

新型炉部会セッション  
熔融塩炉の国内外開発動向と基盤技術

(1)

熔融塩炉の特徴、塩化物熔融塩高速炉の開発状況と研究課題

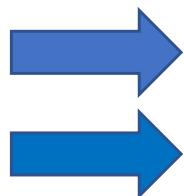
日本原子力学会2023 秋の大会

山脇<sup>1</sup> 道夫

〈一社〉次世代エネルギー研究・開発機構 (BERD)

# 熔融塩炉の特徴（メリット）

- 広い温度範囲(300～1000C)で常圧に近い低蒸気圧
- 透明である（Actinideが含まれると濁る）
- 化学的に不活性で空気、水等と激しく反応しない
- 放射線照射によって分解せず、物性変化も生じない
- 高密度、高熱容量で、高い比出力が得られる
- 液体のため負のフィードバックが大（ボイド係数、温度係数とも）
- Cs, Iなど揮発性FPの蒸気圧が低く環境への放出少
- He, H, Xeなどは容易に分離できる
- 事故時には燃料塩を退避可能（安定収束可）
- アクチニド溶解度大のため放射性廃棄物消滅性能がよい



安全炉として優れている

放射性廃棄物消滅炉として優れている

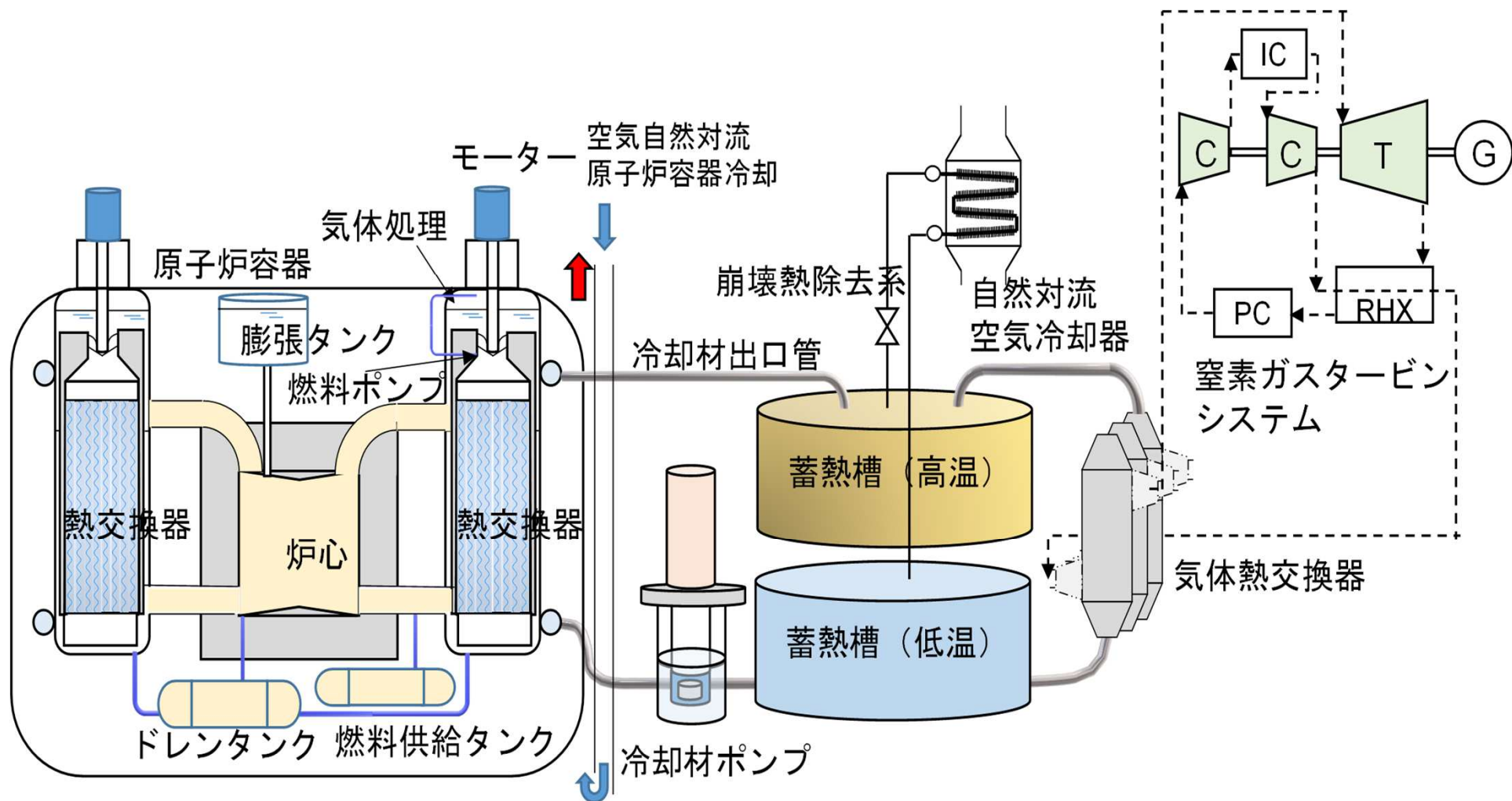
## 熔融塩炉の特徴（デメリット）

- 燃料の密度・濃度変化による反応度変動のおそれ
- 一次系内の誘導放射能やFP等の沈着
- 燃料による腐食や質量移行
- 炉心を離れる燃料中の遅発中性子損失
- 核分裂性物質の炉心外保有量の増加
- 温度低下による粘性増大や凝固



# 塩化物溶融塩高速炉の開発動向

BERDの提案：IMSFR（統合型溶融塩高速炉）



# IMSFR プラント諸元

プラント熱出力		700MWt
1 次系	炉心入口温度	約 600°C
	炉心出口温度	約 670°C
	炉心寸法	直径：2.3m, 高さ：2.4m
	出力密度	約 70MW/m <sup>3</sup>
	燃料組成	35NaCl+35CaCl <sub>2</sub> +20(UCl <sub>3</sub> +UCl <sub>4</sub> )+10(PuCl <sub>3</sub> +MACl <sub>3</sub> )
2 次系	ループ数	4 ループ
	冷却熔融塩組成	27.5NaCl+32.5KCl+40MgCl <sub>2</sub>
3 次系	作動流体	窒素ガス
	熱効率	約 38.4%
燃料処理系		タンク移動方式
機能と性能	安全性	負の温度反応度による固有の安全性を有する
	信頼性	水素発生や蒸気爆発の原因を有していない
	機動性	ポンプ回転数変化による日負荷追従
	放射性廃棄物対策	放射性廃棄物の効率的な燃焼と持続可能性

