

# 金属燃料の研究開発の現状と革新概念

東京工業大学 革新的原子力研究センター  
CRINESセミナー

(財)電力中央研究所  
原子力技術研究所 次世代サイクル領域

尾形 孝成

## 発表内容

1. はじめに
2. 金属燃料開発の経緯と現状

米国における開発の経緯  
照射挙動の概要  
照射試験の現状

炉心検討、安全性評価は  
今回はスコープ外

3. 電中研における開発の進展

課題と取組みの概要  
挙動解析、合金特性評価、被覆管との共存性、設計手法の検討、  
「常陽」照射試験計画、MA含有金属燃料の照射試験、  
工学規模射出鑄造試験、小規模射出鑄造試験、射出鑄造解析、  
MA含有金属燃料製造

4. まとめと今後の展開
5. 金属燃料の革新概念

Zr濃度低減、被覆管ライニング、Heボンド粒子型金属燃料

# 1. はじめに

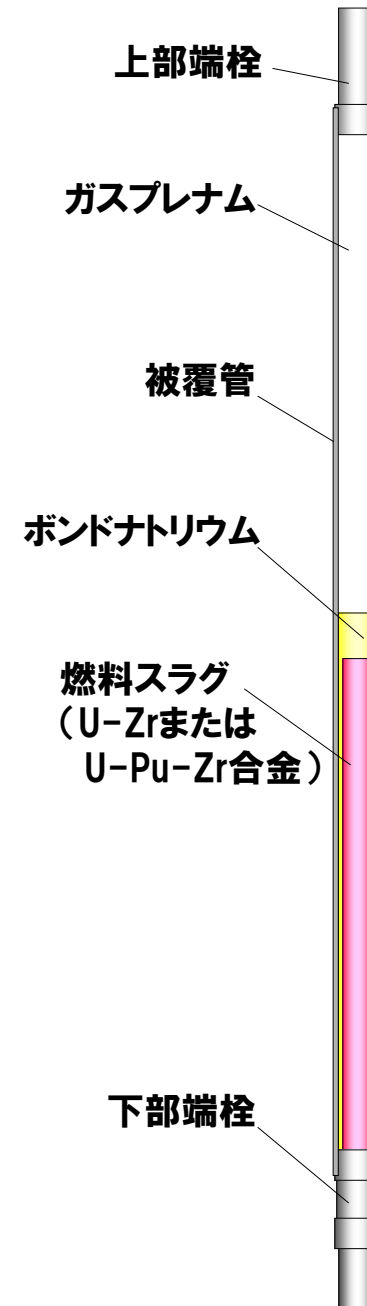
---

➤ 金属燃料の使用によって……

- ・高速増殖炉(FBR)の炉心性能向上:
  - 高増殖率の達成
  - 核分裂性物質の炉内装荷量削減
  - 炉心平均燃焼度の向上
- ・乾式再処理法と射出鑄造法の適用
  - 小規模でも高い経済性

⇒ 種々のFBR導入シナリオに柔軟に  
適合する燃料サイクルの実現が可能

➤ 「FBRサイクル実用化研究開発 (FaCT)」においては  
「副概念」との位置付け



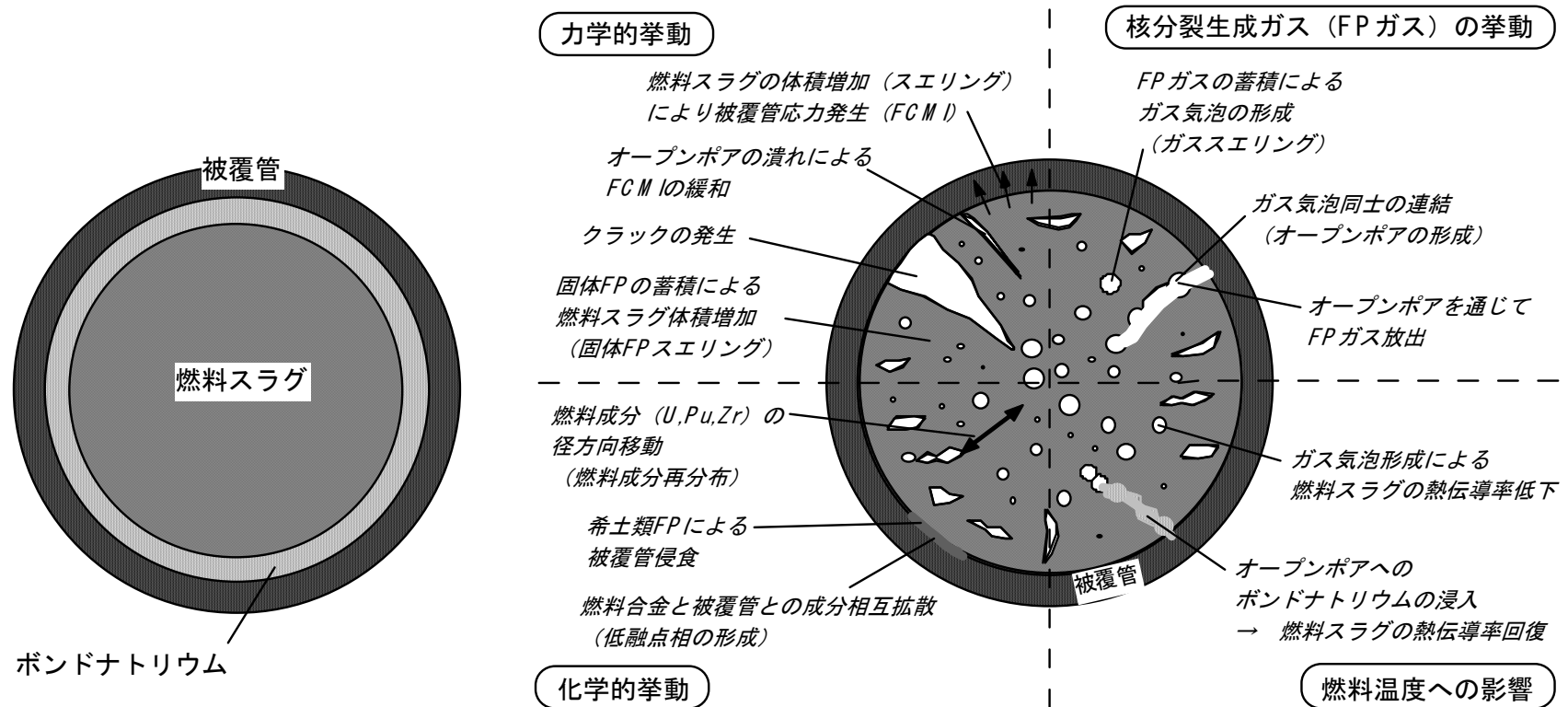
## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

### ➤ 米国で豊富な開発実績

- FBR開発初期の実験炉の炉心燃料に採用：  
U, U-Zr (EBR-I), U-Mo (Fermi, 英国DFR), U-Fs (EBR-II)
- 1960年～1970年代には、Pu燃料の組成の最適化に向けた研究：  
各種燃料合金の物性測定、照射試験、U-Pu-Zr合金の選定など
- 1984年～1994年のIFR (Integral Fast Reactor) プログラム：  
EBR-II照射、FFTF照射、TREAT炉での過出力試験、炉外加熱試験など  
約1万本のU-Zr燃料、約600本のU-Pu-Zr燃料の照射実績  
最高燃焼度約20at.%(200,000MWd/t)
- 1999年から開始されたAFCI (Advanced Fuel Cycle Initiative) プログラム：  
マイナーアクチノイド(MA: Np, Am, Cm)を添加した金属燃料の開発  
物性測定、燃料製造、照射試験など

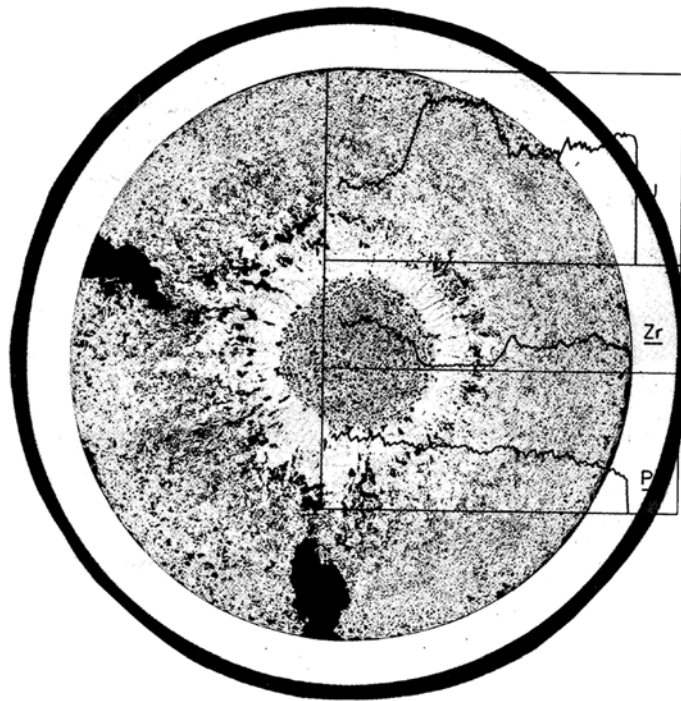
## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

### ➤ 照射挙動の概要



## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

### ➤ 照射挙動の概要～再組織化と燃料成分再分布



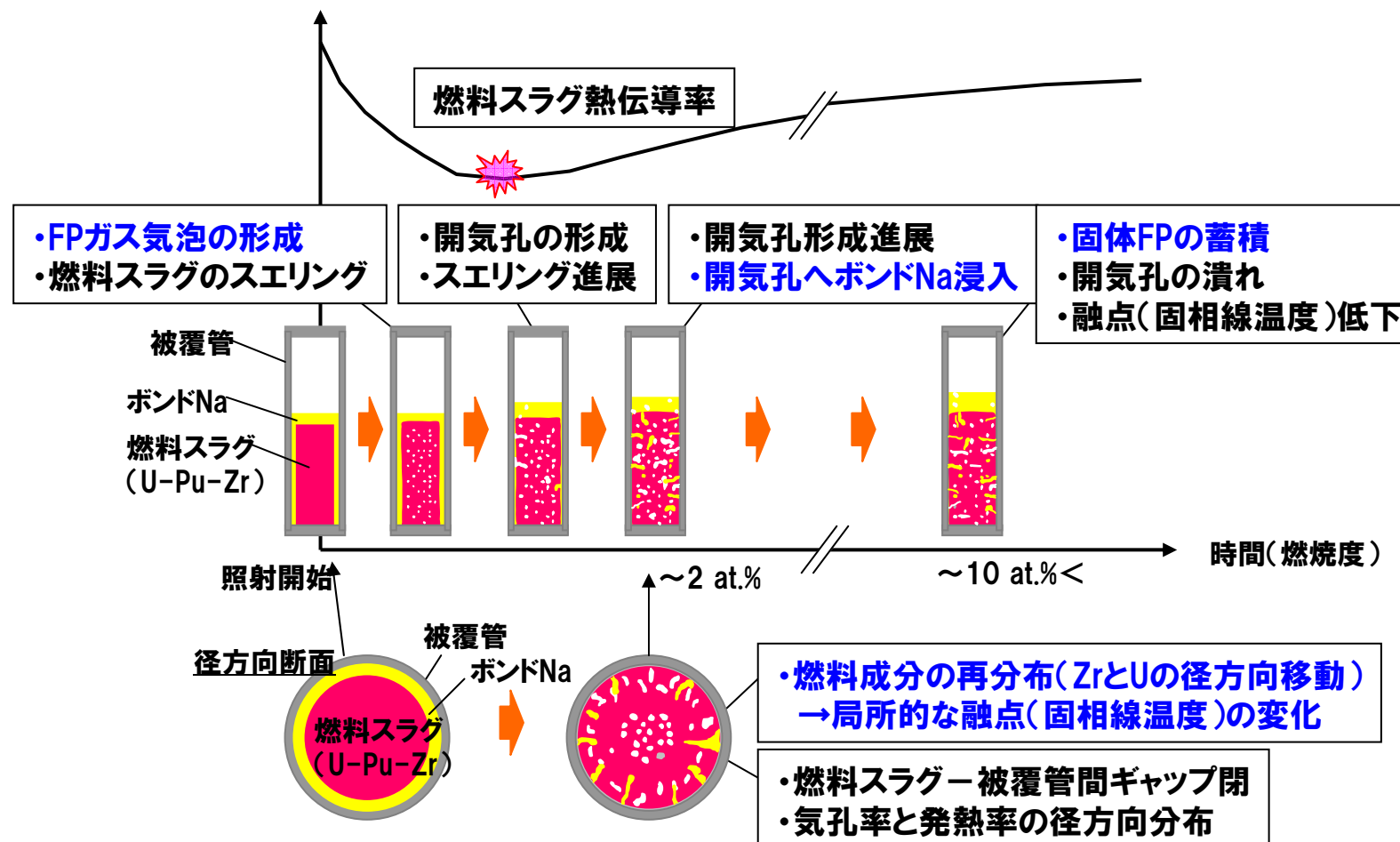
- ✓外周部はポーラスな組織
- ✓高密度(に見える)の領域ではZr濃度が低くU濃度が高い
- ✓温度条件によっては中央部には球形のポアを多く含む領域が形成(恐らく $\gamma$ -固溶体相)
- ✓UおよびZrの移動は熱拡散によるものと考えられ、いくつかのモデルが提案

照射後の燃料スラグ断面 (燃焼度約3at%)

R.G. Pahl, et al, Metallurgical Trans. A, vol. 21A, (1990) 1863.

## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

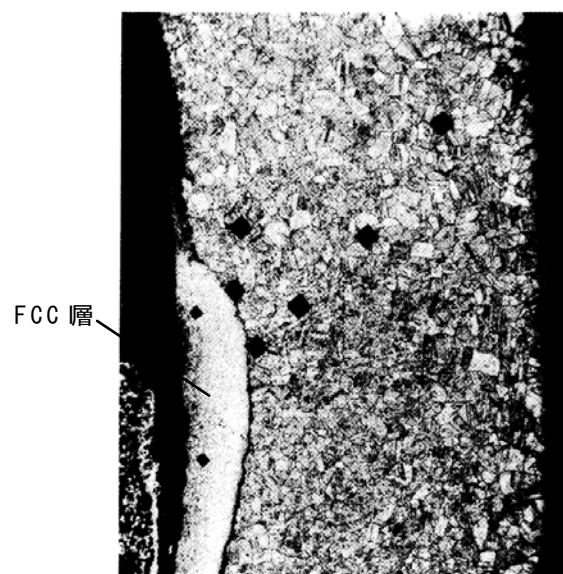
### ➤ 照射挙動の概要～燃料スラグ温度の変化



T. Ogata & T. Mizuno, CRIEPI Report L08001 (2008).

## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

### ➤ 照射挙動の概要～被覆管の内面侵食

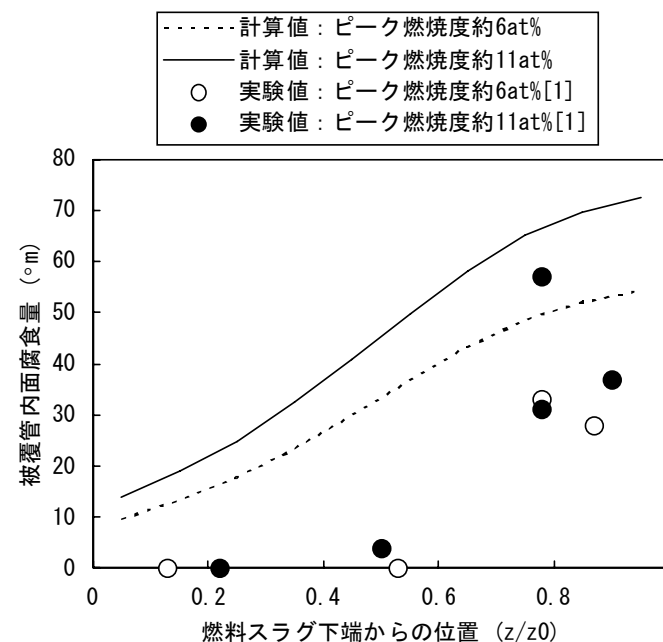


100 microns

FCC 層の写真 (D9被覆管、燃焼度約12at%)

R.G. Pahl, et al, Metallurgical Trans. A, vol. 21A, (1990) 1863.

- ✓希土類FPが被覆管と反応
- ✓これまでのデータから内面侵食量の予測は可能だが希土類FPの移動機構は未解明

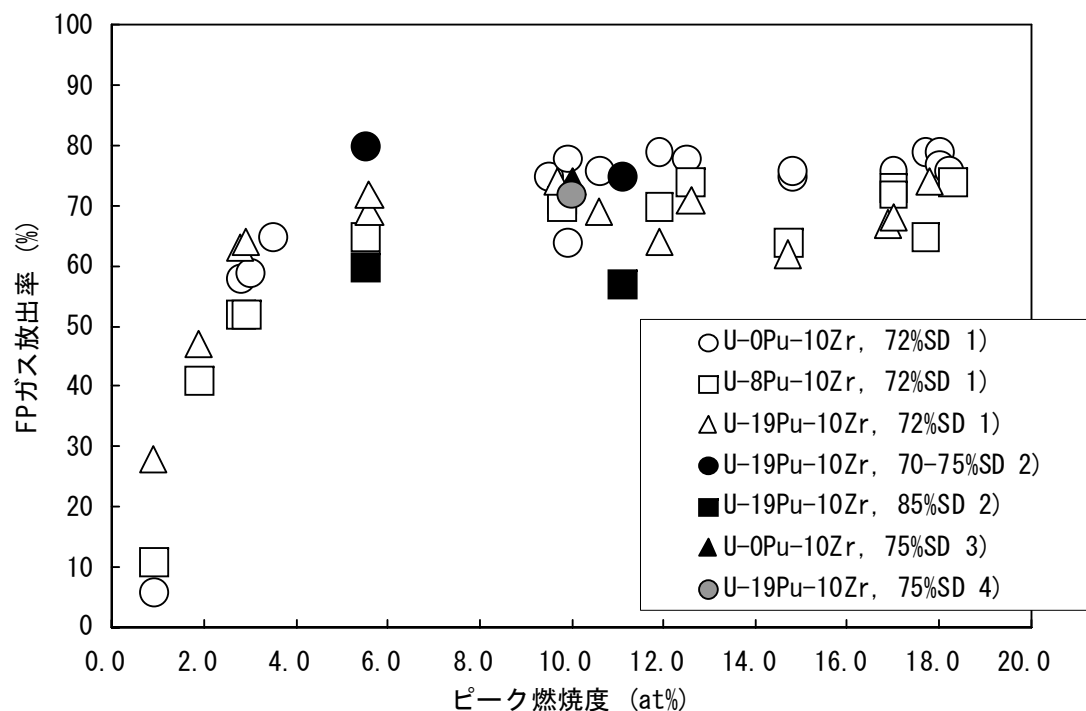


実験値:A.B.Cohen et al., J. Nucl. Mater. vol.204 (1993) 244.



## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

### ➤ 照射挙動の概要～FPガス放出



燃料組成や照射条件に大きくは依存しない  
高スミア密度(>75%)では低めの放出率

1) R.G. Pahl, et al, Proc. Int. Fast Reactor Safety Mtg., Snowbird, Utah, Aug.12-16, 1990, vol.IV, pp.129.

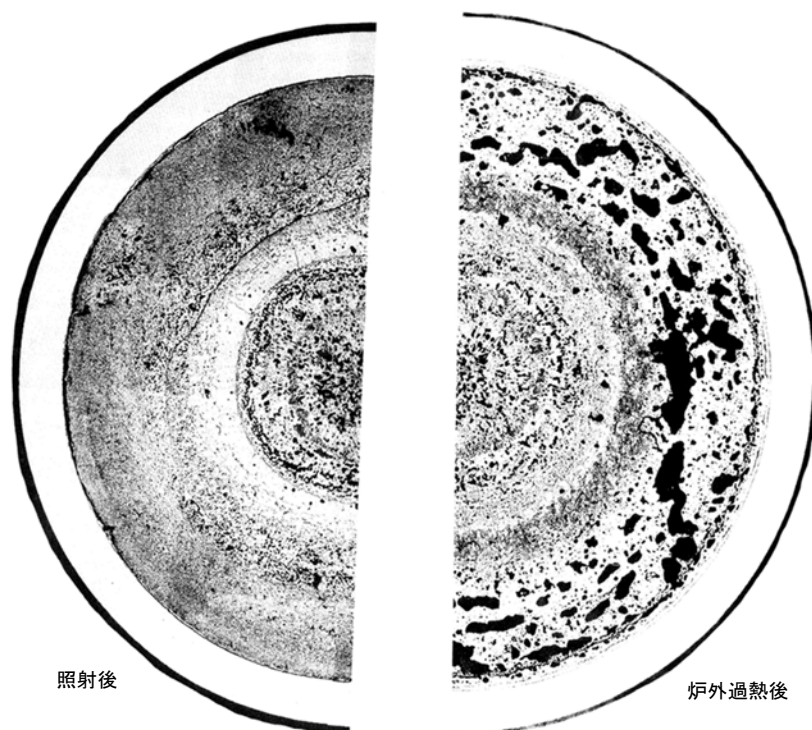
2) H. Tsai, et al, Proc. 3rd Int. Conf. Nuclear Engineering, Kyoto, Japan, Apr.23-27, 1995, vol.2, pp.849.

3) R.G. Pahl, et al, J. Nucl. Mater., 204 (1993) 141.

4) H. Tsai and L.A. Neimark, Proc. Int. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Kyoto, Japan, Oct.25-29, 1992pp.28.2-1

## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

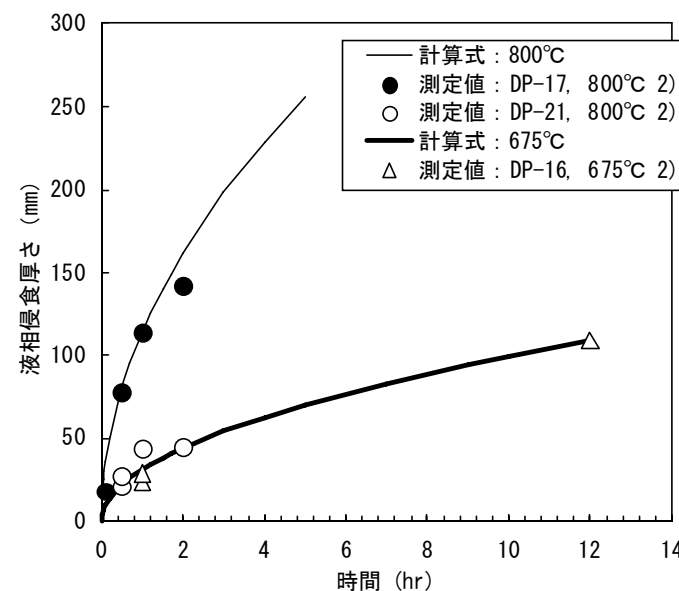
### ➤ 照射挙動の概要～**過熱時**の燃料と被覆管との液相形成反応



炉外過熱により燃料合金の外周部に液相が形成した例  
(右の写真の大きなポイドを含む領域で液相形成)

A.B.Cohen et al., J. Nucl. Mater. vol.204 (1993) 244.

燃料スラグ(U-Pu-Zr合金)と低融点合金を形成するFe等の被覆管成分が燃料側に移行する結果、燃料スラグ外周部の一部に液相が形成され、被覆管内面は侵食される。



測定値:A.B.Cohen et al., J. Nucl. Mater. vol.204 (1993) 244.

## 2. 金属燃料開発の経緯と現状

➤ 現在実施中または準備中の世界の主要な燃料照射試験

照射炉	実施機関	特徴	燃料形態	組成	現状
常陽(日)*	JAEA	MA含有MOX	酸化物	(U,Pu,MA) O <sub>2</sub>	照射中
	JAEA	もんじゅ燃料	酸化物	(U,Pu,Am) O <sub>2</sub>	照射終了
	JAEA	ODS被覆管燃料	酸化物	(U,Pu) O <sub>2</sub>	準備中
	電中研-JAEA	金属燃料	金属	U-Pu-Zr	準備中
ATR(米)**	INL	MA含有燃料 (AFC-2)	酸化物	(U,Pu,MA) O <sub>2</sub>	照射中
			金属	U-Pu-Zr-MA-RE	照射中
Phenix(仏)**	電中研-ITU	MA含有金属燃料	金属	U-Pu-Zr-MA-RE	照射終了
BOR-60(露)	JAEA-RIAR	ODS被覆管燃料	酸化物顆粒	(U,Pu) O <sub>2</sub> -U	照射中

\*現在トラブル停止中    \*\*上記の他、ターゲット燃料の照射試験など実施中

### 3. 電中研における開発の進展

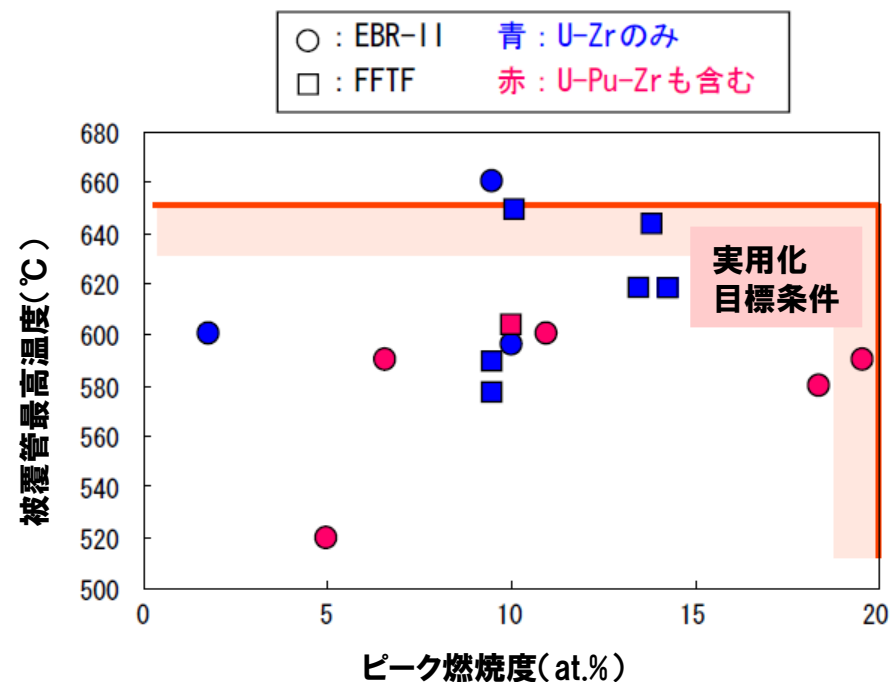
#### ➤ 金属燃料の実用炉への適用に際しての開発課題

✓ 米国照射実績では、実用炉用のU-Pu-Zr燃料に望まれる高温照射（被覆管最高温度 $>650^{\circ}\text{C}$ ）およびMA含有燃料の試験実績が乏しい。

