

# R & D 報 告 会 資 料

[平成 15 年度 第 1 回～第 3 回]

(業務報告)

2 0 0 3 年 10 月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：[jserv@jnc.go.jp](mailto:jserv@jnc.go.jp)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2003

## R & D 報 告 会 資 料

[平成 15 年度 第 1 回～第 3 回]  
(業務報告)

開発調整室\*

### 要 旨

大洗工学センターにおける R & D 報告会は、海外出張における成果および R & D の成果を報告し、それに対する討議を行い、今後実施していく大洗工学センターにおける R & D への反映を図ること並びに発表者の発表能力の向上を目的として、毎月第 2 金曜日に実施されている。

本資料は、R & D 報告会において報告された資料を事務局が取りまとめたものであり、詳細報告については R & D 担当課室・Gr より海外出張報告書あるいは成果報告書として発行される予定である。本報告書は平成 15 年 4 月から平成 15 年 9 月にかけて報告された成果をまとめたものである。

---

\* 編集事務局

## 目 次

## [第1回 R&amp;D報告会] 平成15年5月8日～5月9日開催

1. Na冷却炉の原子炉容器上部プレナム流動適正化試験	1
技開部 開発Gr. 副主研 木村暢之	
2. Na冷却炉上部プレナム流動解析	13
技開部 流体Gr. 研究主幹 大島宏之	
3. 鉛ビスマス冷却中型炉のH14年度プラント設計について	23
システム部 FBRGr. 副主研 江沼康弘	
4. 多様な炉心の炉心安全性の検討－平成14年度評価結果報告－	41
技開部 リスクGr. SL 飛田吉春	
5. ODSフェライト鋼被覆管の実用化技術開発	51
システム部 核燃料Gr. 副主研 皆藤威二	
6. LLFP核変換炉心の検討	61
システム部 炉燃Gr. 副主研 高木直行	
7. ORIENTサイクルの炉心への影響評価	69
システム部 中性子Gr. 副主研 大木繁夫	
8. FBRサイクルの総合的安全評価－乾式施設のリスク分析－	79
システム部 安全設計Gr. 副主研 栗坂健一	
9. 湿式再処理システムにおけるMA回収プロセス	93
システム部 再処理Gr. 副主研 駒義和	
10. 分離・利用に関する基礎研究	105
システム部 分離変換Gr. 研究主幹 小澤正基	
11. 候補概念のサイクル諸量予備評価	121
システム部 サイクルGr. 副主技 塩谷洋樹	

## [第2回 R&amp;D報告会] 平成15年7月4日開催

1. 東海再処理施設酸回収工程のスチームジェット腐食故障の調査結果	
(1)マクロ観察結果と調査計画	129
東海 再処理センター 处理部 化処理1課 副主技 白水秀知	
2. 東海再処理施設酸回収工程のスチームジェット腐食故障の調査結果	
(2)腐食部位の金属組織観察	139
燃材部 FMS 副主研 田中康介	
3. 東海再処理施設酸回収工程のスチームジェット腐食故障の調査結果	
(3)腐食部位の温度評価	145
技開部 流体Gr. GL 山口彰	

4. 東海再処理施設酸回収工程のスチームジェット腐食故障の調査結果 (4)腐食要因のまとめと対策への反映	.....	155
東海    再処理センター    処理部    化処理1課    課長	林    晋一郎	
5. CABRI-R A F T T P A 2 試験の評価	.....	167
技開部    リスクGr    副主研	山野    秀将	

### [第3回 R & D報告会] 平成15年9月12日開催

1. 炉内照射下クリープ試験における破断試料の同定 —レーザを用いた超高感度タグガス分析—	.....	175
照射センター    実験炉部    技術課	副主研	伊藤    主税
2. 「常陽」MK-III燃料の製造 —PNC1520 製部材の溶接経験—	.....	185
東海    Pu燃センター    製造加工部    加工課	副主技	青木    信廣
3. MK-III総合機能試験結果(その2) —試験結果の総括—	.....	199
照射センター    実験炉部    原一課	技術主幹	伊東    秀明
4. MK-III性能試験結果(その1) —低出力時の核特性を中心に—	.....	211
照射センター    実験炉部    技術課	研究員	前田    茂貴

# 第1回 R & D報告会

[平成15年5月8日～9日]

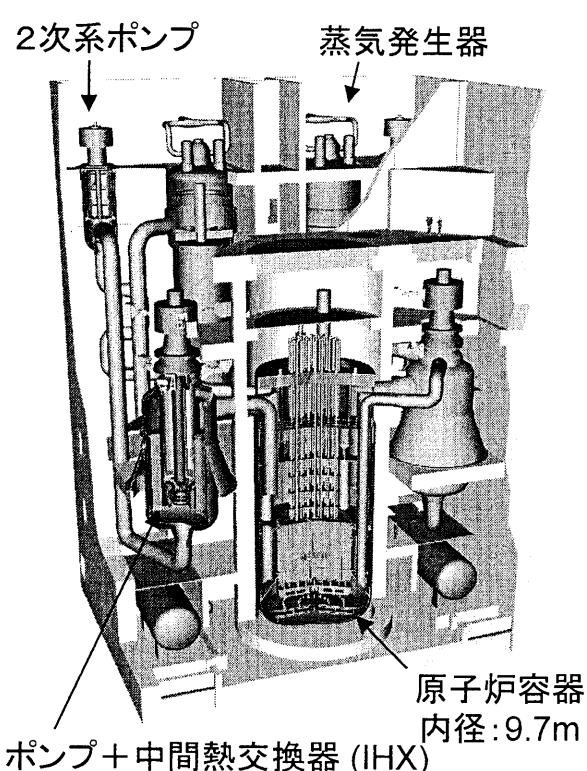
# Na冷却炉の原子炉容器 上部プレナム流動適正化試験

要素技術開発部  
新技術開発試験グループ  
木村 暢之

平成15年度第1回研究開発成果報告会  
2003年5月8日

平成15年度第1回研究開発成果報告会  
2003年5月8日

## Na冷却大型炉の概念

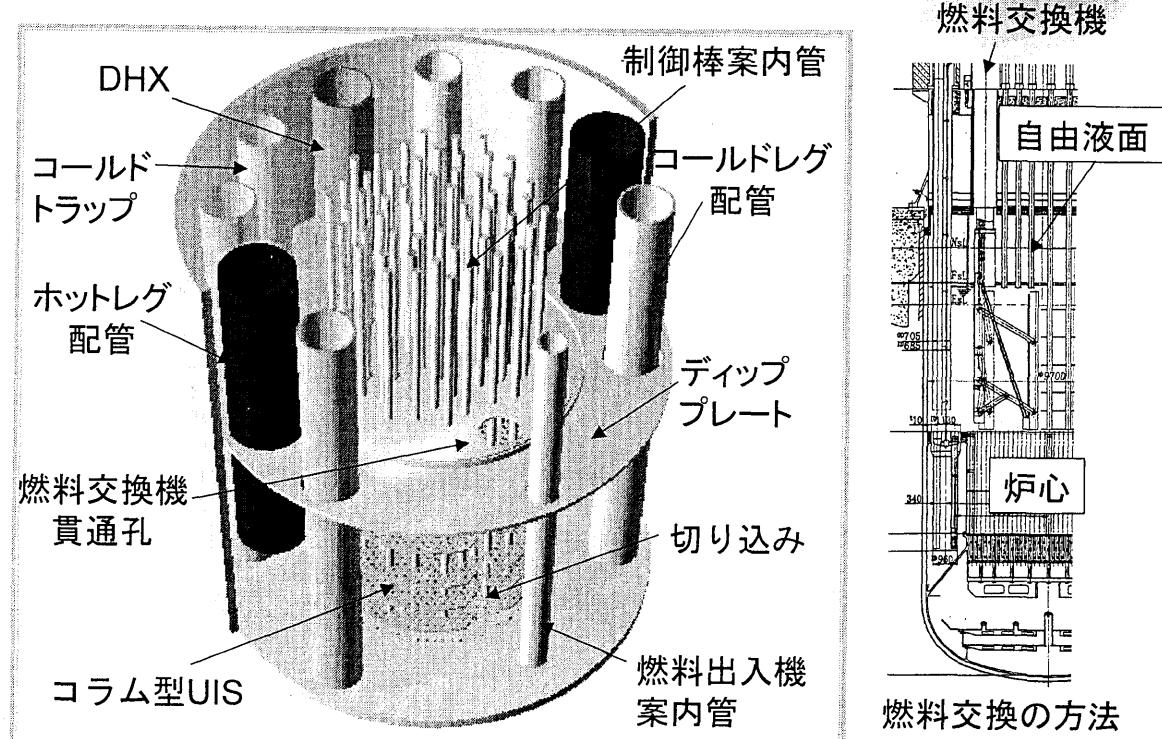


主要目  
電気出力: 150万kWe  
1次系温度: 395°C / 550°C

### 経済性の向上

- ・原子炉容器コンパクト化
- ・ループ数削減
- ・配管短縮化（材料変更）
- ・合体機器（ポンプ+IHX）

## 原子炉容器の上部プレナム構造



## 背景&目的

### 経済性向上を目指したNa冷却FBR

#### 物量の削減

\*実証炉との比較

#### 原子炉容器のコンパクト化

#### ループ数の削減

#### 燃料交換システムの簡素化

炉容器径に対する出力比  
660MWe/10.4m

3ループ  
2ループ

単回転プラグ  
+  
アーム付燃交機

1500MWe/9.7m

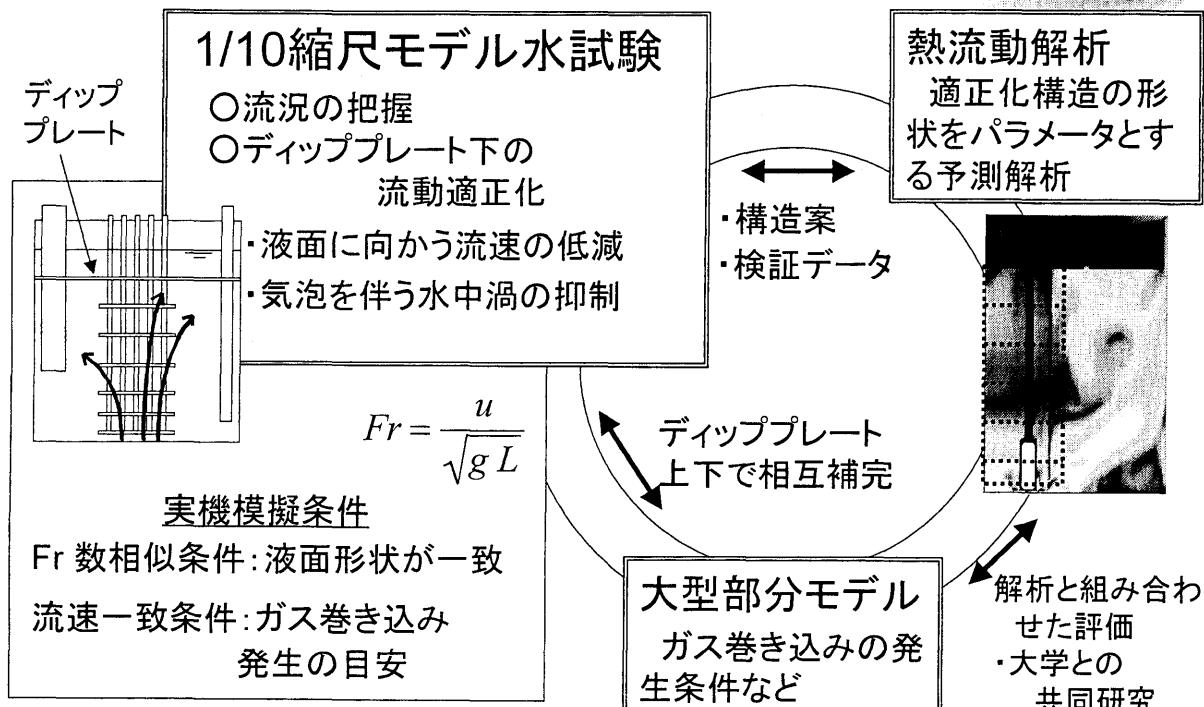
冷却材流量の増加  
(上部プレナム内流速の増加)

切り込み付き炉上部機構  
(UIS)の採用

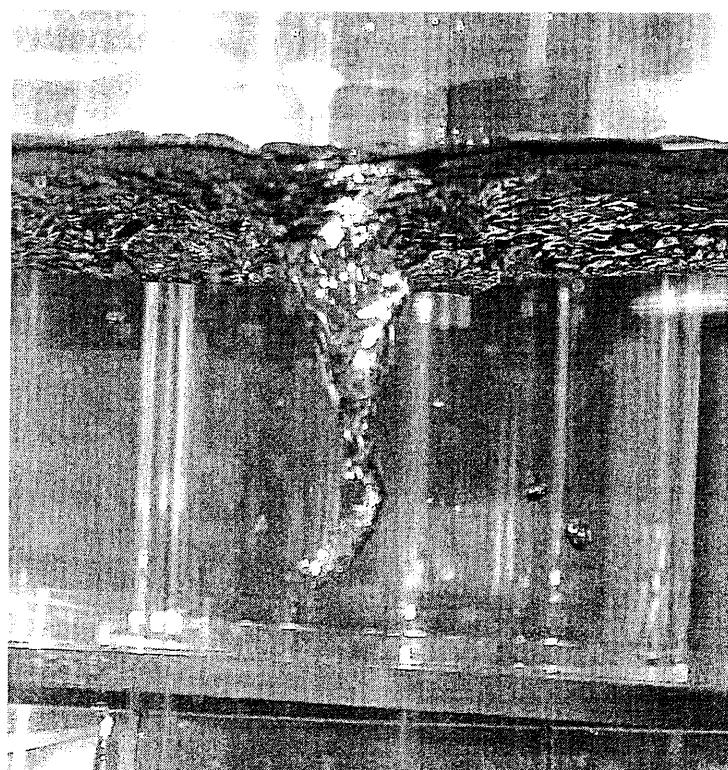
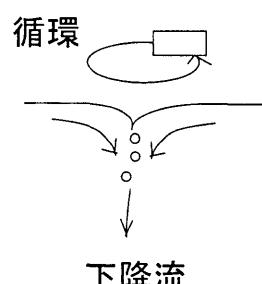
- 自由液面からのガス巻き込み現象
- キャビテーション
- 流力振動
- 他の熱流動課題 (サーマルストライピング、温度成層化現象、など)

