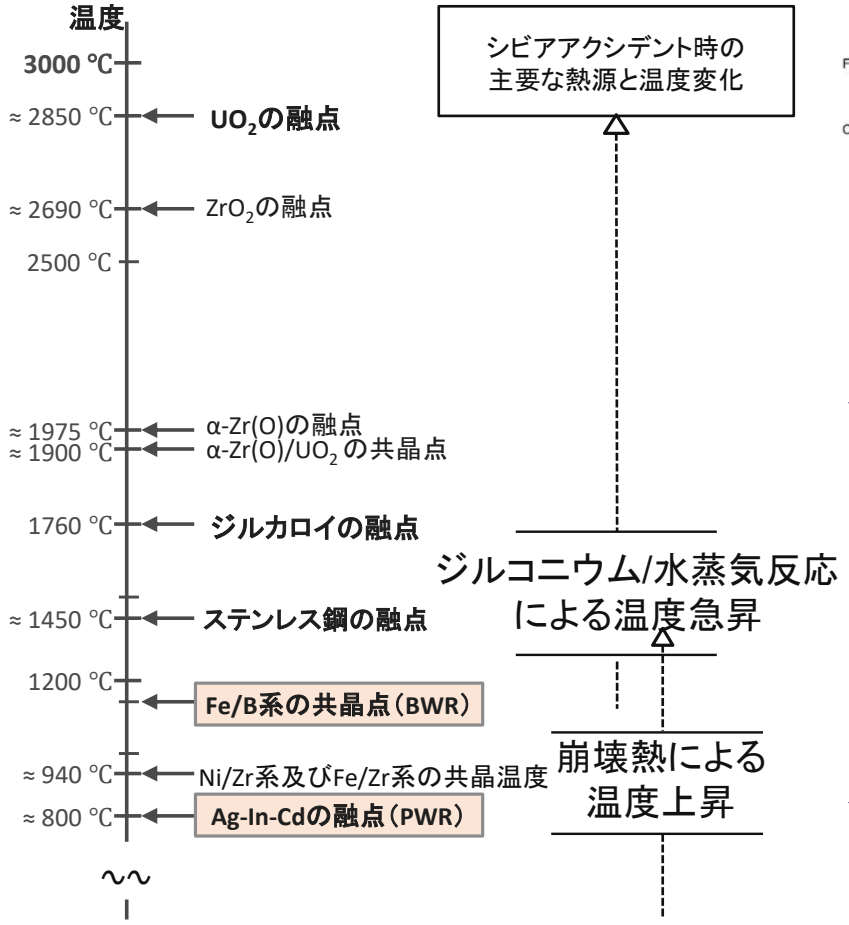
ATF：過酷事故時に従来燃料より損傷しにくく、事故進展を遅らせることを目指した燃料・被覆管の概念