# BERDの研究目標：IMSFRの優れた性能の確認 と設計用データの取得

## IMSFRの優れた性能の確認：

- ・ ①核的安全性：過渡事象時の安全性：  
種々の過渡事象解析で原子炉の安全性を明確にする
- ・ ②核的燃焼特性：放射性廃棄物減容化とU資源有効利用：  
天然塩素とCl-37の比較

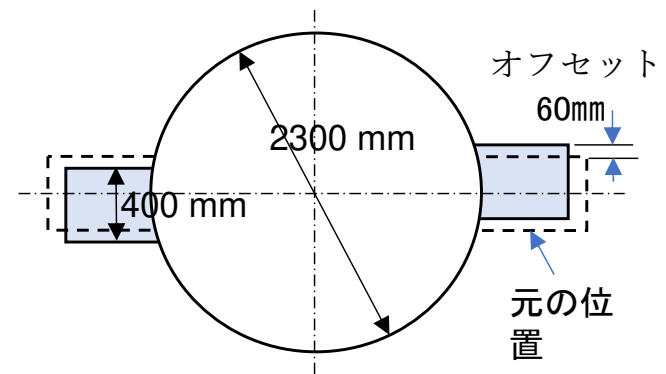
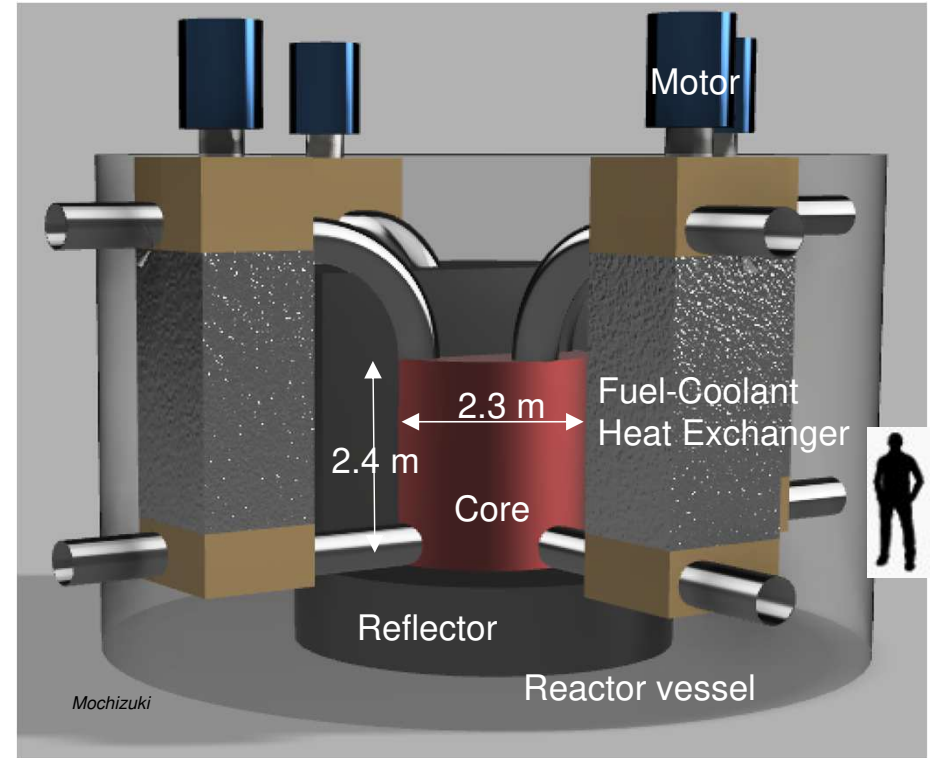
## 設計用データの取得：

- ・ ③溶融塩材料の熱物性：粘度の温度依存性、融点の組成依存性などの測定
- ・ ④再処理プロセス構築：電気化学的物性測定
- ・ ⑤構造材料の溶融塩との両立性：腐食への照射と組成の影響の測定  
He+やNi+照射、LaやCe含有の効果
- ・ ⑥臨界性：出力と炉心寸法、TRU濃度などの関係を解明

# ①核的安全性：過渡事象時の安全性

望月 弘保 (東工大)

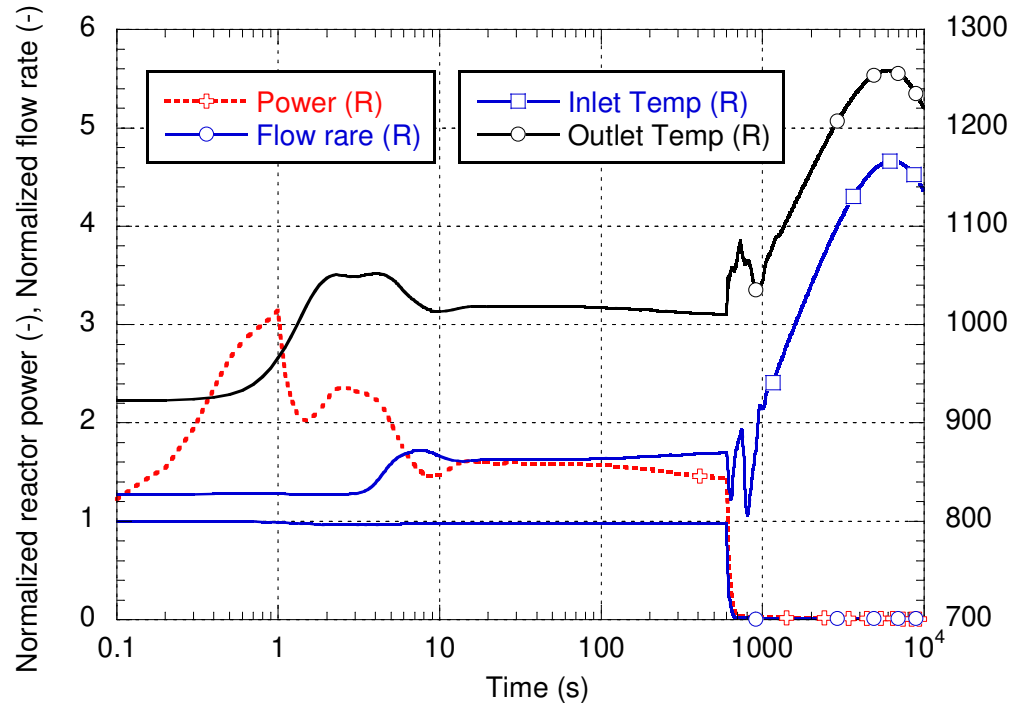
- 種々の過渡事象の核熱連成解析で原子炉の安全性を明確にできた；
  - RELAP5-3Dコード：プラントの長期挙動を解析
  - FLUENTコード：短時間の過渡挙動を解析
- 4事象を解析；
  - 反応度投入事故(URIA),
  - 全電源喪失事故(USBO),
  - 燃料流量喪失事象(ULOFF),
  - ヒートシンク喪失事象(ULOHS)



