

# 超高燃焼度燃料に関する研究

## -金属燃料の設計評価結果と課題-

CRINESセミナー

平成23年3月11日 at 東京工業大学 原子炉工学研究所

(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

太田 宏一

---

# 発表内容

1. はじめに
  2. 金属燃料開発の現状  
照射挙動の概要  
照射試験
  3. 超高燃焼度燃料の設計  
燃料仕様  
照射条件  
被覆管の照射特性  
解析結果  
革新的な燃料仕様の検討
  4. 超高燃焼度化に向けた課題
  5. まとめ
-

# 1. はじめに

## 金属燃料.....

U-Zr / U-Pu-Zr [wt%] 合金  
高密度 & 高熱伝導率

### → 高速炉の炉心性能の向上

増殖性の向上(ブランケットなしで増殖比 $\geq 1.2$ )  
核分裂性物質のインベントリー削減  
平均燃焼度の向上

### → 乾式再処理法に適合

小規模で高い経済性  
PuがUやMAと同時に回収(Puの単離が困難)

### → 射出鋳造法の採用

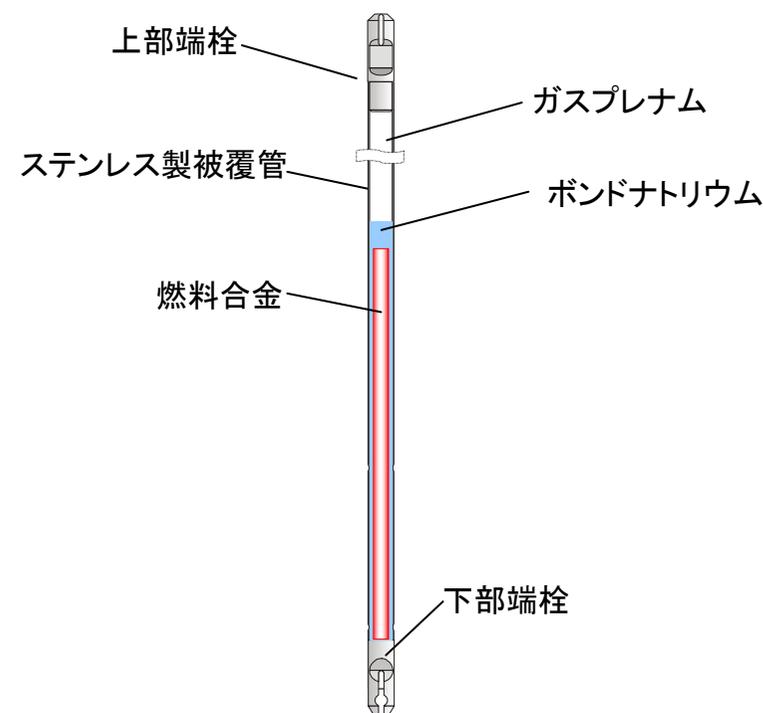
遠隔操作に適した簡便な燃料製造

米国・韓国・インド・中国などで、将来の高速炉燃料の実用化概念の一つに位置づけられている

国内では、「FBRサイクル実用化研究開発」において『副概念』に選定されている

	金属燃料	酸化物燃料
組成 [wt%]	U-Pu-10Zr	(U, Pu)O <sub>2</sub>
理論密度 [g/cc]	15.8	11
スミヤ密度* [%]	75	84
重金属密度** [g/cc]	8.3	6.3
ボンド材	Na	He
熱伝導率 [W/m·K]	26.6	2.3
融点 [°C]	1100	2750