→燃料被覆管酸化による発熱を抑制、水素発生を抑制

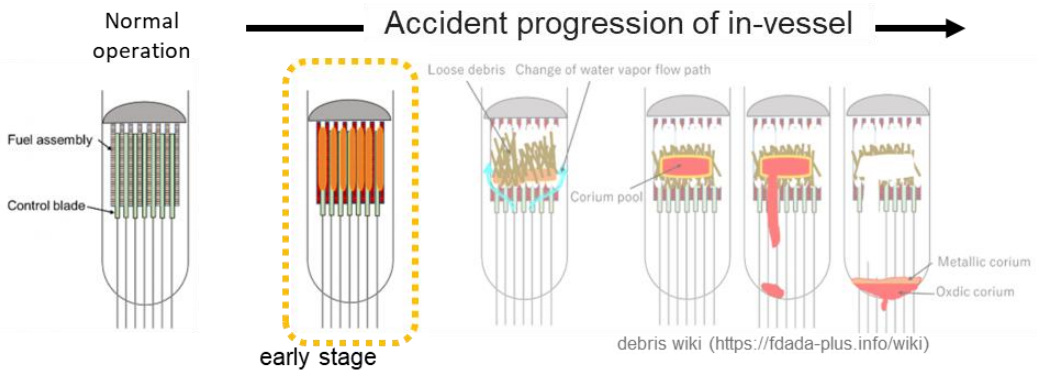
炉心全体の安全性向上には、燃料棒以外の炉心構成材にも着目する必要がある。

© CRIEPI 2026

炉心全体の安全性向上の必要性



シビアアクシデント時に炉心構成材料に生じる現象



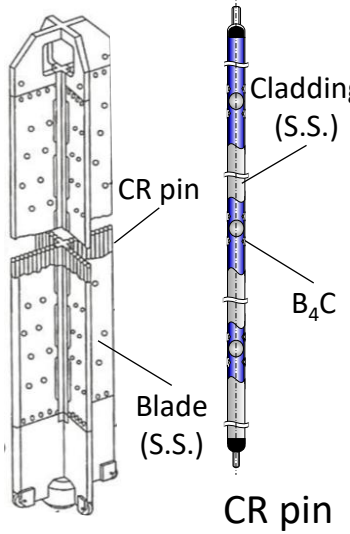
シビアアクシデントの時系列の例

- シビアアクシデント早期段階
  制御棒被覆管（S.S.）や中性子吸収材（Ag-In-Cd、B_4C）は、溶融または共晶反応により、燃料棒＊より先に損傷しうる。
  ＊1200℃ではジルカロイ被覆管の酸化発熱と水素発生が急激に加速
- 溶融した吸収材は周辺の燃料棒を損傷し、FPの早期放出、炉心損傷進展、再臨界リスクの増大につながる可能性がある。

© CRIEPI 2026

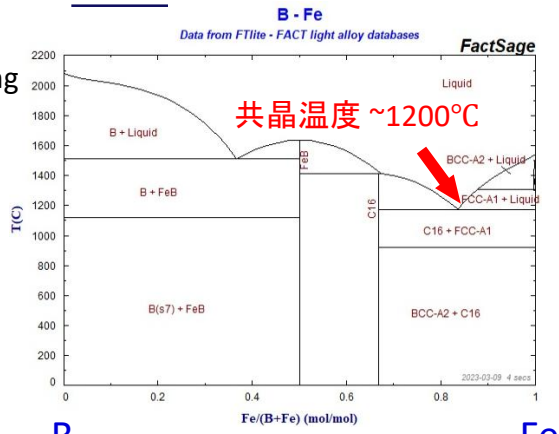
Hofmann, P. Journal of Nuclear Materials 270.1-2 (1999): 194-211.

現行制御棒が有する早期炉心損傷リスク



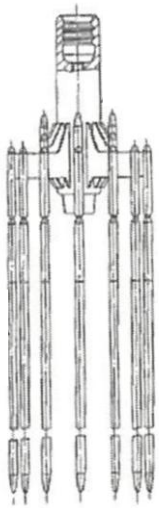
CR pin

BWR

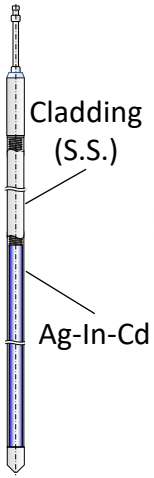


B　Fe

Phase diagram of B-Fe binary system

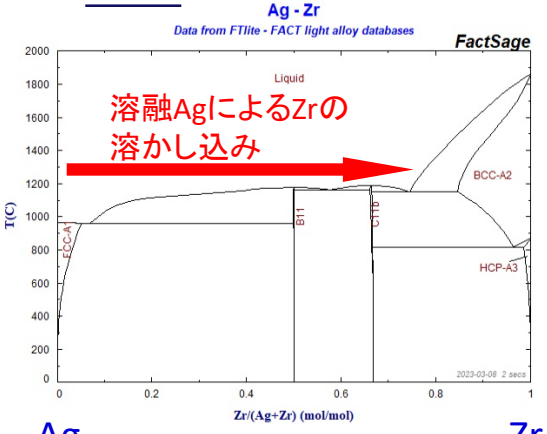


Guide Tube (Zry)



CR pin

PWR



Ag　Zr

Phase diagram of Ag-Zr binary system

- ◆ B_4C/S.S.系
  - ➢ 約1200℃でB_4C/SSの共晶反応が発生
  - ➢ チャンネルボックスや近傍燃料棒との相互作用を誘発
- ◆ Ag-In-Cd/S.S./ジルカロイ系
  - ➢ 800℃以上でCd蒸発に起因する内圧破損
  - ➢ 940℃でS.S.被覆管/ジルカロイ案内管の共晶反応が発生
  - ➢ Agを含む溶融合金が近傍燃料棒を溶解

制御棒の破損（溶融・移行）による局所的な炉心損傷の加速
→核分裂生成物（FP）の早期放出および再臨界リスクの増大

© CRIEPI 2026

事故耐性制御棒（ATCR）の要求事項

- 従来制御棒と同等以上の中性子吸収性能
  → 炉心設計変更の最小化
  → 現行炉への適用性

- 従来制御棒より高い破損温度
  → 過酷事故時の早期損傷を抑制
  → 局所的な炉心損傷進展の遅延

- 炉心構造材（S.S.、ジルカロイ、ATF被覆管）との高温共存性
  → 共晶反応や化学反応による早期破損リスクを低減
  → 炉心構成材全体の健全性向上に寄与