- ① 高燃焼度までの照射挙動の理解
- ② 高温での使用を制限する挙動の確認
- ③ MA含有燃料の照射挙動の確認

✓ 国内開発実績がない。

- ④ 燃料製造および⑤照射試験による国内開発の実績



米国での金属燃料照射実績の概要

### 3. 電中研における開発の進展

➤ 金属燃料の実用性の実証に向けた課題と当所の取組み

課題

- ①高燃焼度までの照射挙動の理解
- ②高温での使用を制限する挙動の確認
- ③MA含有燃料の照射挙動の確認
- ④燃料製造および⑤照射試験による国内開発の実績

取組み

#### 燃料性能評価・実証

- 照射挙動解析技術の開発①
- 燃料合金の特性評価②③
- 燃料合金と被覆管との共存性評価②
- 金属燃料設計手法の検討①②⑤
- 「常陽」照射試験計画①②⑤
- MA含有金属燃料の照射試験③

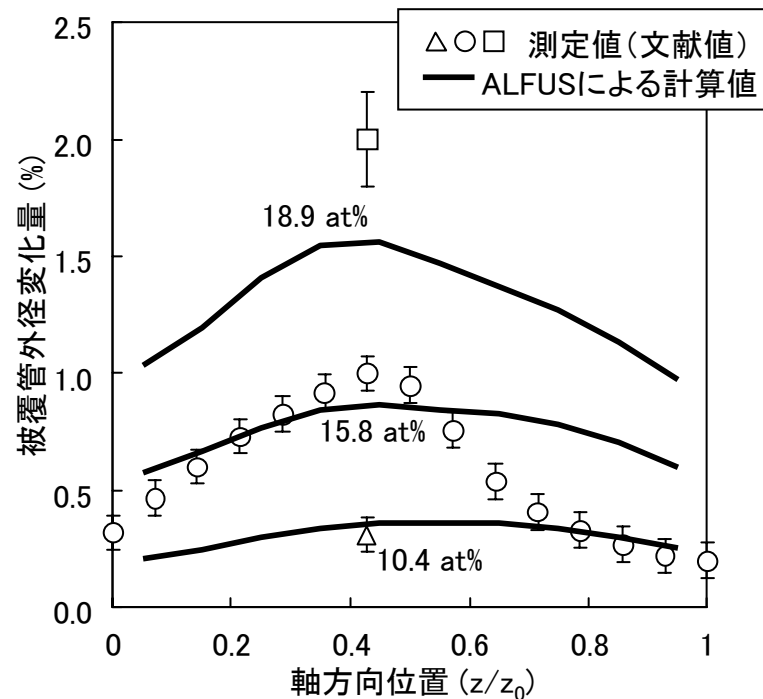
#### 燃料製造技術開発

- U-Zr工学規模射出鑄造試験④
- U-Pu-Zr小規模射出鑄造試験④⑤
- 射出鑄造解析コード開発④
- MA含有金属燃料製造③④

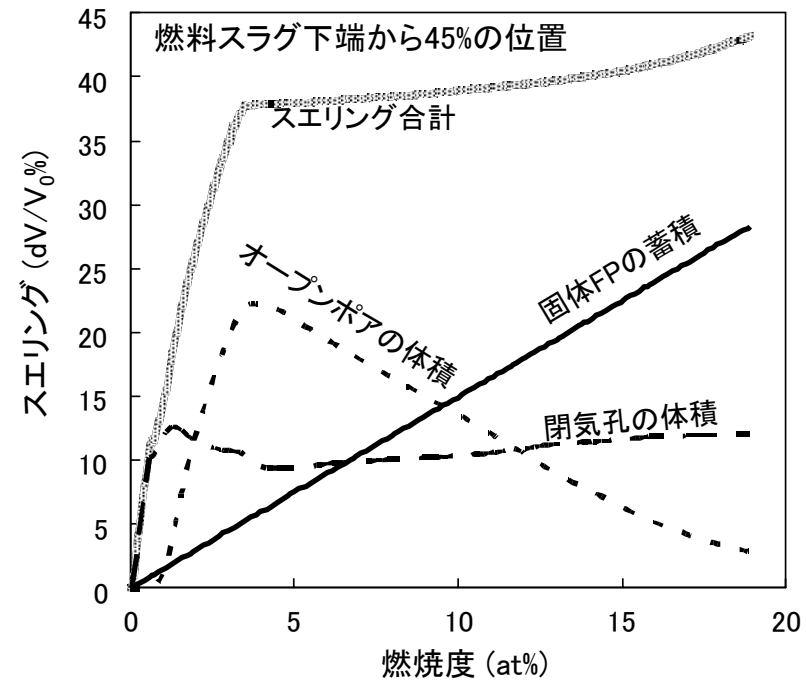
# 3.1. 照射挙動解析技術の開発

## ➤ 照射挙動解析コード: ALFUS(ALoyed Fuel Unified Simulator)を開発

- ・ 燃焼に伴う固体FPの蓄積により、被覆管との機械的相互作用(FCMI)が増大するが、スミア密度75%程度ではピーク燃焼度20at.%程度までならば問題とならないことを説明



U-Pu-Zr燃料(HT9被覆、スミア密度72%)の被覆管外径変化量の測定値とALFUSによる計算値



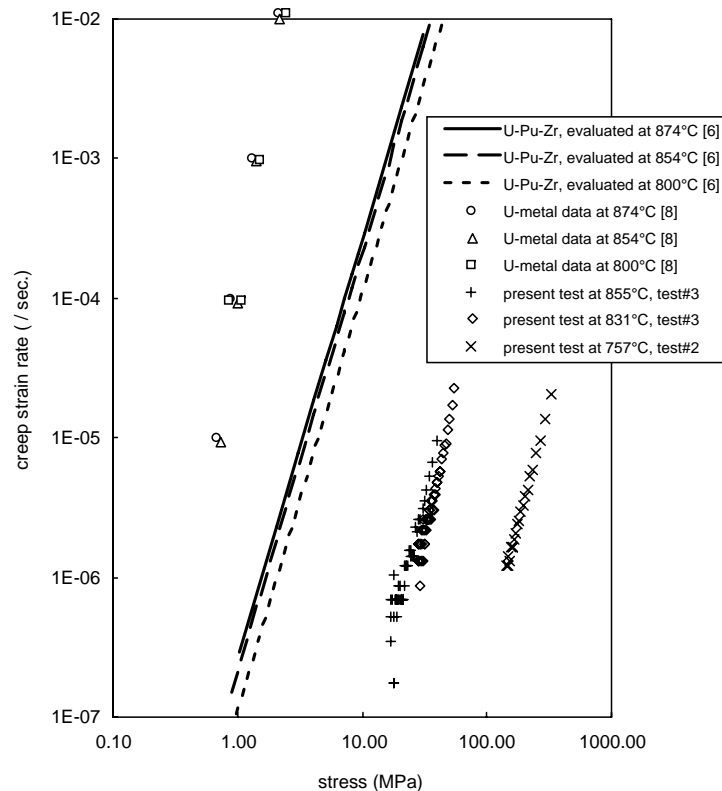
U-Pu-Zr燃料(HT9被覆、スミア密度72%)のスエリング挙動のALFUSによる解析結果

## 3.2. 燃料合金の特性評価

### ➤ 照射挙動モデル構築の基礎となる燃料合金特性データの取得

旧原研との共研

・U-Zr合金の高温変形速度(クリープ歪速度)の測定 →燃料スラグの変形挙動の基礎



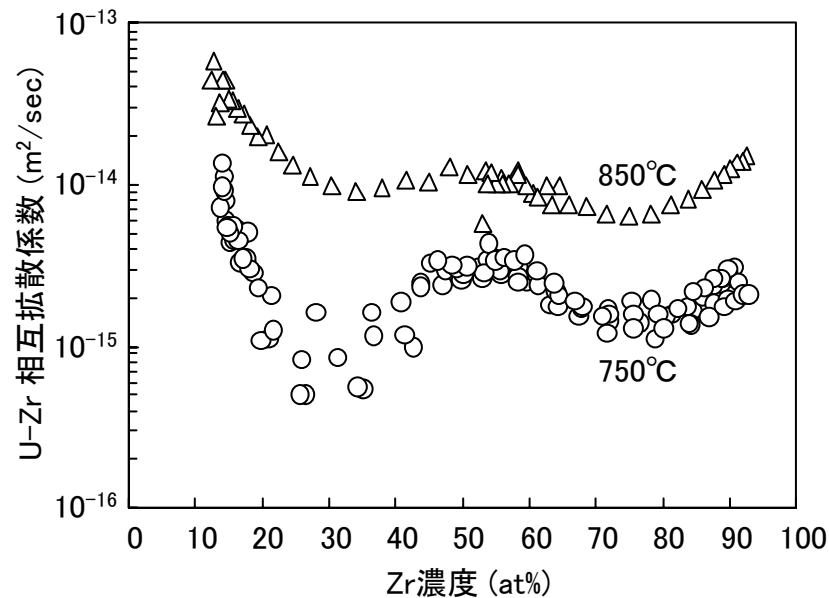
- ✓高温真空チャンバを装着した引張試験機を用いて4x4x10mmのU-10wt.%Zr合金を圧縮し、応力緩和挙動からクリープ歪速度を評価
- ✓U-Pu-Zr合金に比べてU-Zr合金のクリープ歪速度は小さいことが確認できたが、定量的なデータ取得には至らなかった

## 3.2. 燃料合金の特性評価

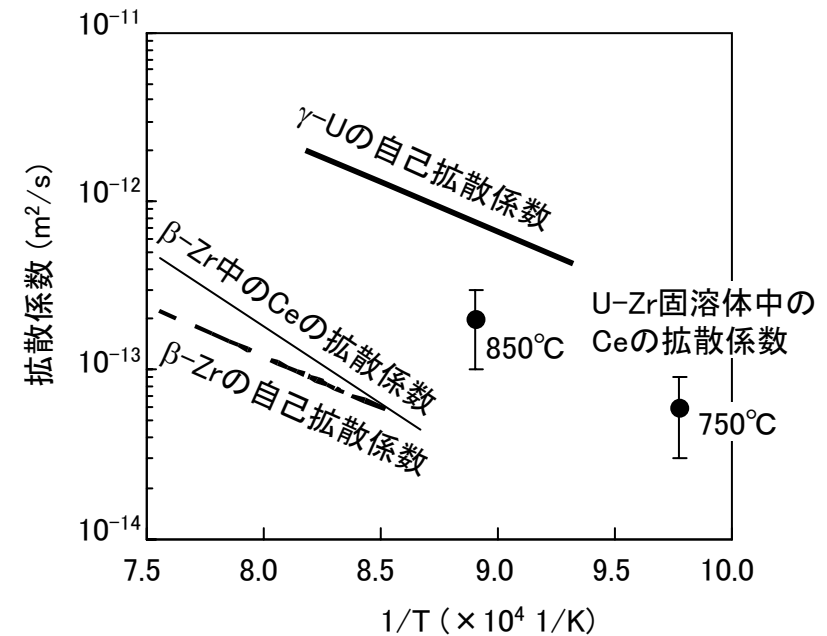
### ➤ 照射拳動モデル構築の基礎となる燃料合金特性データの取得

旧原研との共研

- U-Zr合金の相互拡散係数 → 燃料成分再分布
- U-Zr合金中のCeの拡散係数 → 希土類FPによる被覆管内面腐食(FCCI)