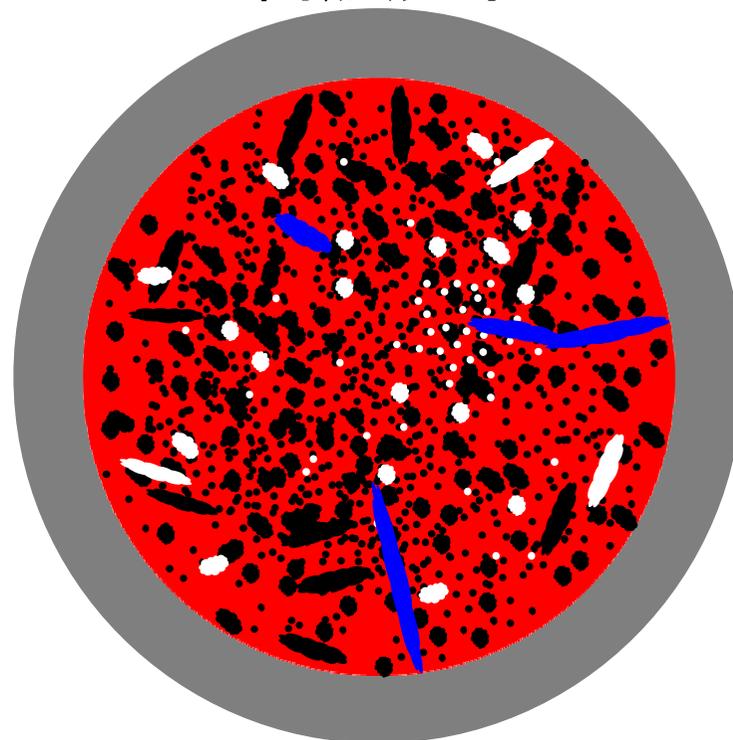
\*:被覆管内の値、\*\*:集合体平均の値



## 2. 金属燃料開発の現状

### 金属燃料の照射挙動の概要

高燃焼時



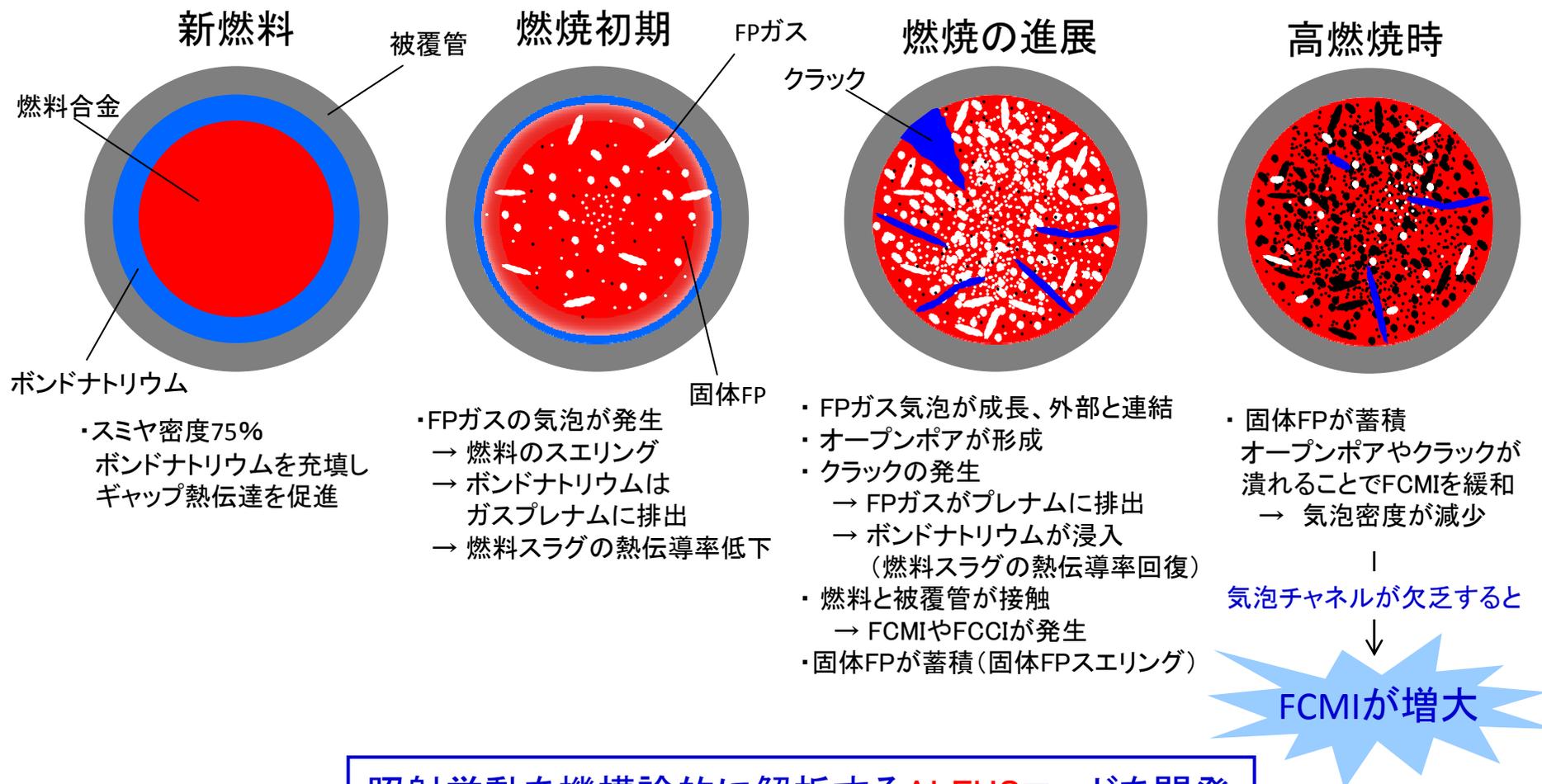
- ・ 固体FPが蓄積  
オープンポアやクラックが潰れることでFCMIを緩和  
→ 気泡密度が減少