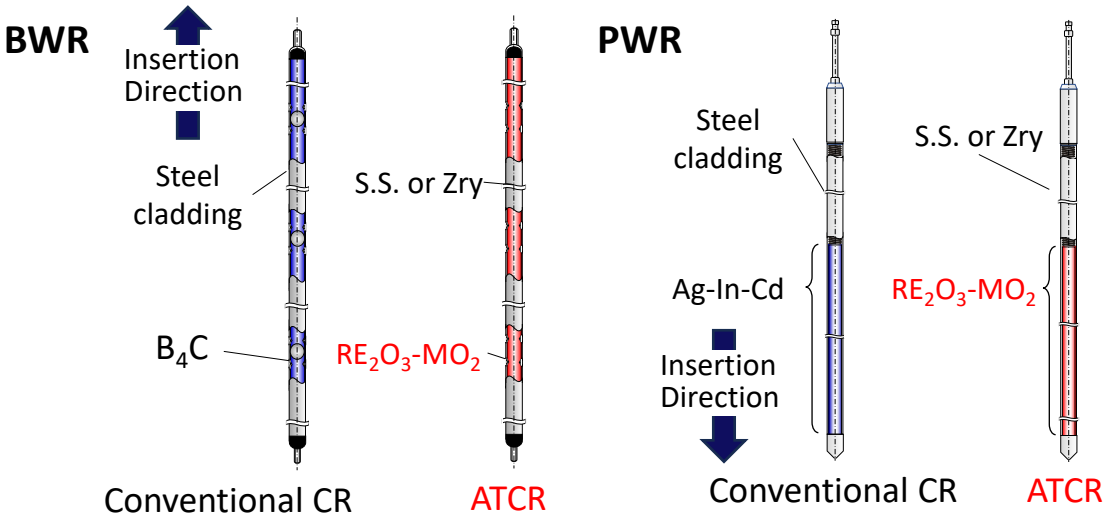
- 溶融燃料との高い混和性
  → 溶融後の均質化により再臨界リスクの低減に寄与

© CRIEPI 2026

ATCRのコンセプト

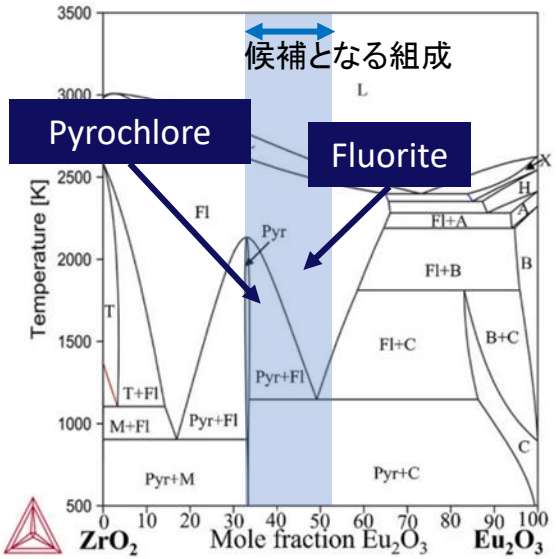
ATCRの構造

- 被覆管：
  S.S.またはジルカロイ
  ＊ATFの開発状況に応じて、燃料棒と同じATF材料
- 中性子吸収材：
  RE_2O_3-MO_2
  RE (Rare Earth) = Eu or Sm
  M = Zr or Hf



