

高速炉における炉心損傷事故の発生を防止する 受動的炉停止デバイスの開発

令和元年度原子力システム研究開発事業(安全基盤技術研究開発 タイプB)

研究代表機関	九州大学	代表者	守田幸路
再委託機関	福井大学 東京都市大学 日本原子力研究開発機構 東京工業大学	責任者	有田裕二 佐藤 勇 関尾佳弘 相樂 洋



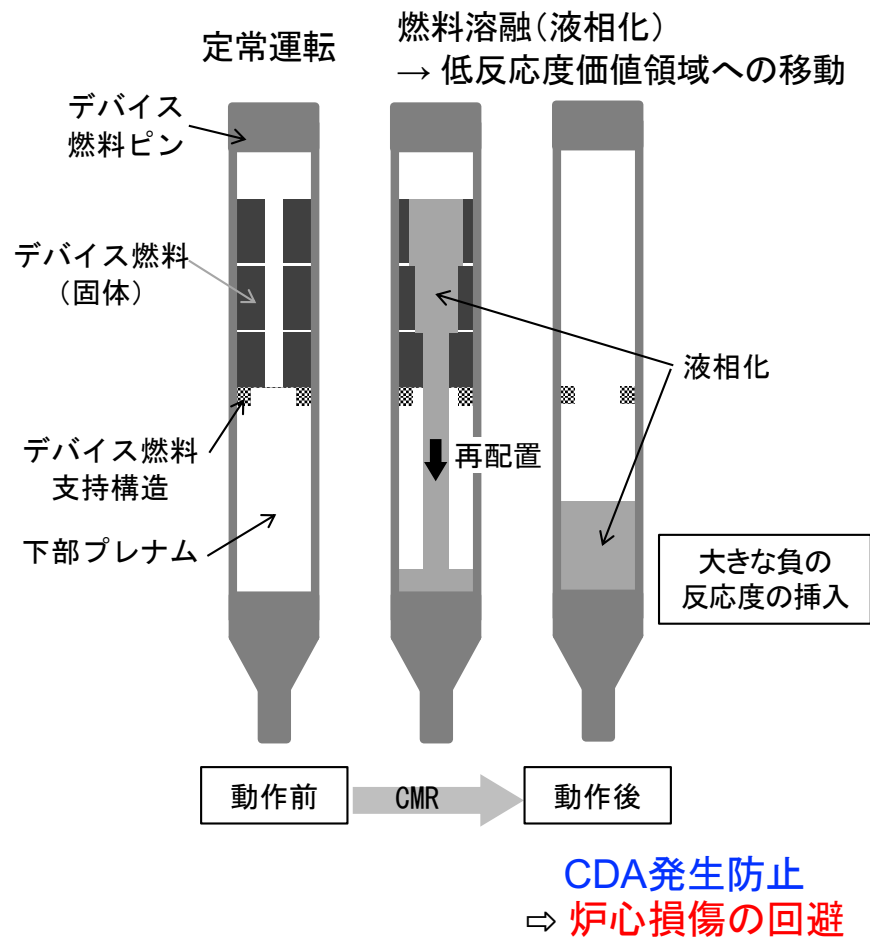
研究の目的

- ナトリウム冷却高速炉(SFR)のATWS(炉停止機能喪失事象)に対する安全設計
 - 発生防止方策
 - ✓ 受動的炉停止機構: SASS(自己作動炉停止機構)
 - ✓ ゼロボイド炉心: 上部Naプレナム付軸方向非均質炉心(CFV炉心)、等
 - 影響緩和方策
 - ✓ CMR(Controlled Material Relocation)概念に基づく再臨界回避
 - 例: FAIDUS(内部ダクト付き燃料集合体)
- ⇒ 損傷炉心物質の原子炉容器内保持(IVR)の成立



- 高速炉の炉心損傷事故(CDA)発生防止対策に「多様性」と「頑健性」を持たせる新しい受動的炉停止機構の開発
 - ☛ **【低融点燃料を用いた集合体型受動的炉停止デバイス】**
 - ✓ 既存の受動的炉停止機構と併用し、ATWSによる炉心損傷を「実質的に回避」(practical elimination)されるべき事故状態とすることに寄与できる新たな安全設計対策

集合体型受動的炉停止デバイスの概念



【低融点燃料の特徴】

- 燃料(融点調整可能)候補材(例)
 - ✓ (U, Pu)Fe合金, (U-Pu)Cl₃塩化物
- 定常運転時
 - ✓ 固体ドライバー燃料として機能
- 事故(ATWS)時
 - ✓ 通常燃料に先行して液相化して移動

【集合体型デバイスの特徴】

- 一部の燃料集合体を換装・導入
- 動作後も交換・再起動可能

【ATWS時の挙動】

- 液相化燃料は中空部を通じて下部プレナム部へ再配置 → 負の反応度挿入
- 単純物理現象(溶融、重力落下等)で動作

集合体型受動的炉停止デバイスの概念

研究目標及び全体計画

高速炉において一部の燃料集合体に置き換えて装荷することで炉心損傷事故の発生を防止する集合体型の受動的炉停止デバイスについて、デバイスに用いる燃料の候補材、事故時の燃料移動を実現するピン構造、デバイス動作時の核・熱流動特性等の観点から総合的に検討し、本デバイスの工学的成立性ならびに実現性を示す。

項目	年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	
(1) デバイス材料開発	①合金系燃料評価 a. 液体物性評価 (再委託先：東京都市大学)	デバイスに使用する合金燃料候補及び模擬試験用物質の選定	熔融金属物性の測定装置の整備	溶融合金物性測定	適用性検討課題の抽出	
	b. 熱物性評価 (再委託先：福井大学)		熱伝導率測定	熱膨張率測定		
	②塩系燃料評価 (再委託先：福井大学)	デバイスに使用する塩系燃料候補及び模擬試験用物質の選定	燃料物性の測定装置の整備と予備測定	塩材の物性測定	適用性検討課題の抽出	
	③可溶柱材料評価	可溶柱に使用する合金材の評価・選定	合金材の試作	金材と燃料の共存性評価	適用性検討課題の抽出	
	(2) デバイス構造開発	①デバイス構造検討 (再委託先：東京都市大学)	デバイス構造に関する調査	デバイス構造の検討、絞込み	デバイス構造の選定	適用性検討課題の抽出
		②デバイス試験 (再委託先：原子力機構)	試験装置の設計	基礎挙動試験	基礎挙動試験及び統合試験	統合試験
(3) 炉心開発 (再委託先：東京工業大学)	デバイス配置炉心の検討 デバイスの核特性検討	炉心特性の明確化 核不拡散性からの定量化	炉心特性の評価 核不拡散性からのデバイス材料選択	適用性検討課題の抽出		
(4) 安全評価	デバイスの動作特性評価	デバイス設置炉心の 応答特性評価	デバイス最適化評価			
(5) 総合評価				デバイス成立性に関する総合評価		
(6) 研究推進	運営・技術会議の実施	運営・技術会議の実施	運営・技術会議の実施	運営・技術会議の実施		
		△ △	△ △	△ △	△ △	