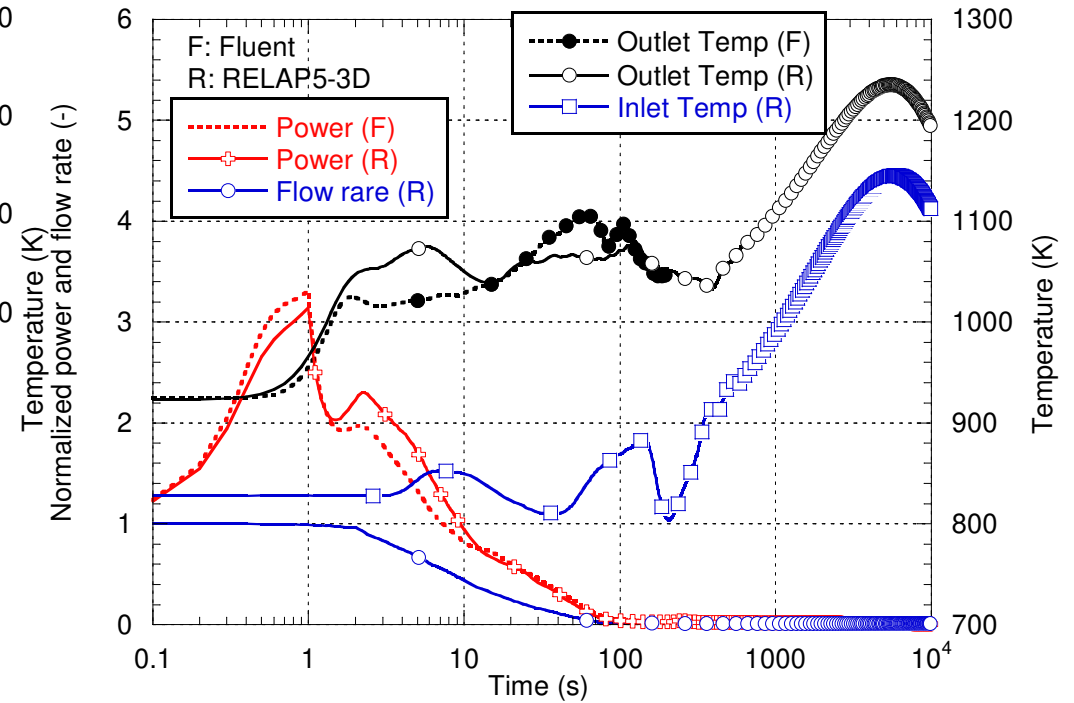
研究中の塩化物溶融塩高速炉

# URIA時の過渡挙動

2 \$ が1秒間にランプ状に投入される事を想定)



燃料循環系のポンプを10分後に手動停止



燃料循環系の運転を2秒で停止

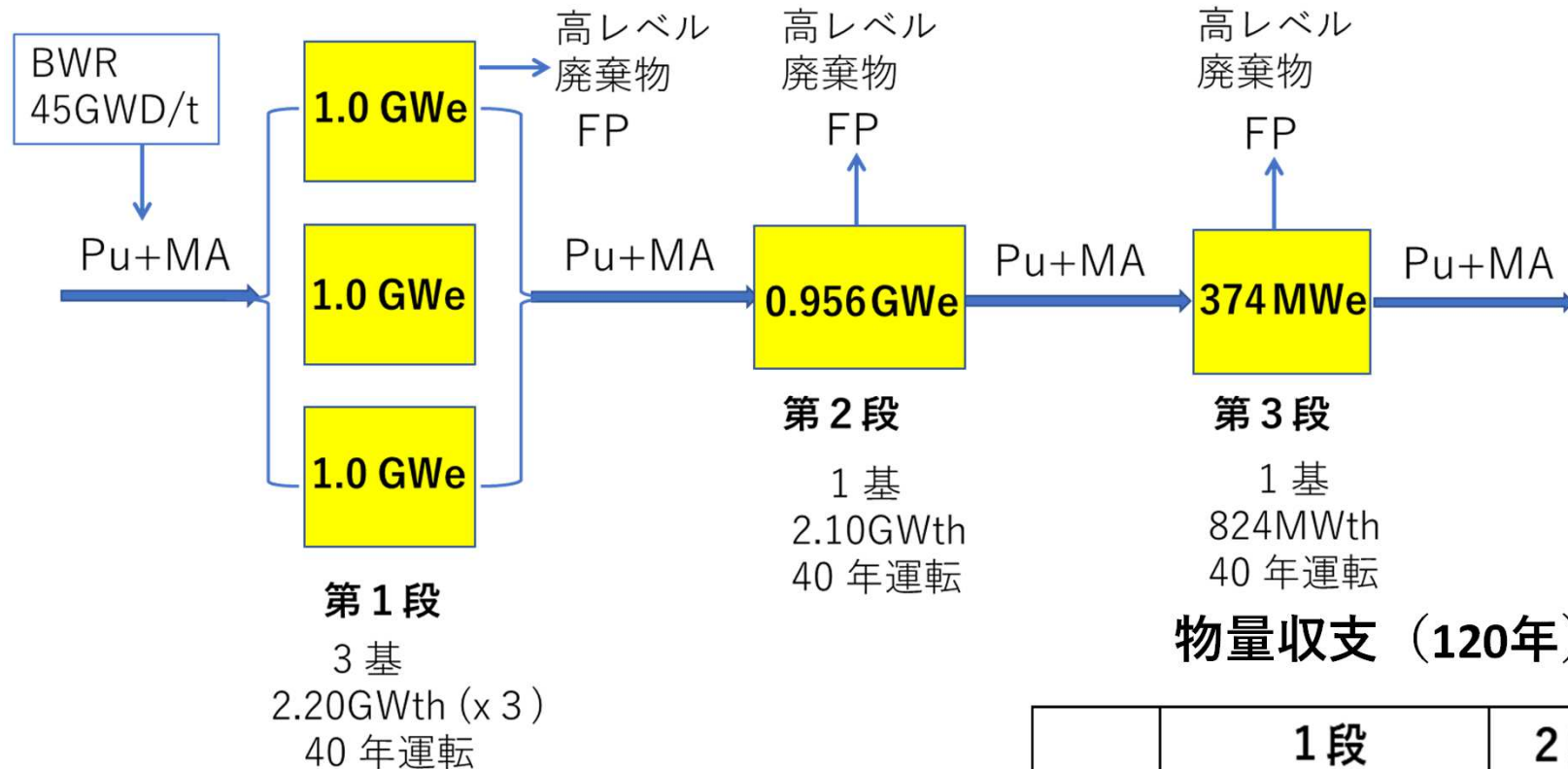
(結論) 現時点で厳しいと考えられる過渡事象に対して安全保護系バイパスを考えた場合、プラント健全性を脅かすものでないことが明確になった。