U-Zr合金の相互拡散係数の測定結果



U-Zr合金中のCeの拡散係数の測定結果



## 3.2. 燃料合金の特性評価

### ➤ 照射挙動モデル構築の基礎となる燃料合金特性データの取得

旧原研との共研

#### • U-Zr合金中のCeの拡散挙動

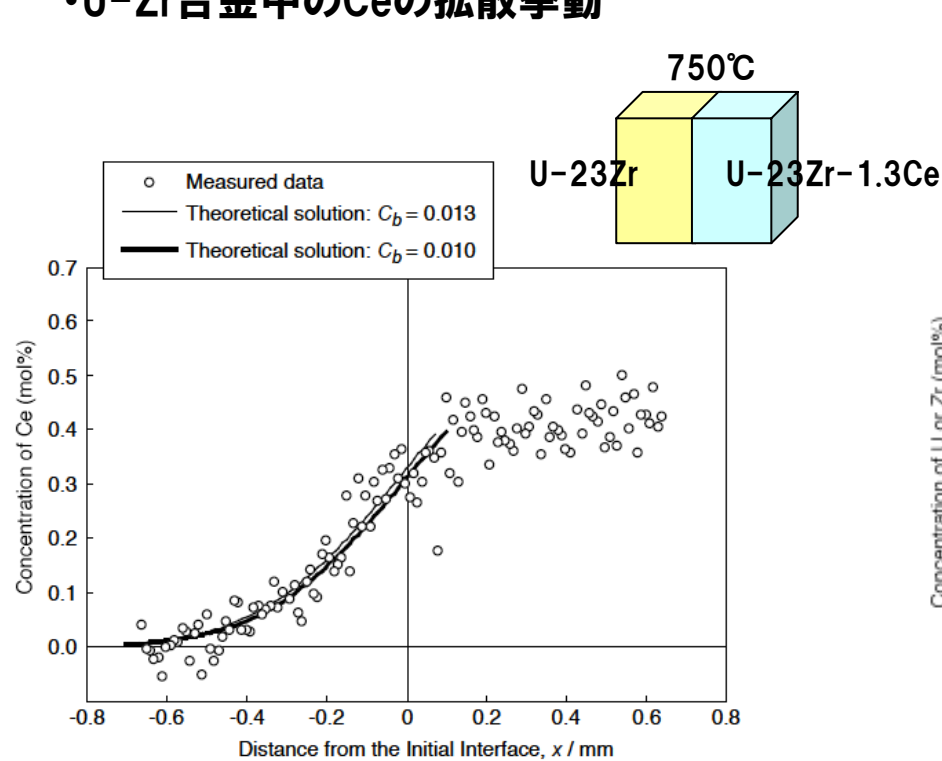


Fig. 6 Concentration profiles of Ce in the U-23mol%Zr / U-23mol%Zr-1.3mol%Ce couple annealed at 1023K.

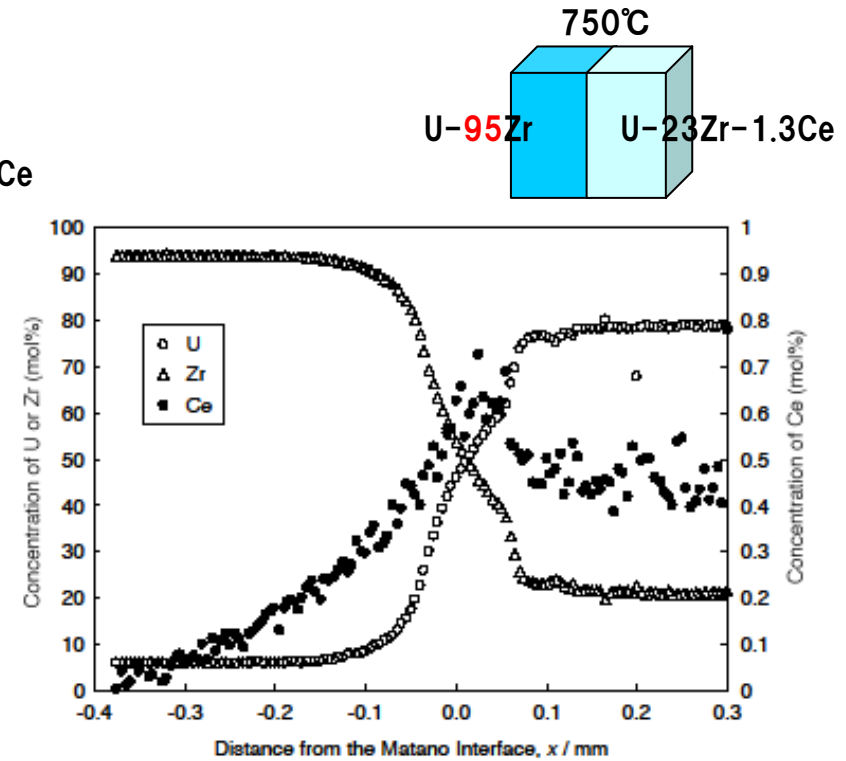
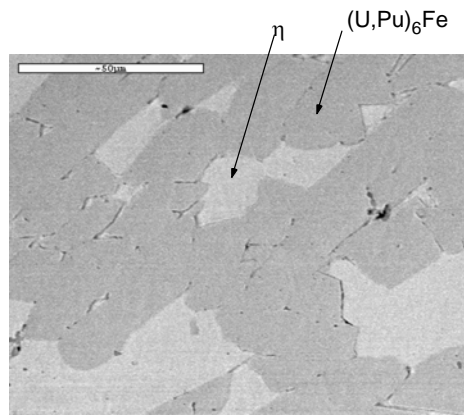


Fig. 12 Concentration profiles of U, Zr and Ce in the U-95mol%Zr / U-23mol%Zr-1.3mol%Ce couple annealed at 1023K.

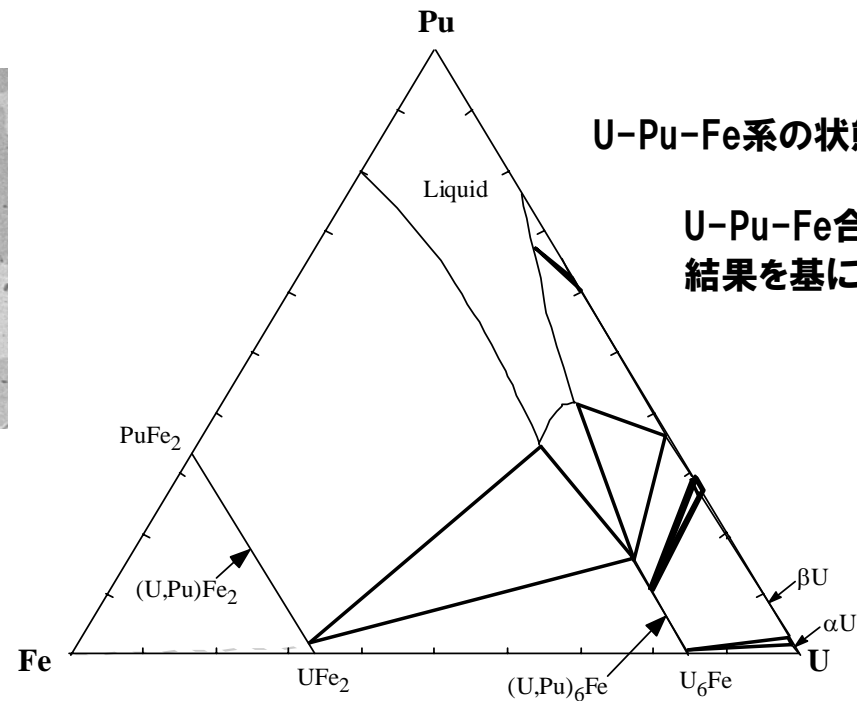
## 3.2. 燃料合金の特性評価

### ➤ 測定データを補完する状態図評価

- U-Pu-Zr-Fe系等の状態図評価 → 固相線温度(融点)、被覆管との共存性検討



試料1のアニール後の組織 (反射電子像)



U-Pu-Fe系の状態図(650°C)

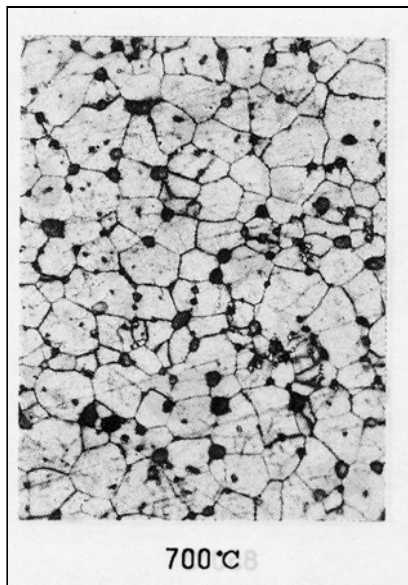
U-Pu-Fe合金の組織観察および熱分析の結果を基に熱力学的評価によって作成

## 3.2. 燃料合金の特性評価

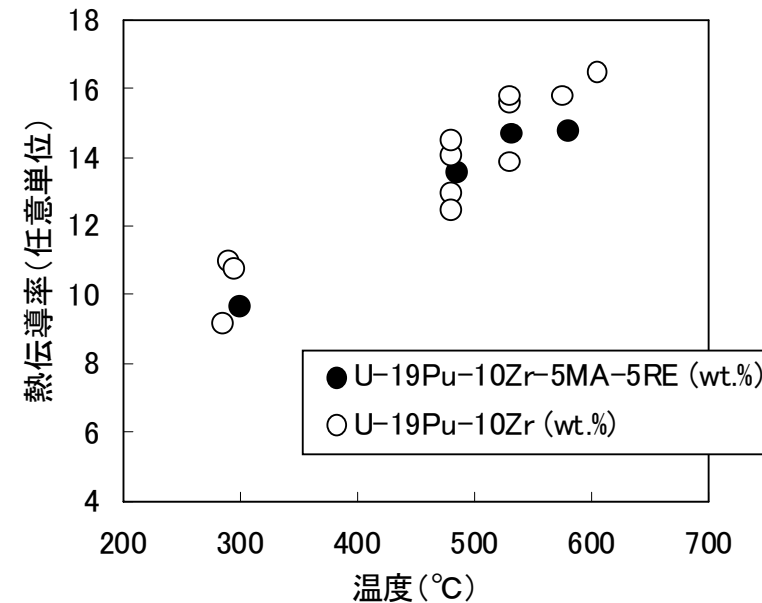
### ➤ MA添加の効果을把握するための物性値測定

- U-Pu-Zr-MA合金の混和性、熱伝導率、ヤング率、被覆管との共存性など  
→ MA含有金属燃料の挙動評価の基礎

ITUとの共研



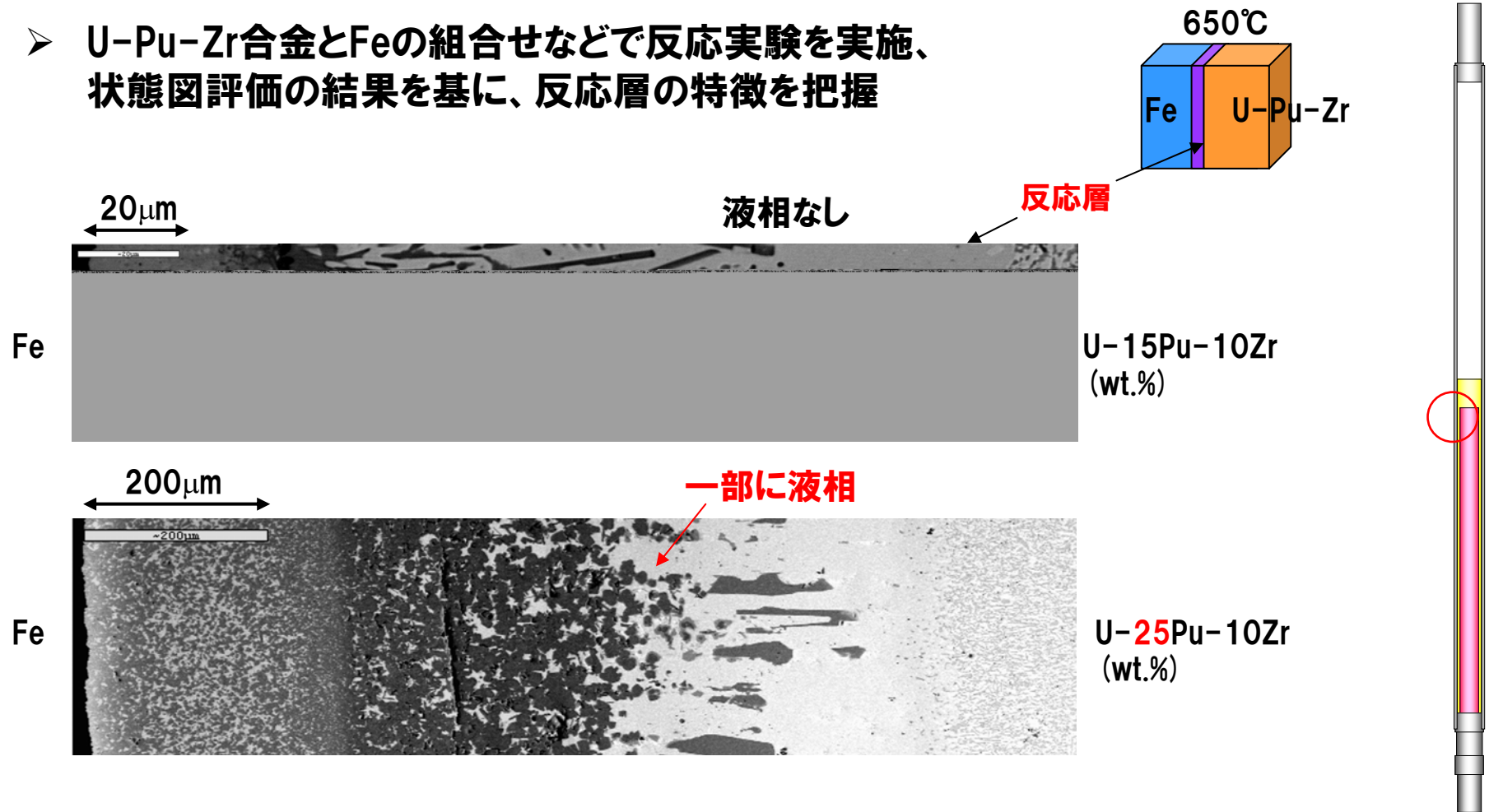
U-19Pu-10Zr-2MA-2RE (wt.%) 合金の組織  
(700°Cアニール後急冷、黒色部がRE相)