上部プレナム内の流動適正化を図る

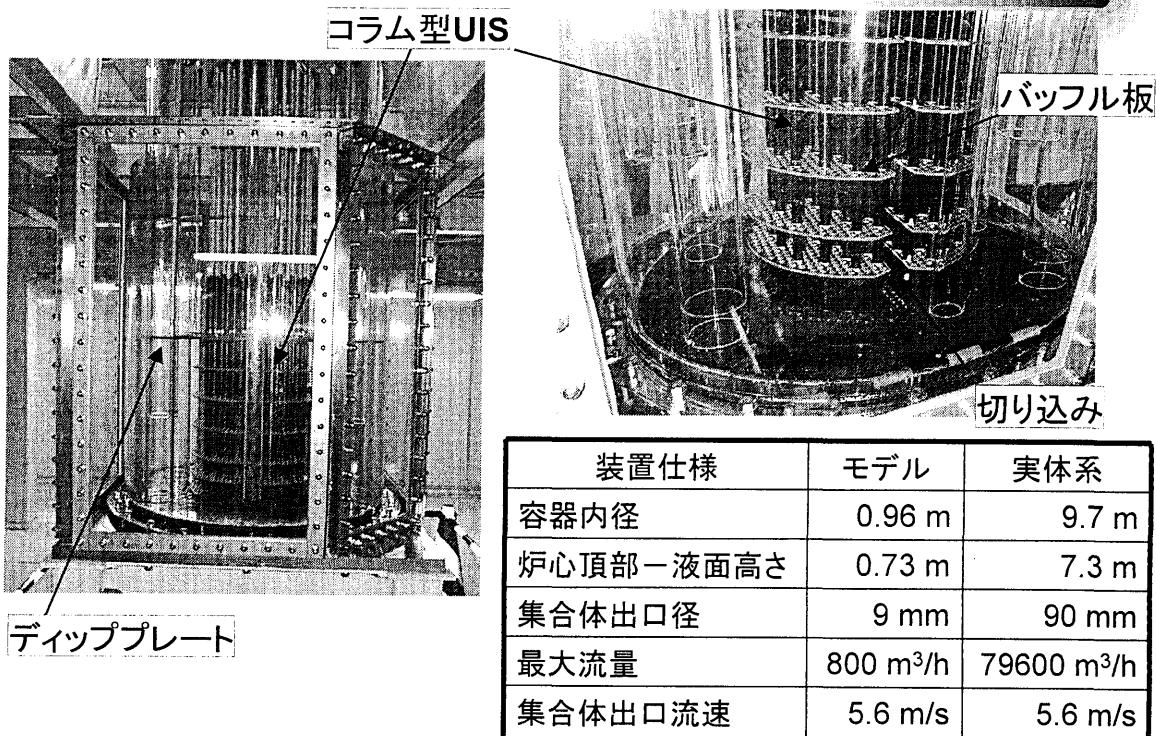
## 流動最適化へのアプローチ



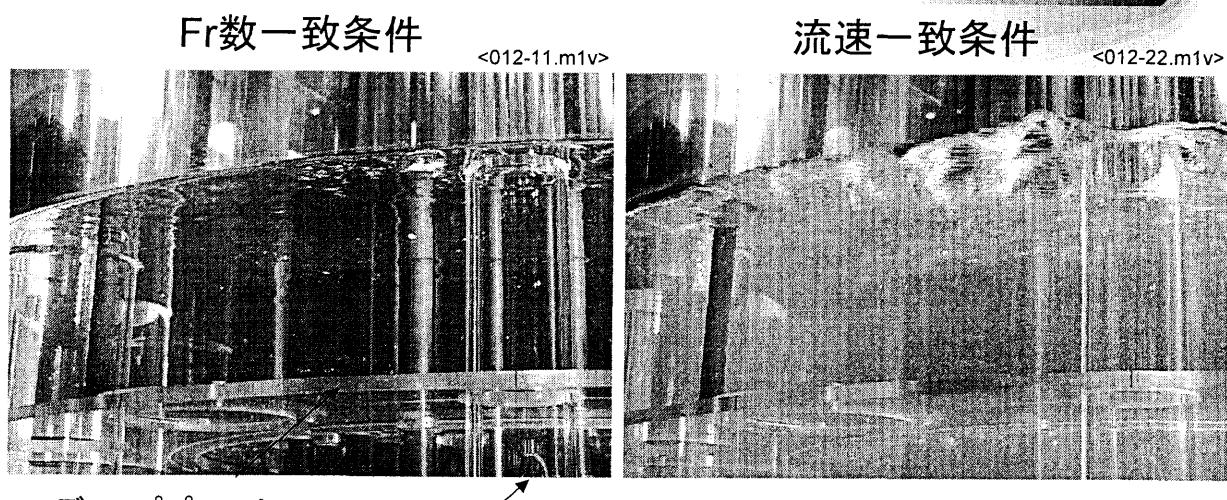
## ガス巻き込み現象の一例

旋回渦による  
ガス巻き込み

## 1/10縮尺上部プレナム水流動試験装置

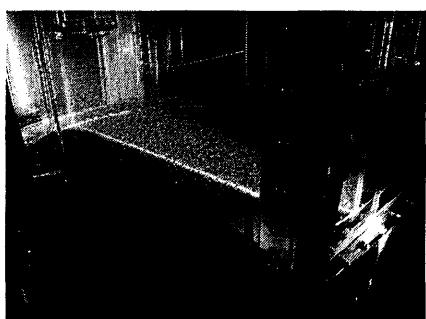
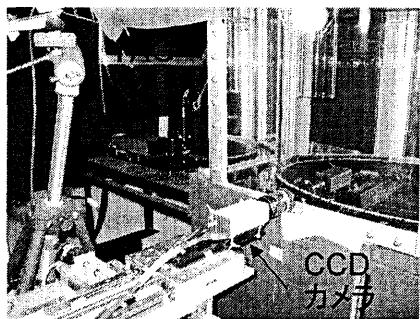


## 液面の可視化観察結果

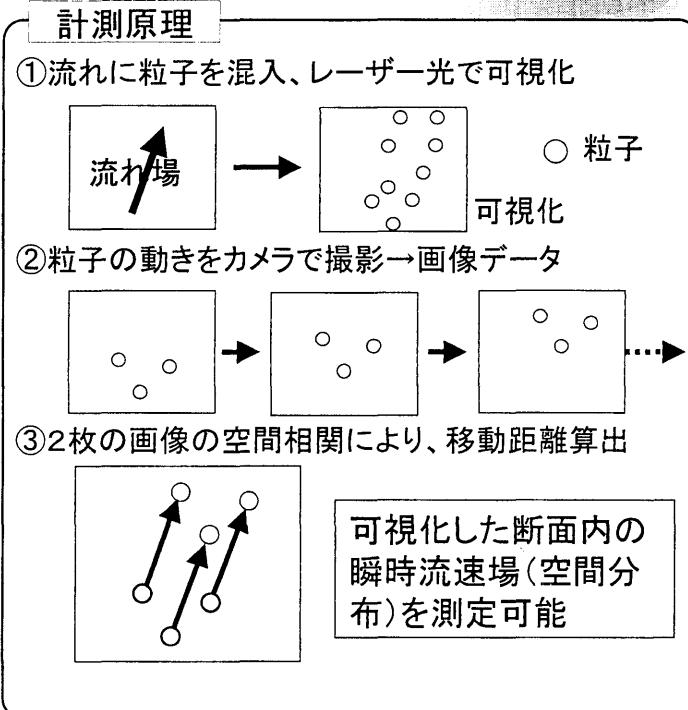


- ・切り込みの正面では液面の変動が大きい。
- ・気泡が連続して吸い込まれるような顕著なガス巻き込みは生じない。

## 流れ場の計測方法 一粒子画像流速測定法(PIV)一



スリット状のパルスレーザー



## 流れ場の計測方法 一超音波流速計(UVP)一

流体中に混入した微粒子に超音波を反射させ、  
その反射波のドップラーシフトから局所流速を求める方法

○位置 :  $x = c\tau/2$

(超音波の射出から戻るまでの時間より微粒子の位置を算出)

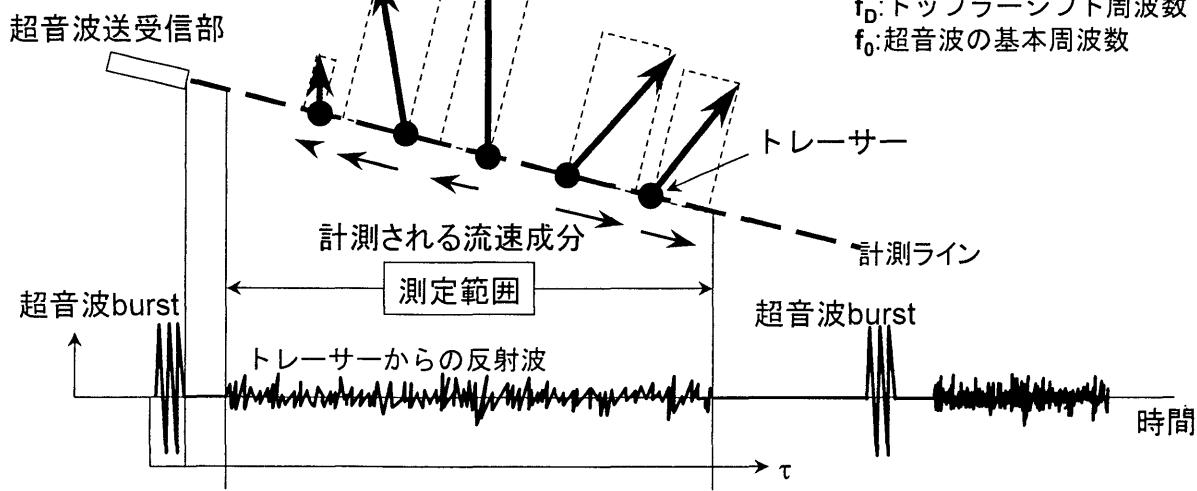
○流速 :  $V = f_D c / 2f_0$

(射出周波数と微粒子からの反射周波数の差分から微粒子の速度を算出)

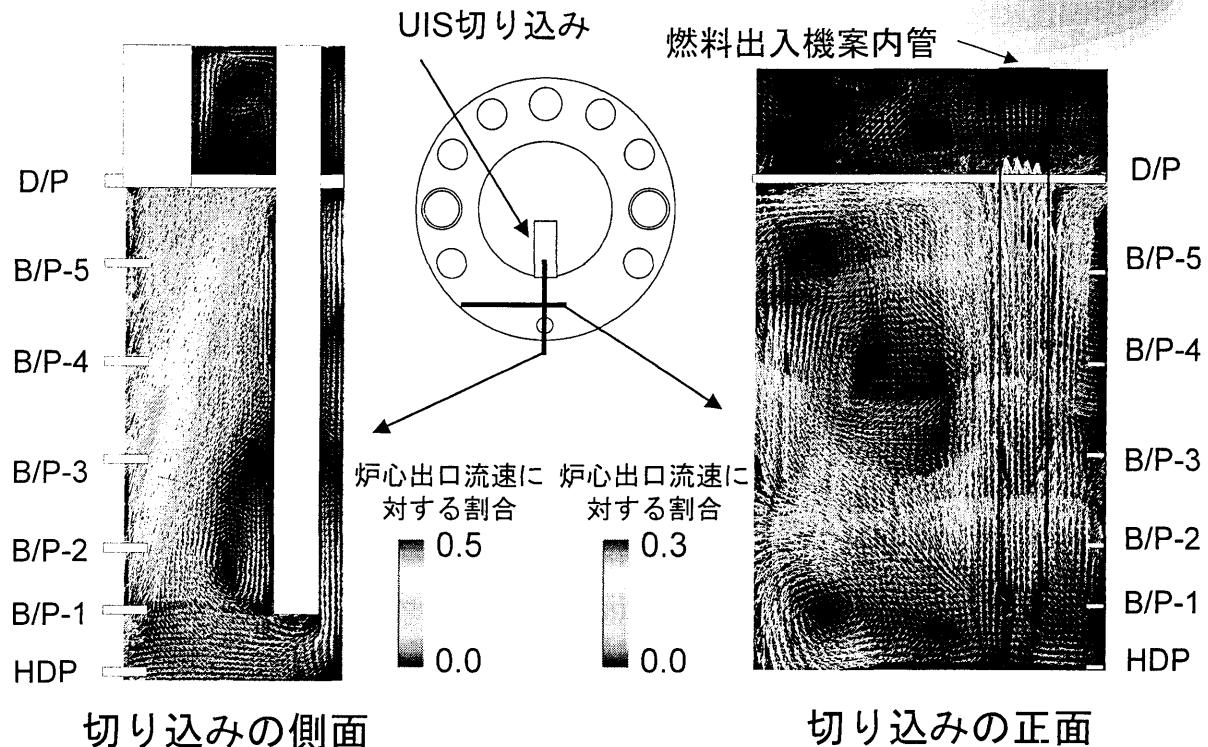
$c$ : 媒体中での音速

$f_D$ : ドップラーシフト周波数

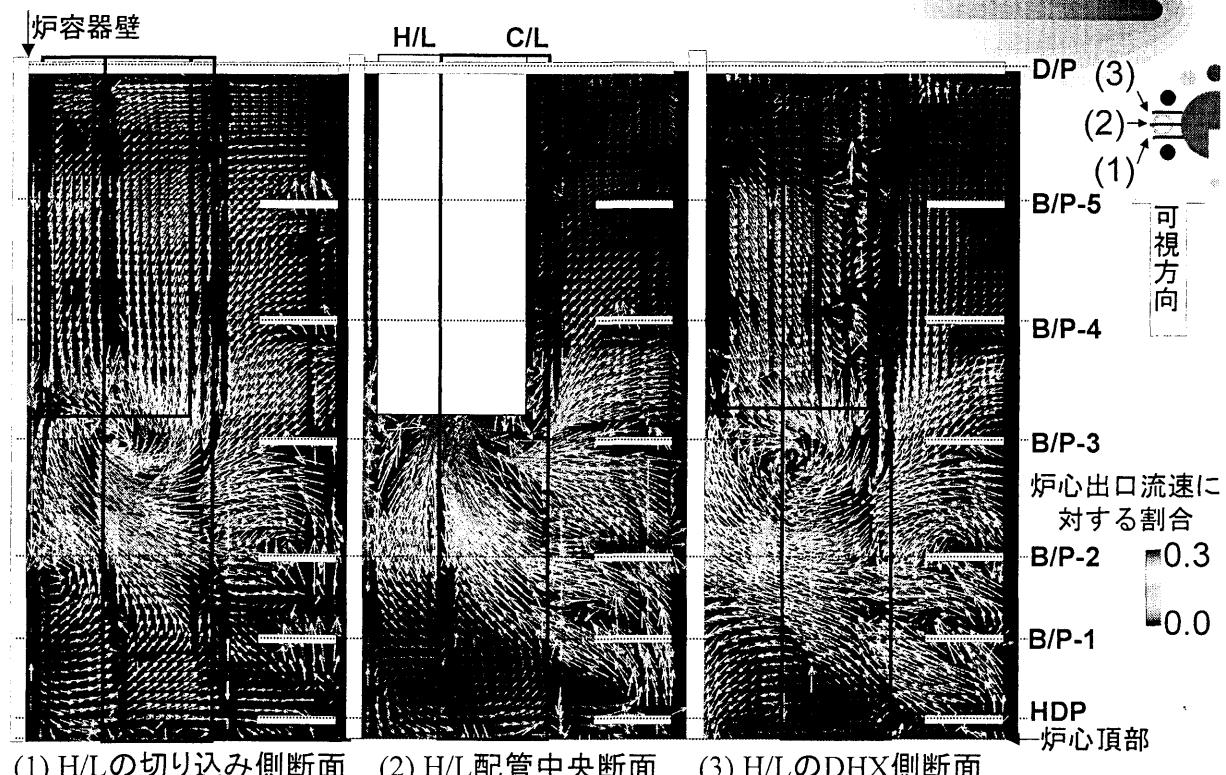
$f_0$ : 超音波の基本周波数



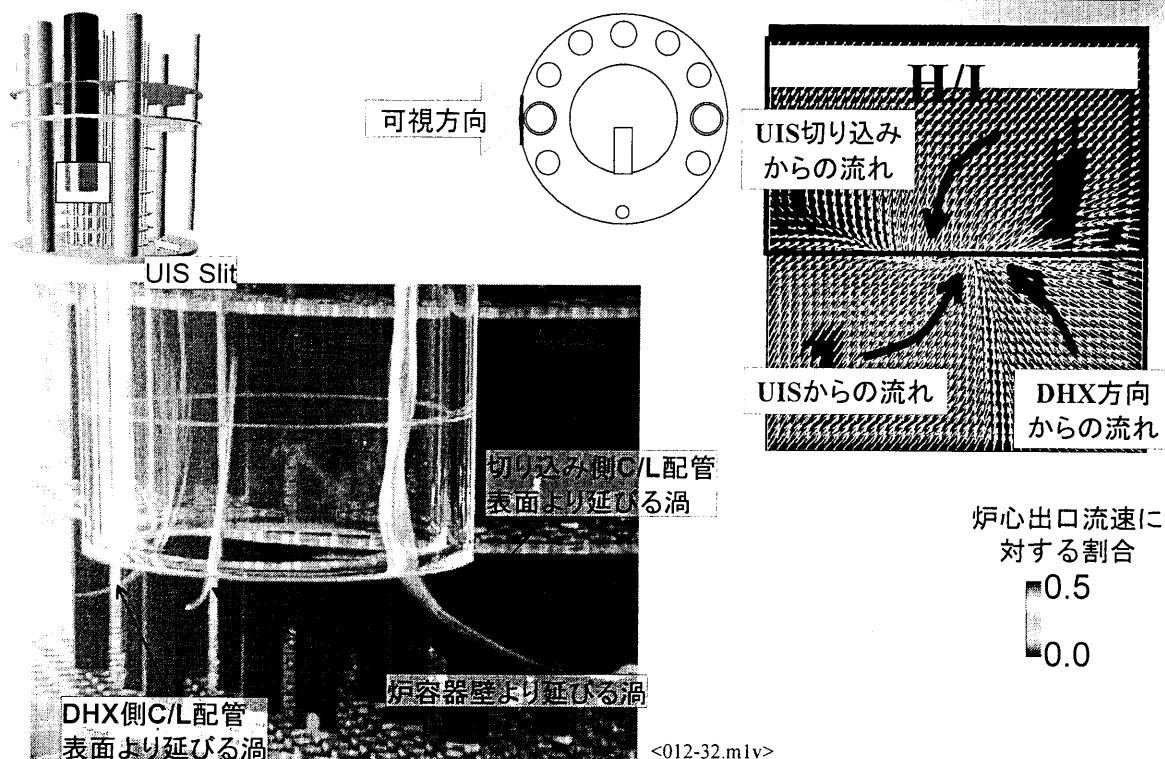
## UIS切り込みを通過する流れ -Fr数一致条件-



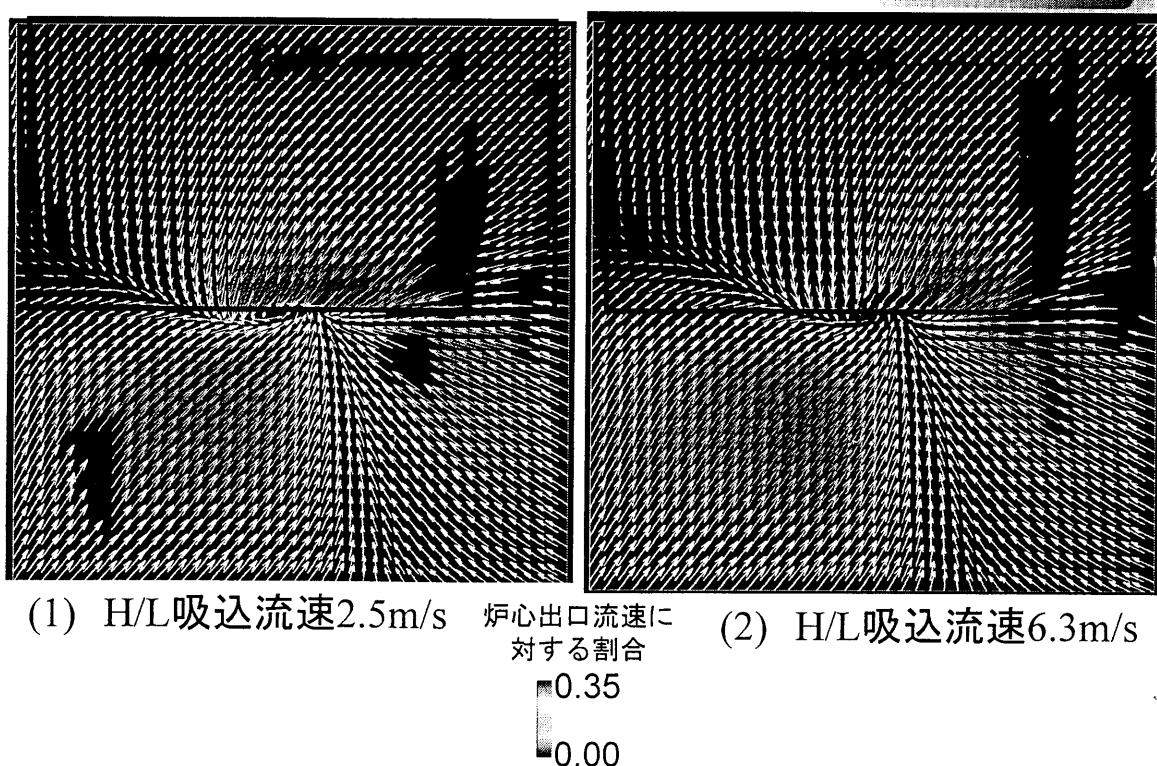
## H/L配管近傍の流れ -Fr数一致条件-



## H/L近傍でのキャビテーションを伴う水中渦



## H/L近傍の流れ場に対する流速の影響



## キャビテーション係数による水中渦初生条件の評価

## キャビテーション係数:k

$P$ :代表箇所の静水圧  
 $P_s$ :飽和蒸気圧  
 $\rho$ :流体密度  
 $v$ :H/L平均流速

$$k = \frac{P - P_s}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

## 実機条件

$P_s$ :1451Pa(550°C)  
 $P$ :0.25MPa(カバーガス圧)+0.036Pa(水頭圧)  
 $\rho$ :820kg/m³(550°C)  
 $v$ :9.2m/s(H/L平均流速)