# ②放射性廃棄物減容化とU資源有効利用

三田地紘史、島津洋一郎 (BERD)

## 三段消滅方式による廃棄物減容



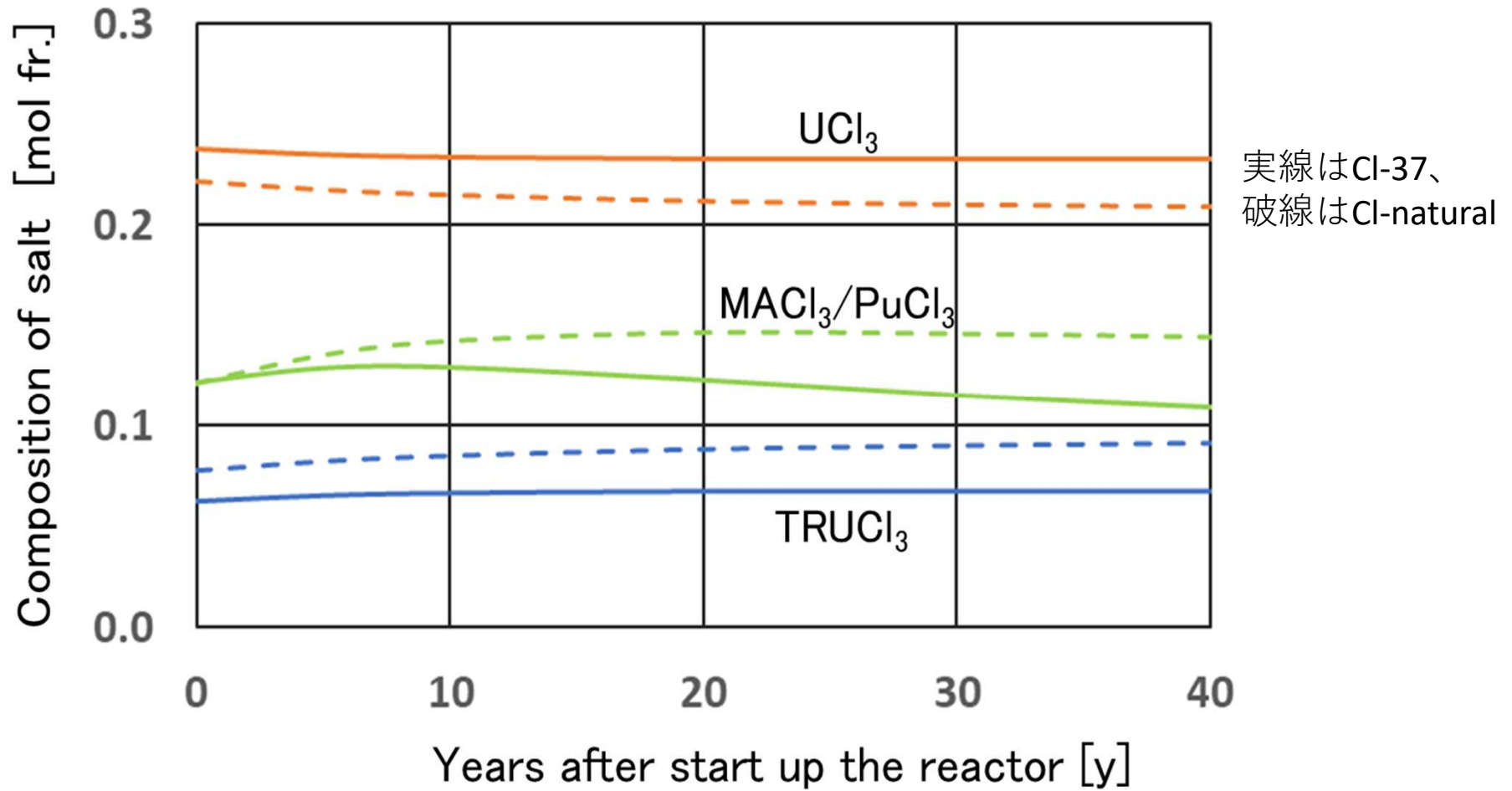
### 三段焼却方式

- 1段目3.0GWeにTRUを投入し40年間運転する。
- 次に40年後に1段目炉内に残留するTRUを使用し2段目0.956GWeを40年間運転する。
- 更80年後に2段目炉内に残留するTRUを使用して3段目374MWeを40年間運転する。

	1段		2段	3段
	投入	残留	残留	残留
	[ton]	[ton]	[ton]	[ton]
Pu	120.65	39.77	15.38	6.45
MA	14.54	7.85	4.29	2.27
TRU	135.24	47.63	19.67	8.71

- 劣化U供給でU資源有効利用

燃料塩各成分の濃度変化（再処理率21.1 l/d）



- U有効利用を目指す小型熔融塩高速炉の燃焼特性

- **700MWt炉**（天然塩素使用）：

転換比もウラン利用率も共に0.57になる。

- **700MWt炉**（Cl-37使用）：

転換比は0.82に、ウラン利用率は0.81になる。

----→ 塩素の同位体分離設備の開発が必要。

- **自給型2.2GWt炉** (Cl-37使用)：

転換比もウラン利用率も共に1.0になる。

----→ 将来的にはCl-37使用の自給型炉が望ましい。

### ③ 溶融塩材料の熱物性：

粘度の温度依存性、融点の組成依存性などの測定

有田裕二、萩原航輝、山下京也（福井大）

#### 1) 塩化物溶融塩の粘度測定

実施内容

- 模擬燃料塩  $35\text{NaCl}+35\text{CaCl}_2+30(\text{La,Ce})\text{Cl}_3$  について、 $700\sim 400^\circ\text{C}$ における粘度測定を実施し、高融点物質の析出等による粘度増大の温度域を明らかにした。

結果

- 粘度測定の結果（右図）析出が始まる温度に対応した $500^\circ\text{C}$ 以下で粘度が急増する。
- 十分粘度が小さい温度領域を維持することが重要