RE_2O_3
RE: Eu or Sm
- 中性子吸収材としての能力を長期間維持
- 中性子吸収反応によるHeガス発生なし
- UO_2との混合性が良好

MO_2
M: Zr or Hf
- RE_2O_3と固溶体を形成し炉水との共存性向上
- 高融点
- UO_2との混合性が良好



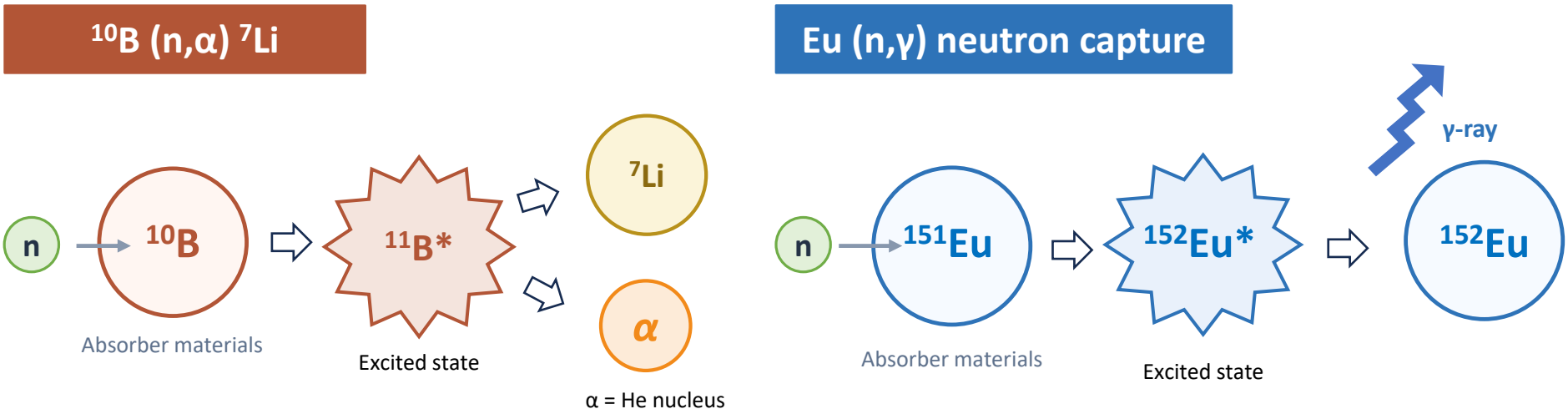
Phase diagram of ZrO_2-Eu_2O_3 system

- 炉心および燃料集合体の設計変更なし（見込み）
- 原子炉の運転操作の変更なし（見込み）

© CRIEPI 2026

通常運転時の利点

ATCRは事故時の利点だけでなく、通常運転時にも価値を持つ



- RE同位体は、中性子吸収時に(n,γ)反応を起こすため、ガスを生成しない。
- 中性子捕獲後に生成する核種も中性子吸収材として機能する
  →より長寿命化が期待できる。