U-19Pu-10Zr-5MA-5RE (wt.%) 合金と  
U-19Pu-10Zr合金の熱伝導率の比較

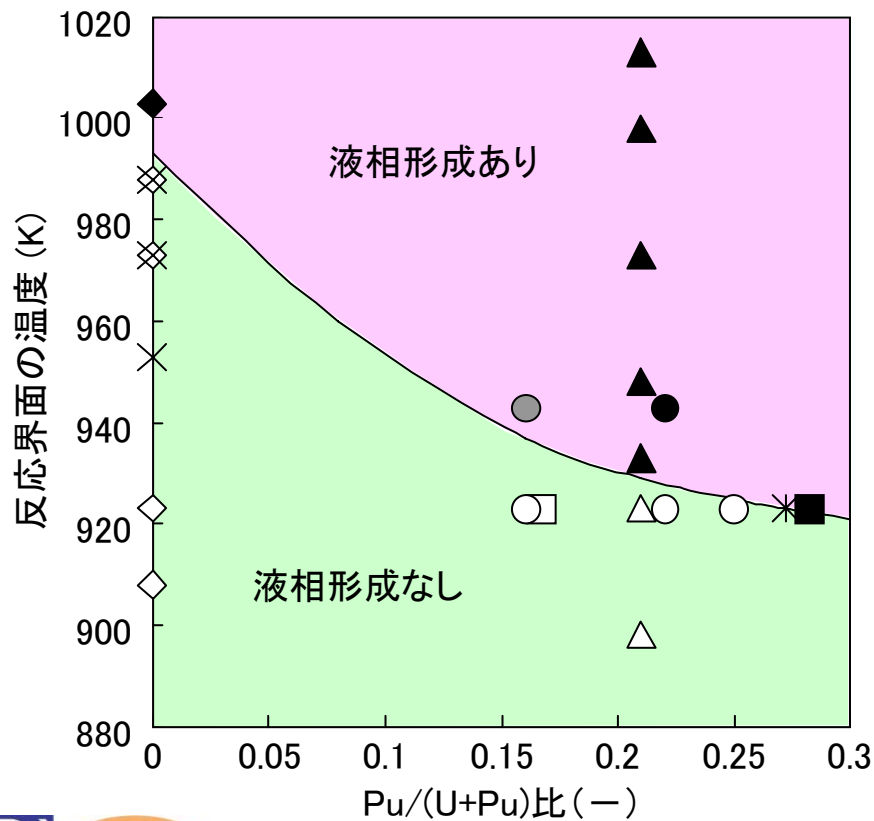
### 3.3. 燃料合金と被覆管との共存性評価

- U-Pu-Zr合金とFeの組合せなどで反応実験を実施、状態図評価の結果を基に、反応層の特徴を把握



### 3.3. 燃料合金と被覆管との共存性評価

- 燃料合金のPu/(U+Pu)比が0.25より小さい時、650℃以下では液相が形成されないことを説明

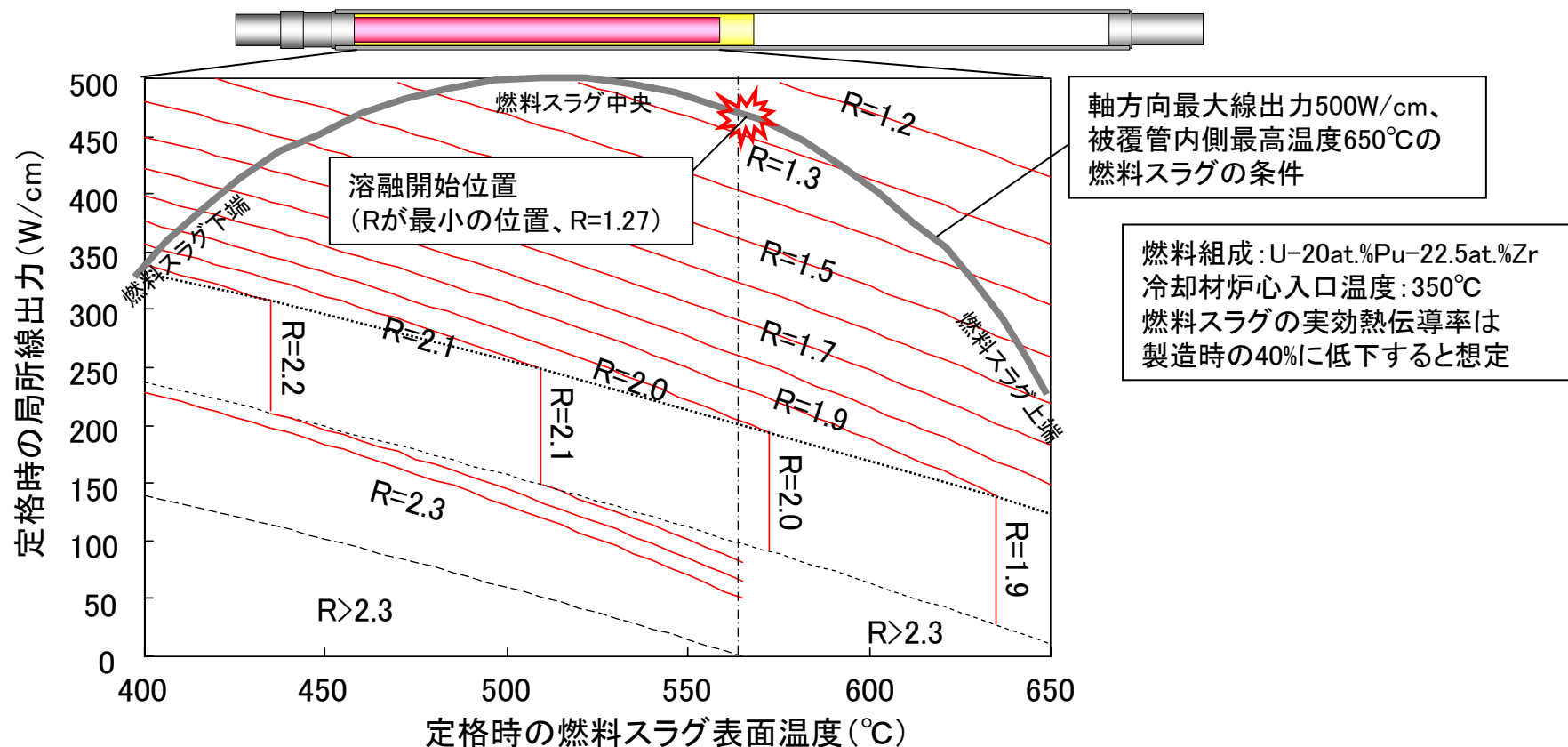


	組合せ	液相	備考	
◇	U-Zr/Fe	無	当所データ (一部旧原研との共研)	
◆		有		
×	U-Zr/Fe-Cr	無		
□	U-Pu-Zr/Fe	無		
■		有		
○	U-Pu/Fe	無		
●		有		
●		不明		
*	U-Pu-Zr/HT9	有		米国データ(非照射)
△		無		米国データ(照射燃料)
▲		有		

### 3.4. 金属燃料設計手法の検討

- 照射に伴う燃料スラグの熱伝導率や融点の変化など、照射挙動の不確かさを見込んだ評価を行っても、溶融には十分な余裕があることを確認

JAEAとの共研



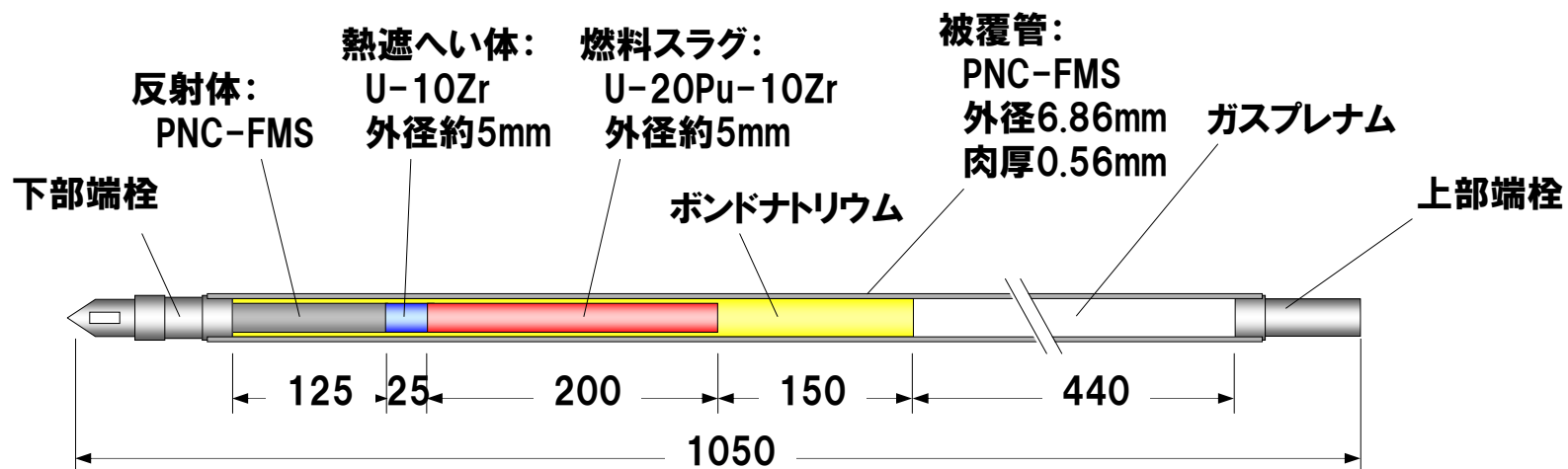
定格時局所線出力に対する局所溶融線出力の比 R のマップ図

T. Ogata & T. Mizuno, CRIEPI Report L08001 (2008).

### 3.5. 「常陽」照射試験計画

JAEAとの共研

- 海外データでは不足している次のデータを得るための照射試験を計画
  - ・燃料スラグと被覆管との間で650℃では液相形成が起きないことの確認
  - ・被覆管温度600℃以上における希土類FPによる被覆管内面腐食(FCCI)データの取得
  - ・15 at.%相当以上における燃料-被覆管機械的相互作用(FCMI)データの取得
  - ・国産金属燃料の照射実績の蓄積
- 試験燃料要素の「設計および工事の方法の認可」を取得、**2010年7月燃料製造完了**



T. Ogata, et al, CRIEPI Report L08006 (2008).



## 3.5. 「常陽」照射試験計画

### ➤ 試験目的、燃料ピンの仕様、照射条件

要素番号	被覆管肉厚 中心温度	スミア密度 (公称値)	ピーク 燃焼度	目的
(1)	640℃	77.4 %	3 at. %	・液相形成が生じない 上限温度の確認
(2)	640℃	74.4 %		
(3)	620℃	77.4 %	8 at. %	・被覆管最高温度(ホット スポット相当)における FCCIデータ取得
(4)	620℃	74.4 %		
(5)*1	620℃	77.4 %	15 at. %	・海外データとの比較 ・FCMIスミア密度依存性 データ取得
(6)*1	620℃	74.4 %		