実機でのH/L吸込部のキャビテーション係数

$k=8.1$

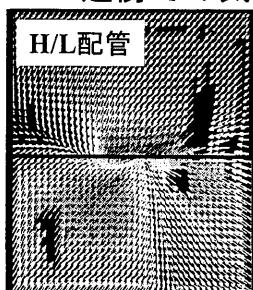
 $k>8.1$ のとき、実機での発生の可能性大

発生箇所	炉壁-H/L	切込側C/L-H/L	DHX側C/L-H/L
H/L吸込平均流速(m/s)	4.0	5.0	5.2
実機流速に対する割合(%)	43	54	57
キャビテーション係数	12.8	8.0	7.4

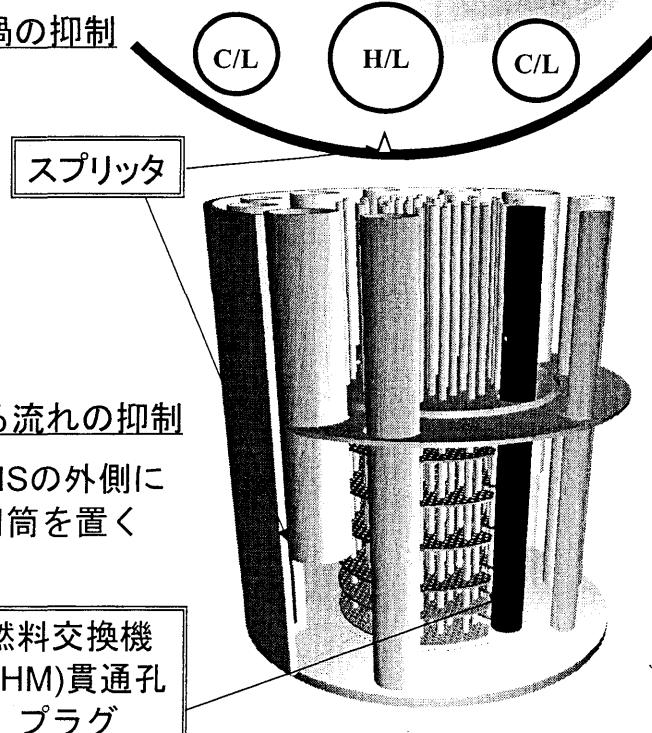
H/L近傍での水中渦は実機で発生する可能性有り

## 上部プレナム流動における課題と対策の検討

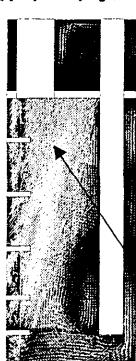
## 1) H/L近傍での気泡を伴う水中渦の抑制



流れの回転  
を止める



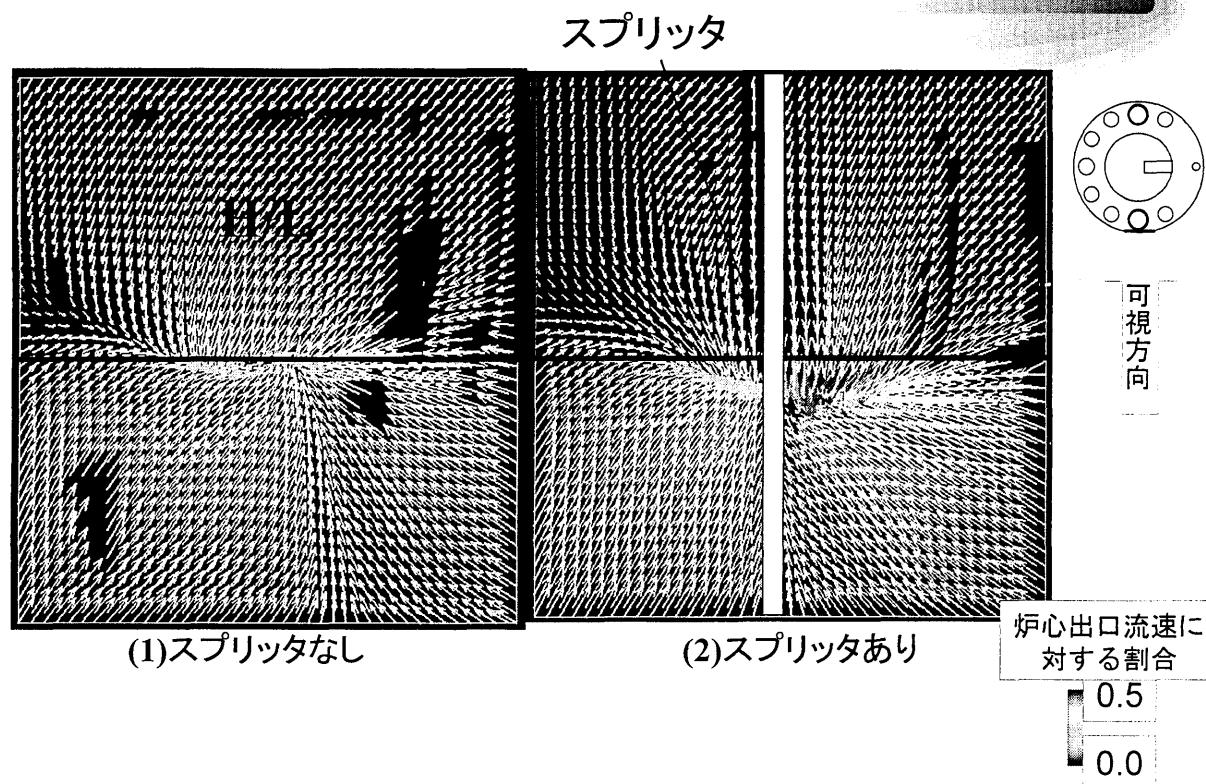
## 2) 液面に向かう流速の低減



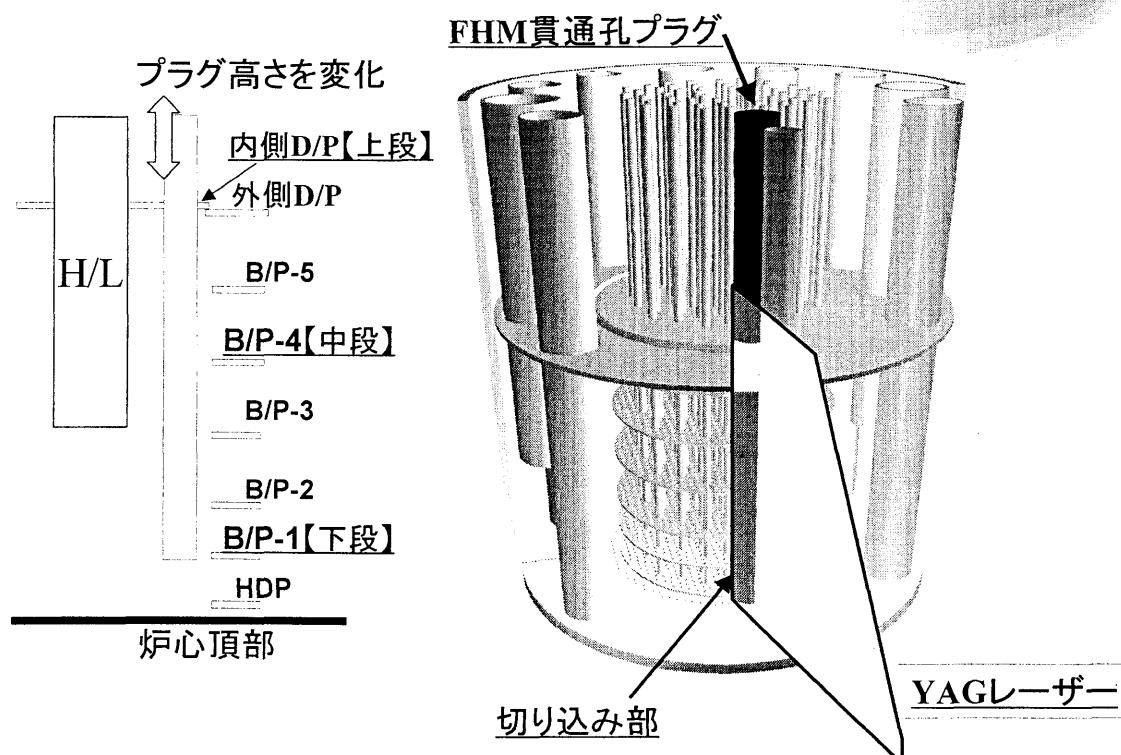
→切り込みを通る流れの抑制  
UISの外側に  
円筒を置く  
UISの外側  
へ抜ける流  
れを遮断  
UIS外側の  
流速大