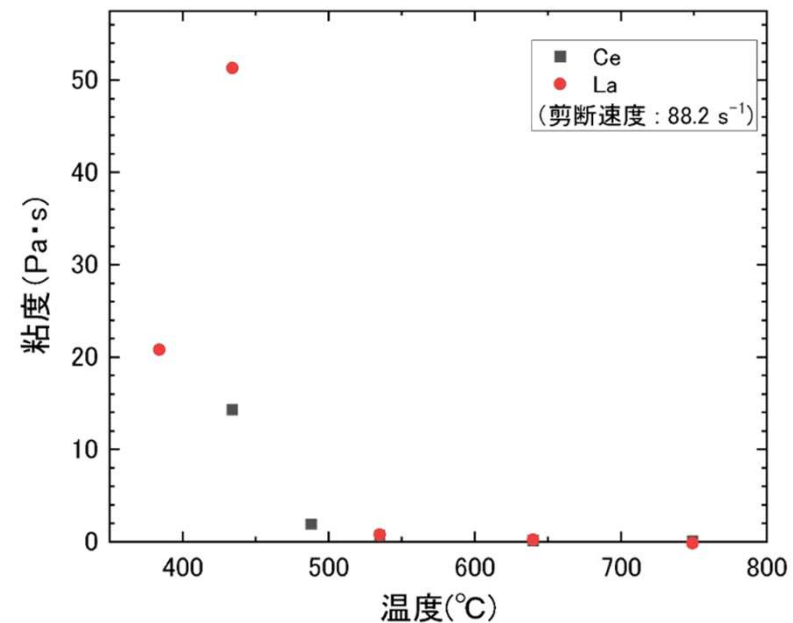


図 粘度測定結果

## 2) 塩化物燃料塩の融解挙動 (融点把握)

**目的：** 炉心設計や運転温度などの設定のため、融点・高融点化合物の有無について確認する。

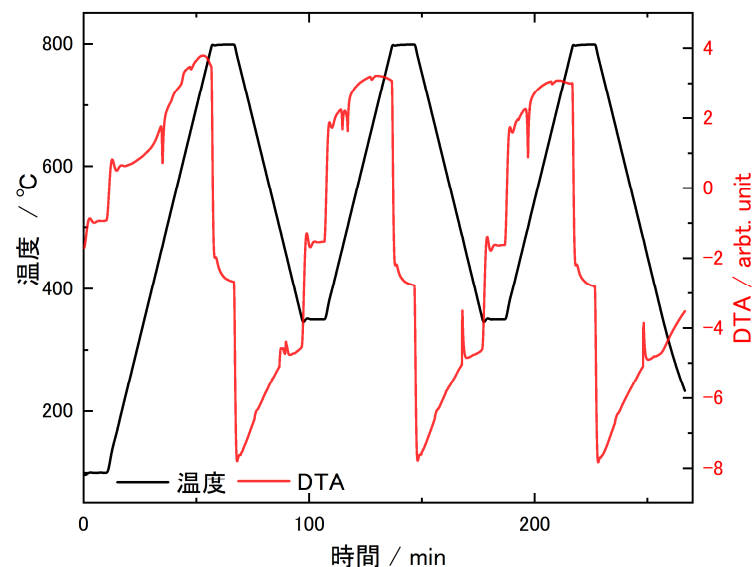
想定燃料塩  $35\text{NaCl} + 35\text{CaCl}_2 + 20(\text{UCl}_3 + \text{UCl}_4) + 10(\text{PuCl}_3 + \text{MACl}_3)$

模擬燃料塩  $35\text{NaCl} + 35\text{CaCl}_2 + 30 (\text{LaCl}_3 \text{ or } \text{CeCl}_3)$

擬三元系の塩試料を作製し (下写真)、  
融解・凝固挙動をDTAで観察し (右図)、  
融点等の情報を得た。



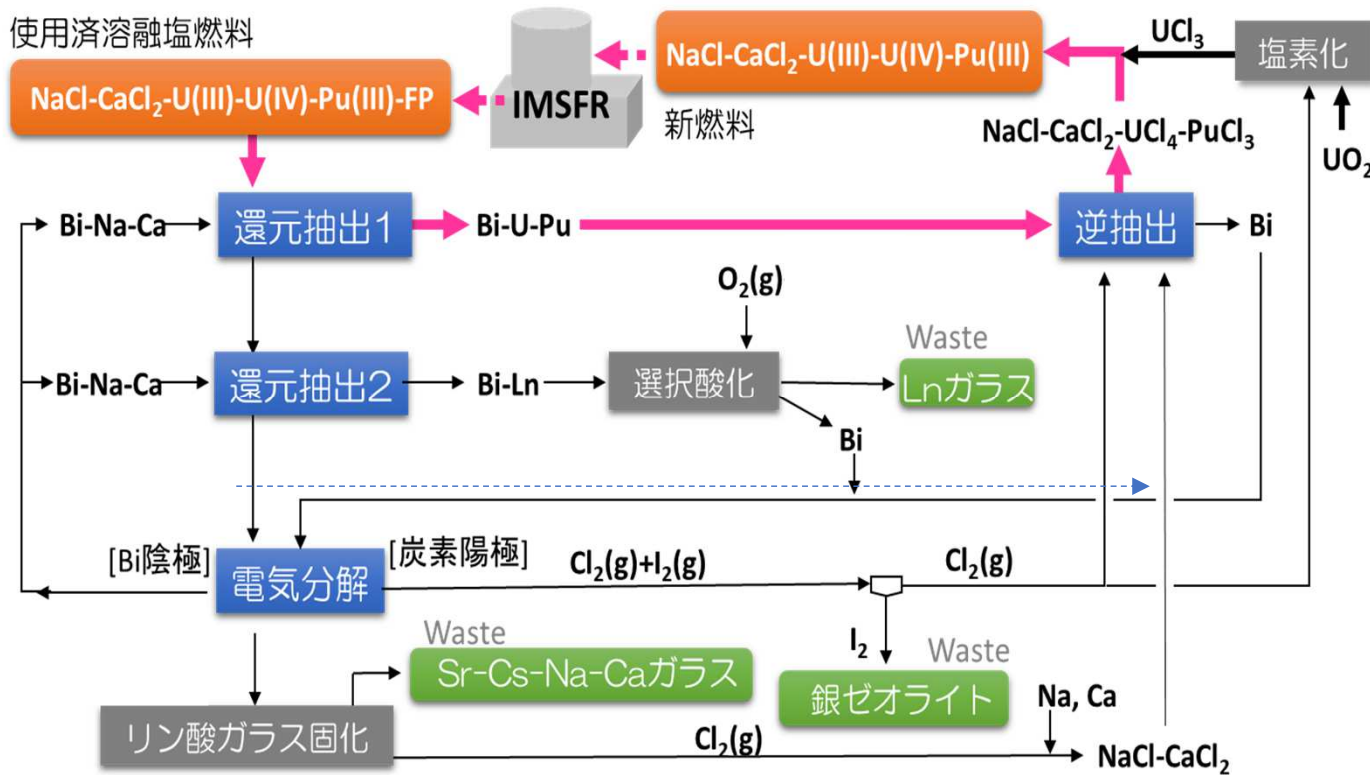
作製試料の様子



融解・凝固時のDTA測定結果

# ④ 塩化物溶融塩燃料の再処理プロセス構築

村上毅、小山正史（電中研）



## コンセプトと特徴

1. 溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>中での化学・電気化学反応を利用  
 → **技術的成熟度の高い金属燃料乾式再処理**と類似の技術  
 → 他のベース塩(**NaCl単塩**)にも適用可
2. 主要工程のアクチニド回収 / FPからの分離に還元抽出を採用  
 → **固相なし**、液相のみ
3. **塩素 (<sup>37</sup>Cl)** の回収リサイクル

山脇道夫、望月弘保、小山正史、有田裕二、三田地紘史、島津洋一郎、木下幹康、吉岡律夫、日本原子力学会誌ATOMO Σ、63 (2021) 791.