気泡チャネルが欠乏すると

FCMIが増大

## 2. 金属燃料開発の現状

### 金属燃料の照射挙動の概要

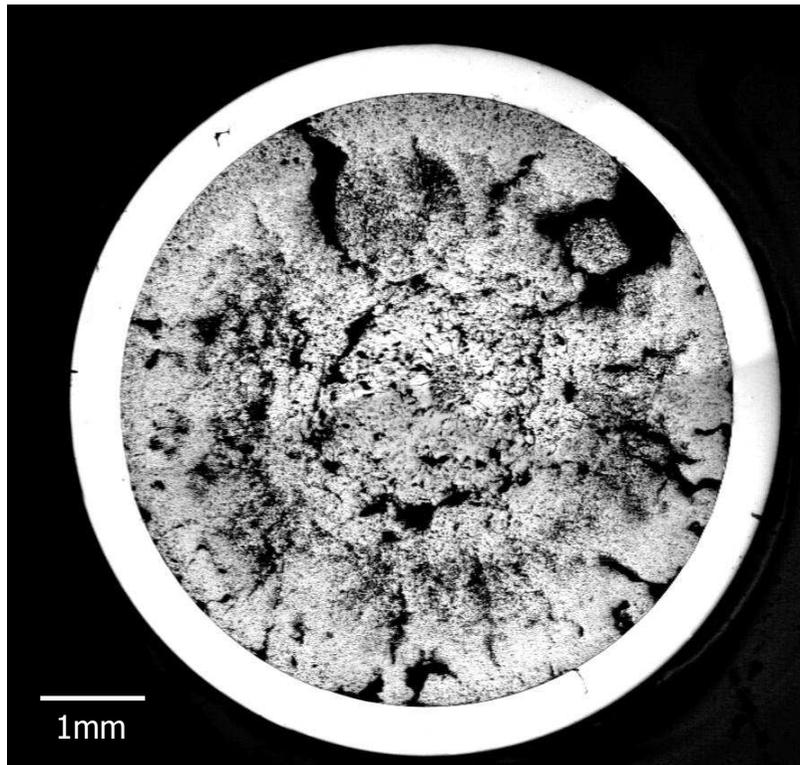


照射挙動を機構論的に解析するALFUSコードを開発

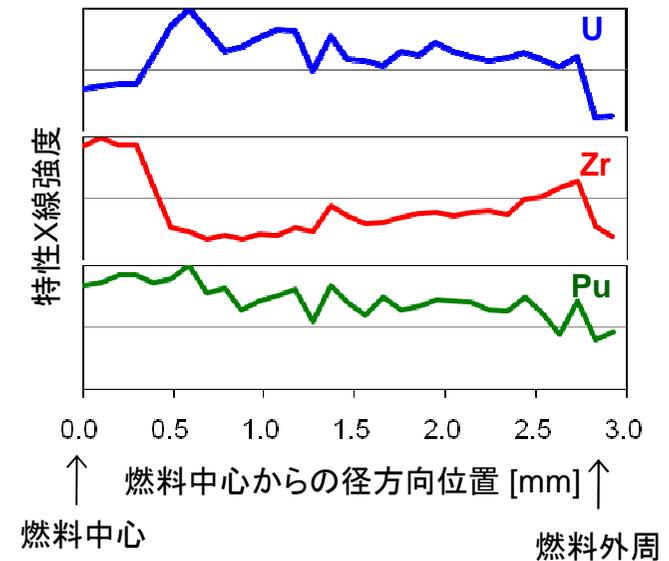
## 2. 金属燃料開発の現状

### 照射試験

2.5at.%燃焼度のU-19Pu-10Zr合金の金相写真



EDXによる径方向濃度分布測定



燃料成分 (U&Zr) が再分布

照射実績: U-Zr合金=約1万本、U-Pu-Zr合金=約600本  
最高燃焼度~20at.%

# 超高燃焼度燃料の設計

### 3. 超高燃焼度燃料の設計

#### 燃料仕様

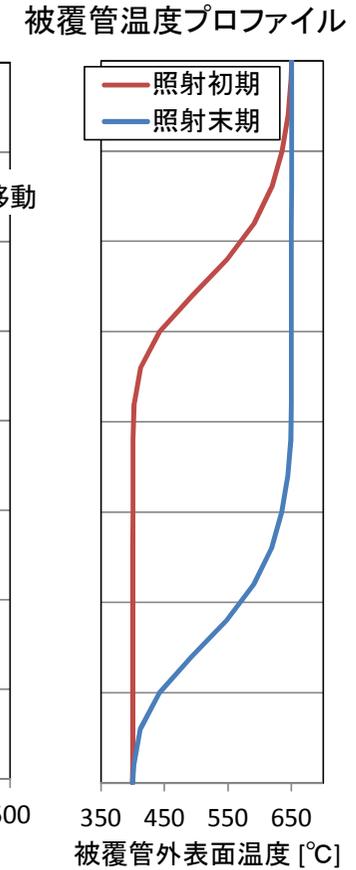
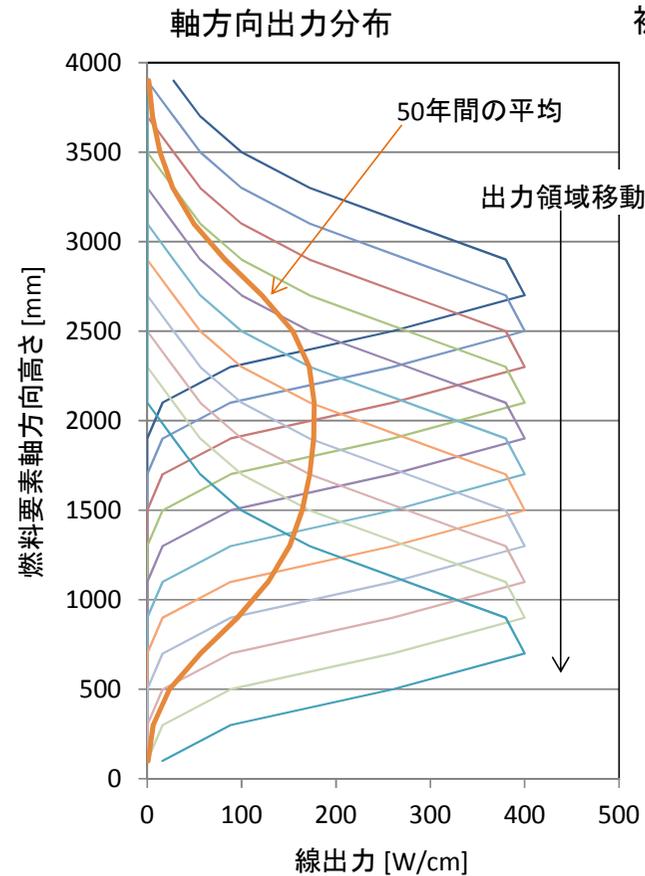
被覆管材料	オーステナイト系/フェライト系
被覆管外径 (mm)	10.2
被覆管内径 (mm)	9.0
被覆管肉厚 (mm)	0.6
ギャップ巾 (mm)	1.2
初期燃料組成	U-10wt%Zr
スラグ径 (mm)	7.8
燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.8
重金属密度 (g/cm <sup>3</sup> )	14.2
スラグ密度 (%TD)	100
スミア密度 (%TD)	75
燃料スタック長 (m)	4.0
プレナム長 (m)	8.5
ボンド材	金属Na

CANDLE燃焼方式を想定し、長尺&太径燃料

# 3. 超高燃焼度燃料の設計

## 照射条件

最大線出力 (W/cm)	400
時間平均最大線出力 (W/cm)	178
燃焼(照射)期間(年)	50
到達燃焼度 (GWd/t)	478 (~50at.%)
被覆管最高温度 (°C)	650
高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> ·s)	$3.8 \times 10^{15}$
高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )	$2.7 \times 10^{24}$
損傷量 (dpa)	1330



# 3. 超高燃焼度燃料の設計



## 被覆管の照射特性

オーステナイト系SS: PNC-316相当鋼  
フェライト系SS: FMS相当鋼

スエリング特性

$$S = R \cdot \phi(D - D_0) \cdot \exp\left\{-\frac{(T - T_{\max})^2}{2 \cdot \sigma_T^2}\right\}$$

$$\sigma_T = \frac{\Delta T_h}{2\sqrt{2\ln 2}}$$

- S: スエリング (%)
- R: スエリング速度 (%/dpa)
- D: 損傷量 (dpa)
- D<sub>0</sub>: 潜伏期間 (dpa)
- T: 温度 (°C)
- T<sub>max</sub>: スエリング最大温度 (°C)
- T<sub>h</sub>: スエリング温度依存性における半値幅

## 照射クリープ特性

$$\frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} = B_0 + D_0 \dot{S}$$

