

事故耐性の高い軽水炉用制御棒概念の構築

キーワード：軽水炉，過酷事故，制御棒，再臨界，反応度価値

報告書番号：L13005

背景

軽水炉の制御棒には、ステンレスで被覆した銀-インジウム-カドミウム合金（Ag-In-Cd：AIC）や炭化ホウ素（ B_4C ）などの制御材が用いられる。AICの融点や B_4C とステンレス中の鉄（Fe）の間で液相が生じる共晶温度は、ジルカロイと水蒸気の反応が急速に進行し始める温度（約 $1200^{\circ}C$ 以上）より低い。そのため、過酷事故時に制御棒が炉心に挿入されても、それが炉心損傷に先行して熔融・脱落する可能性がある。また、InやCdは蒸発し易く、 B_4C も蒸発し易い酸化ホウ素などに变化するため、炉心損傷後の熔融燃料から制御材が分離することも懸念される。したがって、過酷事故時にも炉心損傷に先行して脱落したり、熔融燃料から制御材が分離したりしない制御棒概念が構築できれば、ホウ酸水を注入せず真水や海水等を緊急注水した場合にも再臨界に至る可能性^注を極めて低くでき、代替注水の選択肢を増やすことができる。

目的

過酷事故時の未臨界確保を容易にする制御材の性能を検討し、候補材の高温試験や制御棒反応度価値の解析を行い「事故耐性の高い制御棒（ATCR）」の概念を構築する。

主な成果

1. ATCR 候補材の選定

過酷事故時の未臨界を確保するため、①中性子吸収断面積が大きく十分な未臨界余裕が確保できること、②過酷事故時にも炉心燃料より先に熔融・脱落しないこと、③炉心熔融時および再固化後も燃料物質と分離しないこと、をATCRの要求性能とし、新たな制御材候補として希土類元素などの酸化物を選定した（表1）。

互いに類似の化学的性質を持つ希土類酸化物の候補材の代表として Gd_2O_3 と被覆管成分のFeとの高温での共存性を確認したところ、 $1600^{\circ}C$ で1時間保持しても Gd_2O_3 に液相は生じなかった（図1）。これは、ジルカロイと水蒸気が急速に反応し始める約 $1200^{\circ}C$ より十分高温まで希土類酸化物とFeが反応せず、これらを用いた制御棒が炉心燃料より先に熔融しないことを示唆している。

2. 制御棒反応度の予備解析

加圧水型軽水炉体系を例に、ATCR候補材の制御棒価値を予備評価した（表1）。 Sm_2O_3 や Gd_2O_3 および Dy_2O_3 の場合にAICと同等の制御棒価値が得られ、 Eu_2O_3 では、より大きな反応度余裕が確保できる結果となった。 HfO_2 は制御棒価値が比較的低いものの、他の候補材と混ぜるなどの工夫によって、化学的性質の類似した ZrO_2 を多く含む燃料デブ

りとの混合性向上が期待できるため、有望な候補材である。なお、運転中に炉心内部や近傍領域に配置され、炉内中性子分布に影響を与える制御棒部位には、従来制御材を装荷することで、現行炉にも適用できる（図2）。

以上より、過酷事故時の未臨界状態を容易に確保する「ATCR 概念」を構築できた。

注：文献「NUREG/CR-5653 PNL-7476 (1990)」では、BWR において過酷事故時に制御棒が熔融し、大規模な燃料破損が生じる前にホウ酸水を注入せず、真水によって再冠水すると、再臨界となる可能性が指摘されている。再臨界に至っても直ちに環境への放射性物質の放出につながるものではないが、事故事象の進展を加速する可能性があるため、未臨界を確保することが重要である。

表1 事故耐性の高い制御棒の候補材と従来制御材の主要な物性および反応度価値

	候補材料						従来材料	
	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	HfO ₂	AIC	B ₄ C
マクロ吸収断面積 ¹ [cm ⁻¹]								
熱中性子 ²	163	115	1196	3	4	3	11	85
高速中性子 ³ (×10 ⁻³)	2.8	7.4	2.5	4.0	1.9	2.3	5.8	9.6
融点 [°C]	2330	2300	2330	2340	2000	2800	800	2350
構造材 (Fe) との高温 ⁴ 共存性	- ⁵	良	良 ^{図1}	- ⁵	良	- ⁶	-	共晶 ⁷
燃料物質との混合性	- ⁵	高	高	- ⁵	高	- ⁶	低/蒸発 ⁸	蒸発 ⁹
制御棒価値解析値 ¹⁰ [%Δk/kk']	-5.18	-6.28	-5.05	-5.22	-4.49	-4.61	-5.11	-