燃料交換機  
(FHM)貫通孔  
プラグ

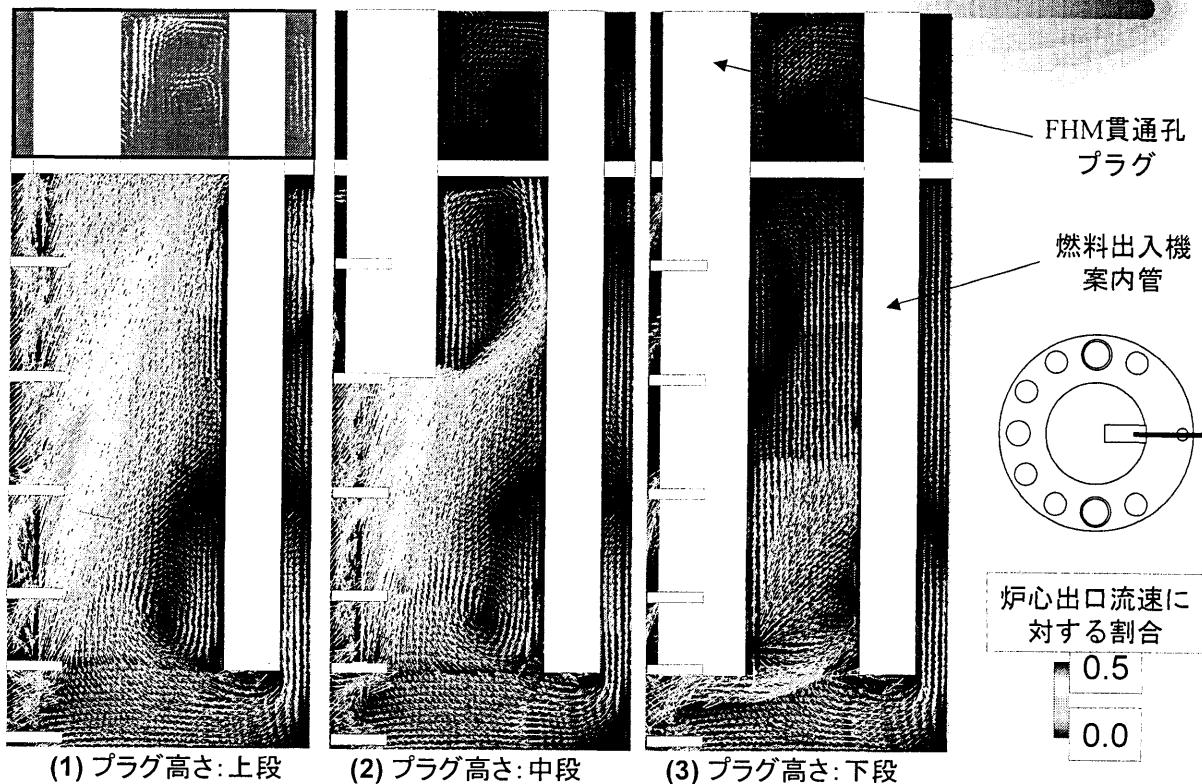
## H/L近傍の流れ場に対するスプリッタの効果



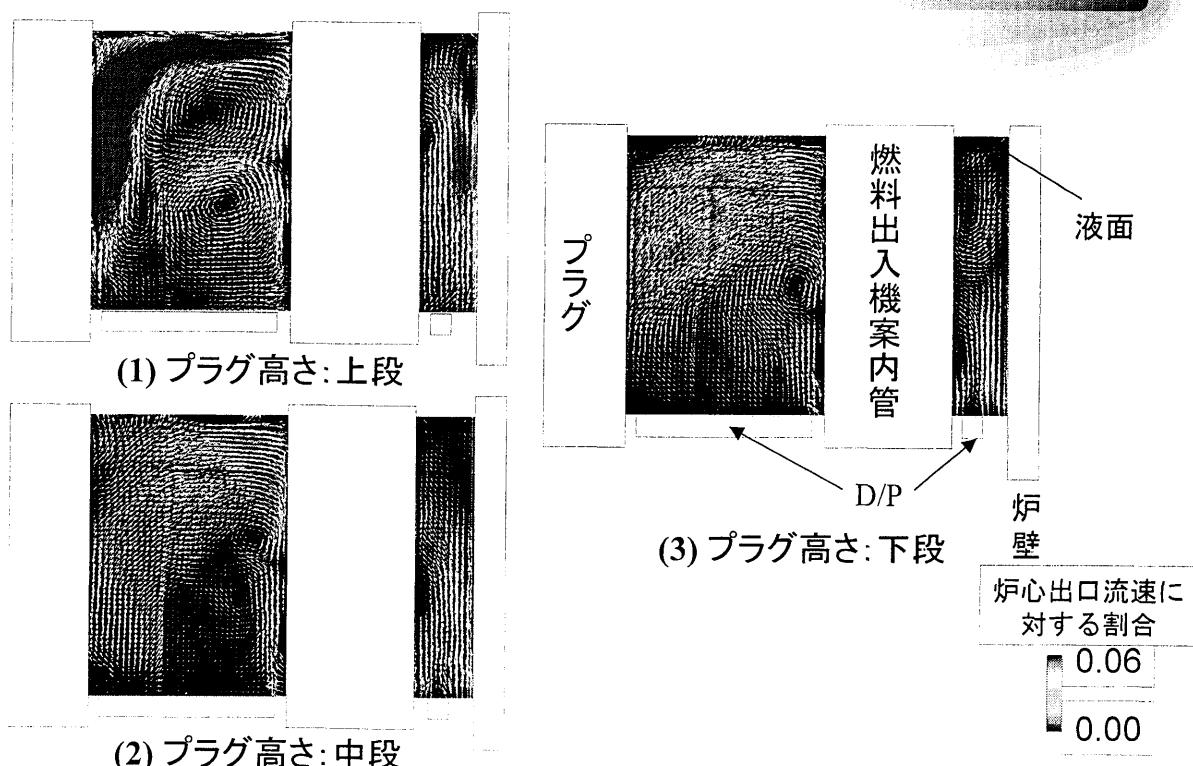
## FHM貫通孔プラグ高さ位置



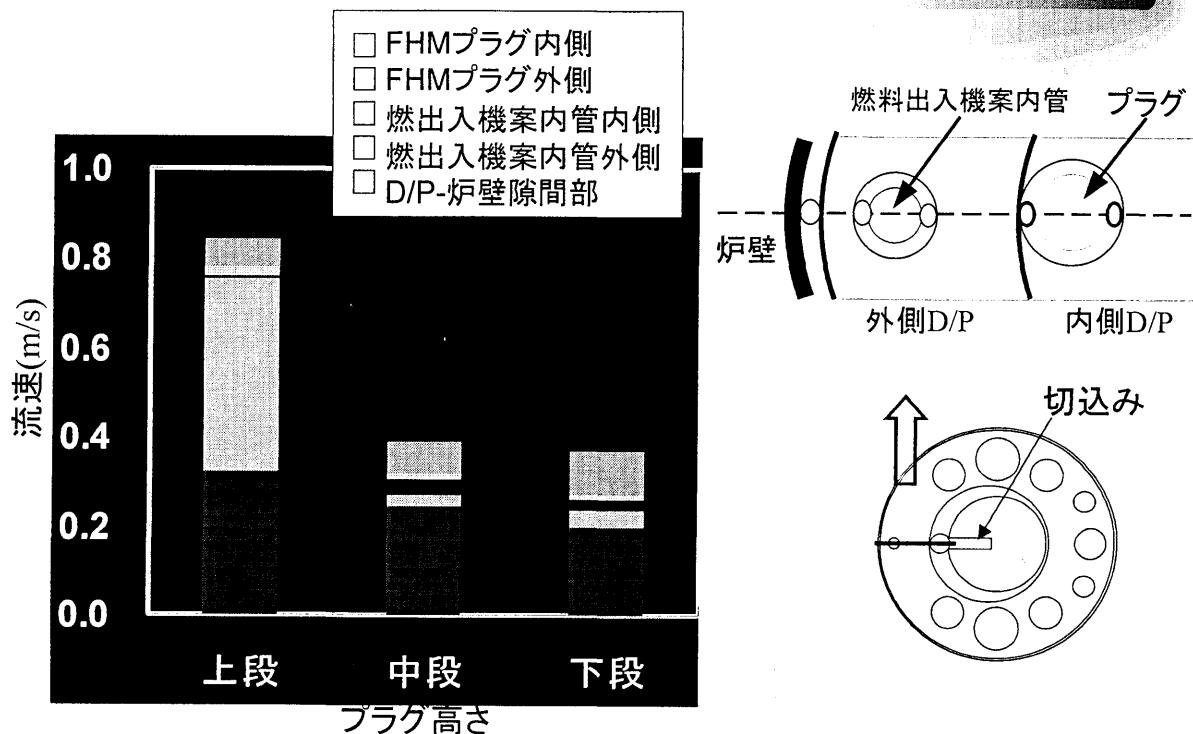
## 切り込みを通る流れに対するプラグ高さの影響



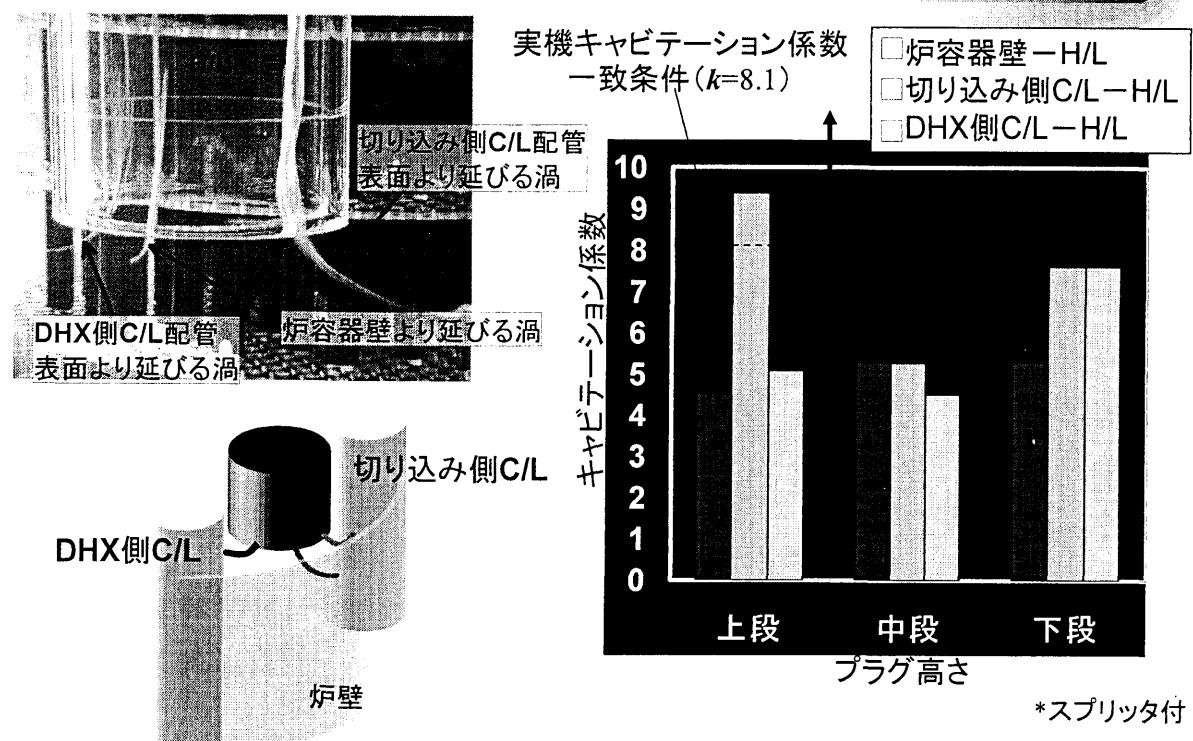
## 液面近傍の流れに対するプラグ高さの影響



## D/P通過流速に対するプラグ高さの影響



## 水中渦の初生に対するプラグ高さの影響



## まとめ

### アドバンストループ型ナトリウム冷却高速炉の開発

#### ○経済性向上 : 原子炉容器のコンパクト化

- ・断面平均流速が従来の2.5倍
- ・胴のない切り込みつきコラム型UIS

#### ○流動の適正化が不可欠

- ・自由液面でのガス巻き込み（液面に向かう流速）
- ・出口配管での気泡を伴う水中渦

#### 適正化構造 :

FHM貫通孔プラグ（上部プレナムの中段插入）

◇切り込み部正面でのD/Pの通過流速を1/2に低減

スプリッタ（炉容器壁に取付）

◇実機キャビテーション係数一致条件での水中渦発生を防止

→上記の構造の効果を確認し、適正化の見通しを得た。

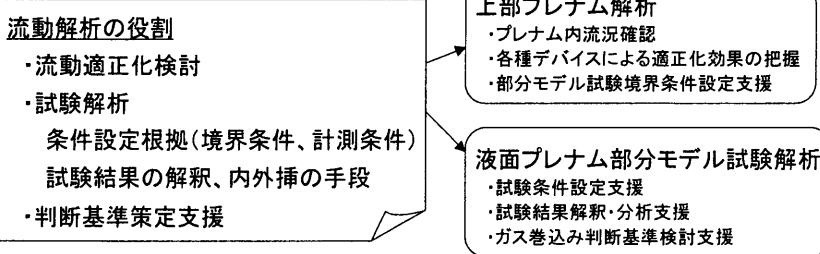
H15年度第1回R&D報告会

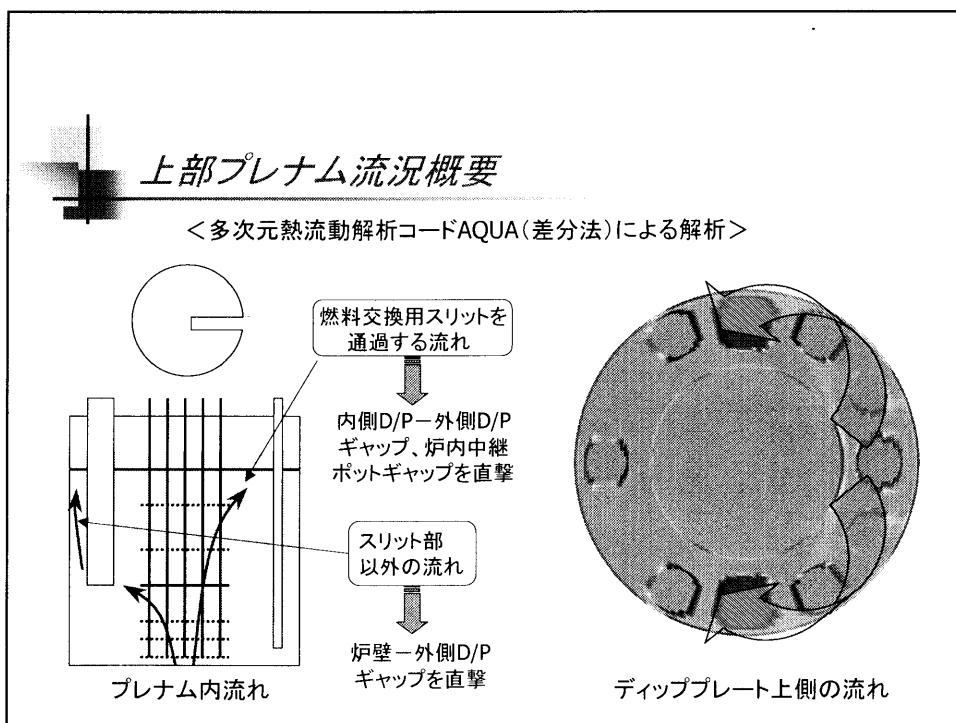
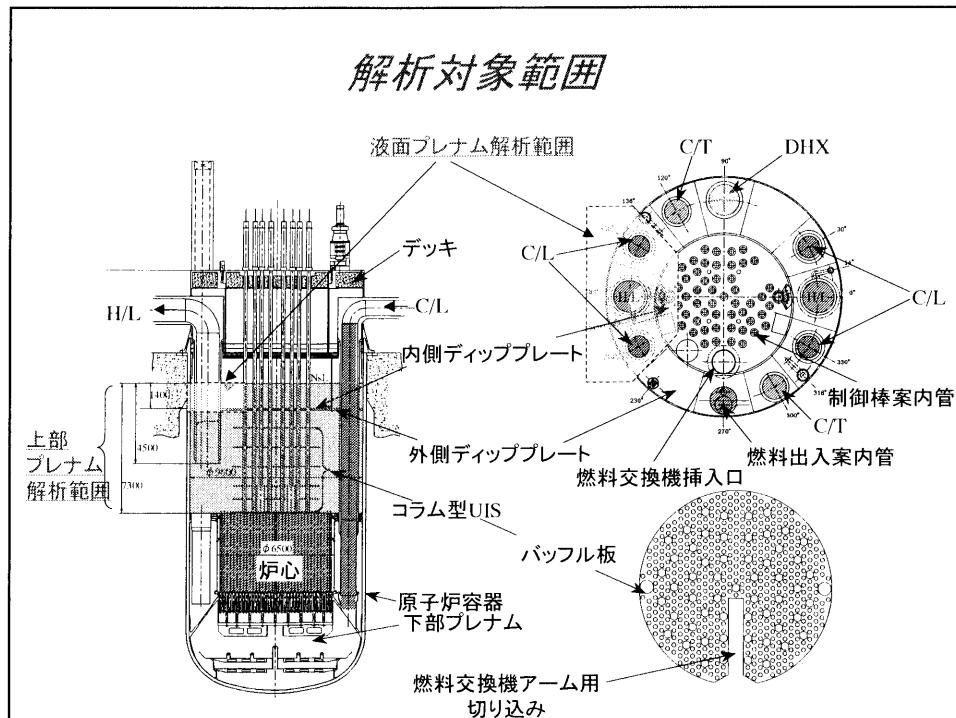
## Na冷却炉上部プレナム流動解析

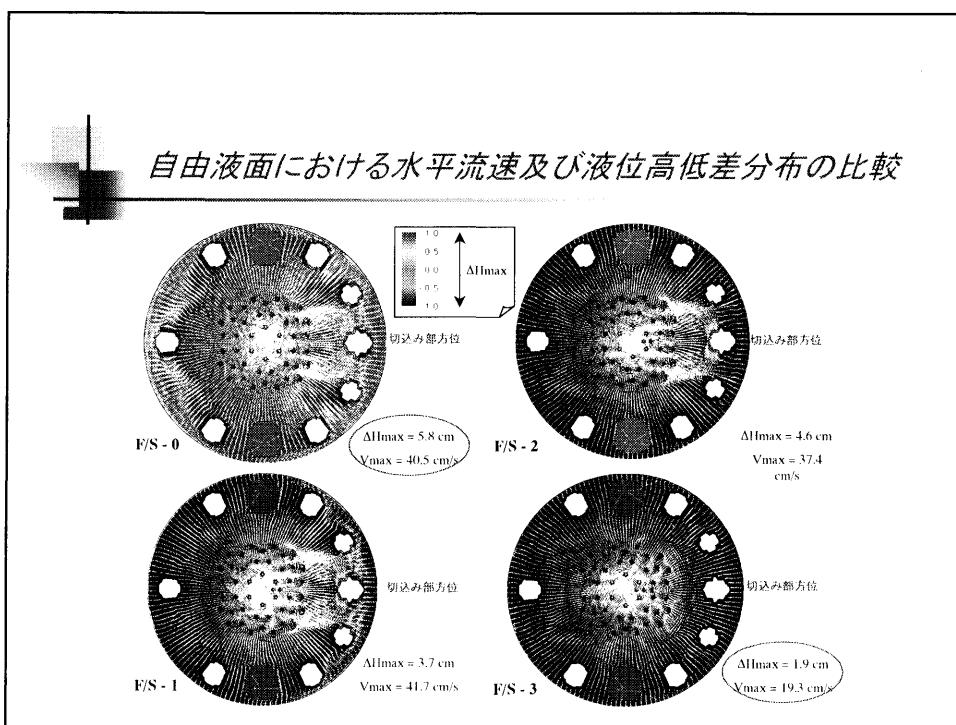
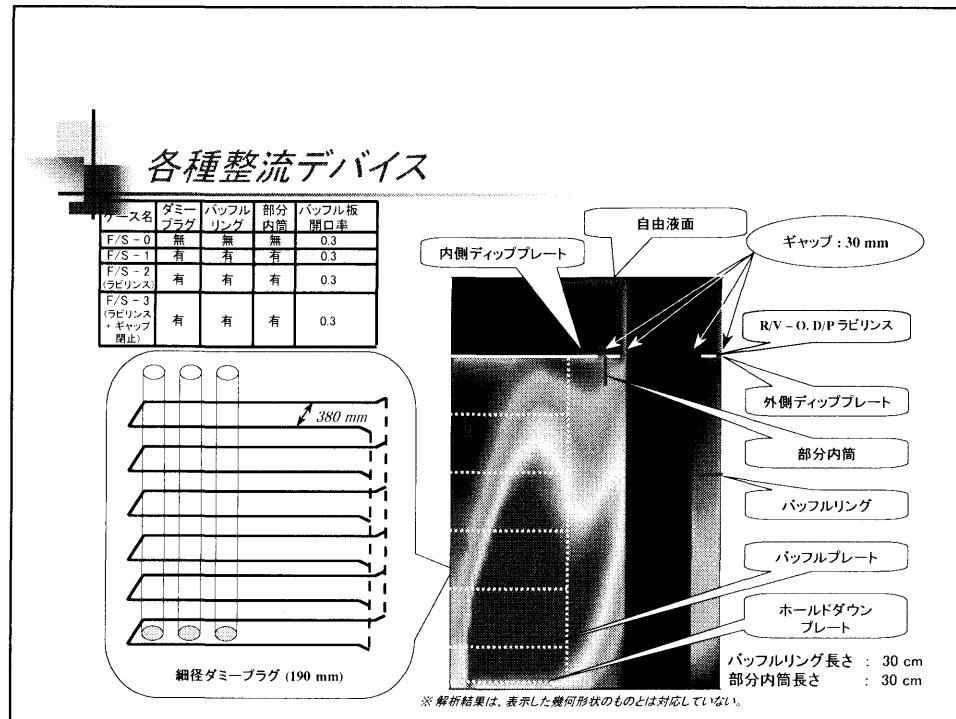
要素技術開発部 流体計算工学研究グループ  
大島 宏之