いずれのピンもピーク線出力は500W/cm

\*1 計画検討中

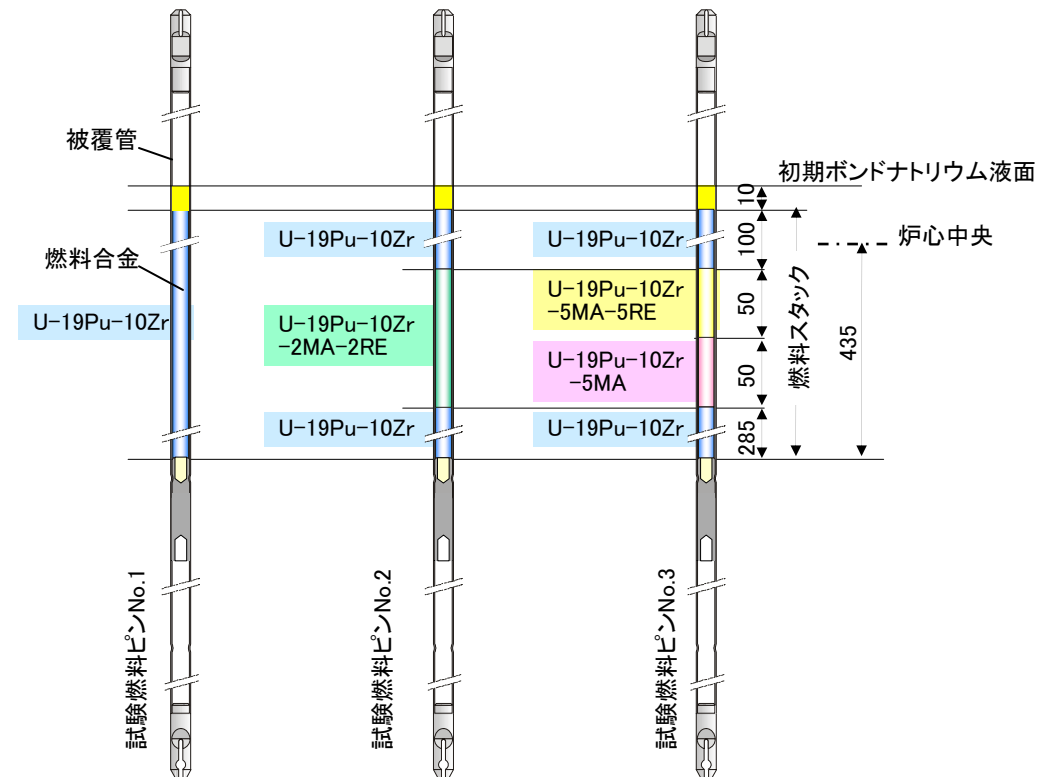


# 3.6. MA含有金属燃料の照射試験

## ➤ 試験目的、燃料ピンの仕様、照射条件

ITUとの共研

- ✓ 試験目的:  
MA核変換の実証、MA含有金属燃料の照射挙動の研究
- ✓ 燃料合金の組成 (wt%) :  
U-19Pu-10Zr-xMA-yRE (4種類)  
RE: 希土類(Y, Ce, Nd, Gd)  
MA: マイナーアクチニド(Np, Am, Cm)
- ✓ 被覆管: 15-15Ti、外径6.55 mm
- ✓ 燃料スラグ外径: 4.9 mm
- ✓ スミア密度: 75.2%
- ✓ ピーク線出力: ~330W/cm
- ✓ 被覆管最高温度: ~570℃
- ✓ 燃料集合体3体に各燃料ピン(合計9本)を装荷し、仏国Phenix炉で照射(2003~)
- ✓ 低(2.5at.%)、中(7at.%)、高(10at.%)の3通りの燃焼度で各集合体を取り出し



## 3.6. MA含有金属燃料の照射試験

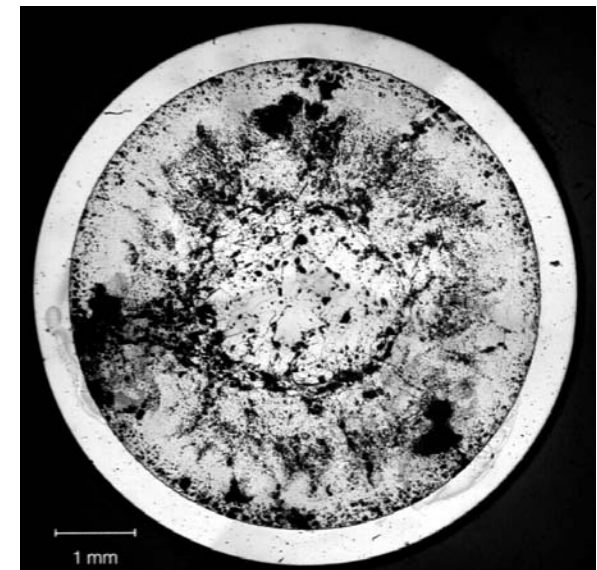
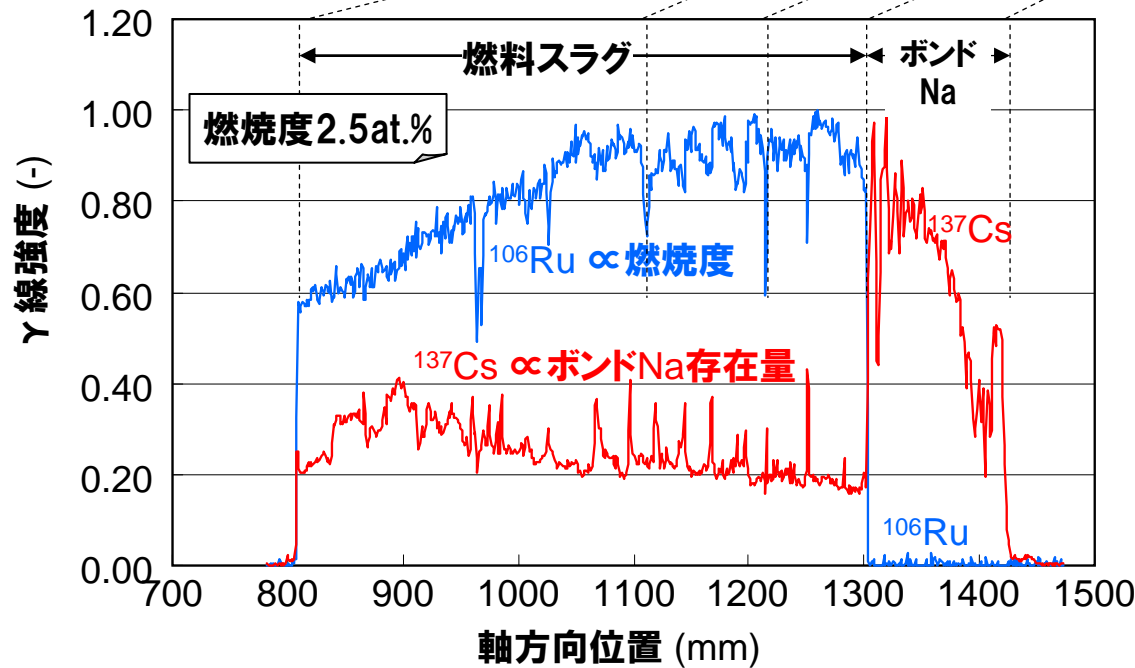
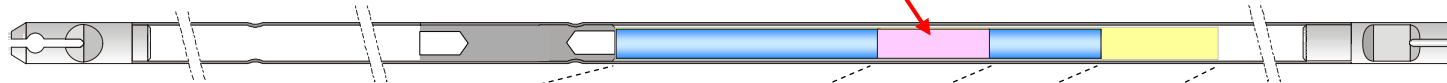
- 1994年までに試験燃料製造、2003年に仏国Phenix炉にて照射開始
- 2008年6月に照射を終了、最高燃焼度約10at.%を達成、燃料破損なし
- 低燃焼度(2.5at%)および中燃焼度(7at%)の集合体：  
METAPHIX-1およびMETAPHIX-2の照射後試験を超ウラン元素研で実施中

# 3.6. MA含有金属燃料の照射試験

ITUとの共研

- これまでのところ、MA添加が照射挙動に及ぼす顕著な影響は見出されていない

MA含有部: U-19Pu-10Zr-2MA-2RE (wt.%)

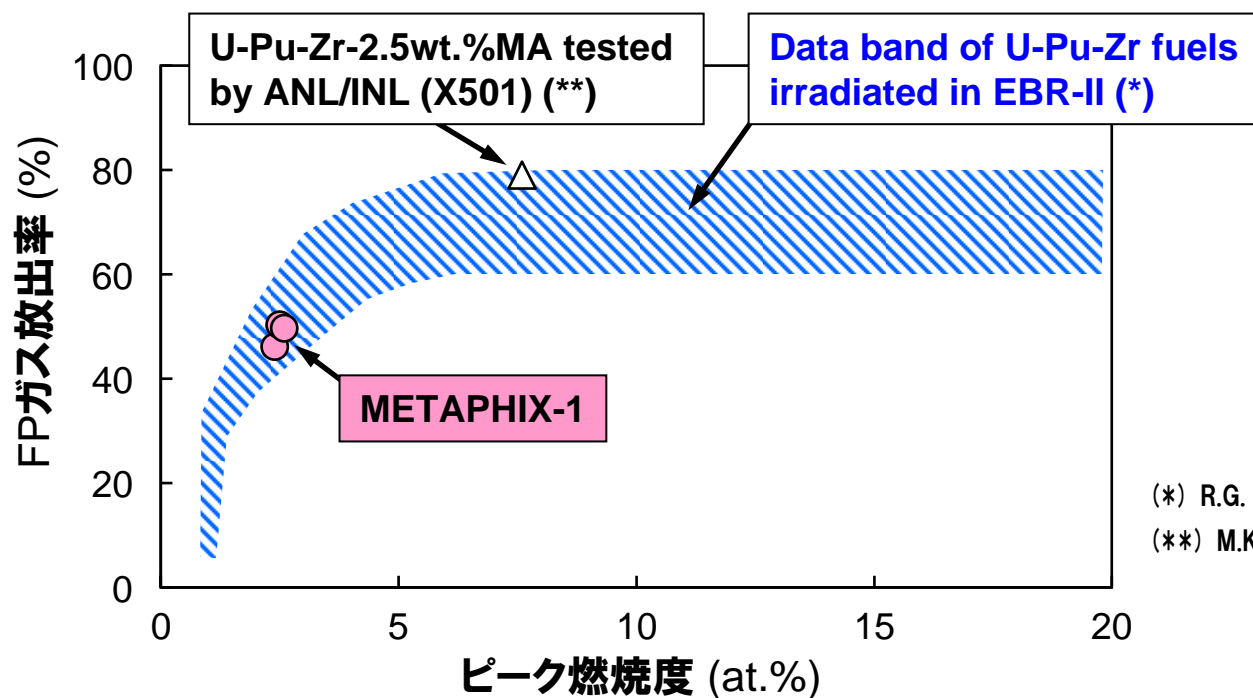


U-19wt.%Pu-10wt.%Zr-5wt.%MA  
燃料スラグの断面 (2.5at.%)

### 3.6. MA含有金属燃料の照射試験

ITUとの共研

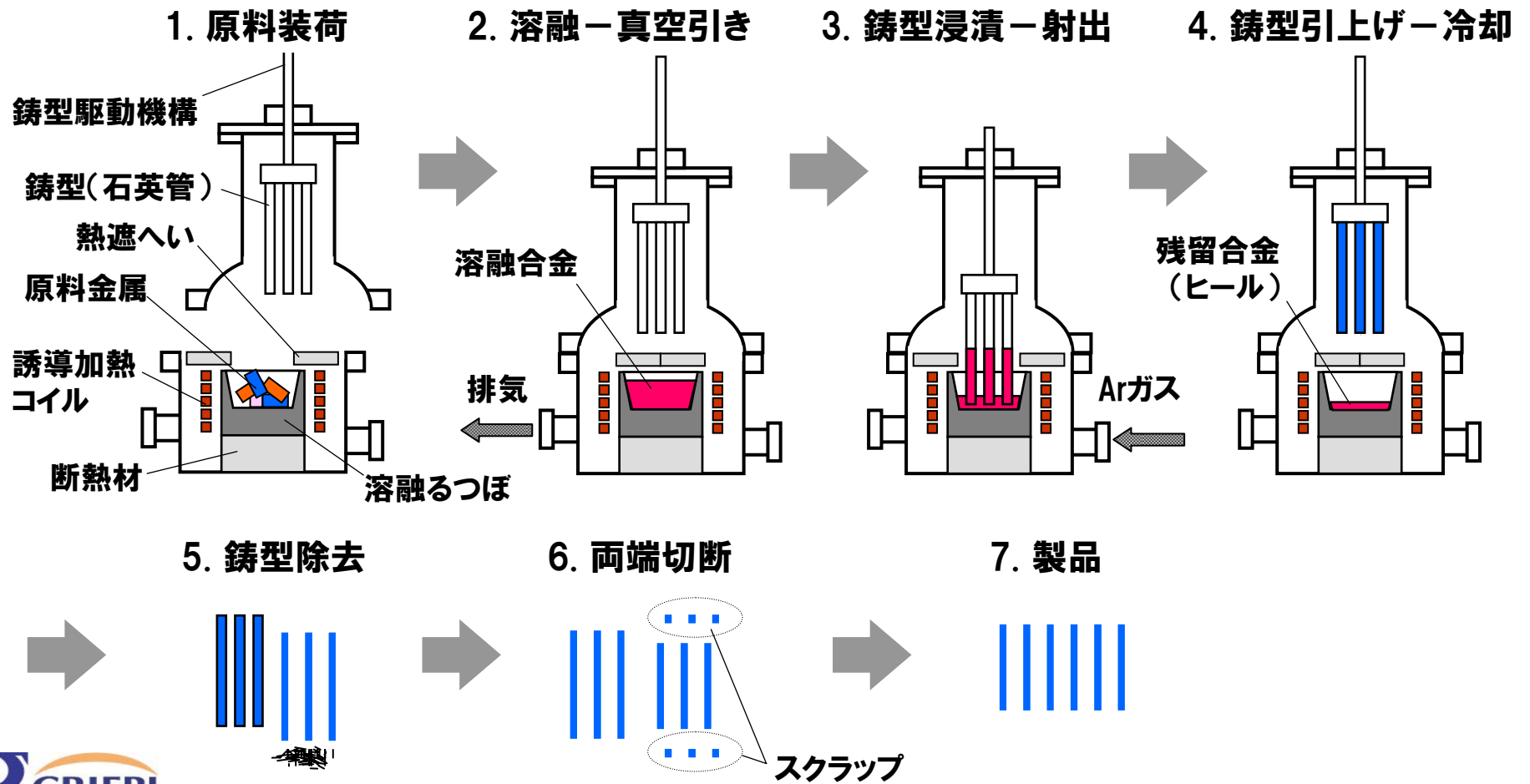
➤ これまでのところ、MA添加が照射挙動に及ぼす顕著な影響は見出されていない



(\*) R.G. Pahl et al, J. Nucl. Mater. 188 (1992) 3.  
(\*\*) M.K. Meyer et al, INL/EXT-08-13835 (2008).