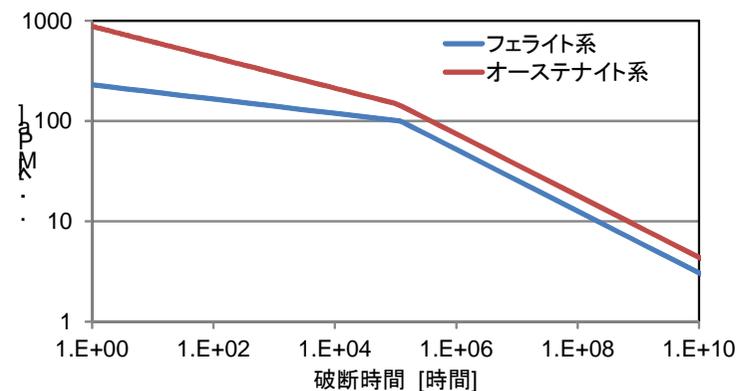
- $\dot{\epsilon}$ : クリープ歪速度 (1/dpa)
- $\sigma$ : 静水圧 (MPa)
- B<sub>0</sub>: クリープ定数 (1/MPa)
- D<sub>0</sub>: スエリング依存定数 (1/MPa)
- $\dot{S}$ : スエリング歪速度 (1/dpa)

## クリープ強度式

$$LMP = T(M_C + \log t_R)$$

$$LMP/1000 = a + b(\log \sigma_H) + c(\log \sigma_H)^2$$

- T: 温度 (K)
- t<sub>r</sub>: 破断時間 (hr)
- M<sub>C</sub>: 材料定数
- σ<sub>H</sub>: 応力 (MPa)