期待される効果：長寿命化と使用済制御棒の低減による経済的メリット

© CRIEPI 2026

目次

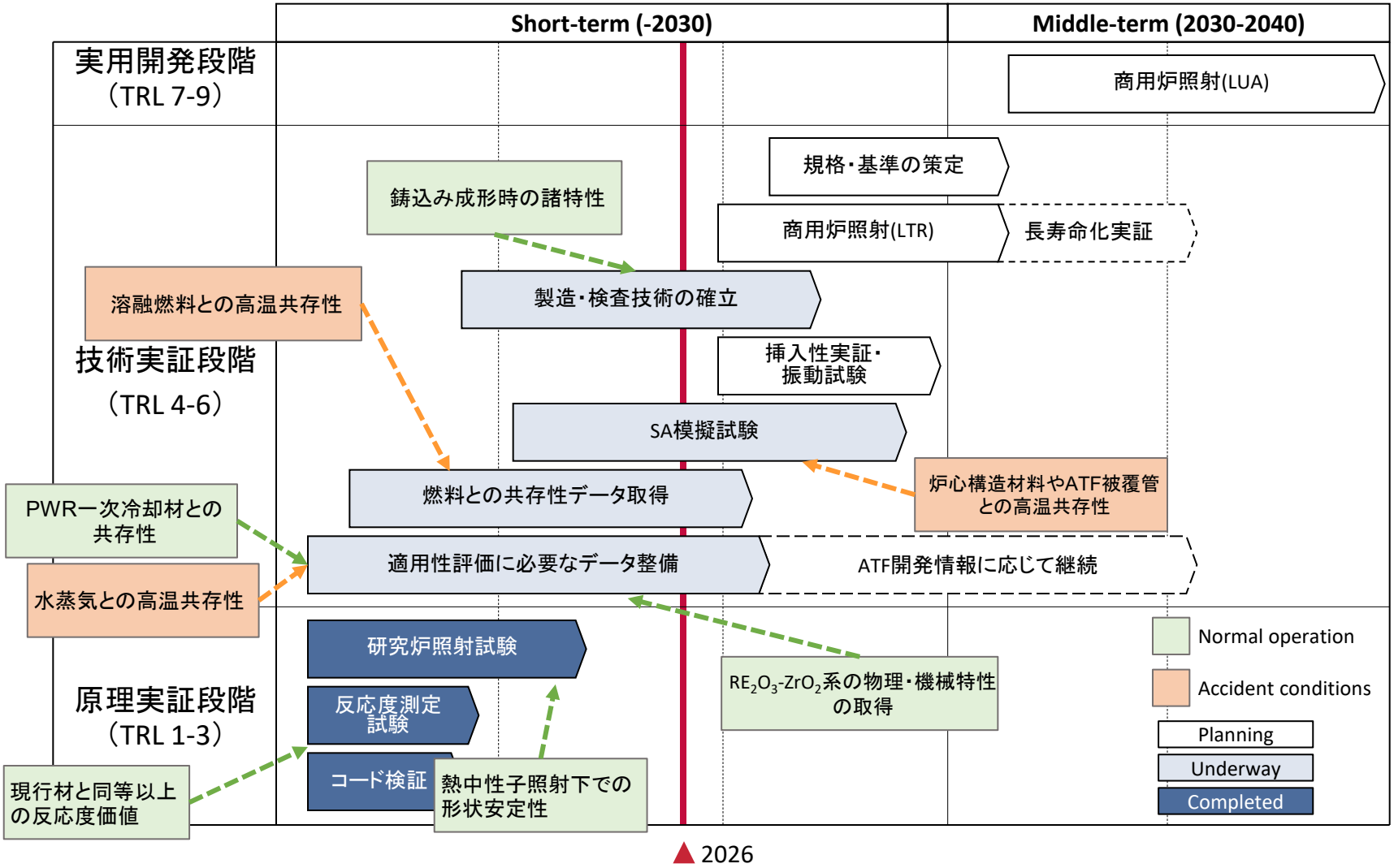
01. 事故耐性制御棒（ATCR）の必要性と基本コンセプト

02. 事故耐性制御棒（ATCR）の開発の方向性と期待効果

© CRIEPI

ATCRの開発ロードマップ

技術成熟度レベル（TRL）



© CRIEPI

新型中性子吸収材の核的性能

制御棒価値の比較

計算コード: MVP
核データ: JENDL-4.0

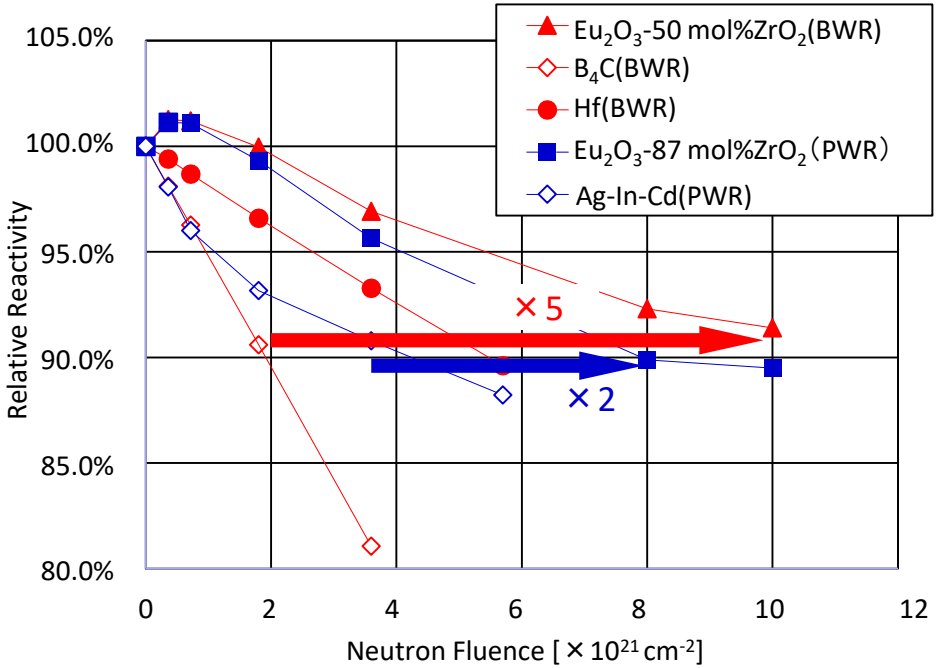
吸収材	BWR反応度価値 [%Δk/kk']	PWR反応度価値 [%Δk/kk']
Sm_2O_3-HfO_2	-15.9	-5.4
Sm_2O_3-ZrO_2	(-14.5〜-14.7)*	-4.9
Eu_2O_3-HfO_2	-19.2	-6.4
Eu_2O_3-ZrO_2	-18.5	-6.2
B_4C	-18.6	
Ag-In-Cd		-5.2