主要研究成果の概要

(1) 合金系燃料評価 ① 合金系燃料評価 (東京都市大, 福井大学)

【研究目標】 デバイスに用いる合金系燃料候補と模擬試験用物質を選定し、合金系燃料の物性評価を行い課題を摘出する。

a. 液体物性評価

- 設定したデバイス燃料材 (U:Pu:Fe=66:24:10 (mol%); 動作温度:695°C) に対して、**模擬燃料合金 (Sn:Bi=93:7 (mol%))** を選定し、動作 (溶融落下) 時の妥当性を検討した。
 - ✓ 模擬燃料合金の固液二相状態における粘性評価から、液相割合50% (188°C) で急激に粘性が変化しており、この温度が動作温度に相当するものとした。
 - ✓ 動作温度 (= 粘性変化温度) と液相割合の関係から、**液相割合60%でデバイスが動作する設計**とした。この妥当性は、「立て板試験」により確認した。

b. 熱物性評価

- 模擬燃料合金の熱伝導率は、純粋な金属よりは小さいものの酸化物燃料よりは十分大きく、通常の合金系燃料と大差ないことが示された。
- 熱膨張測定から、合金系燃料の寸法変化は純金属よりも小さくなることが分かった。いずれも、燃料挙動模擬上問題ないことが分かった。

(1) 合金系燃料評価 ② 塩系燃料評価 (福井大学)

【研究目標】 デバイスに用いる塩系燃料候補と模擬試験用物質を選定し、塩系燃料の物性評価を行い課題を抽出する。

- 設定したデバイス燃料材 (U-Pu-Cl₃; 融点: 724°C) に対して、模擬燃料塩として NaCl-CaCl₂-LaCl₃ 擬3元系塩の溶融挙動を測定し、複雑な溶融挙動を示すものの、模擬燃料塩の粘性は低く、600°C付近では他の溶融塩と同程度であり、流動性が高いことが分かった。
- 模擬燃料塩の熱伝導率は酸化物燃料よりも小さく、Zr粒子分散による熱伝導率改善を試みたが効果は小さく、他の方法の検討が必要

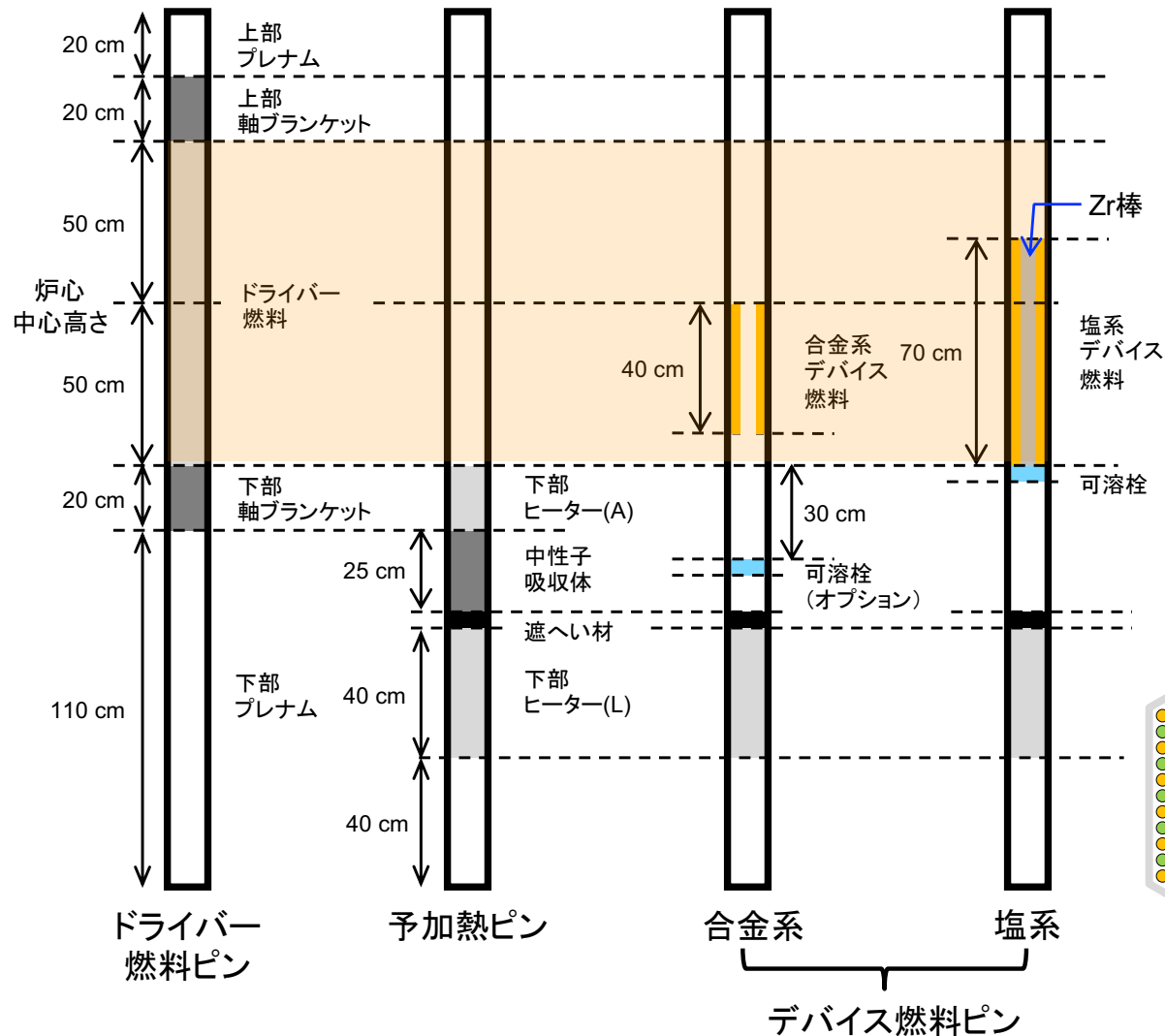
(1) 合金系燃料評価 ③ 可溶栓材料評価 (九州大学)