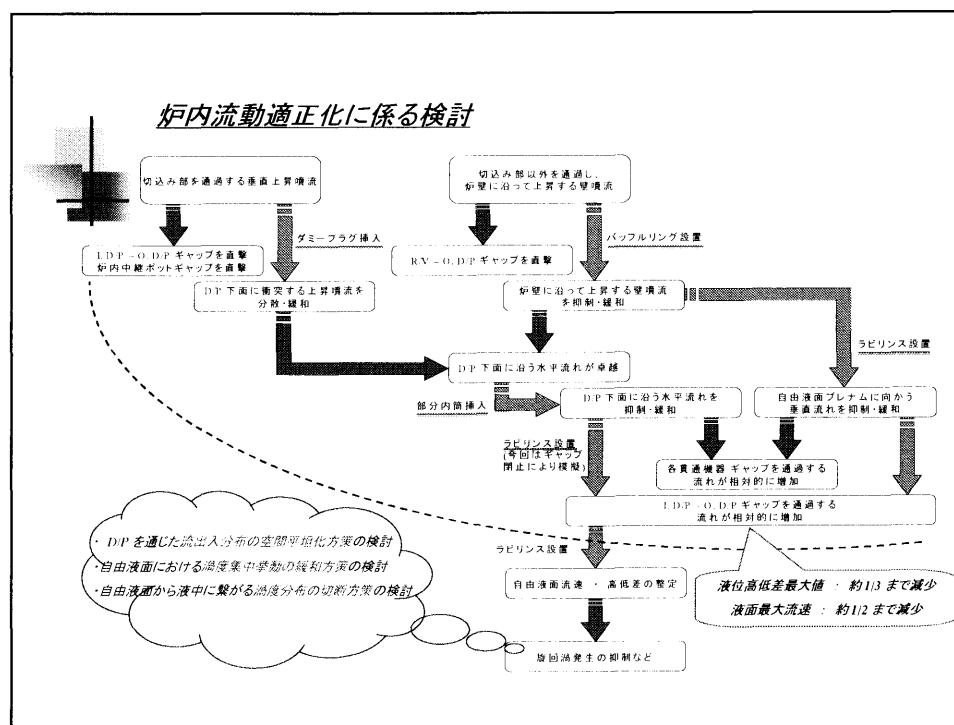
### 流動解析の概要

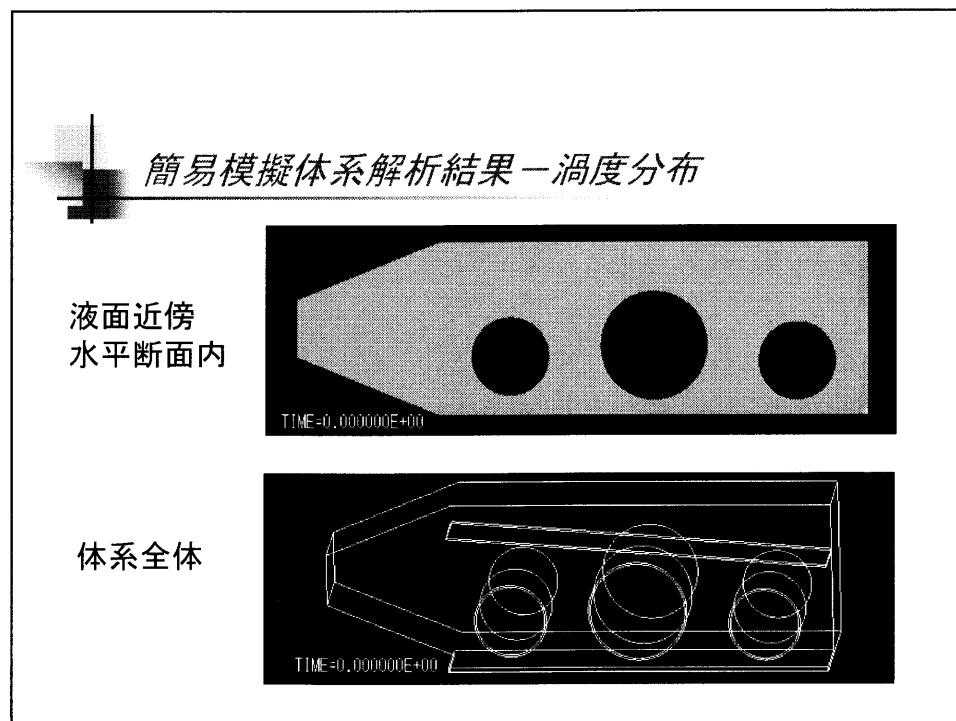
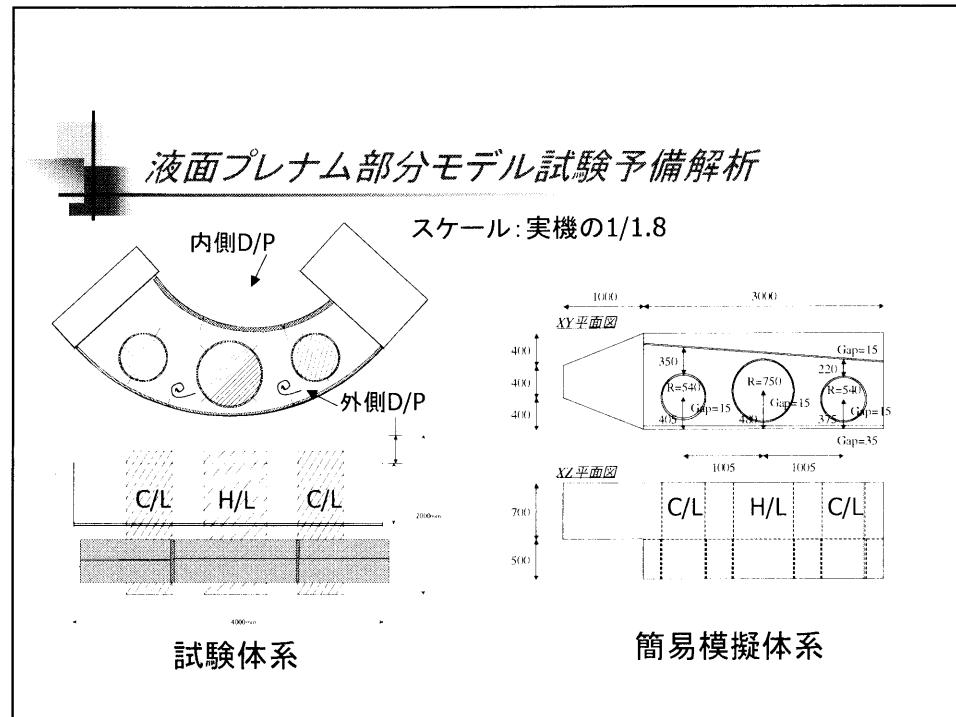
- システムの簡素化・コンパクト化設計
- 上部プレナム内流速の高速化・流れの非対称化
- ➡ ガス巻込みなど各種課題克服・判断基準の明確化要求
- 理論、実験、数値シミュレーションの連携による課題解決シナリオの構築

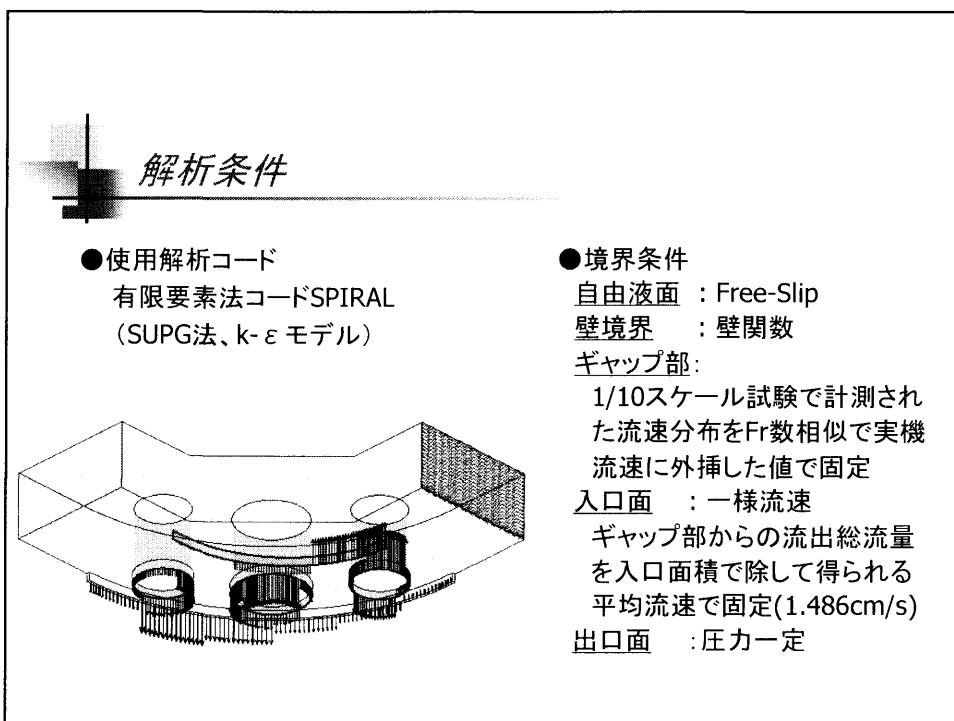
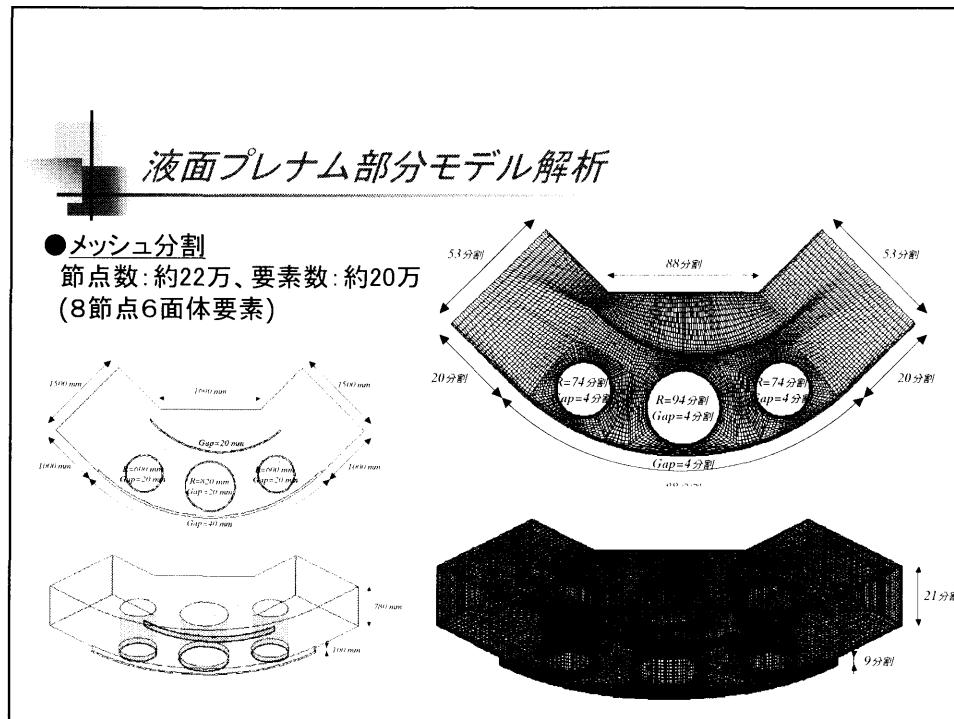


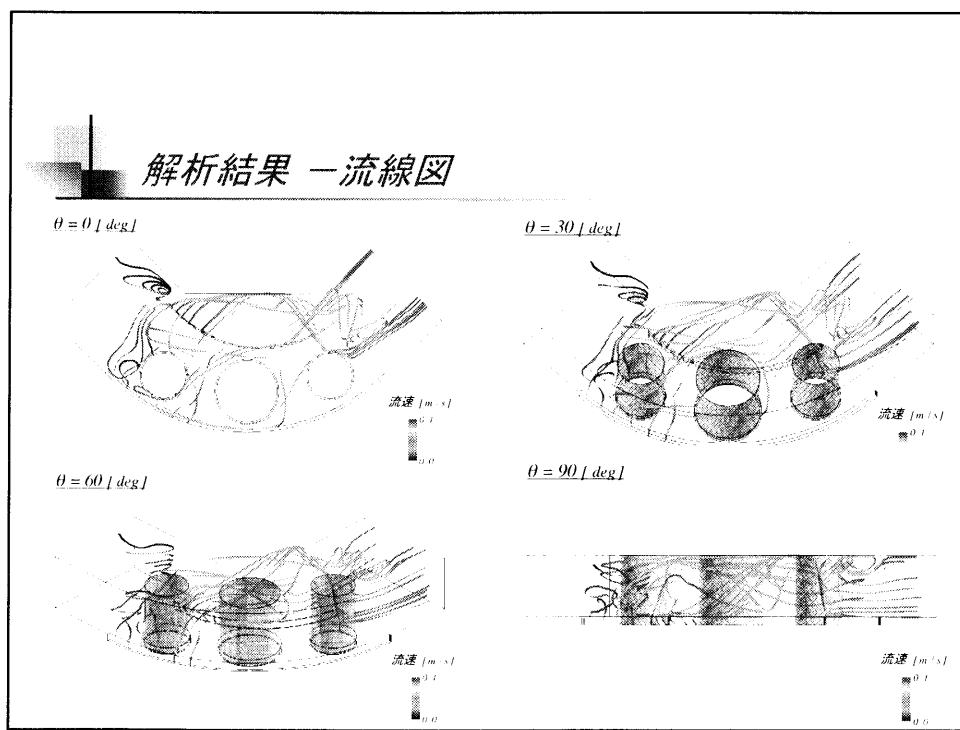
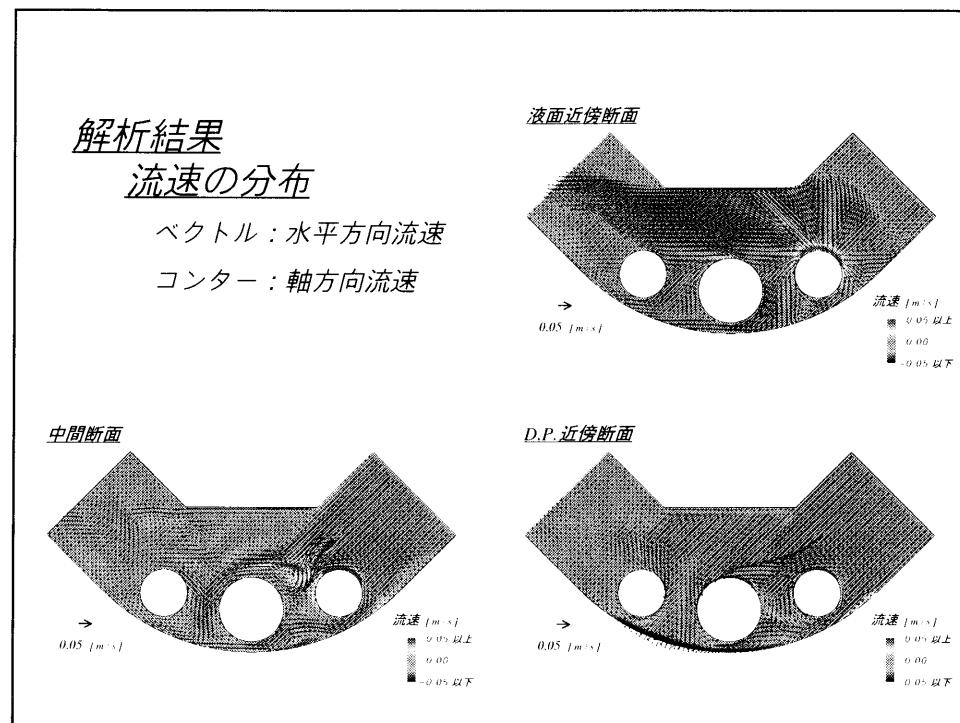




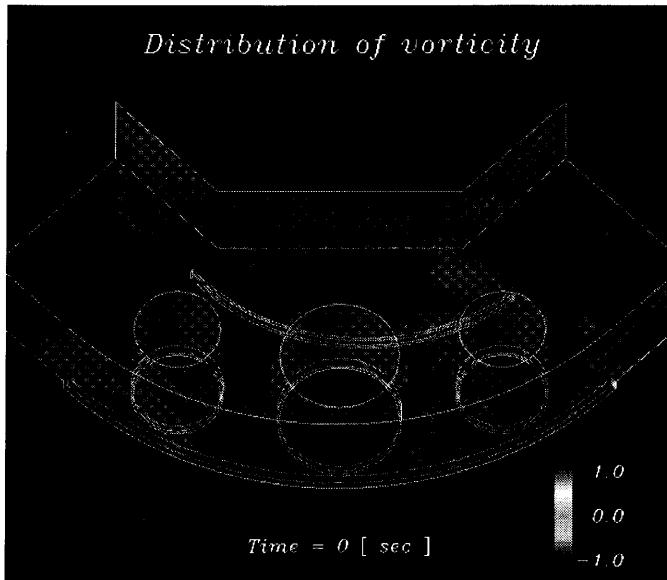




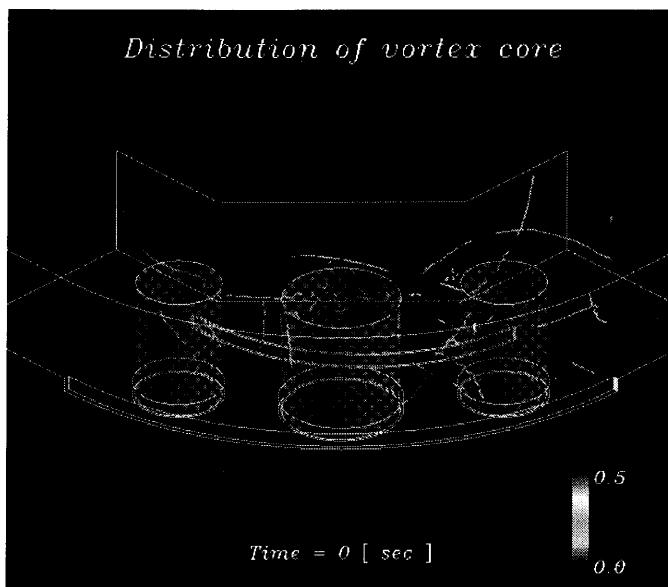




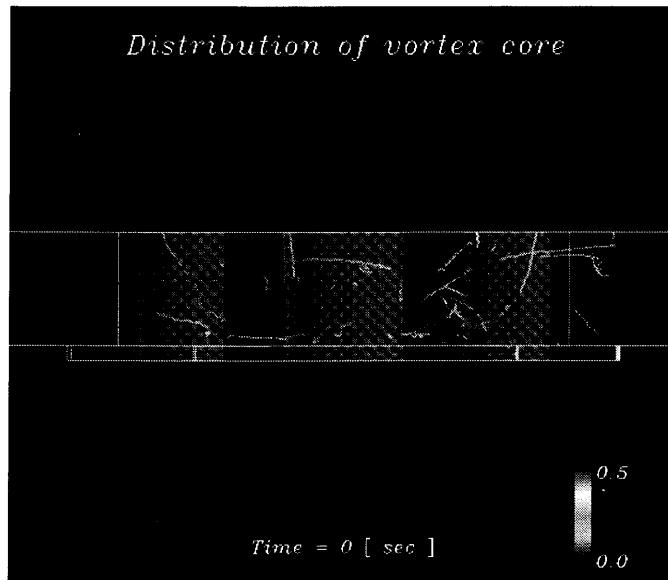
解析結果一渦度分布



解析結果一渦度中心線分布(1)