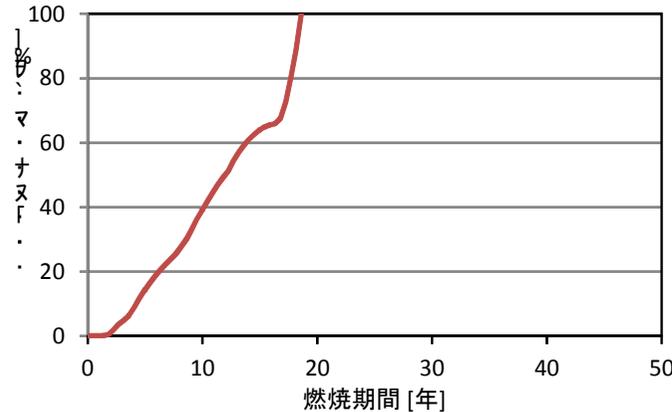
650°Cにおけるクリープ強度特性

# 3. 超高燃焼度燃料の設計

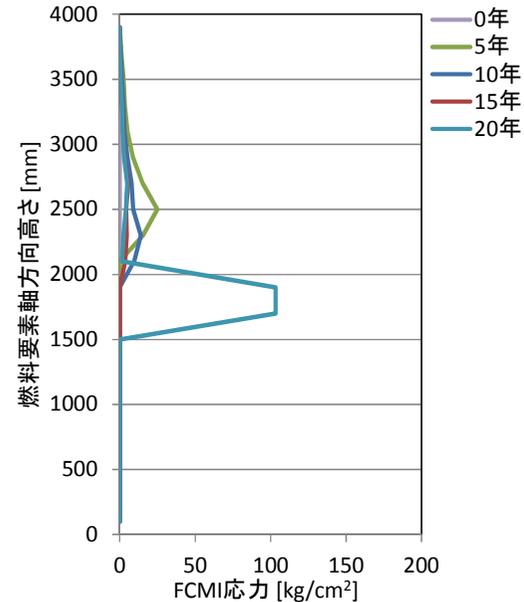


## 解析結果(1): オーステナイト系被覆管材の場合

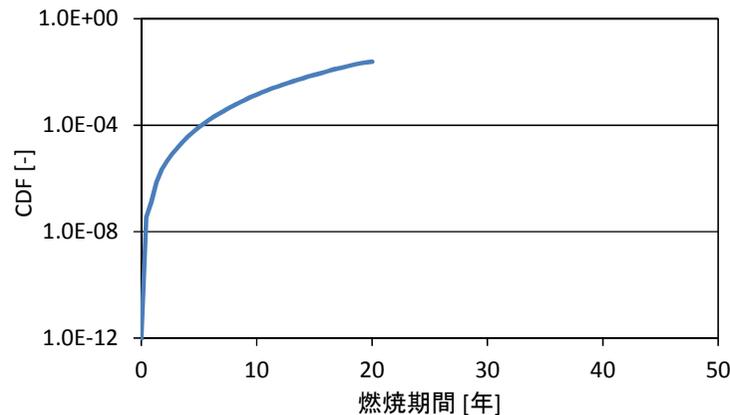
被覆管最大変形率の推移



FCMI応力の軸方向分布の推移



被覆管CDFの推移



### 照射スエリングが過大

- ・照射開始から5年で被覆管変形率 > 10% (局所燃焼度 > 11at.%)
- ・FCMIは低いレベル → CDF < 1.0

### スエリングの緩和は難

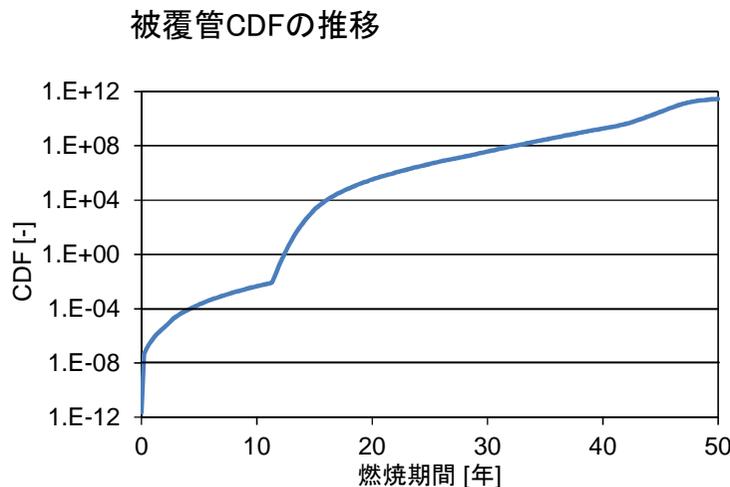
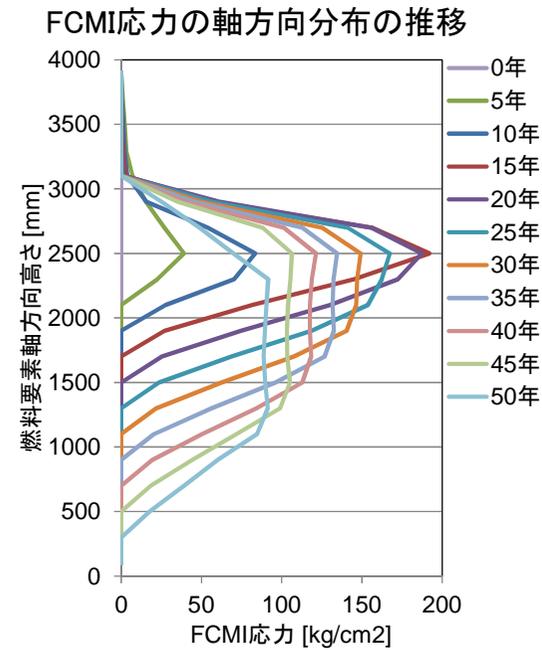
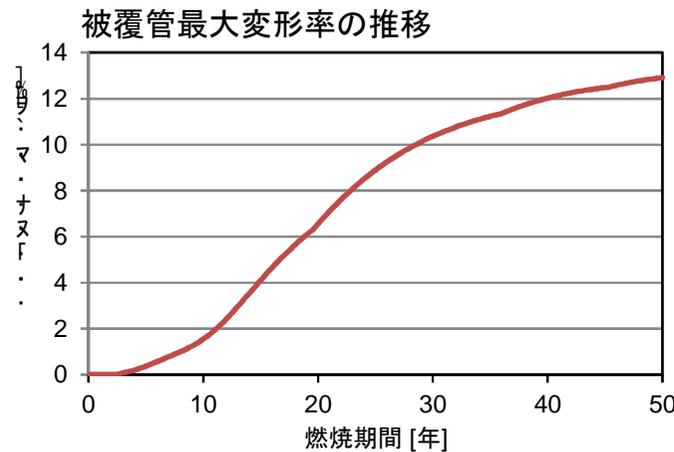
- ・ $400^{\circ}\text{C} < T_{\text{clad}} < 650^{\circ}\text{C}$

超高燃焼度の達成は困難

# 3. 超高燃焼度燃料の設計



## 解析結果(2):フェライト系被覆管材の場合



照射スエリング特性は良い

- ・10年以上の照射でFCMIが急激に増大  
局所燃焼度 > 20at.% → 固体FPの蓄積
- ・CDF > 1.0 (12年)