【研究目標】 可溶栓に使用する材料を評価・選定し、デバイス燃料との共存性を調査・検討する。

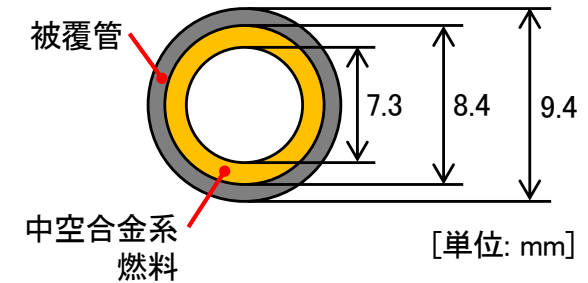
- 可溶栓候補材の選定 (動作温度に対応する融点、中性子吸収断面積、化学的安定性、物性)
 - ✓ 合金系デバイス燃料: **Al-12.2Si合金** (融点 577°C)
 - ✓ 塩系デバイス燃料: **Ni-50Sn合金** (融点 750°C)
- 可溶栓候補材と模擬燃料の共存性確認 (通常運転時の温度条件下)
 - ✓ Al-12.2Si/Ce-17Fe系 (合金系デバイス燃料): 共存性成立
 - ✓ Ni-50Sn/CeCl₃系 (塩系デバイス燃料): 共存性に問題 → デバイスピン構造での配慮

(2) デバイス構造開発 ① デバイス構造検討 (東京都市大)

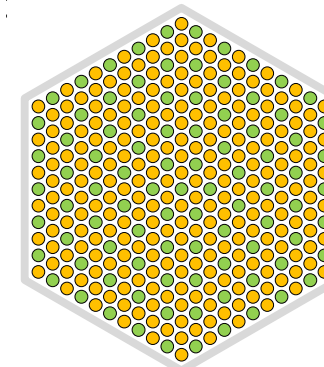
【研究目標】 デバイスの構造を設定する。



	合金系	塩系
組成	(U, Pu)Fe	(U-Pu)Cl ₃ Zr粉26vol.%混合
ピン外径	9.4 mm	9.4 mm
被覆管厚	0.5 mm	0.5 mm
燃料内径	7.3 mm	4.9 mm
スミア密度	0.244	0.660
備考	中空	中心Zr棒



合金系デバイス燃料ピンの断面



- デバイス燃料ピン: 240本
- 予加熱ピン: 91本

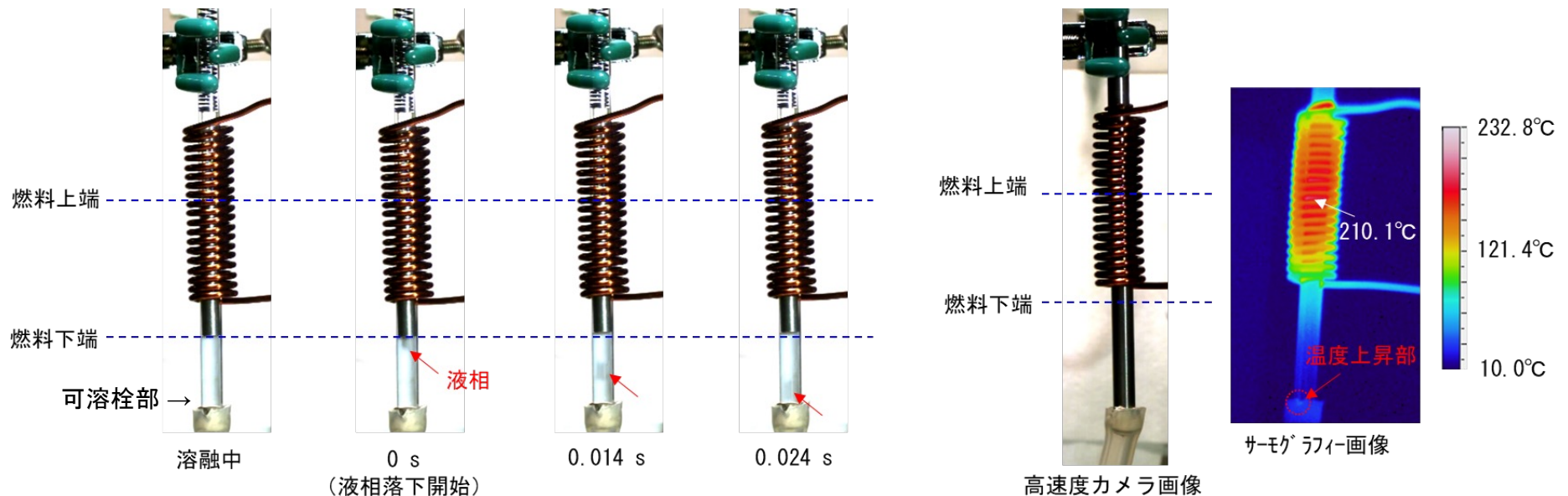
デバイス集合体内のピン配置 (331本ピン束)

デバイスピン構造の概略とデバイス集合体内配置 (例)

(2) デバイス構造開発 ① デバイス試験(日本原子力研究開発機構)

【研究目標】 デバイスを模擬した流動試験で、デバイスの基本特性を把握する。

- デバイス燃料の液相移動挙動のみの予測評価を目的とした**基礎挙動試験**(液相移動に及ぼす粘性の影響を評価)と、デバイス構造全体の成立性評価を目的とした**統合試験**(デバイス燃料の形状等を考慮した構造での液相移動挙動を把握)を実施した。
- ✓ デバイス構造模擬体(模擬被覆管:ガラス管及びSUS管、模擬燃料:Sn中空試料)を用いた統合試験(加熱条件:燃料上部温度>燃料下部温度)では、Sn中空試料は上部から溶融し、液相が中空試料内壁面を伝って下部方向へ移動、中心空孔を通過して下部空間部に落下



ガラス管製模擬体(模擬燃料Sn, 60 mm長さ)の液相移動挙動

- ✓ 燃料上部で溶融した模擬燃料は、自由落下に相当する速度で可溶栓部まで落下、上部よりも低温の下部領域の内面において冷却の影響を受けることなく落下

SUS管製模擬体(模擬燃料Sn, 50 mm長さ)の液相移動後の様子

- ✓ ガラス管試験と同じ挙動が示され、液相移動が適切に行われることを確認



(3) 炉心開発 1 (東京工業大学)