* 推定値

B_4CまたはAg-In-Cdと同等の反応度価値

新型中性子吸収材の組成

BWR	Eu_2O_3-50 mol% ZrO_2
PWR	Eu_2O_3-87 mol% ZrO_2



中性子照射に伴う反応度価値の変化

✓ 現行制御棒と同等以上の反応度価値

✓ 核的寿命を2-5倍に延長
→使用済制御棒発生数の削減、定検期間の短縮

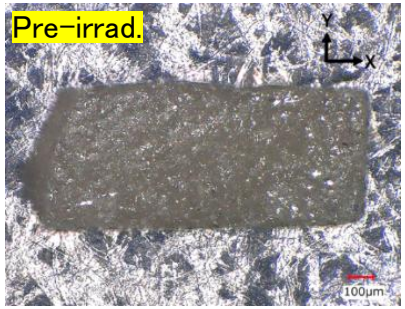
© CRIEPI 2026

H. Ohta, et al., *Top Fuel 2016*, Boise, Idaho, USA, 11–15 Sep. 2016.
H. Ohta, et al., *AESJ Annual Meeting*, 8 Sep. 2016.

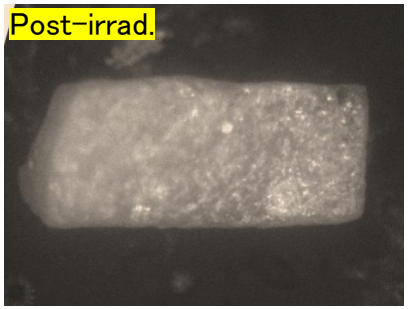
新型中性子吸収材の材料安定性

熱中性子照射下での形状安定性

照射場：京都大学研究用原子炉（KUR）長期照射プラグ
照射時間：254.7時間（炉出力=1MW）+ 55.2時間（炉出力=5MW）



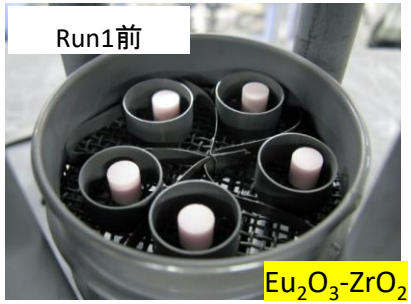
200μm

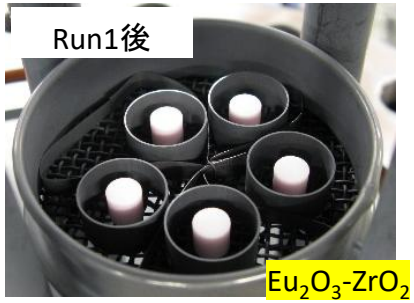


200μm

✓ 熱中性子照射試験の結果、低照射量条件では重量・寸法の有意な変化は確認されなかった。
→商用炉環境下によるさらに高い照射量の試験が実施可能な見通し

溶出試験(PWR一次冷却材環境)





PWR一次冷却水を模擬したホウ酸水ループ（350L）内で保持

温度：～300℃, 圧力：～16MPa
3 Runに分けて合計～9週間保持
[B]：1248 – 1310ppm
[Li]： 6.8 – 7.0ppm(pH調整用)
DH：≤ 2.7ppm, DO： ≤ 0.5ppb