# 再処理プロセス構築のための塩化物溶融塩の電気化学物性測定

## ① 溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>中におけるアクチニドや核分裂生成物の酸化還元電位

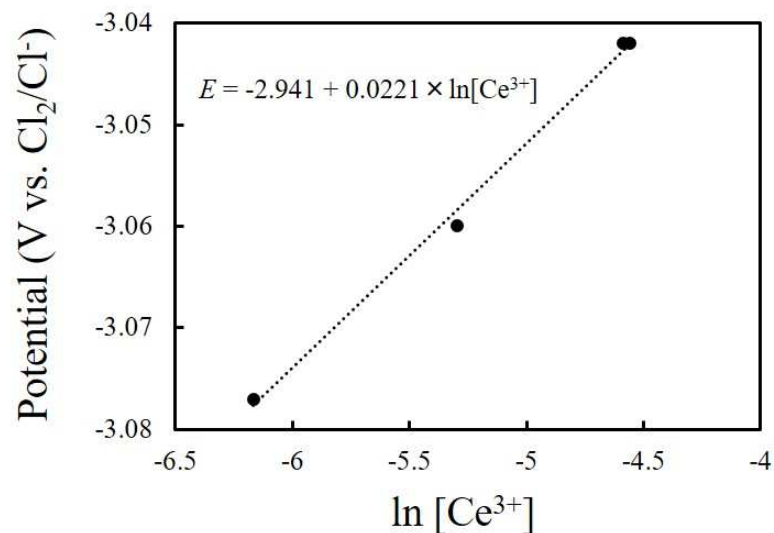


図 溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>(823 K)中におけるCe酸化還元電位のCeCl<sub>3</sub>濃度の対数に対するプロット

Ceの標準式量酸化還元電位  
 $E^0 = -2.941$  (V vs. Cl<sub>2</sub>/Cl<sup>-</sup>)

## ② 溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>と液体Bi間におけるアクチニドや核分裂生成物の分配挙動

表 溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>(823 K)と液体Bi間の希土類(La, Ce, Pr, Nd, Gd)の\*分離係数 (Ce基準)

	SF <sub>La</sub>	SF <sub>Ce</sub>	SF <sub>Pr</sub>	SF <sub>Nd</sub>	SF <sub>Gd</sub>
<b>RUN1</b>	<b>3.5</b>	<b>1</b>	<b>0.78</b>	<b>0.82</b>	<b>4.2</b>
<b>RUN2</b>	<b>3.2</b>		<b>0.84</b>	<b>0.86</b>	<b>4.1</b>

$$*Ceを基準とした分離係数SF = \frac{C_{M^{3+}}}{C_{M_{in\ Bi}}} \times \frac{C_{Ce_{in\ Bi}}}{C_{Ce^{3+}}}$$

### 今後の課題

得られた物性値(酸化還元電位や分配挙動)に基づいて、再処理プロセスにおけるアクチニドや核分裂生成物のマスバランス評価

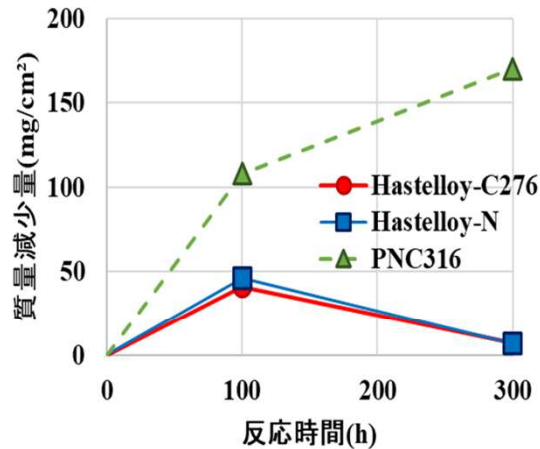
# ⑤ 構造材料の溶融塩との両立性：腐食への照射と組成の効果の測定

## 1) 塩化物共晶塩とNi基合金およびステンレス鋼の腐食挙動研究

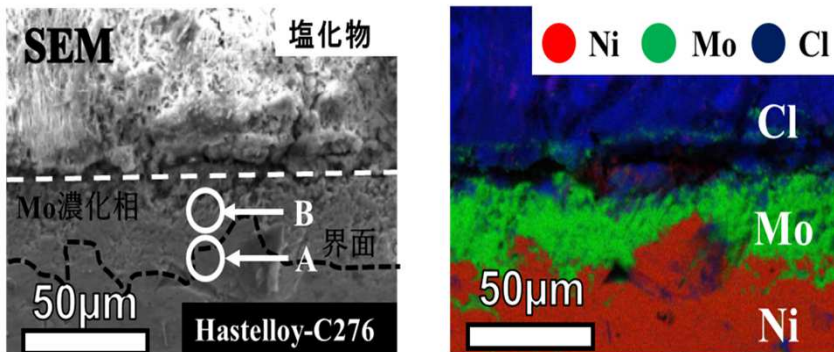
福元謙一、中川奎、有田裕二 (福井大)

塩化物溶融塩炉内環境下を模擬した反応試験

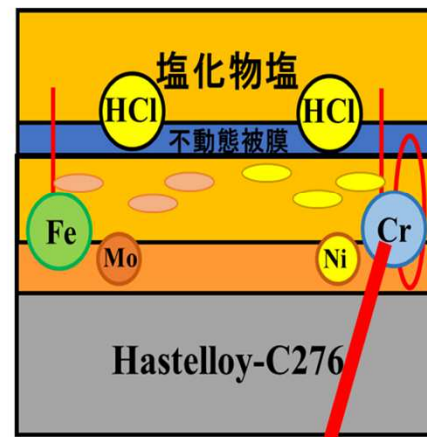
- ✓ 構造材料の腐食挙動の知見を取得
- ✓ 塩化物環境下での材料選択の指針を検討