【研究目標】 デバイス配置した炉心の有効性を最大とする配置方法を検討するとともに、デバイス物質の核不拡散性からの要件を明らかにする。

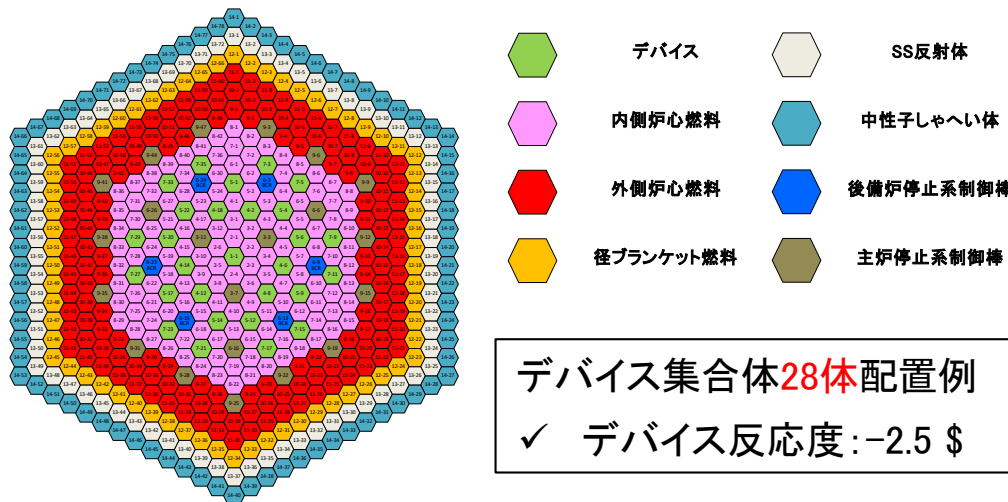
① 実証炉クラスのMOX燃料高速炉とデバイス特性

1) 基準炉心とデバイス効果を最大化する炉心の設定

- 基準炉心: 750 MWe実証炉クラスMOX燃料高速炉炉心
 - ✓ デバイス効果の評価炉心: 従来型均質炉心及び低ナトリウムボイド反応度炉心
- デバイス効果を最大化する炉心
 - ✓ 炉心燃料集合体の1割程度を内側炉心内に分散配置した体系

基準炉心・原子炉仕様	
原子炉熱出力	1785 MWth
原子炉入口／出口温度	395／550 °C
炉心燃料集合体数	286体
ブランケット燃料集合体数	66体
原子炉1次系流量	9,083 kg/s
燃料冷却流量	8,718 kg/s
ピン本数／集合体	311本(※)
ピン径	9.4 mm
ラッパ管内対面距離	191.8 mm
ラッパ管肉厚	5 mm
集合体配列ピッチ	206.8 mm

※ 内部ダクトあり(内部ダクトなしで331本ピン束)



基準炉心断面及びデバイス集合体配置(例)

デバイス効果評価炉心の反応度係数

項目	従来型炉心	低ナトリウムボイド 反応度均質炉心
ドップラー係数 (dk/kk')/Ln(T1/T0)	-6.87E-3	-6.86E-03
燃料密度係数 (dk/kk')/(dM/M)	3.02E-1	3.36E-01
構造材密度係数 (dk/kk')/(dM/M)	-6.99E-2	-5.13E-02
冷却材密度係数 (dk/kk')/(dM/M)	-2.32E-2	-8.93E-02
炉心膨張係数 (dk/kk')/(dR/R)	5.93E-2	5.93E-02
ボイド反応度 [\$]	8	2.9

(3) 炉心開発 2

2) デバイス集合体の基本仕様の検討とデバイス物質の基本核特性の評価

- 工学的安全係数(HSF)と過出力係数を反映し、デバイス燃料温度評価、燃料物質選択

	デバイス燃料	固相線/液相線温度	定格時制限温度	燃料移動開始温度
合金系	U-Pu-Fe (65.6:24.4:10 mol%)	630/781°C	567°C	695°C (固相割合40%)
	LEU(低濃縮U)-Fe (66:34 mol%)	725°C(共晶温度)	636°C	725°C (固相割合40%)
塩系	U-Pu-Cl ₃ (U:Pu = 3:1)	764/802°C	665°C	758°C (可溶栓Ni-Sn溶融)

- Puを含まないLEU-Fe合金がデバイス燃料として利用可能なことを示した。
 - ✓ 定格時制限温度を高くでき、ULOF時はU-Pu-Fe合金デバイス燃料より5秒程度早い動作

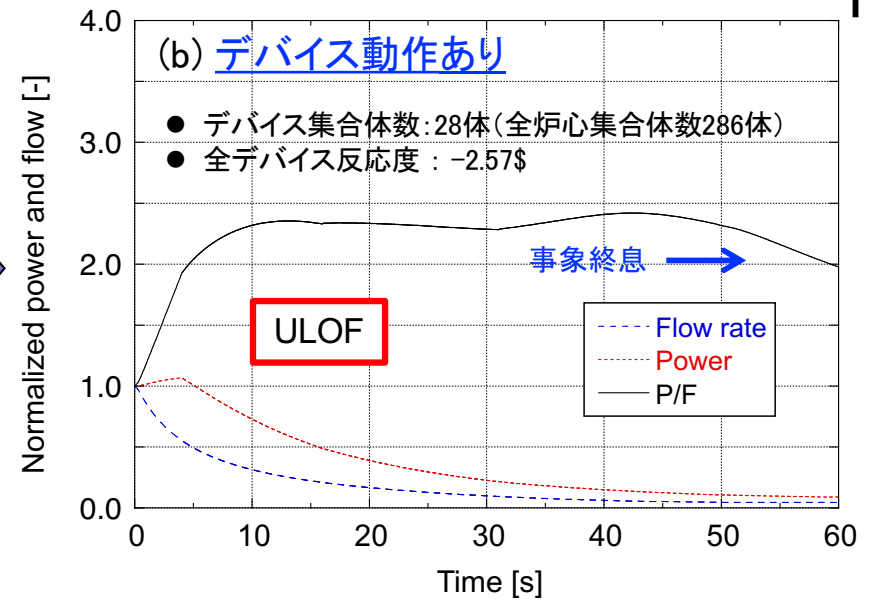
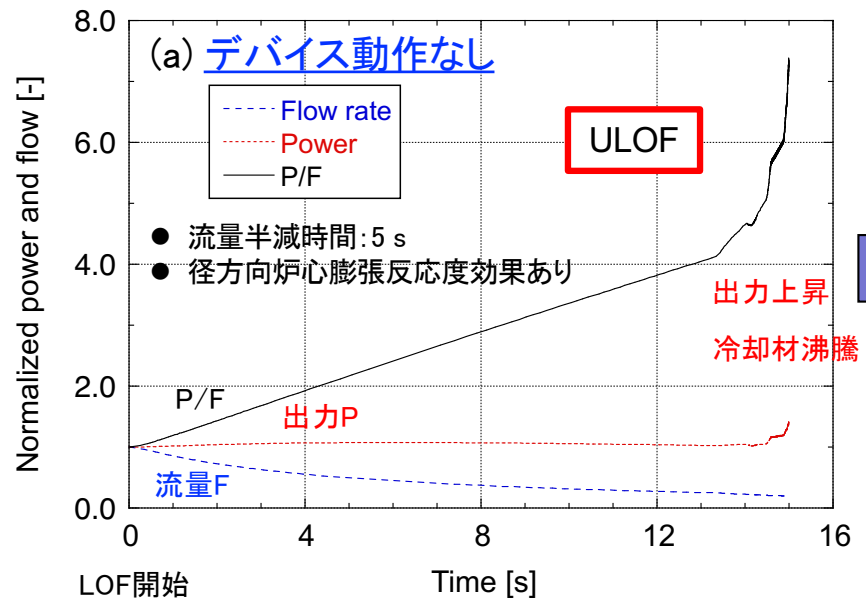
② デバイス特性と適用性の検討