## 解析結果一渦度中心線分布(2)



## まとめと今後の課題

### 上部プレナム解析

流動適正化の方向性確認

(液位高低差最大値1/3に、液面最大流速1/2に減少)

➡ 漩度集中緩和、ギャップ流入出平圧化、3次元渦切断方策等の検討  
試験計画への反映

### 液面プレナム試験解析

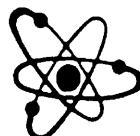
モデル体系による予備解析の実施

➡ 詳細モデルによる解析、試験条件設定、結果解釈、現象解明支援

スケール試験、理論、シミュレーションから得られる知見を総合し、  
ガス巻込み判断基準を策定

## 実用化戦略調査研究

# 鉛-ビスマス冷却中型炉のH14年度 プラント設計について



平成15年5月8日

核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター  
システム技術開発部 FBRシステムグループ

江沼 康弘

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会

 JNC

## 本研究の目的

### 重金属冷却高速炉プラントの概念設計研究

重金属冷却材:Pb, Pb-Bi

→化学的活性小(2次系削除型)、核的特性(中性子反射効果大)、

材料共存性(腐食特性)、熱流力的性質(熱伝導度、自然循環特性)等 の重金属  
冷却材の特徴に着目

- 実用化戦略調査研究での設計要求への適合性
  - 技術的成立性の見込みのあるプラント概念
  - プラント建設コスト(主に、NSSS構材物量による比較:[ t/MWe ])
- 関連要素技術の研究開発項目の同定

# 発表の概要

## 1. H13年度までの重金属冷却炉検討

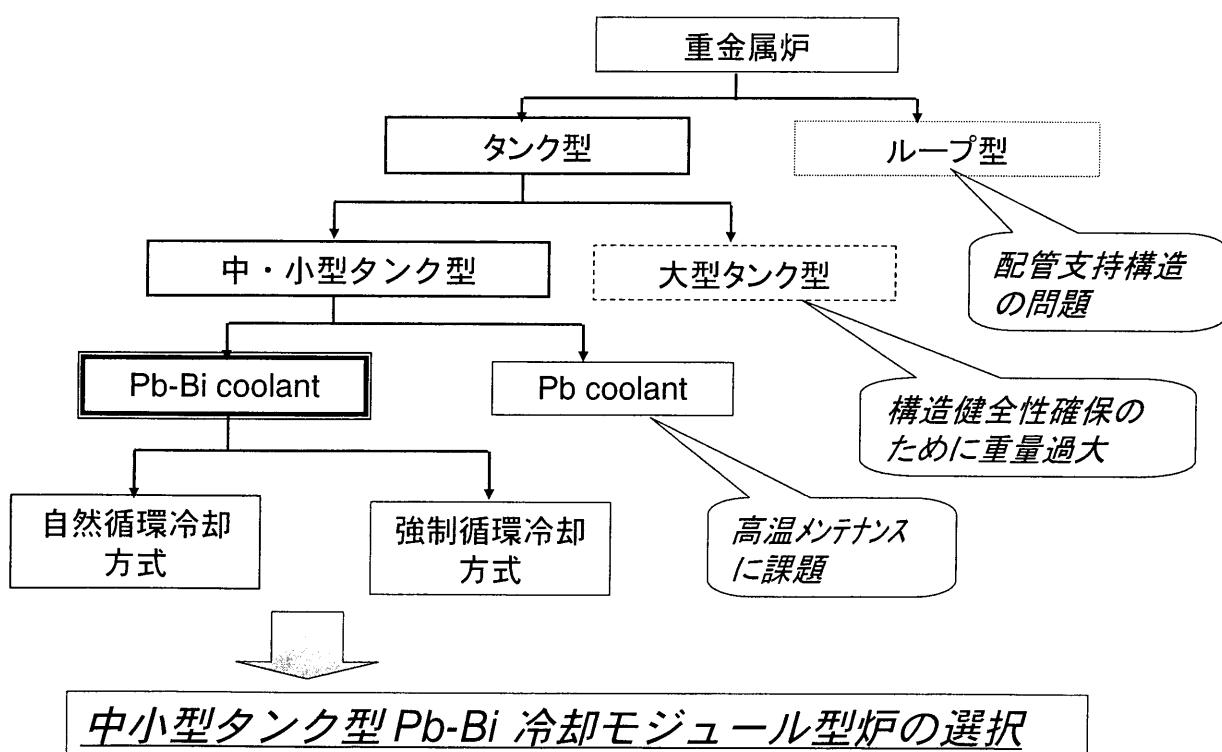
- 有望炉型の検討(フェーズ1)
- 中型Pb-Bi冷却自然循環炉(H13年度)
- 中型Pb-Bi冷却強制循環炉(H13年度)

## 2. H14年度における重金属炉検討結果

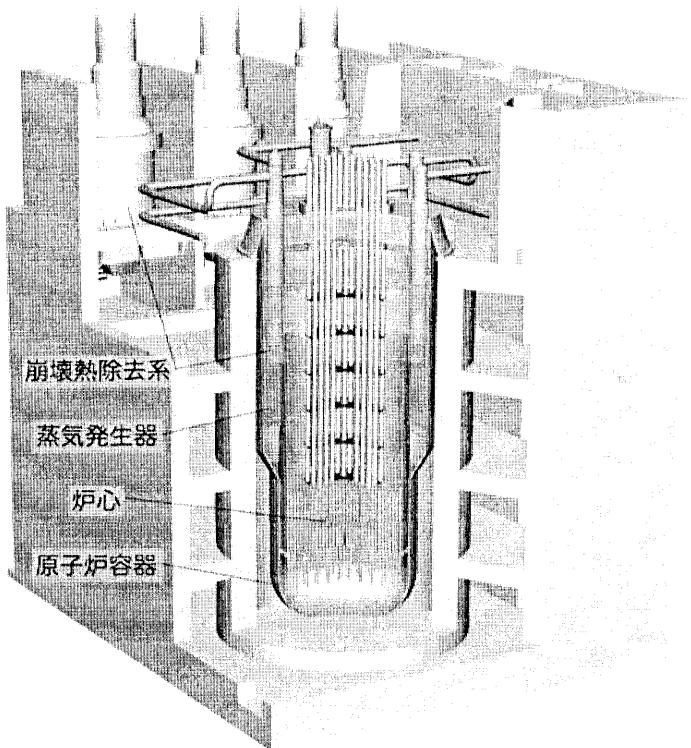
- 構造健全性
  - 耐震性(NC&FC)
  - キドニー型蒸気発生器(熱応力)
- 運転性
  - 自然循環炉
- 安全性
  - SGTR

## 3. まとめ

### フェーズ1における有望炉型絞り込み

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会
 JNC


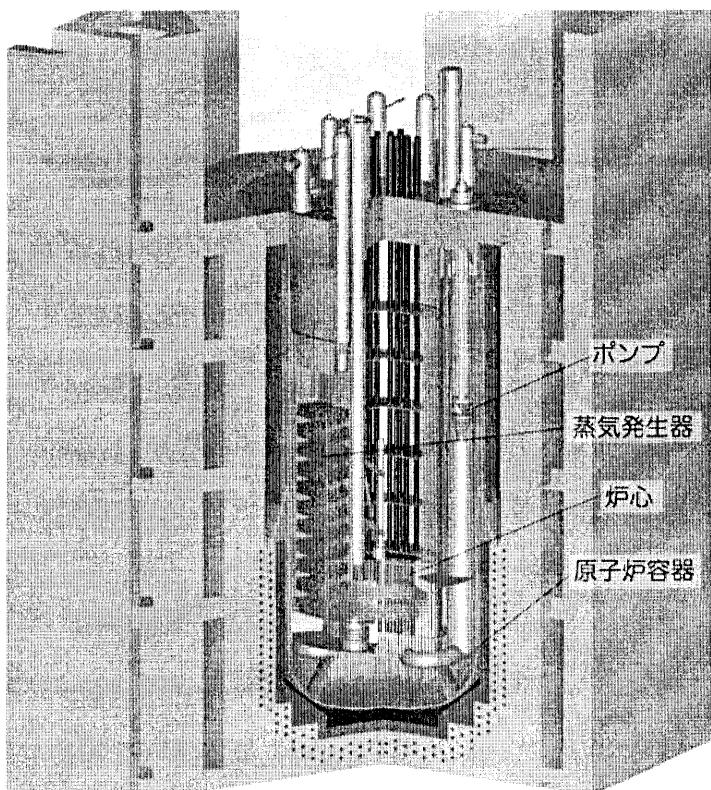
## 自然循環冷却方式中型Pb-Bi冷却炉 (55万kWe)



プラント主要目

出力	1450Mwt／550MW <sub>e</sub>
炉心出口冷却材温度	465°C
炉心入口冷却材温度	285°C
蒸気温度／給水温度	404°C／210°C
主蒸気圧力	約6.5MPa
炉心・燃料	Pu・U混合塗化物
炉心構成要素外接円径	約594cm
燃焼度	約15万MWd/t
増殖比	約1.2
受動安全	SASS
炉心上部機構	単回転プラグ+切込付コラム型UIS
蒸気発生器	1体型ヘリカルコイル×1
崩壊熱除去方式	PRACS(NC) × 3
プラント運転サイクル	18ヶ月・8バッチ
免震	3次元免震

## 強制循環冷却方式中型Pb-Bi冷却炉 (75万kWe)



出力	1875Mwt／750MW <sub>e</sub>
炉心出口冷却材温度	520°C
炉心入口冷却材温度	352°C
蒸気温度／給水温度	453°C／240°C
主蒸気圧力	約15.7MPa
炉心・燃料	Pu・U混合塗化物
炉心構成要素外接円径	約530cm
燃焼度	約15万MWd/t
増殖比	約1.2
受動安全	SASS
炉心上部機構	単回転プラグ+切込付コラム型UIS
蒸気発生器	キドニー型SG × 2
崩壊熱除去方式	PRACS(NC) × 3
プラント運転サイクル	18ヶ月・7バッチ
免震	3次元免震

## H14年度の検討項目 －プラント設計研究－

### (1) 鉛-ビスマス冷却炉の枢要課題の見通し

- ・構造健全性
  - 耐震性 (NC&FC)
  - キドニー型蒸気発生器 (熱応力)
- ・運転性 (自然循環炉)
  - 起動、停止、負荷変更等
- ・安全性
  - SGTR

### (2) 設計要求への適合性

- ・経済性評価用データの整備

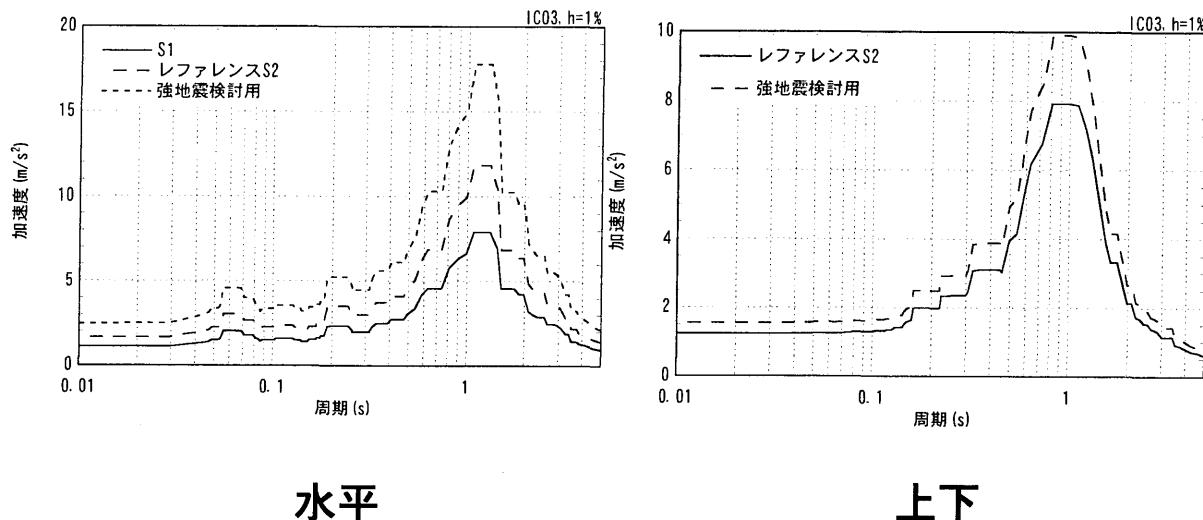
## 耐震成立性評価項目

○評価対象：自然循環炉(55万kWe)、強制循環炉(75万kWe)

- ・原子炉容器座屈 (制限値：座屈裕度 $>1.5$ )
- ・炉心支持板中心の上下応答加速度 (制限値：1 G以下)
- ・炉心投入反応度 (制限値：1 \$未満)
- ・制御棒挿入性 (UISと炉心相対変位 $<15\text{mm}$ )

## 地震条件

- レファレンス S2 : M6.5相当、3次元免震採用
- 強地震条件 : M7.1相当、3次元免震採用



## 原子炉容器座屈評価（自然循環炉）

項目		上部胴(板厚50mm)		下部胴(板厚40mm)	
		レファレンス S2波	強地震検討用	レファレンス S2波	強地震検討用
座屈強度	塑性曲げ座屈強度	360.0 MPa		364.5 MPa	
	塑性せん断座屈強度	185.0 MPa		178.6 MPa	
	塑性軸圧縮座屈強度	292.8 MPa		296.4 MPa	
発生応力	曲げ応力	90.7 MPa	136.0 MPa	82.6 MPa	123.9 MPa
	せん断応力	68.5 MPa	102.8 MPa	48.9 MPa	73.4 MPa
	軸圧縮応力	36.5 MPa	44.7 MPa	-125.0 MPa	-115.0 MPa
座屈評価	座屈限界/発生値	2.33	1.60	3.80	2.43
	必要安全率	1.50	1.50	1.50	1.50
	評価	成立	成立	成立	成立

原子炉容器板厚上部胴50mm、下部胴40mm以上で成立する見通し

## 原子炉容器座屈評価（強制循環炉）

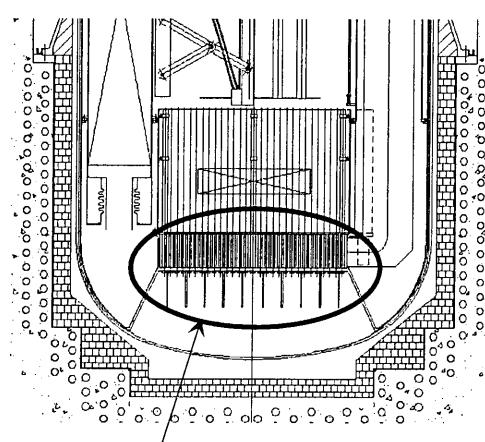
項目		レファレンスS2波	強地震検討用
座屈強度	塑性曲げ座屈強度	311.4 MPa	
	塑性せん断座屈強度	168.6 MPa	
	塑性軸圧縮座屈強度	252.9 MPa	
発生応力	曲げ応力	55.2 MPa	82.8 MPa
	せん断応力	53.2 MPa	79.8 MPa
	軸圧縮応力	39.4 MPa	48.5 MPa
座屈評価	座屈限界/発生値	2.67	1.87
	必要安全率	1.50	1.50
	評価	成立	成立

原子炉容器板厚50mm以上で成立する見通し

## 炉心支持板中心の上下応答加速度

### ○自然循環炉

単位	地震条件		
	レファレンスS2	強地震検討用	
炉心支持板の上 下応答加速度	m/s <sup>2</sup>	2.71	3.39
許容値	m/s <sup>2</sup>	9.8	9.8
評価	—	成立	成立



### ○強制循環炉

単位	地震条件		
	レファレンスS2	強地震検討用	
炉心支持板の上 下応答加速度	m/s <sup>2</sup>	2.79	3.49
許容値	m/s <sup>2</sup>	9.8	9.8
評価	—	成立	成立

炉心支持板に補強リブを設置することで成立する見通し

## 炉心投入反応度(自然循環炉)

項目	単位	地震条件	
		レファレンスS2	強地震検討用
炉心支持板の上下応答変位①	mm	2.87	3.59
炉心支持板の面外変形②	mm	0.35	0.44
燃料のコンパクション③ (②×0.6*)	mm	0.21	0.26
燃料のコンパクションによる 投入反応度④ (③×8φ/mm)	φ	1.68	2.08
C R引抜きによる投入反応度⑤ (①×3φ/mm)	φ	8.61	10.77
投入反応度 (④+⑤)	φ	<b>10.29</b>	<b>12.85</b>
許容値	φ	100	100
評価		成立	成立