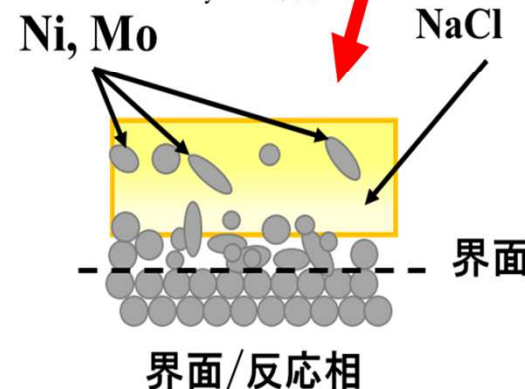
ステンレス鋼トハステロイ合金 + NaCl-CaCl<sub>2</sub>-CeCl<sub>3</sub>  
600°C, 100h, 300h 反応試験の質量減少量(精製後)



650°C 100h Hastelloy-C276 SEM観察結果  
(左)界面SEM像 (右)Ni, Mo, Cl重複マッピング結果



Hastelloy-C276反応メカニズム



腐食速度/断面組織観察

- ◆ Hastelloy-C276断面組織観察から反応相を同定, 腐食形態は均一腐食.
- ◆ Hastelloy-C276が最も耐食性に優れていた.
- ◆ Ni, Mo, Wの塩化物塩に対する耐食性の違いによると考えられる.

今後の検討課題

- Hastelloy-C276でグラファイトるつぼ+精製塩で反応試験
- 溶融塩精製が必須
- 不純物影響を定量化



## 2) 塩化物共晶塩とNi基合金の照射後腐食試験による照射下共存性研究

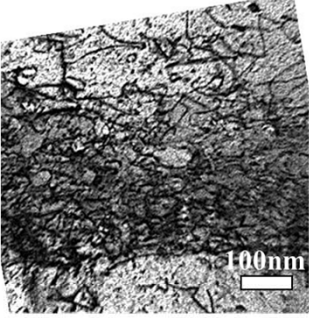
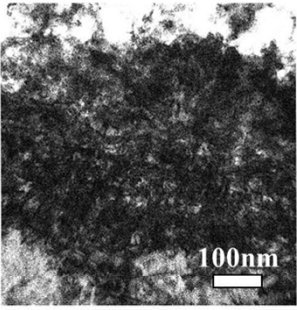
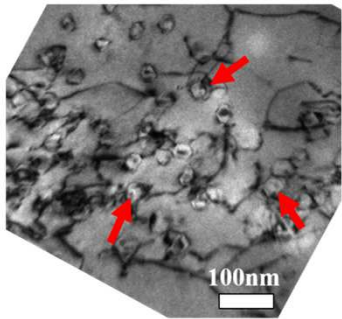
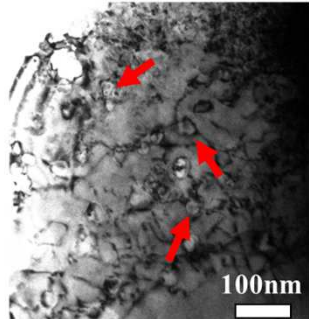
福元謙一、中川奎、有田裕二 (福井大)

**照射条件：** Heイオン照射を行ったNi基合金に腐食試験を行い、照射材と塩の共存性を明らかにする。

- 照射核種：He<sup>+</sup>
- 最大損傷量：1.67dpa
- 加速器：若狭湾エネルギー研究センター タンデム加速器

**試験条件：** • 600°C, 10h, Ar雰囲気

**実験結果：**

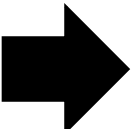
	腐食前	腐食後	転位とボイドの数密度(Hastelloy-N)		
Hastelloy-C276			腐食前	腐食後	
			転位 (n/m <sup>2</sup> )	1.5×10 <sup>14</sup>	1.4×10 <sup>14</sup>
			ボイド (n/m <sup>3</sup> )	1.3×10 <sup>21</sup>	1.2×10 <sup>21</sup>
Hastelloy-N			ボイドの平均直径(Hastelloy-N)		
			腐食前	腐食後	
		平均直径 (nm)	34 ± 6.6	35 ± 8.5	

## 得られた結論

- Hastelloy-C276ではボイドが見られない  
⇒Niよりも寸法が大きいCrがボイドを捕獲し、ボイドの形成を阻害

 耐照射損傷性はHastelloy-C276の方が高い.

- 照射欠陥が集中した領域の大きさ⇒**ほぼ変化なし.**
- Hastelloy-Nの照射欠陥⇒**大きな変化なし.**

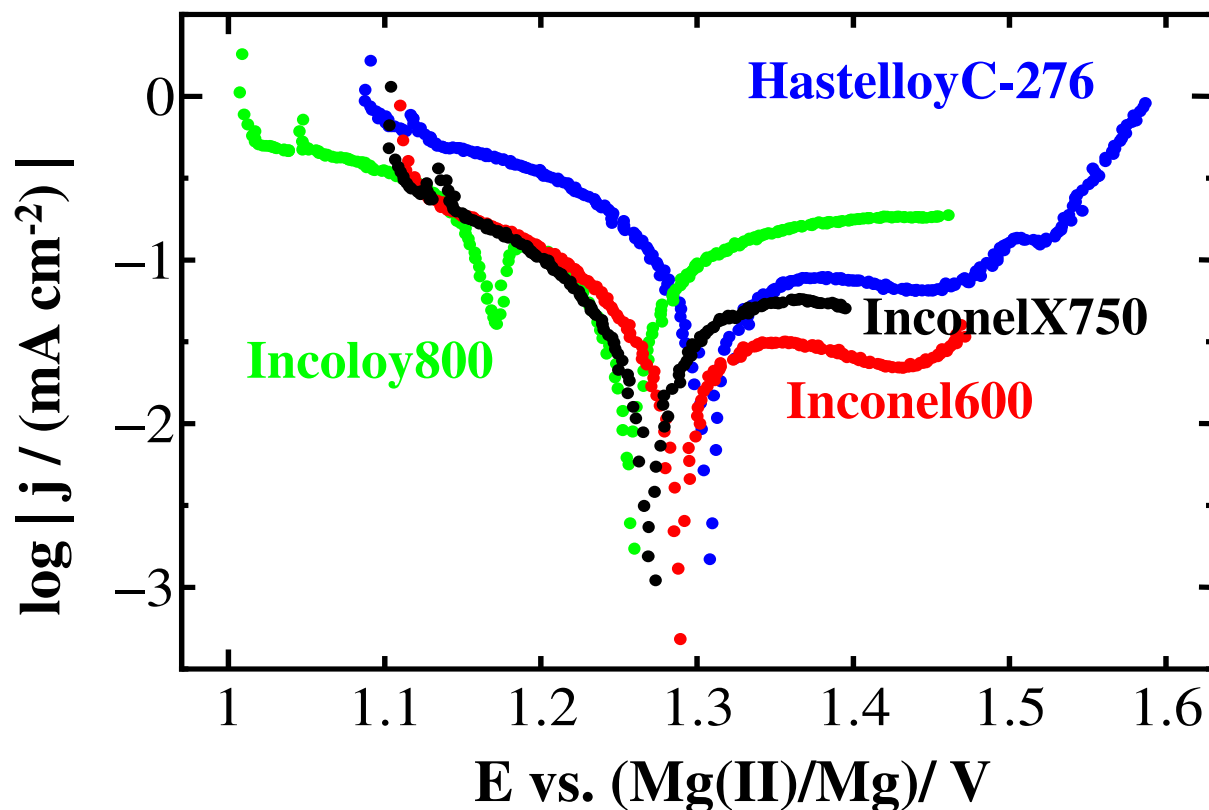
 高温・溶融塩環境における照射欠陥が構造材の腐食に与える影響は小さい.