1) 多様な燃料炉心・地震時へのデバイス適用拡大可能性の検討

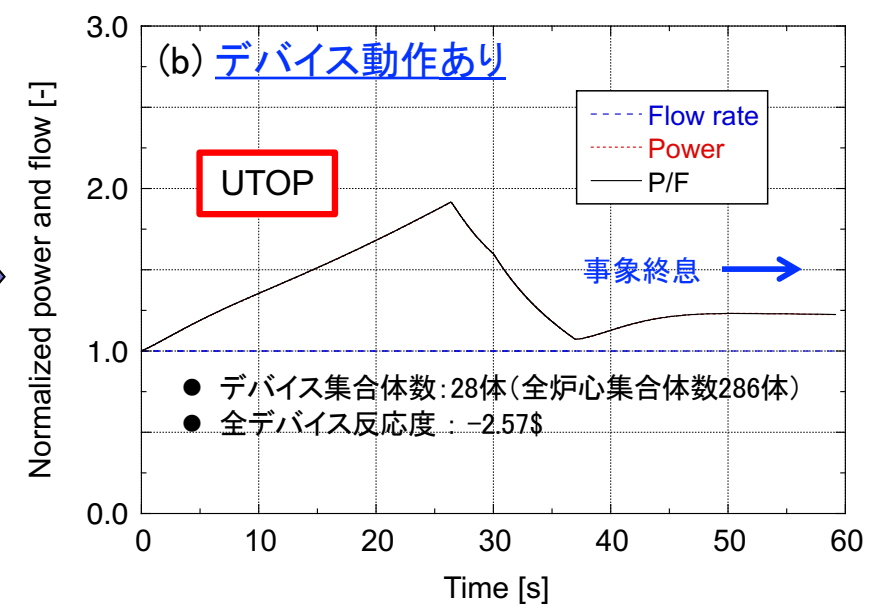
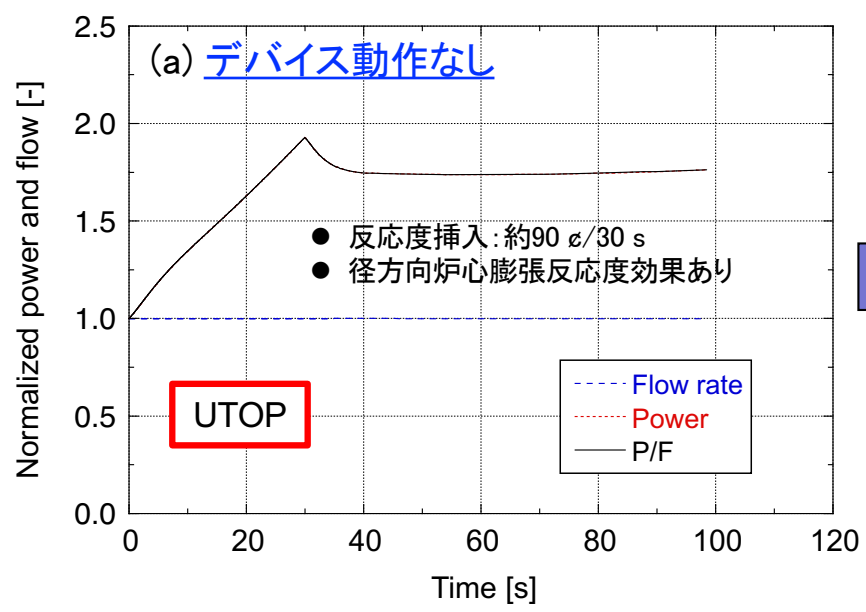
- 下記のケースに対して本デバイスの有効性を確認
 - ✓ 低ナトリウムボイド反応度(+2\$)軸方向非均質炉心(MOX)のULOF事象
 - ✓ 従来型均質炉心及び金属燃料炉心の(ULOF+地震)の重畳条件