## 炉心投入反応度(強制循環炉)

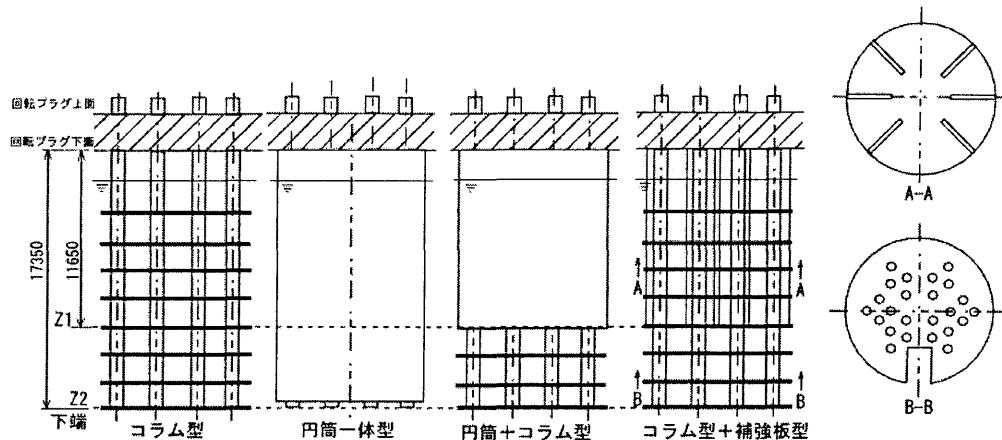
項目	単位	地震条件	
		レファレンスS2	強地震検討用
炉心支持板の上下応答変位①	mm	2.43	3.04
炉心支持板の面外変形②	mm	0.22	0.28
燃料のコンパクション③ (②×0.6*)	mm	0.13	0.17
燃料のコンパクションによる 投入反応度④ (③×7φ/mm)	φ	0.92	1.18
C R引抜きによる投入反応度⑤ (①×3φ/mm)	φ	7.29	9.12
投入反応度 (④+⑤)	φ	<b>8.21</b>	<b>10.30</b>
許容値	φ	100	100
評価		成立	成立

## 制御棒插入性

各種UIS形状に対する地震応答解析結果

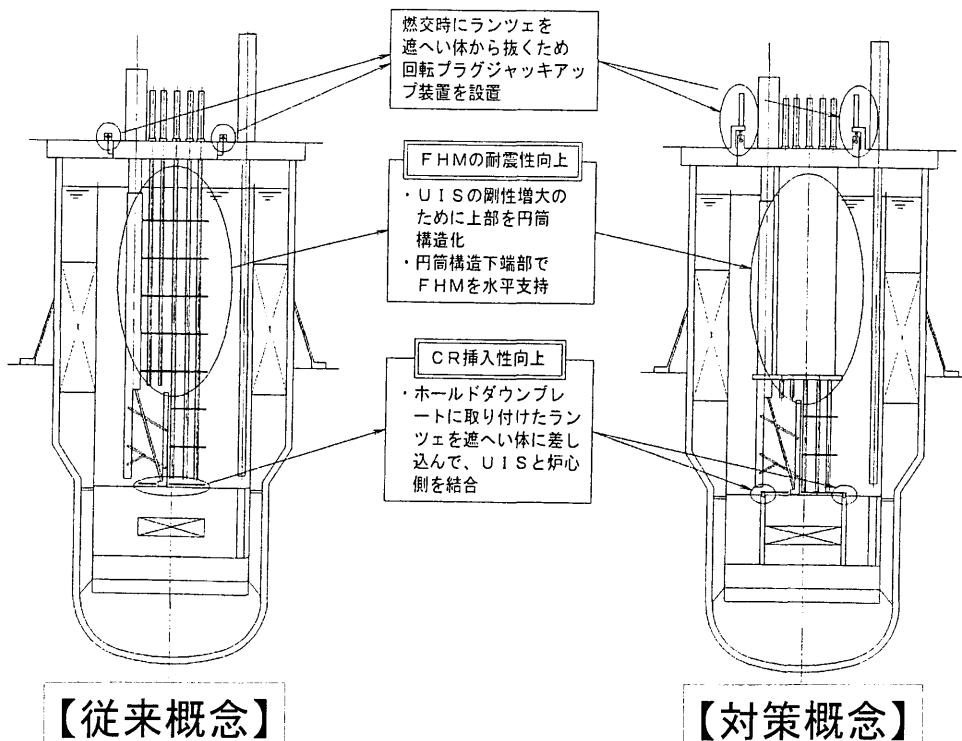
	コラム型	円筒一体型	円筒+コラム型	コラム型+補強板型
Z1の変位	92mm	81mm	23mm	80mm
Z2の変位	<b>125mm</b>	<b>141mm</b>	<b>51mm</b>	<b>128mm</b>
固有振動数	1.36Hz	1.38Hz	2.14Hz	1.49Hz

注) NC炉-M550を対象。CRD案内管板厚は20mm、円筒の板厚は50mm、補強板板厚50mm。地震条件はレファレンスS2

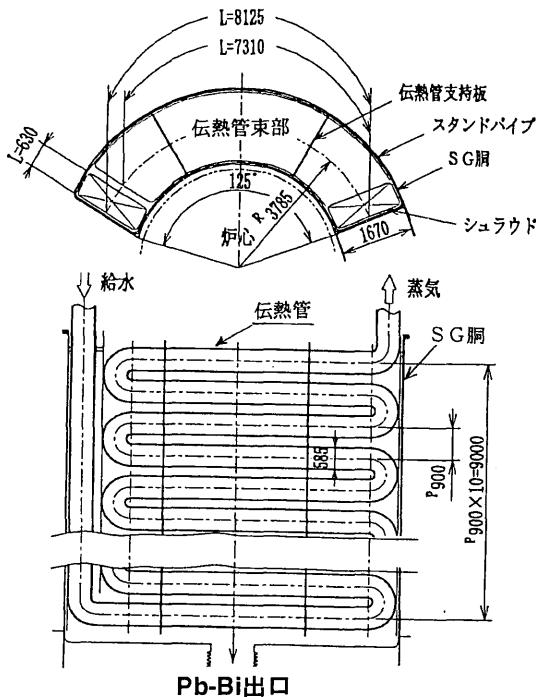


## 制御棒插入性確保のための対策

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会



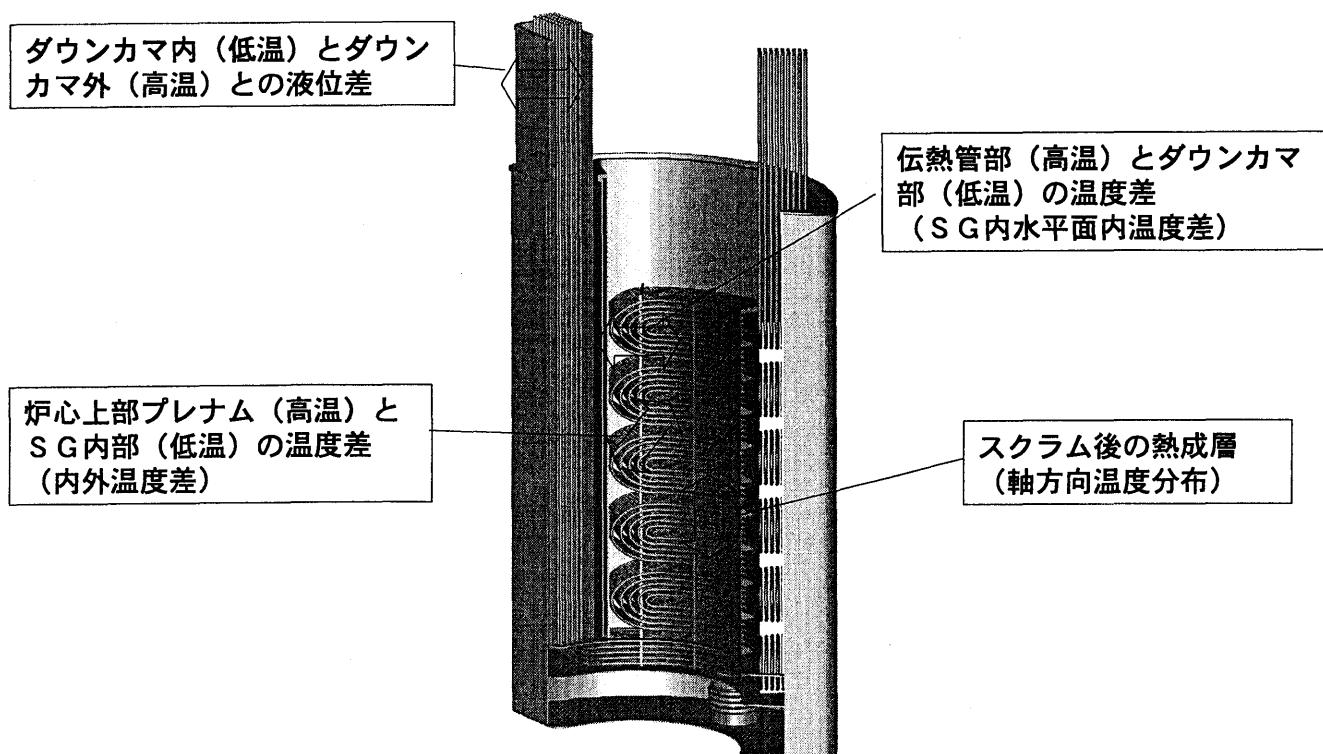
# キドニー型 SG



基本仕様

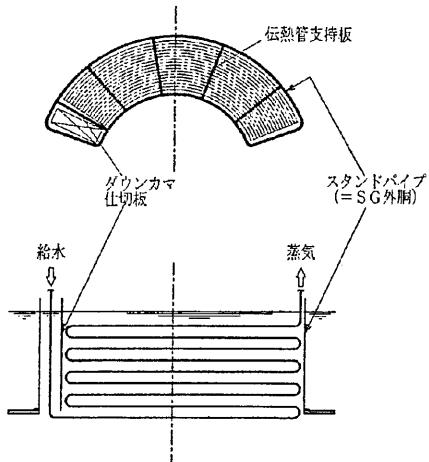
伝熱管型	サーベンタイン型	
流体 外/内	鉛ビスマス／水・蒸気	
交換熱量	937.5 MWt/基 × 2基	
伝熱面積	3351 m <sup>2</sup> /基	
伝熱管	外径(板厚)	25.4 (2.6)mm
	本 数	578 本/基
	伝熱部高	9585mm
	材 質	12Cr鋼
温 度	Pb-Bi入/出	520 / 352°C
	給水/蒸気	240 / 452.7°C
流 量	Pb-Bi側	$1.375 \cdot 10^8$ kg/h
	水・蒸気側	$1.561 \cdot 10^8$ kg/h
出口圧力	水・蒸気側	約15.7MPa

## キドニー型 SG の課題

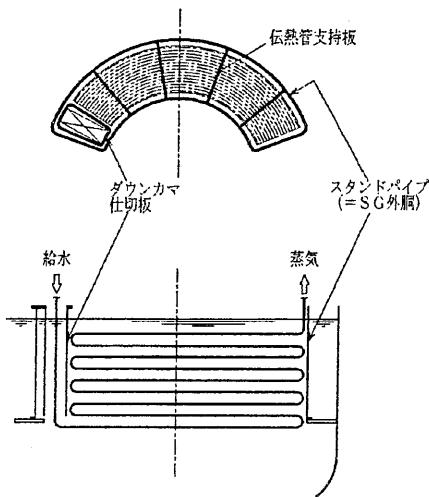


# キドニー型 SG 候補概念

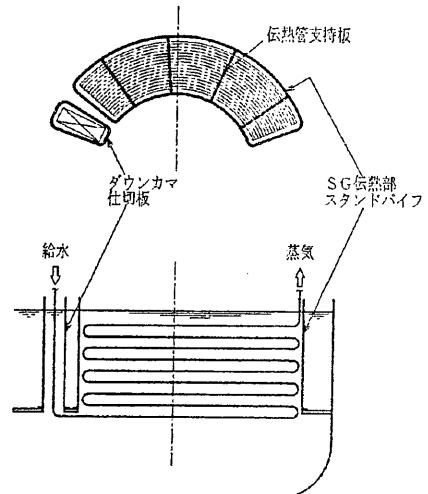
ケース 1



ケース 2

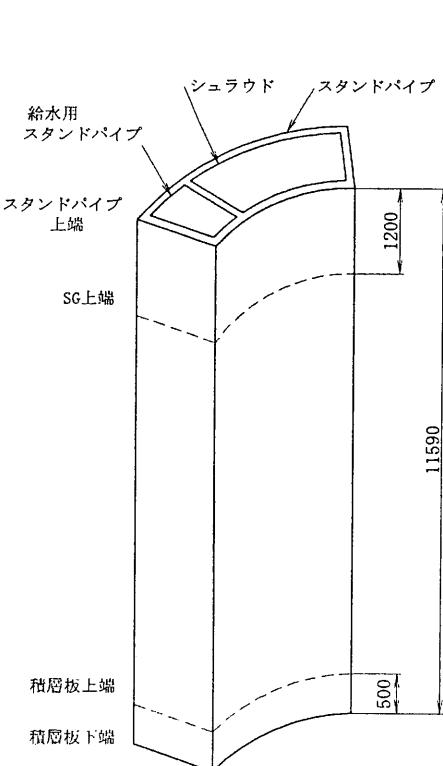


ケース 3

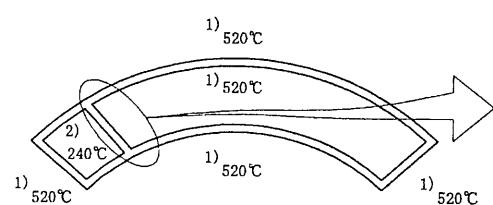


成立可能性は向上するものの、物量・配置スペースも増大

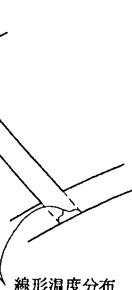
## ケース 1 の解析モデル・荷重条件（定格時）

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会

1) スタンドパイプ上端～SG上端

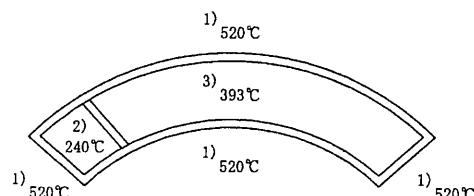


内面と外面の平均温度

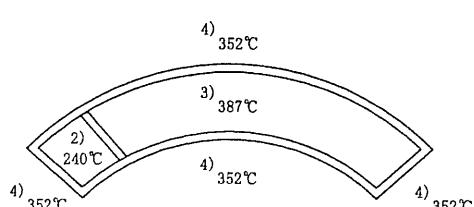


線形温度分布

2) 積層板上端レベル



3) 積層板下端レベル



1) 520°C上部プレナム温度

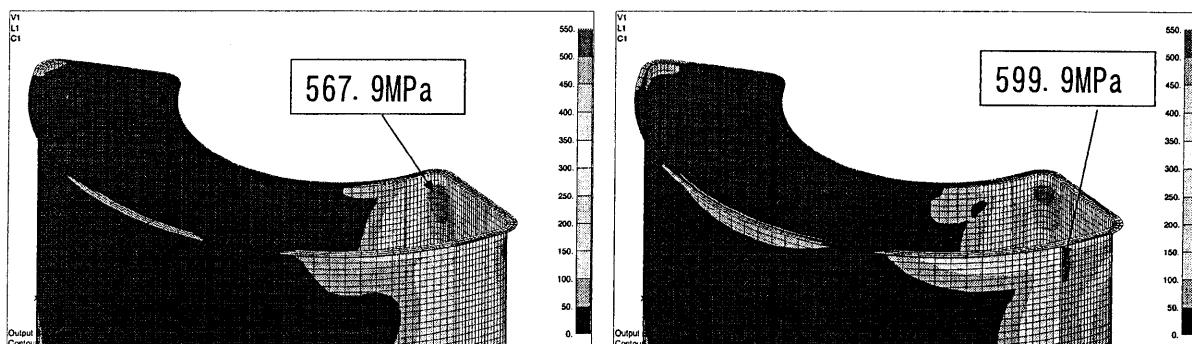
2) 240°C給水温度

3) ○ °C SG上部からSG下端まで  
線形温度分布として  
計算される値

4) 352°C下部プレナム温度

ケース1 解析結果（定格時）平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会

## スタンドパイプのミーゼスの相当応力分布



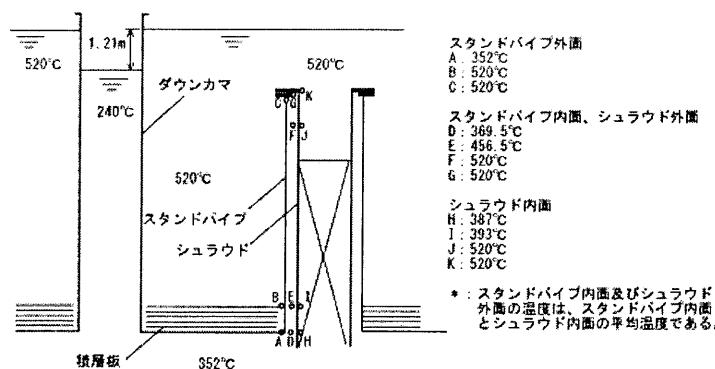
外面

内面

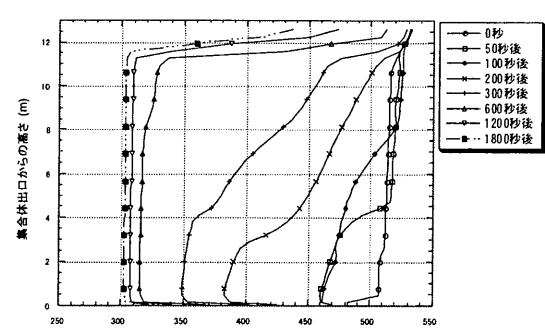
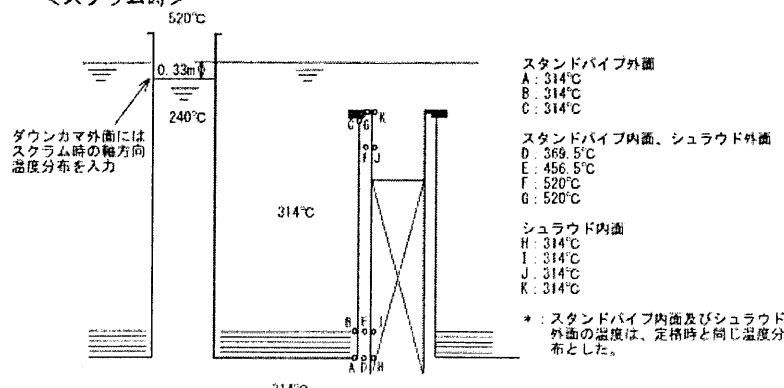
応力制限値 :  $\sigma_n \leq 460 \text{ MPa}$   
(520°C、熱過渡回数600回)