✓ 外観・重量測定の結果、有意な溶出は認められず、良好な安定性を示した。

© CRIEPI 2026

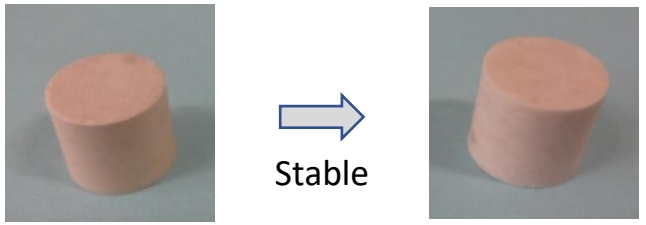
新型中性子吸収材の事故耐性①

高温水蒸気中での安定性

$RE_2O_3 + 3H_2O \rightarrow 2RE(OH)_3$



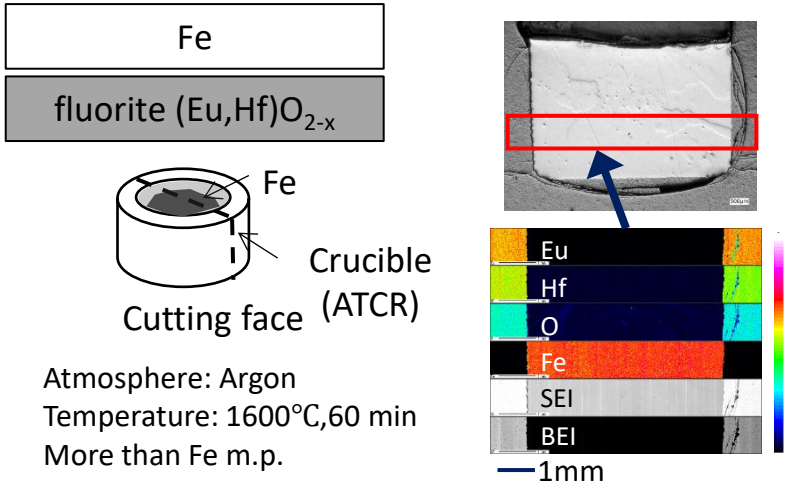
Eu_2O_3 焼結体
（150℃、96h、Ar-20vol.%Steam）



Eu_2O_3-50 mol%ZrO_2 焼結体
（1200℃、96h、Ar-20vol.%Steam）

👍 ✓ RE_2O_3–MO_2にすることで外観および元素分布に有意な変化なし
→物理・化学的に安定

炉心を構成する材料との高温共存性



👍

- ✓ 制御棒の損傷温度が現行材(1200℃～1400℃)よりも高く健全性を維持
- ✓ 新型中性子吸収材と炉心を構成する材料との高温相互作用は限定的

© CRIEPI 2026

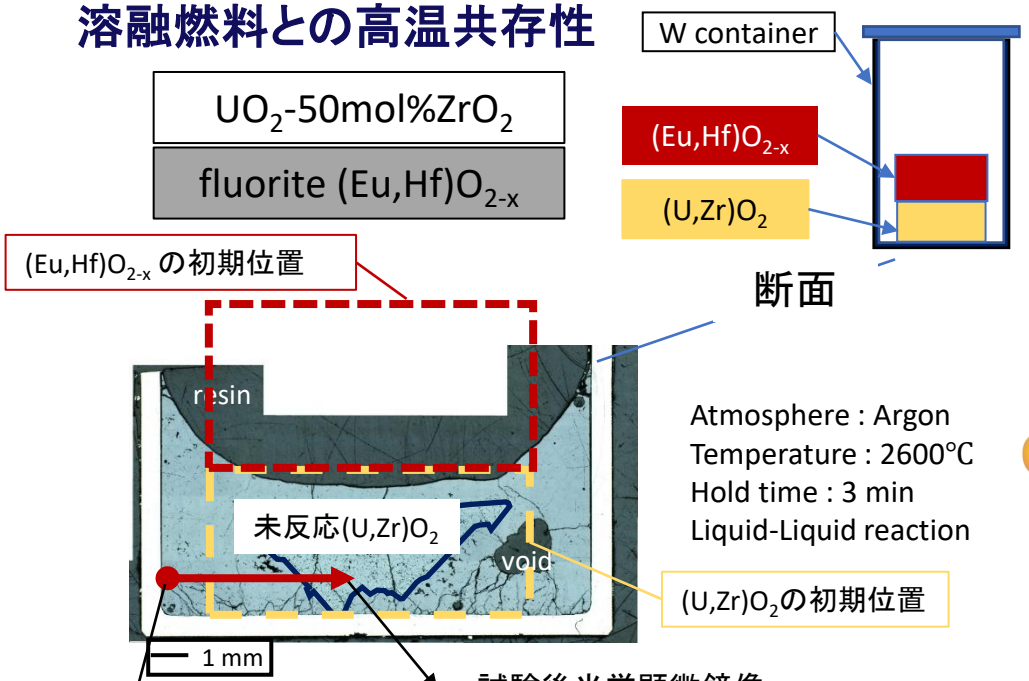
K. Nakamura, et al, 11th EPRI/DOE/INL Joint Workshop on Accident Tolerant Fuel, 28–29 Mar 2022.
K. Nakamura, et al, 27th International QUENCH Workshop 27 - 29 Sep. 2022