¹:天然組成、JENDL-4.0に基づく、²:中性子エネルギー=0.025eV、³:中性子エネルギー=²³⁵Uの核分裂スペクトル、⁴:1200°C以上、⁵:Nd₂O₃やGd₂O₃との類似性から「良/高」と推測、⁶:ZrO₂との類似性から「良/高」と推測、⁷:共晶温度=約1150°C、⁸:CdやInの一部が蒸発、⁹:水蒸気との反応生成物(酸化ホウ素やホウ酸)として蒸発、¹⁰:大型加圧水型軽水炉体系による全制御棒挿入反応度の解析値

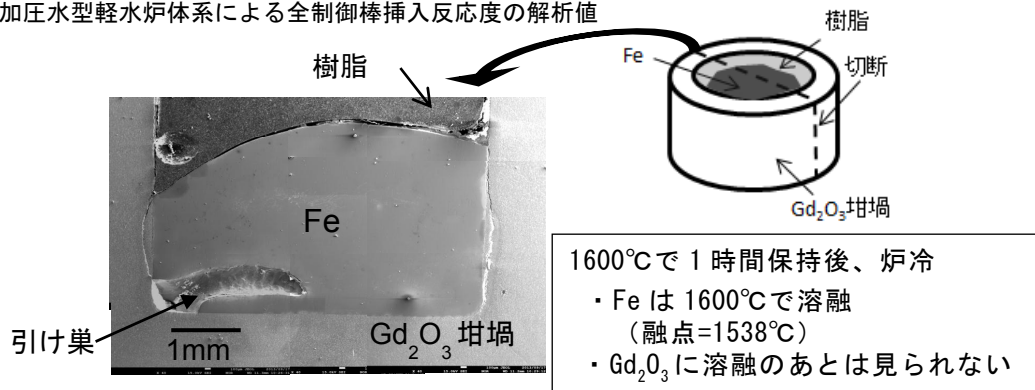
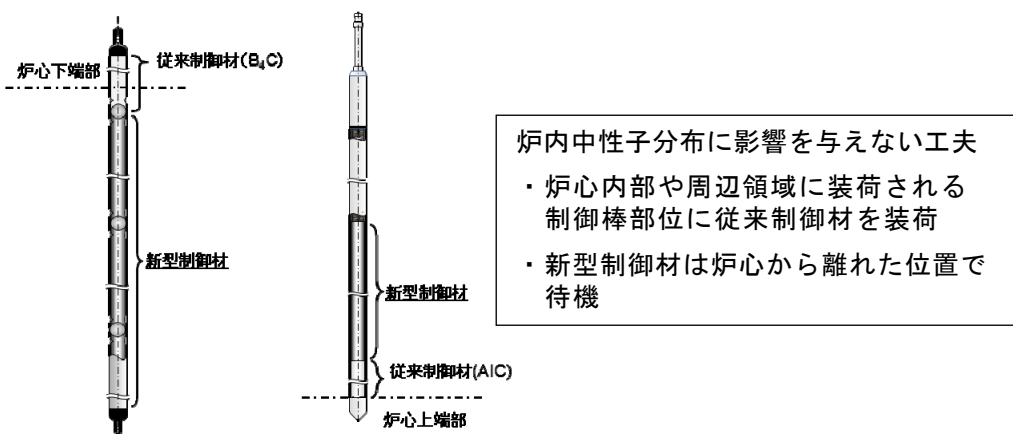


図1 Gd₂O₃とFeの高温反応



沸騰水型軽水炉の場合 加圧水型軽水炉の場合

図2 現行炉への適用性を考慮した ATCR の構造例

研究担当者	太田 宏一 (原子力技術研究所 燃料・炉心領域)
問い合わせ先	電力中央研究所 原子力技術研究所 研究管理担当スタッフ Tel. 03-3480-2111(代) E-mail: ntrl_rr-ml@criepi.denken.or.jp

報告書の本冊(PDF版)は電中研ホームページ <http://criepi.denken.or.jp/> よりダウンロード可能です。

[非売品・無断転載を禁じる] ©2014 CRIEPI 平成26年6月発行