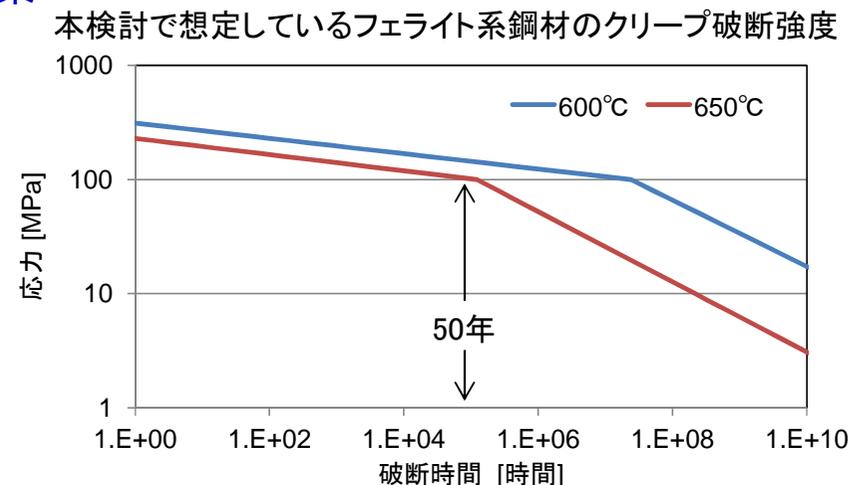
フェライトも超高燃焼度の達成は困難

# 3. 超高燃焼度燃料の設計

## 超高燃焼度化を目指した革新的燃料仕様の検討

超高燃焼度まで照射した燃料ピンの挙動解析結果

被覆管材料	フェライト系
ピーク燃焼度	50at.%
被覆管温度	400~650°C
プレナムガス圧	12MPa
被覆管最大変形率	13.7%
被覆管最大応力	195MPa/cm <sup>2</sup>
被覆管最大CDF値	2.9E+11
プレナム部CDF値	9.7E+4



### 超高燃焼度化に向けた方策案

フェライト系被覆管材

FCMI応力の低減

→ 燃料のHM密度を保ちながら、スミヤ密度を低減

プレナムガス圧の低減

→ FPガス排出機構(ベント型燃料)の採用

被覆管温度の低下

→ 冷却材流量の増加

### 3. 超高燃焼度燃料の設計

#### 革新的燃料仕様

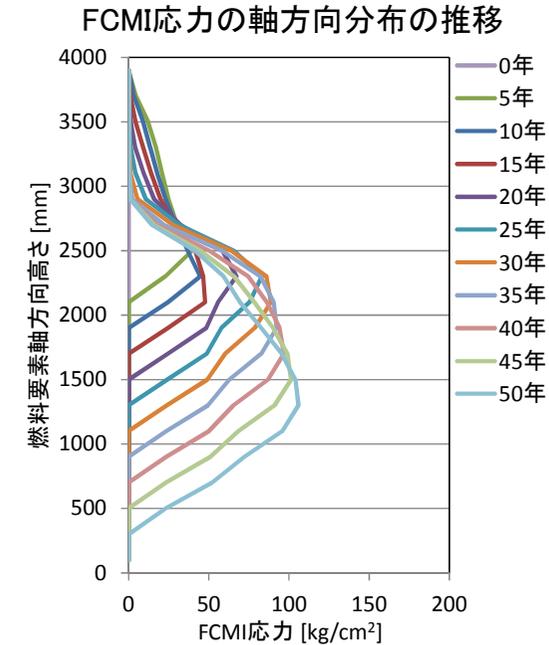
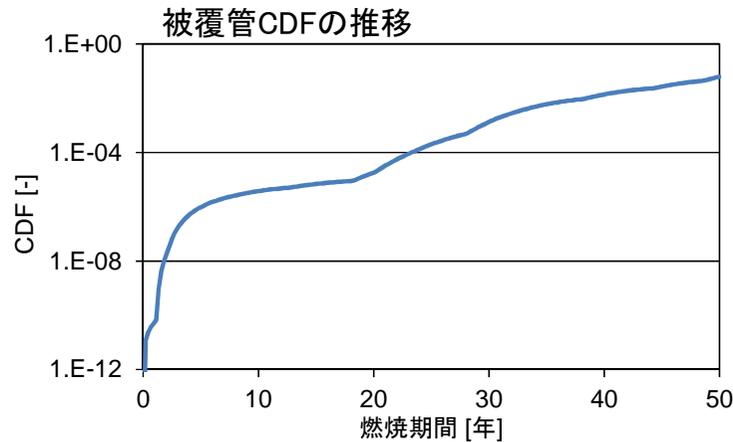
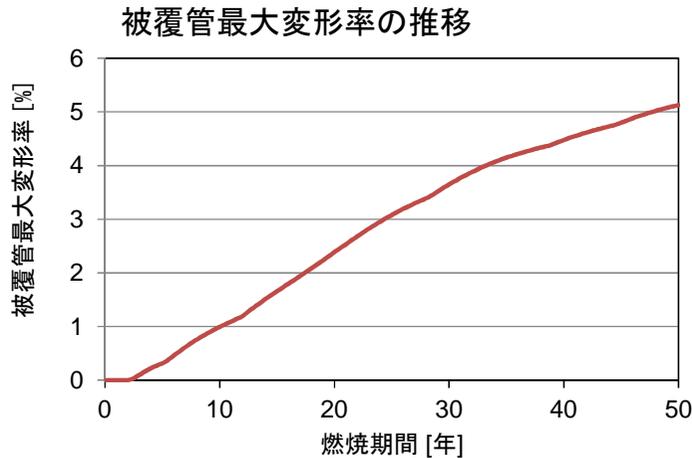
	従来仕様	革新的仕様
被覆管材料	オーステナイト/フェライト系	フェライト系
被覆管外径 (mm)	10.2	10.2
被覆管内径 (mm)	9.0	9.0
被覆管肉厚 (mm)	0.6	0.6
ギャップ巾 (mm)	1.2	<b>2.0</b>
燃料組成	U-10wt%Zr	<b>U-3wt%Zr*</b>
スラグ径 (mm)	7.8	<b>7.0</b>
燃料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	15.8	<b>18.0</b>
重金属密度 (g/cm <sup>3</sup> )	14.2	<b>17.5</b>
スミア密度 (%TD)	75	<b>61</b>
燃料ピンあたりの 重金属密度 (g/cm <sup>3</sup> )	10.7	<b>10.7</b>
燃料スタック長 (m)	4.0	4.0
プレナム長 (m)	8.5	(8.5)
ガス圧上限 (MPa)	-	<b>0.2</b>
被覆管温度 (°C)	400-650	<b>400-600</b>