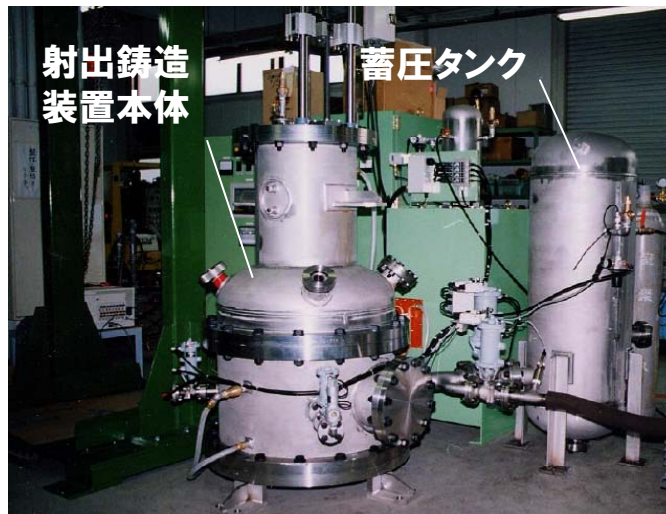
# 3.7. 工学規模射出鑄造試験

## ➤ 射出鑄造法による燃料スラグの製造

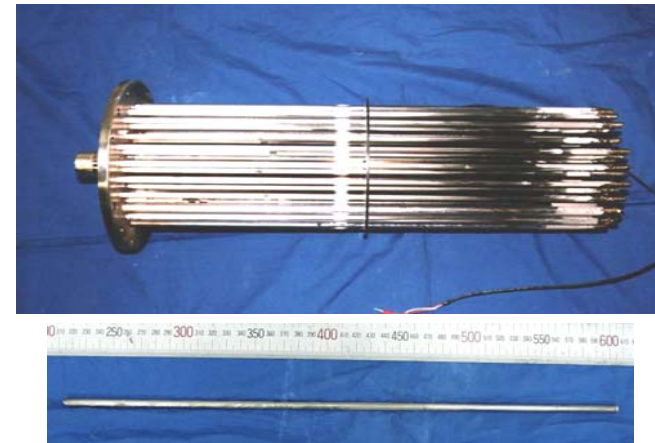


## 3.7. 工学規模射出鑄造試験

- 実用規模に近い20kg/バッチの射出鑄造試験装置によって、直径約6mm、長さ400mmのU-Zr合金スラグを約500本以上製造
- 実用上十分な製造効率、実用的な炉心設計に概ね適合する品質などを達成



工学規模U-Zr射出鑄造試験装置

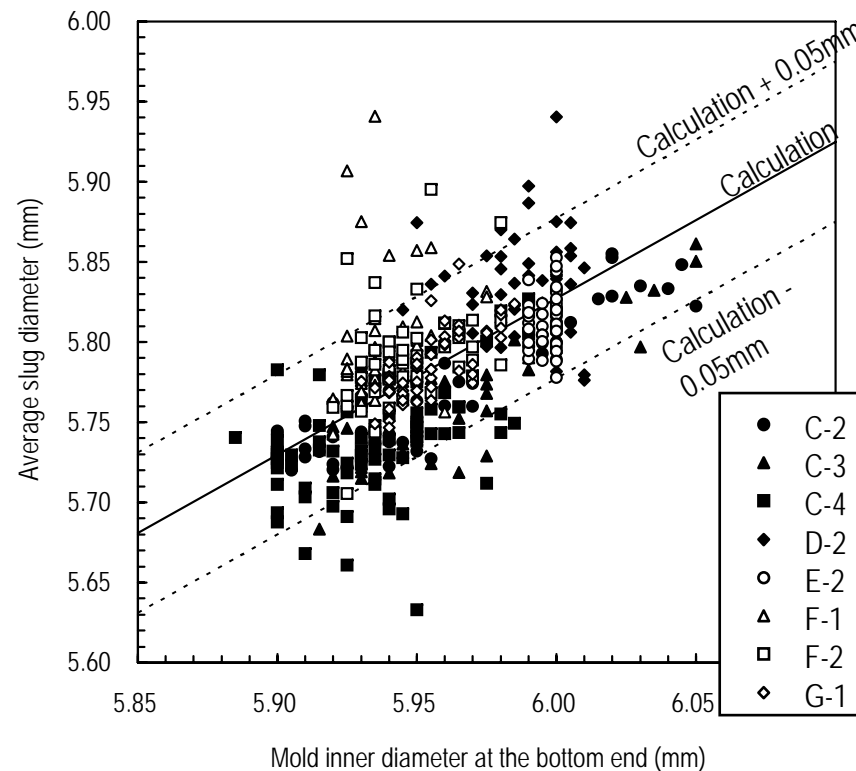


工学規模試験における鑄造後の  
鑄型の外観とU-Zr合金スラグ

旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託事業として財団法人電力中央研究所が実施した平成14-18年度「金属燃料の乾式再処理プロセスの合理化に関する技術開発」の成果です。

### 3.7. 工学規模射出鑄造試験

➤ 燃料スラグ外径は鑄型の内径精度の管理によって調整可能



旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの委託事業として財団法人電力中央研究所が実施した平成14-18年度「金属燃料の乾式再処理プロセスの合理化に関する技術開発」の成果です。

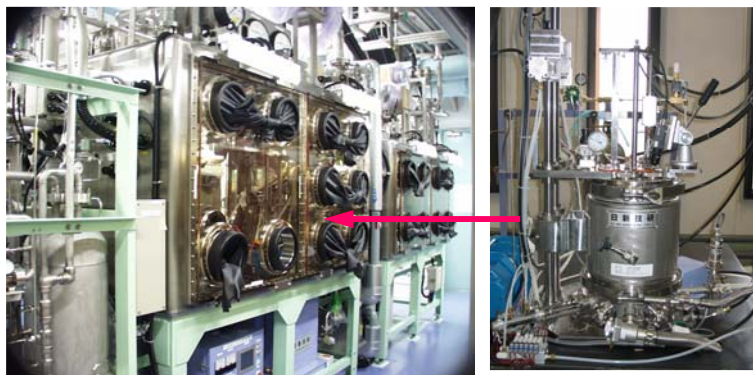
T. Ogata & T. Tsukada, Global 2007, Boise, ID (2007).



## 3.8. 小規模射出鑄造試験

- 常陽照射試験に向けて、約200g/バッチの小規模射出鑄造試験装置によって、直径約5mm、長さ200mmのU-Pu-Zr合金スラグを製造
- 組成の均一性、直径のばらつきなどの目標仕様を満足する燃料スラグの製造に成功

JAEAとの共研



金属燃料製造設備と小規模射出鑄造装置の外観



U-20wt%Pu-10wt%Zr合金スラグ

U-20wt%Pu-10wt%Zr合金スラグ検査結果の一例

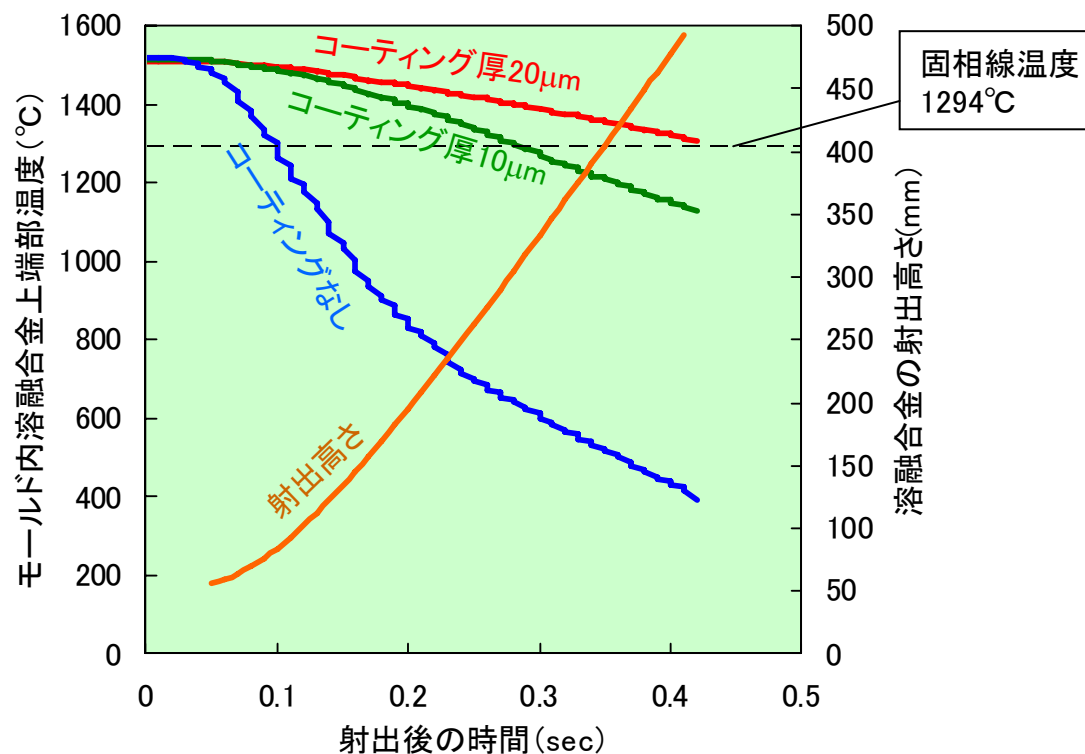
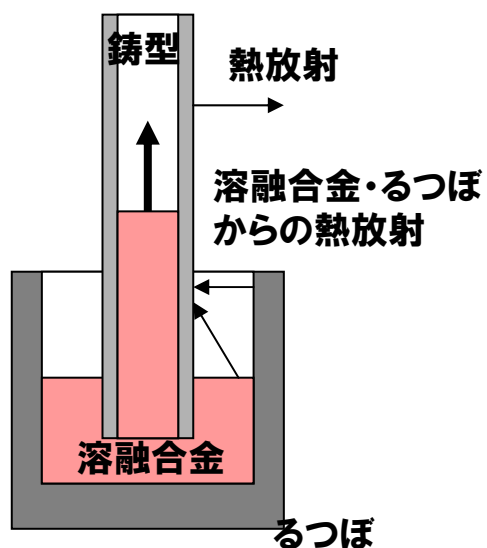
測定項目	測定結果			目標仕様	
長さ (mm)	200.3			200±1	
直径 (mm)	5.02±0.04			4.95±0.05 5.05±0.05	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.6			15.3~16.1	
組成 (wt%)	位置	上	中	下	
	U	69.0	69.2	68.2	balance
	Zr	10.2	10.0	11.0	10.0±1.0
	Pu	20.5	20.5	20.5	20.0±1.0 (合計)
	Am	0.31	0.31	0.32	



### 3.9. 射出鑄造解析技術の開発

一部神鋼との共研

- 燃料スラグの仕様(長さ、直径、組成など)と鑄造条件の関係を把握するため射出鑄造シミュレーションコード ICAST を開発
- 石英製鑄型内面コーティングの断熱効果が射出長さに大きく影響することなどを解明



## 3.10. MA含有金属燃料製造

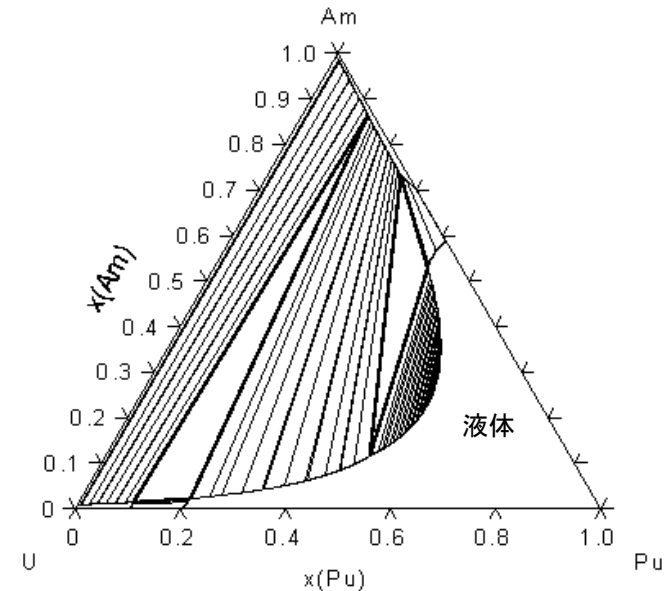
- Phenix照射試験用のMA含有金属燃料はアーク溶解－重力鑄造によって製造<sup>注1)</sup>
- 合金の組織観察および状態図評価によって、U-Pu-Zr-Np-Am合金において、NpはUと類似した挙動を示すこと、Puが共存するとU-Amの混合性が向上することなどを解明



アーク溶解－重力鑄造によって製造した  
照射用MA含有金属燃料ロッド<sup>注1)</sup>

ITUとの共研

注1) M. Kurata, Global 1997, Yokohama (1997).