2) デバイスのプラント内での管理・取り扱いに関わる課題抽出

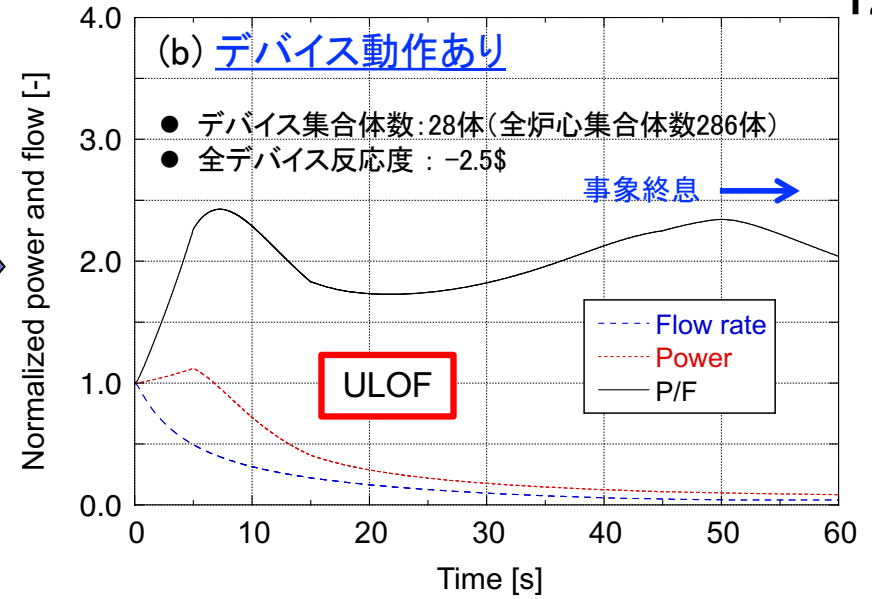
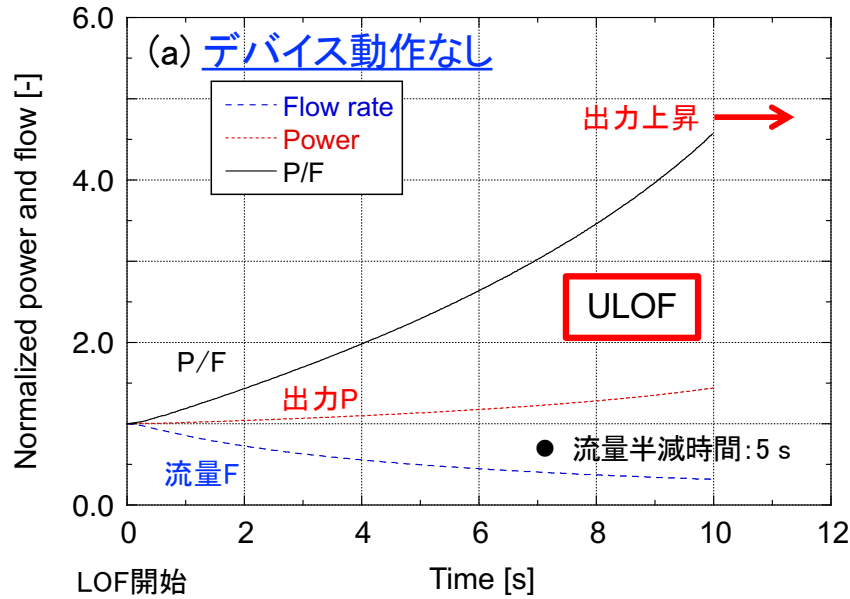
- デバイス燃料の交換時期(反応度寿命)の検討
 - ✓ 連続定格運転832日(基本仕様)～2500日程度(Pu富加度低減・スミア密度等調整)



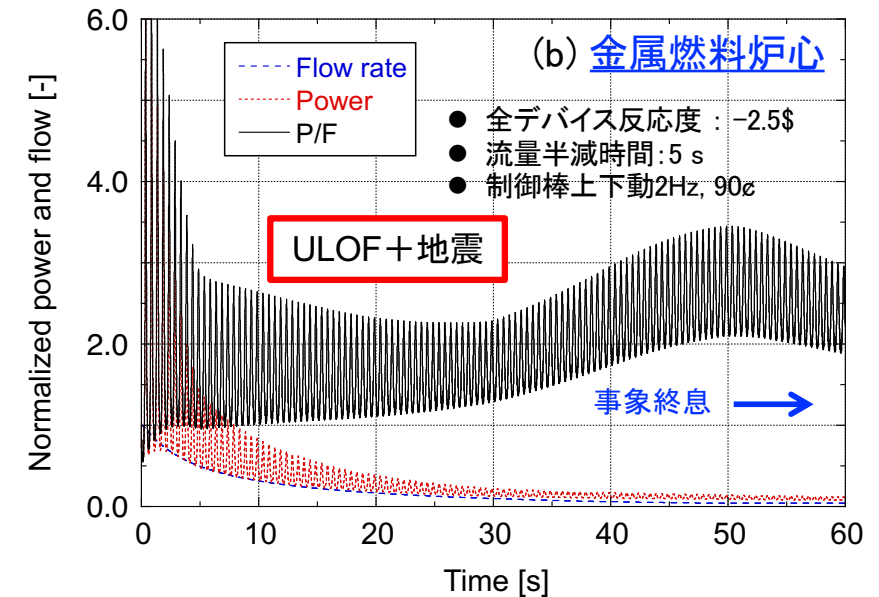
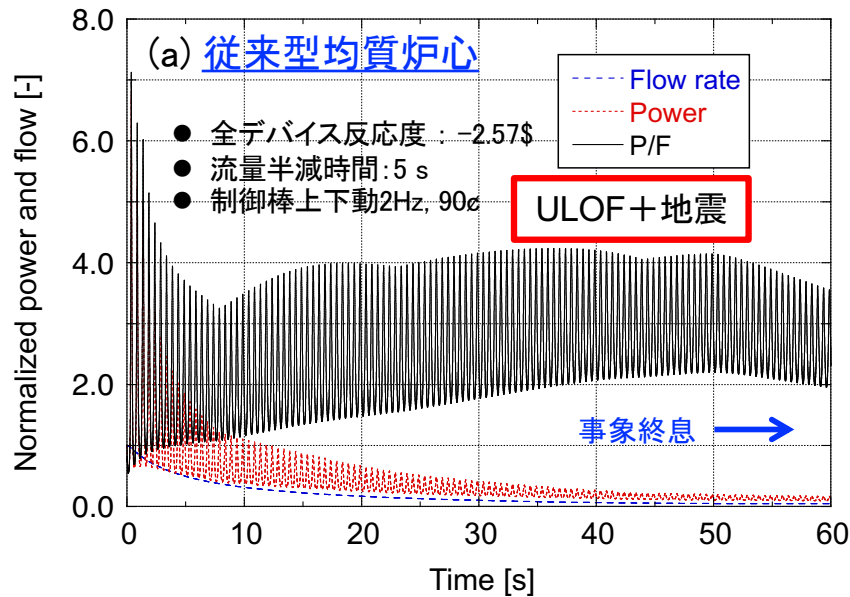
ULOF時の流量F, 出力P, P/Fの時間変化の例(従来型均質炉心)



UTOP時の流量F, 出力P, P/Fの時間変化の例(従来型均質炉心)



ULOF時の流量F, 出力P, P/Fの時間変化の例(金属燃料炉心)



(ULOF+地震)事象時の流量F, 出力P, P/Fの時間変化の例(デバイス動作あり)

(3) 炉心開発 3

③ デバイス物質の核不拡散性からの要件検討

1) 保障措置・核セキュリティ設計に係る調査検討

a) デバイス燃料物性の核不拡散性定量評価対象範囲

- 合金系燃料、塩系燃料の物性値・特性値を基に核不拡散性を検討
 - ✓ そのための基礎データとなるデバイス単体のPu、Uインベントリーを評価

b) デバイス燃料物性の核不拡散性定量評価

- Puを含むデバイス新燃料の取り扱い経路と保障措置機器の設置例を想定し、核セキュリティと保障措置両方に共通となる、核物質を金属に転換する処理フェーズと、使用(核爆発装置(NED)製造)フェーズ、プラントにおける取得フェーズについて評価
 - ✓ MOX燃料と同等の不正利用価値となり、デバイス燃料候補として選択した合金系燃料、塩系燃料は選定できることを確認
 - ✓ 本デバイスを具備したプラントでは、たとえATWS事象が発生した後も、保障措置上のアイテム管理が継続できることが示された。