\*: U-Pu-3wt%Zr合金の照射試験例(燃焼度~2at.%)が存在

# 3. 超高燃焼度燃料の設計



## 革新的燃料仕様による照射挙動



スミヤ密度の低減によってFCMIの増大を緩和  
&  
プレナムガス圧の低減 → 被覆管最大変形率~5%  
&  
被覆管最高温度=600°C → CDF < 1.0

燃料健全性のクライテリアを満足

# 4. 超高燃焼度化に向けた課題

---



## (1) 低スミア密度燃料の開発

- 照射挙動の把握  
固体FPスエリング率、軸方向スエリング率、ガス放出率、ボンドナトリウム浸入割合 など
- 核特性の変化の検討  
軸方向スエリングの増大、ボンドナトリウム装荷量および排出量の増加
- 照射中のガス気泡の蓄積による燃料合金の実効的な熱伝導率の低下
- 燃料中心温度評価

## (2) 低Zr燃料の開発

- 照射挙動の把握  
照射成長、物質移動、被覆管との相互作用など  
低Zr濃度燃料の照射試験の報告例  
U(-Pu)-6wt%Zr: 異常や課題なし  
U-Pu-3wt%Zr : 異常なし (Zrシース燃料, ~2at.% 燃焼度)  
U-2wt%Zr : 非等方な異常成長(~1at.%燃焼度) & 被覆管に過大な歪み
  - Zr濃度の低下による核的影響評価
  - 低Zr合金の化学的安定性
-

## 4. 超高燃焼度化に向けた課題

---

### (3) ベント型燃料の採用

- 既存概念が採用可能
- プレナム長さの短尺化にも効果

### (4) 被覆管温度の低温化

- 冷却材流量の増加によるバンドル圧損(流路面積を保存)  
プレナム長さと合わせて検討

### (5) その他

- 従来の照射挙動データに基づく照射挙動評価の外挿性  
20at.%を大幅に上回る照射データの不足
-

## 5. まとめ

これまでの金属燃料照射データに基づく、機構論的解析コード(ALFUS)によって超高燃焼度(～50at.%)燃料の挙動を解析した。

- 1)オーステナイト系被覆管材の場合、照射スエリングが過大となり、照射開始から5年以内(～11at.%燃焼度)で被覆管の最大変形率が10%を超えた。
- 2)フェライト系の被覆管材の場合、スエリングは抑えられるものの、固体FPの蓄積やFPガス圧の増大により、やはり通常の燃料仕様で燃焼度50at.%を達成することは難しい。

以上の結果から、超高燃焼度化を実現するには、以下のような燃料仕様の高度化を実現する必要があると言える。

- ・重金属装荷量を保存したまま、燃料スミア密度を低減する。  
(Zr濃度を低減する)
- ・プレナムガス圧を低減する。
- ・被覆管最高温度を下げる。

このような革新的燃料を開発することで、超高燃焼度燃料の成立に見通し