新型中性子吸収材の事故耐性②

溶融燃料との高温共存性

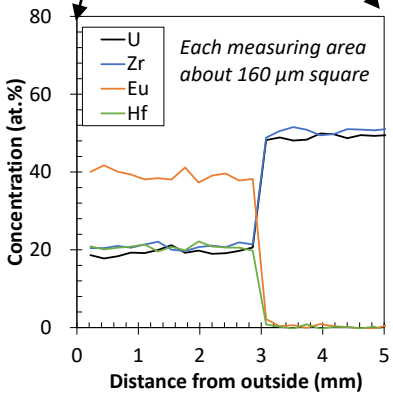
UO_2-50mol%ZrO_2

fluorite $(Eu,Hf)O_{2-x}$



Atmosphere : Argon
Temperature : 2600℃
Hold time : 3 min
Liquid-Liquid reaction

試験後光学顕微鏡像



均一な固溶体を形成
fcc−$(Eu,Hf,U,Zr)O_2$

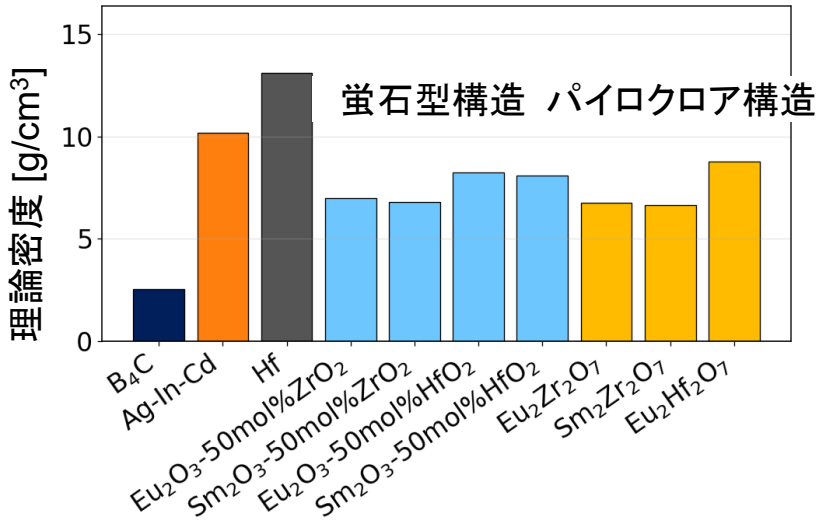
✓ 核燃料物質（U）は中性子吸収材（Eu）と共存

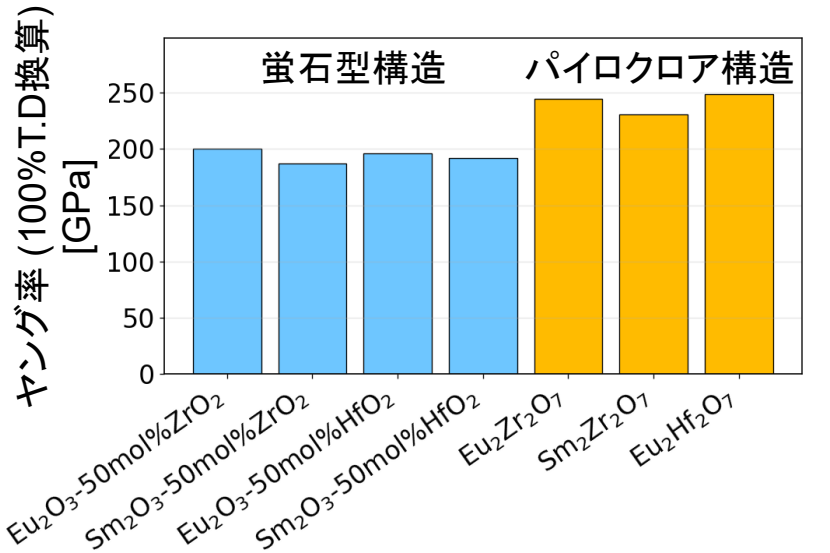
→重大事故終息後の廃止措置時に再臨界リスクの大幅な抑制に寄与

© CRIEPI 2026

K. Nakamura, et al, 11th EPRI/DOE/INL Joint Workshop on Accident Tolerant Fuel, 28–29 Mar 2022.
K. Nakamura, et al, 27th International QUENCH Workshop 27 - 29 Sep. 2022

ATCR実用化に向けたデータ整備





- **理論密度**:
  - ✓ REの組み合わせ
    SmとEuの組み合わせによる有意な違いは見られない。
  - ✓ Mの組み合わせ
    Hfの方がZrより高い密度
  - →いずれもB_4CとHfの間の値
- **ヤング率**:
  - ✓ Sm、EuとZr、Hfの組み合わせによる有意な違いは見られない。
  - ✓ パイロクロア構造は蛍石型構造よりも2割程度高い
  - →RE_2O_3の違いよりも、MO_2濃度の影響が大きい

© CRIEPI 2026

まとめ

- 炉心安全の向上には、燃料棒だけでなく制御棒にも事故耐性が必要である。
- ATCRは、現行制御棒と同等以上の機能を維持しつつ、早期損傷リスクの低減を目指す。
- RE_2O_3-MO_2系中性子吸収材（RE = Eu or Sm、M = Zr or Hf）は、長寿命化と高温安定性の両立が期待できる。
- 現在、ATCRの実用化に向けたデータの整備・拡充が進められている。

ATCRは、事故時の安全余裕と通常運転時の長寿命化を両立しうる新しい制御棒概念

© CRIEPI 2026