2) デバイス燃料の臨界安全性の調査検討

- 鋼材キャスク様の容器(ナトリウム中・水中)内にある作動前後のデバイス集合体単体の臨界性評価を行い、本デバイスの燃料取扱いは工学設計可能なことを示した。

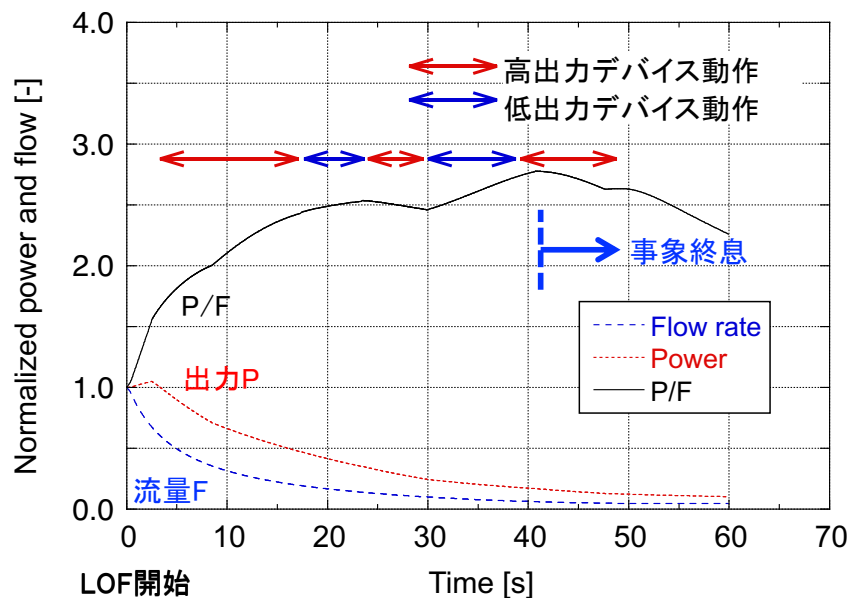
(4) 安全評価 1 (九州大学)

【研究目標】 過渡時の炉心挙動とデバイスの応答特性からデバイスの最適化を行う。

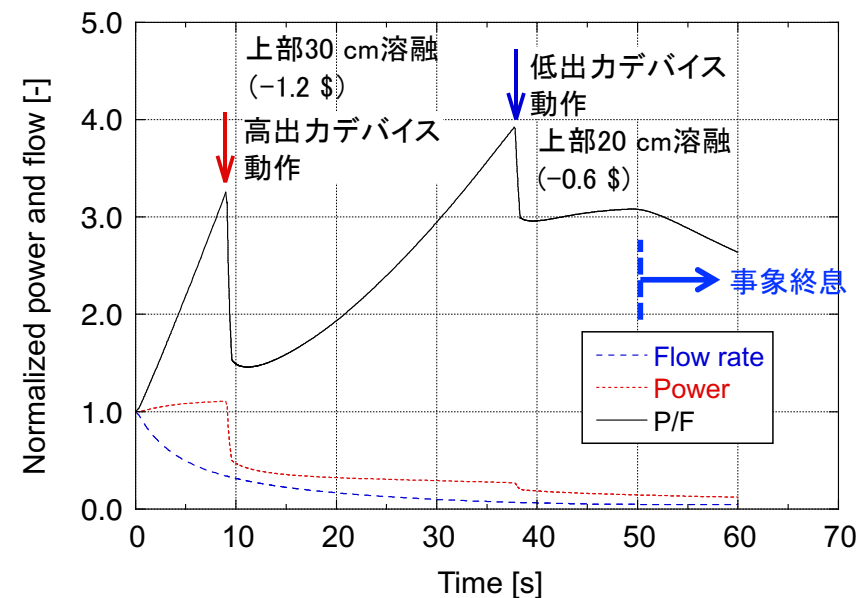
- デバイス応答特性評価 (従来型均質炉心; ボイド反応度 約8\$; 全デバイス反応度 -2.57\$)

a) U-Pu-Fe合金系燃料デバイス

- ✓ ULOF事象に対して、デバイス動作の**非同時性を考慮**しても、デバイスが同時動作の挿入反応度とほぼ同じ反応度が挿入され、事象が終息することが示された。
- ✓ エクストルージョン対策として**可溶栓を設置**した場合も、可溶栓が動作によりデバイス反応度が挿入、事象が終息することが示された。



(a) デバイス動作の**非同時性を考慮**



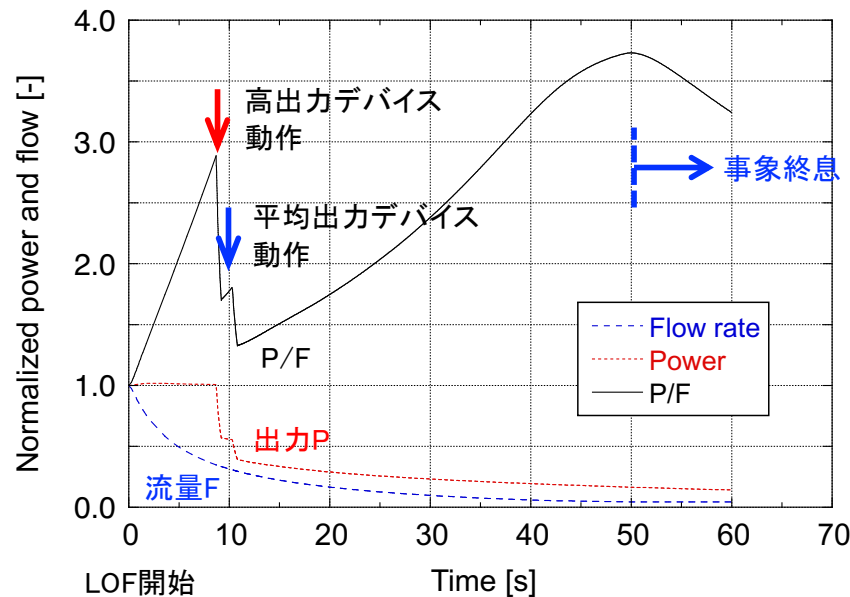
(b) **可溶栓溶融** (Al-Si合金: 577°C) による動作

ULOF時の流量F, 出力P, P/Fの時間変化の例 (従来型均質炉心: U-Pu-Fe合金系燃料デバイス)