Am-Pu-U合金の状態図の解析結果(1000°C)

## 4. まとめと今後の展開

- 米国による過去の物性値測定や照射試験等の結果、金属燃料の照射挙動の概略が把握でき、公開データによって試験燃料の設計が可能である。
- しかし、物性値データの拡充、照射挙動のメカニズムの解明とモデル化など、設計合理化や高性能化に向けた課題は多い。
- 電中研では、金属燃料の実用性の実証に向けて、高燃焼度までの照射挙動の理解、高温での使用を制限する挙動の確認、MA含有燃料の照射挙動の確認、燃料製造および照射試験による国内開発実績の蓄積の課題に取り組んできた。
- 米国や韓国など国外において金属燃料への注目が高まる中、将来の基幹電源の確保に向けた基盤研究として、今後も、金属燃料の実用性の実証に向けた研究開発を着実に進めて行く予定。

## 4. まとめと今後の展開

### ➤ 今後の研究が望まれる点(例)

#### ✓物性値データの拡充

- 熱伝導率や固相線・液相線温度の測定、状態図評価など
- クリープ等機械的物性値の測定・評価

#### ✓機械的挙動

- 多孔質物体のクリープによる圧縮挙動
- 固体FPの性状と固体FPスエリング量の定量評価
- 機械的挙動

#### ✓化学的(金属学的)挙動

- 燃料成分やFPの移動
- 被覆管との反応(希土類による侵食、液相形成)
- 事故時の熔融燃料の挙動(被覆管、集合体部材との反応進展、凝固/分散挙動)

#### ✓MA添加の影響

#### ✓燃料製造技術の改良、革新

#### ✓燃料概念の改良、革新

## 5. 金属燃料の革新概念 (1) Zr濃度低減

### 【特徴】

- ✓燃料合金中のZr濃度を3wt.%まで低減
- ✓U-Pu-3wt.%Zr燃料(Zrシース付)の照射試験実績有り、U-2wt.%燃料は非等方的照射成長

### 【期待される特長】

- ✓炉内のフィッサイル装荷量の増大 → 炉心特性の一層向上
- ✓液相線温度・固相線温度の低下 → 射出鑄造時の燃料熔融温度低減、Am蒸発抑制
- ✓電解精製工程におけるZr処理の負荷を低減

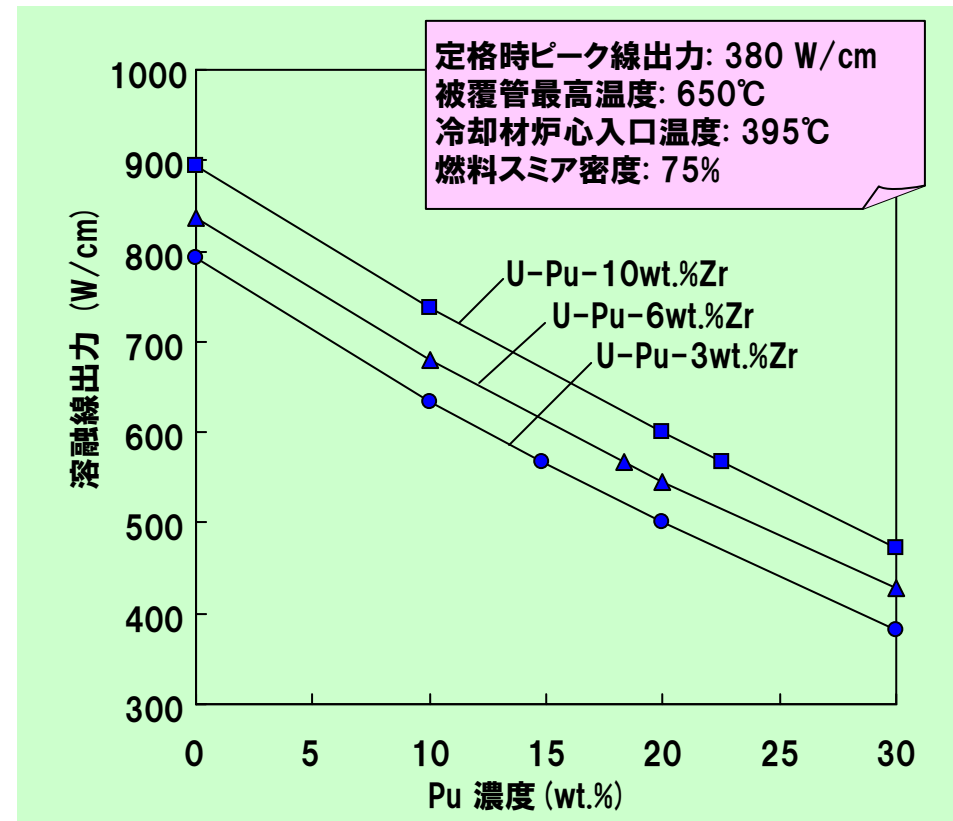
### 【課題】

- ✓熔融線出力の低下
- ✓被覆管の液相侵食速度の増大？ ← 反応層における高融点の $\text{Fe}_2\text{Zr}$ 相等の形成量の低下

# 5. 金属燃料の革新概念 (1) Zr濃度低減

## 【研究開発の現状】

- ✓照射挙動の不確かさを含んだ保守側の評価の結果、U-Pu-3wt.%Zr燃料の溶融線出力はPu濃度15wt.%以下の場合、 $>550\text{W/cm}$ で燃料溶融に対して十分な余裕
- ✓燃料と被覆管との共存性については炉外試験や照射試験が必要



## 5. 金属燃料の革新概念 (2) 被覆管ライニング

### 【特徴】

- ✓希土類FPによる被覆管内面腐食や過渡時の液相浸食を低減するため、被覆管の内側にバリア材(ライナー)を設置

### 【期待される特長】

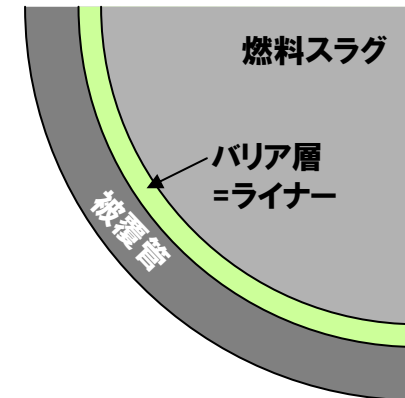
- ✓被覆管内面腐食や液相浸食の防止・抑制  
→高被覆管温度( $>600^{\circ}\text{C}$ )や高燃焼度( $>15\text{at}\%$ )における金属燃料の使用を容易にする

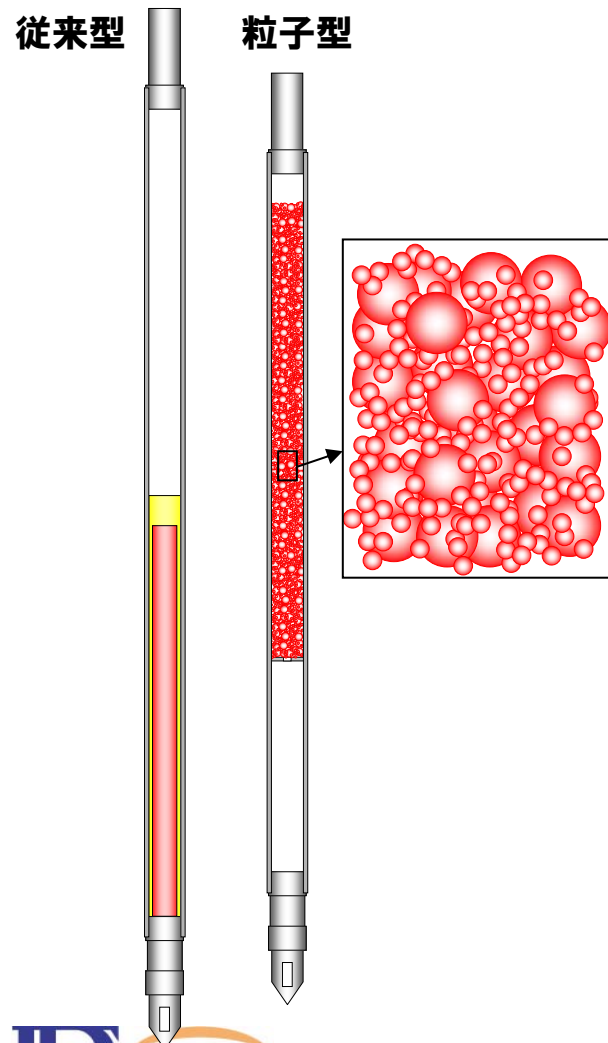
### 【課題】

- ✓ライナー材の信頼性
- ✓ライニング方法、端栓溶接方法の工夫、開発
- ✓頑健な被覆管が金属燃料炉心の安全性に及ぼす影響の評価  
(仮想的な炉心崩壊事象に至るシナリオにおいて、  
溶融燃料の分散-負の反応度印加のタイミングが遅れる?)

### 【研究開発の現状】

W、V、Zr、Ti、Cr、ZrNなど種々のライナー材が日本、米国、韓国で試験  
これまでの炉外加熱試験の結果では、Vが最も良好





#### 【特徴】

- ✓ 外径比5:1~10:1程度の大粒子と小粒子を混合してスミア密度75%程度
- ✓ ボンドNaを使用せず、Heを充填

#### 【期待される特長】

- ✓ 下部プレナムが可能になり燃料ピン長を短くできる  
→ 圧損緩和によりバンドル稠密化に余裕
- ✓ 最初から被覆管との接触があるためボンドNa不要  
→ 電解精製装置の塩の寿命延伸、 $\text{CdCl}_2$ 等酸化剤使用量抑制
- ✓ 製造工程の歩留まり向上が可能
- ✓ ガスアトマイズで粒子製造の場合、鑄型が不要、しかも閉鎖系での合金熔融が可能となり高MA燃料への対応可能性

#### 【課題】

- ✓ ガスアトマイズによる粒子製造可能性の確認
- ✓ 均一充填の確認が必要
- ✓ 充填不均一の場合ホットスポットファクタ増大
- ✓ 使用前の焼結促進のためプレコンディショニングが必要
- ✓ F/C点接触の影響が不明
- ✓ Csや希土類の挙動などが不明(径方向温度勾配大)
- ✓ ボイド反応度係数の影響評価



## 5. 金属燃料の革新概念 (3) Heボンド粒子型金属燃料

### 【研究開発の現状】

- ✓U-2Mo, U-10Mo, U-5Nb-3Zr, U-9Nb-3Zr (wt.%) の合金粒子を遠心アトマイズ法で製造。(KAERI)  
平均粒径50 $\mu$ m前後の球形粒子。1バッチ約4kg、RERTRプログラムの一環。

K.H. Kim, et al, J. Nucl. Mater. 245 (1997) 179.

J.M. Park, et al, J. Nucl. Mater. 265 (1999) 38.

- ✓U-10Zr, U-30Zr, U-70Zr (at.%) の合金粒子を融体滴下法で製造。(旧原研)  
粒径0.4~1.0mmの球形粒子。  
JRR-2で約1.2at.%まで照射。

T. Ogawa, et al, J. Alloys & Compounds, 271-273 (1998) 670.

- ✓U-15Pu-10Fz (wt.%) のガスアトマイズおよび粉砕 (pulverizing) によって製造。(旧ANL)  
粒径80~400 $\mu$ mの球形粒子。(ガスアトマイズで粒子状とならなかったスポンジ状の合金をhammer millで粉砕、球状化)  
篩分で粒子径をそろえてNb-1Zr合金製被覆管に約60%スミア密度で充填、ボンドNaを充填。  
CP-5で3.8at.%まで照射。被覆管最高温度560~600 $^{\circ}$ C。6本の試験燃料の被覆管の全てに小さなクラックや検知できない欠陥が発生。(原因不明)

Annual Progress Report for 1965: Metallurgical Division, ANL-7155.

W.N. Beck et al, ANL-7388 (1968).

- ✓米国ベンチャーARC社のARC(Advanced Reactor Concept:燃料寿命20年、燃料交換期間7年、電気出力100MWe)の燃料概念として採用

L. Walters, et al, Proc. ICAPP'10, San Diego, CA, USA, Jun.13-17, 2010.

## 5. 金属燃料の革新概念 まとめ

- ✓ Zr濃度低減、被覆管ライニング、Heボンド粒子型金属燃料の組み合わせ概念も可能
- ✓ 実用化されれば、金属燃料・炉心の性能は一層向上し、燃料サイクルプロセスにも好影響
- ✓ いずれの革新概念も今後の確認試験が必要だが、高速炉の実用化(～2050年?)までに間に合う可能性