### 3) 塩化物溶融塩による材料 腐食挙動試験 —電気化学測定—

同志社大 後藤・渡邊・鈴木

電解浴 NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>  
450°C

走査速度 10 mV min<sup>-1</sup> (0.166  
mV s<sup>-1</sup>)



**耐食性：**

**Inconel600**

**> InconelX750**

**> HastelloyC-276**

**> Incoloy800**

	HastelloyC-276	Inconel600	InconelX750	Incoloy800
$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$1.29 \pm 0.01$	$1.29 \pm 0.01$	$1.29 \pm 0.02$	$1.26 \pm 0.02$
$j_{\text{corr}} / \mu\text{A cm}^{-2}$	$101 \pm 24$	$20 \pm 7$	$74 \pm 17$	$234 \pm 90$
<b>腐食速度 / mm year<sup>-1</sup></b>	<b><math>1.07 \pm 0.28</math></b>	<b><math>0.178 \pm 0.059</math></b>	<b><math>0.730 \pm 0.180</math></b>	<b><math>2.36 \pm 0.92</math></b>

## 4) 塩化物溶融塩による腐食への組成による効果試験

同志社大 後藤・渡邊・鈴木

600°Cにおいて溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>-CeCl<sub>3</sub>および溶融NaCl-CaCl<sub>2</sub>-LaCl<sub>3</sub>中において各種合金および表面処理が構造材料に与える腐食挙動を明らかにした

**材料：** Hastelloy N, Inconel600, InconelX750, Hastelloy C-276, Incoloy800, NiめっきしたSUS304, SUS304

**試験方法：** 分極測定（腐食速度）、GD-OES（材料組成）、顕微ラマン（溶融塩構造）

**実験結果：**

表. 分極測定に基づき求められた腐食速度

溶		Hastelloy N	Niめっき SUS304	SUS304	Hastelloy C-276	Inconel 600	Inconel X750	Incoloy 800
NaCl-CaCl <sub>2</sub> -CeCl <sub>3</sub>	$j_{corr}$ / mA cm <sup>-2</sup>	0.082	0.021	0.28	0.16	0.11	0.089	0.46
	腐食速度 / mm year <sup>-1</sup>	0.85	0.23	3.1	3.4	0.78	0.56	3.1
NaCl-CaCl <sub>2</sub> -LaCl <sub>3</sub>	$j_{corr}$ / mA cm <sup>-2</sup>	$3.6 \times 10^{-4}$	$7.9 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$6.3 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-3}$
	腐食速度 / mm year <sup>-1</sup>	0.0037	0.0085	0.017	0.0068	0.029	0.11	0.049

## 得られた結論

### 熔融NaCl-CaCl<sub>2</sub>-CeCl<sub>3</sub>

- Hastelloy N > NiめっきしたSUS304 > SUS304 > Hastelloy C-276 > Inconel X750 > Incoloy 800 > Inconel 600

### 熔融NaCl-CaCl<sub>2</sub>-LaCl<sub>3</sub>

- Hastelloy N > Hastelloy C-276 > NiめっきしたSUS304 > SUS304 > Inconel 600 > Incoloy 800 > Inconel X750

➡ **Hastelloy-Nが耐食材料として最も優れている。  
SUS304へのNiめっきは耐食性を高める効果あり**

浴組成による腐食挙動変化に関する考察：

熔融塩のラマン測定結果から、CeとLaが熔融塩の組成が変化することで、融体構造が変化する。この融体構造の変化により、合金から選択的に溶出させる元素に影響を与えることが示唆

# 今後の研究開発課題

## 1. 原子炉熱輸送システム

- ① 負荷追従性能の明確化
- ② 気体処理系のボイドを考慮した過渡変化挙動の再評価
- ③ 気体処理系を利用した反応度制御（ボイドによりさらに安全性は高まる）
- ④ 種々の燃焼方式に対して最終的に残留する核廃棄物
- ⑤ 反射体の構造と交換手順
- ⑥ 板状熱交換器の溶接実証
- ⑦ 燃料ポンプの詳細設計とメンテナンス方法
- ⑧ 崩壊熱除去系に接続するための特殊弁設計

## 2. その他の課題

- ① 構造材料の照射特性、特に熔融塩との共存性の研究を継続する。Ni基合金に加え、ステンレス鋼の使用を追求したい。
- ② 熔融塩について、熔融温度、密度、熱容量、熱伝導率、粘性係数等の熱物性、さらに、熔融燃料塩中のアクチノイドやFP元素の溶解度、活量係数等を計測する。そのため、日本ではJAEAの施設の利用は必須。海外では、ドイツのカールスルーエにあるEUのJoint Research Centerであらゆる核燃料物質の物性値を測定できる。
- ③ 燃料製造の研究として、使用済み酸化物燃料からの転換のほか、福島事故のデブリからの燃料製造を含めたい。
- ④ 再処理の研究として、固体析出のない熔融塩 / 液体金属系での還元抽出と、廃棄物低減のため、Na、Ca、Clの分離リサイクル利用を目指す。
- ⑤ 塩素の核データは現状不十分で、詳細な評価が必要。天然の塩素には $^{35}\text{Cl}$ と $^{37}\text{Cl}$ があり、前者は長半減期の有毒物質となるため、濃縮技術の開発が求められる。
- ⑥ 核拡散抵抗性やテロ対策に関する研究

# 結論

- ・ 熔融塩高速炉は、核的安全性に優れ、かつ放射性廃棄物減容化とUの有効利用性に優れており、研究・開発を進める価値が高い。
- ・ 熔融塩高速炉の設計の基礎データの取得を進めており、実験・解析の手法の確立が図られ、今後の進展に向けて展望が開けた。

謝辞:本研究は、経済産業省令和3年度「社会的要請に応える革新的原子力技術開発支援事業」の一環として、原子力研究開発機構から 委託を受けて実施したものである。