(4) 安全評価 2

b) 塩系燃料デバイス

- ✓ デバイス集合体を28体装荷した炉心では、事象終息に必要なデバイス反応度は若干不足するが、2%程度増加することで、事象を終息できることが分かった。さらに、デバイス動作の非同時性を考慮した場合でも、事象が終息することが示された。



- 装荷デバイス集合体数: 28体 (331本ピン)
- 全デバイス反応度: $-1.53\$$
- 可溶栓溶融 (Ni-Sn合金: 750°C) による動作
- デバイス動作の非同時性を考慮

事象終息に必要なデバイス反応度: $-2.1\$$
 ➔ 397本ピン集合体で32体 (+4体) 相当

ULOF時の流量F, 出力P, P/Fの時間変化の例 (従来型均質炉心: $(\text{U-Pu})\text{Cl}_3$ 塩系燃料デバイス)

- 以上a)、b)より合金系及び塩系燃料デバイスについて、ULOF/UTOPの起因過程における過渡特性を評価し、デバイス動作時の応答特性を最適化することができた。

(5) 総合評価 1(九州大学)

【研究目標】(1)～(4)の検討に基づき、デバイス構造とデバイスの有効性を示す。

- 実機への適用における工学的な開発課題を整理し、実証試験の実施、デバイス燃料材の物性データの取得等の対策を示した。この検討に基づき、合金系燃料デバイスと塩系燃料デバイスに対する実証試験項目を抽出し、実用化を見据え、照射炉(常陽及び米国・ATR, TREAT炉)を用いた実証試験計画を策定した。

各研究項目における課題の整理(対策が必要な課題を抜粋)

項目	検討結果	課題	対策
① 合金系燃料			
中空合金試料作製	機械加工で試験用燃料製造	量産には適さない可能性有(試験燃料ピン製造可能)	管引き抜き加工等を参考に検討
② 塩系燃料			
熱伝導率の向上	Zr粉添加の効果が確認できない	定常時に溶融する可能性	デバイスピンの細径化で線出力低減
③ 可溶栓			
燃料物質との共存性	合金系燃料では問題なし、 模擬塩系燃料CeCl₃との反応性大	塩系燃料では、可溶栓の腐食により健全性が確保できない。	可溶栓/塩ペレット間に合金ペレットを挟み直接接触を回避
④ デバイス試験			
合金系燃料	溶融燃料は中空部を固化せずに落下し、低温部で固化する。発熱状態での落下も確認	エクストルージョン発生時の模擬は困難 (泡沫発生設計対策として可溶栓を導入済み)	解析による評価 実証試験での確認

(5) 総合評価 2

各研究項目における課題の整理(続き)

項目	検討結果	課題	対策
⑤ 炉心評価			
誤作動時の炉心挙動	誤作動時にも出力分布の歪みは小さい	デバイス動作挙動の実証(燃料落下挙動、特にエクストルージョン時)	実証試験
各種炉心への適用性(金属燃料、低ナトリウムボイド反応度、低線出力)	適用性を確認	物性データの確認(U-Pu-Zr合金、U-Fs合金データ・知見をもとにしたU-Pu-Fe合金物性の過渡時データの把握)	物性データ取得
塩系燃料デバイス装荷炉心の挙動	28体のデバイス集合体装荷炉心の1.02倍のデバイス反応度で事象終息するが、塩系燃料の熱伝導率向上が期待できないため、細径ピンの採用で低線出力とするデバイス仕様の変更が必要	細径ピンを用いたデバイスの設定・評価 物性データの確認(熱伝導率、熱膨張率、溶解時膨張率) 可溶栓動作前の溶融塩膨張による負の反応度効果の検討	物性データ取得 実証試験
⑥ 安全評価			
実機条件での適用性(デバイス非同時性、燃焼による反応度低下、地震時反応度考慮等)	実機条件でのデバイス動作、有効性は過渡解析で確認	デバイス動作の実証	実証試験

(5) 総合評価 3

項目 \ 期間(年)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
・ 燃料落下挙動 (炉外試験)	模擬燃料試験 ・ 燃料製造 ・ 炉外試験 ・ 挙動評価										
・ 燃料落下挙動 (炉内試験) ・ 燃料照射挙動	炉内試験予備検討			U-Fe 燃料試験 ・ 燃料製造 ・ 定常照射試験 ・ 燃料溶融 (準定常) ・ 実施：常陽 ・ 挙動評価				U-Fe 燃料試験 ・ 燃料製造 ・ 定常照射試験 ・ 燃料溶融 (準定常) ・ 実施：米国 ATR, TREAT ・ 挙動評価			
								U-Pu-Fe 燃料試験 ・ 燃料製造 ・ 定常照射試験 ・ 過渡挙動 ・ 燃料落下 (過渡) ・ 実施：米国 ATR, TREAT ・ 挙動評価			

照射炉を用いた実証試験計画(合金系燃料デバイスの例)

成果のまとめ

- SFRにおいて一部の燃料集合体に置き換えて装荷することで、ULOF/UTOP時の炉心損傷事故の発生を防止する集合体型の受動的炉停止デバイスの工学的な成立性を示した。
 - ✓ 単純な物理現象のみで動作する熱的即応性を有する優れた受動性を有し、複数のSFRの設計概念に対して、炉心損傷の発生を防止できる確実性が極めて高いことが示された。
- 実機への適用における工学的な課題を抽出するとともに、実用化を見据えた炉内試験を含む実証試験計画を策定した。
- 本研究で検討した新しい受動的炉停止デバイスは、国際標準となるSDC/SDGに沿うものであり、既存の炉心設計に対する適合性も高い。
 - ✓ 従前の受動的炉停止方策と併用することで、原子炉停止の信頼性を飛躍的に向上し、深層防護における炉心損傷防止策に対する独立な防護ラインを強化することができる。
- 今後、実用化に向けた検討が進み、安全設計への導入が実現すれば、炉心損傷の頻度が大幅に低減され、当該事象を設計考慮対象から実質上排除できる高速炉を実現できる可能性がある。

謝 辞

本研究は文部科学省の原子力システム研究開発事業 JPMXD0219213057の助成を受けたものです。

プロジェクトの立案・実施にあたっては、電力中央研究所の故 遠藤 寛氏、東芝ESSの坪井 靖氏に貢献・協力を頂いたことを付記します。