ダウンカマと伝熱管と同じスタンドパイプに設置するのは困難ケース3 の荷重条件（定格及びスクラム時）

&lt;定格時&gt;

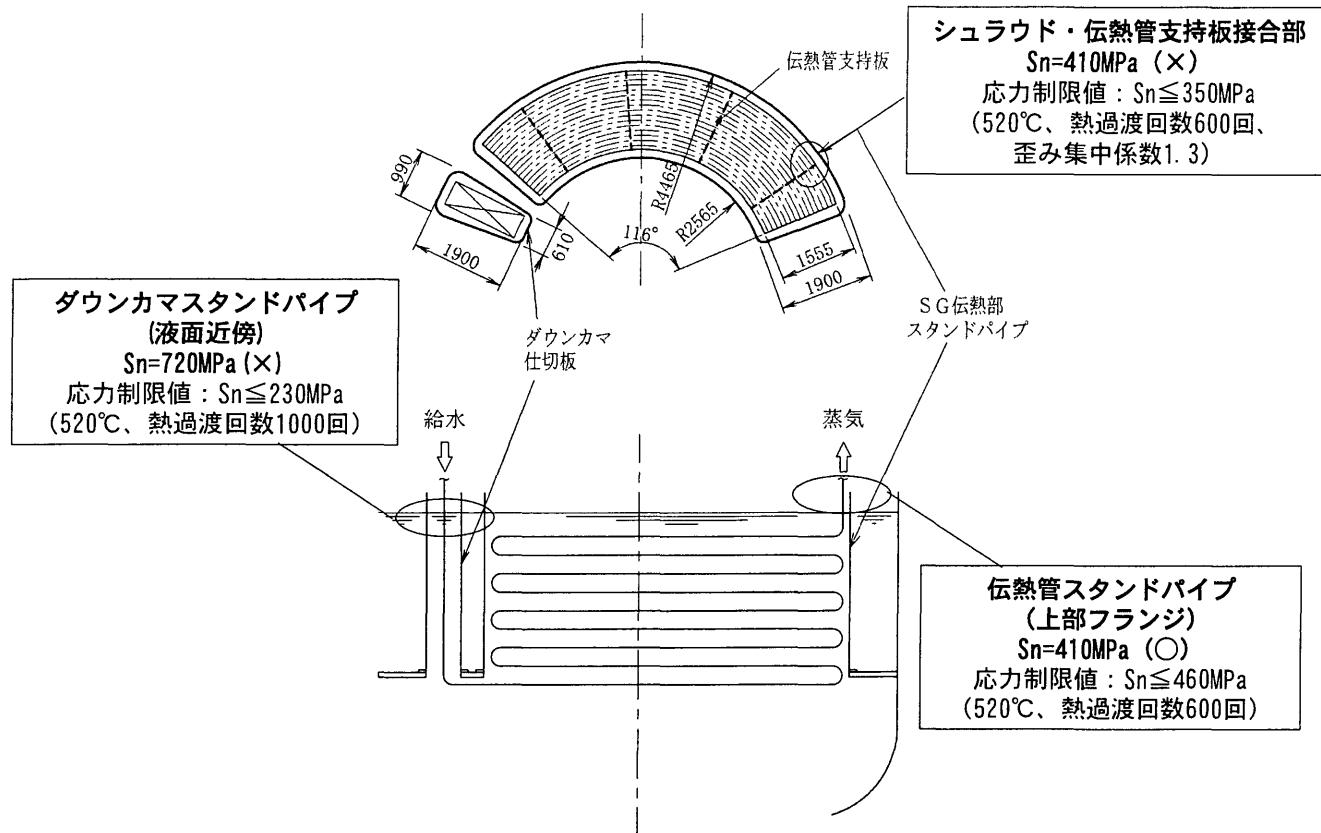
平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会

&lt;スクラム時&gt;

手動トリップ解析結果 軸方向温度分布  
<SG側面 (i=17) >

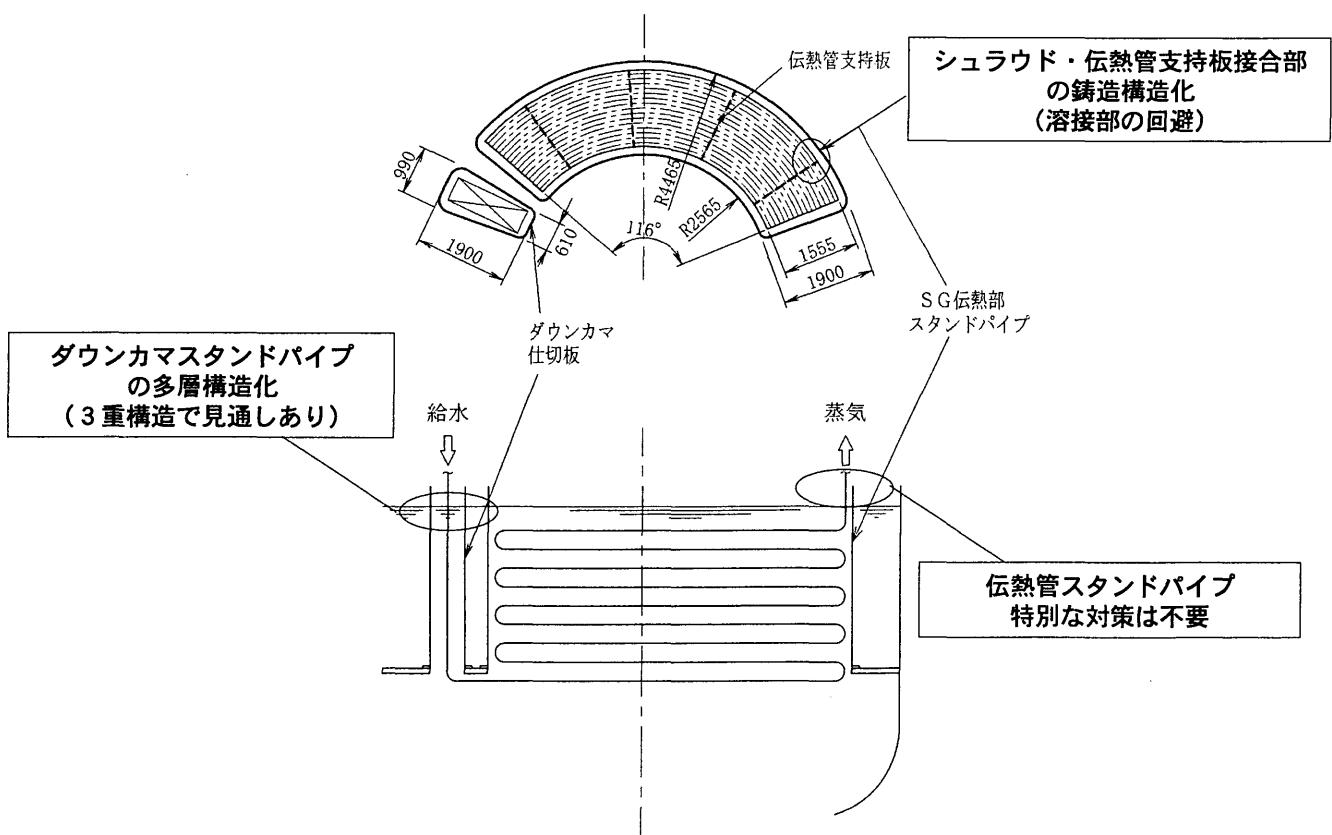
## ケース3 解析結果

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会

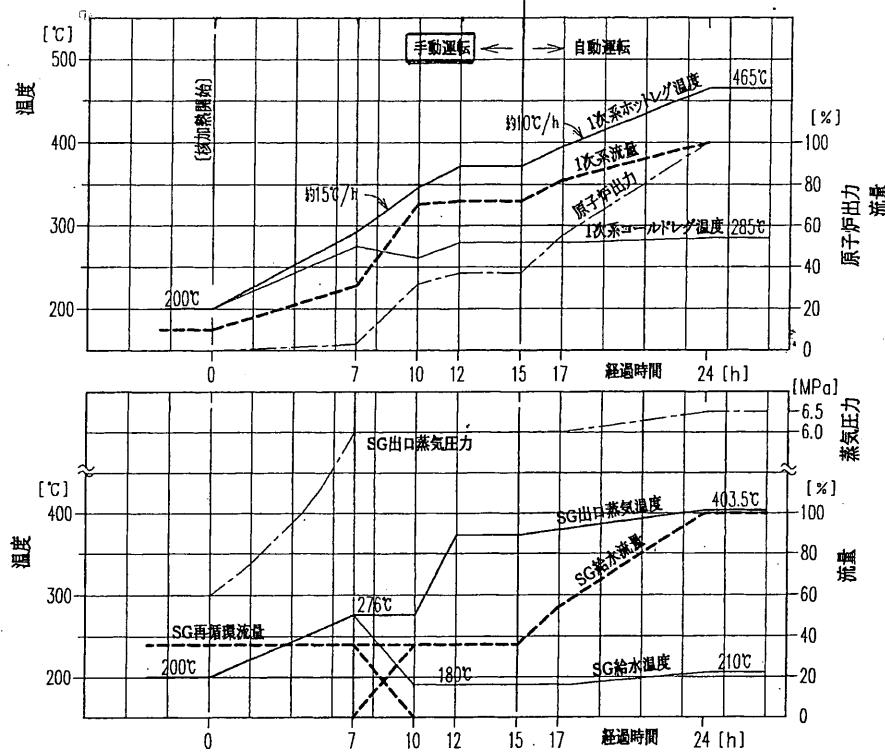


## 構造健全性を見通すための対策

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会



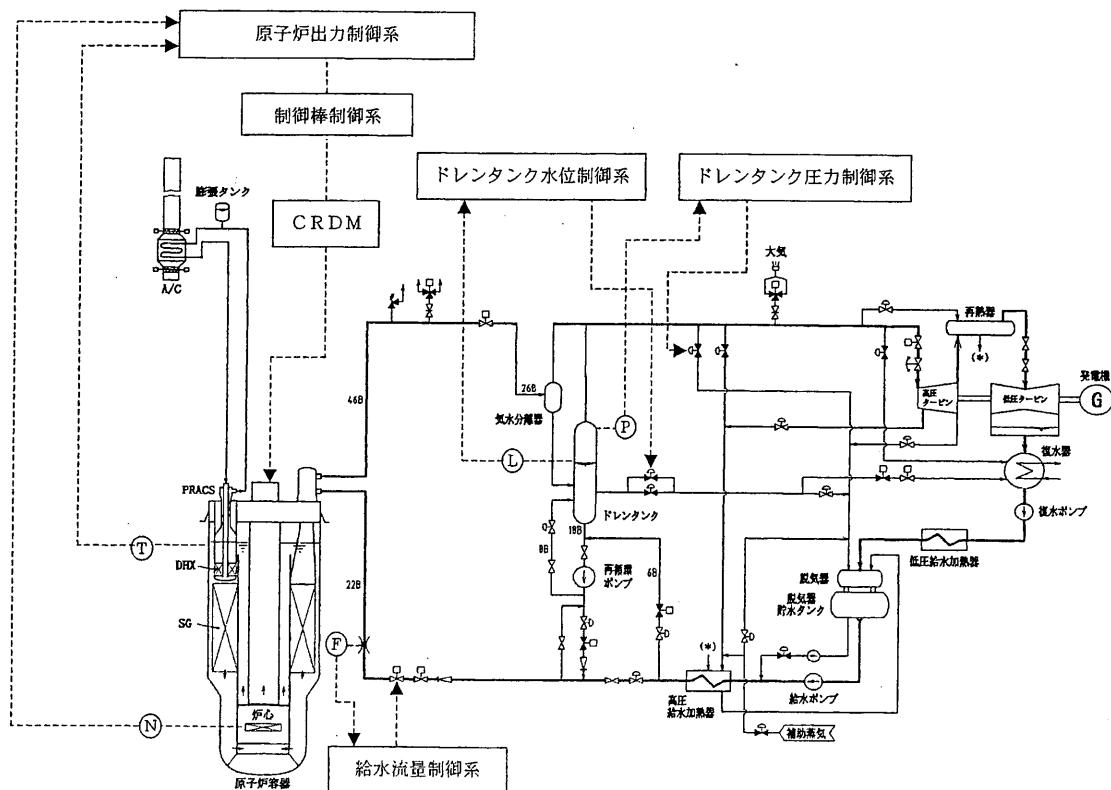
## 自然循環炉の運転性



起動計画案

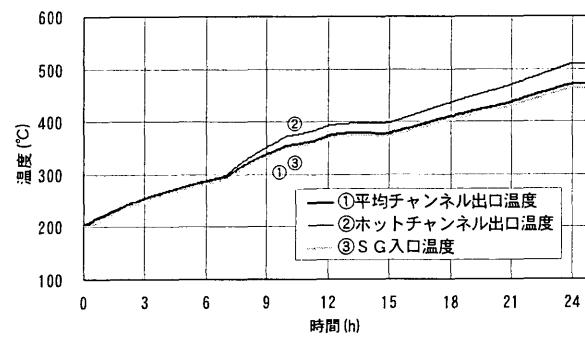
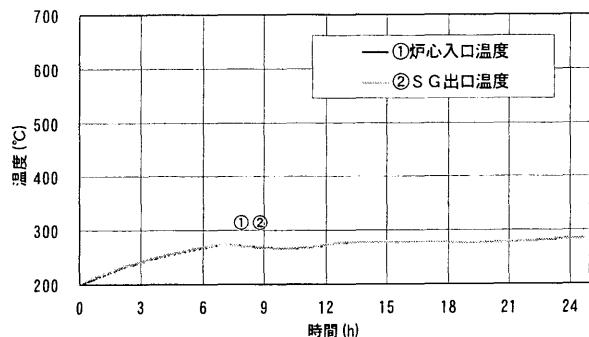
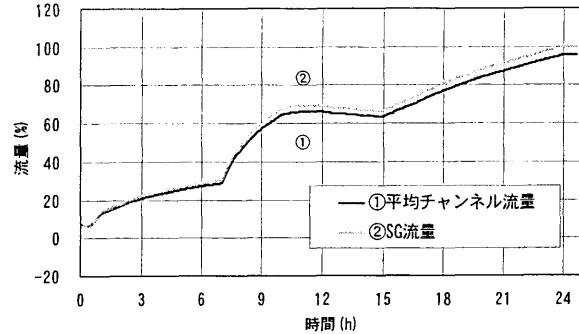
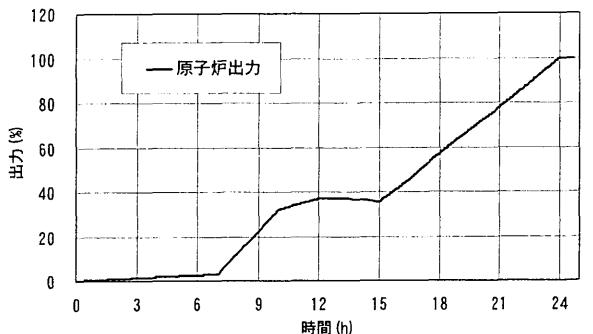
平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会

## 制御系概念図



## 自然循環炉の起動特性

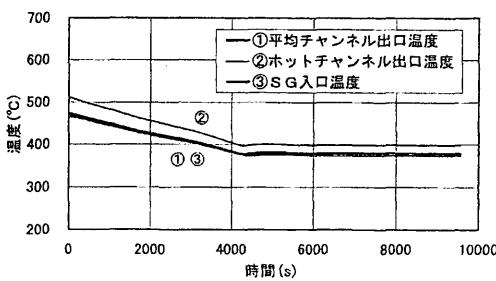
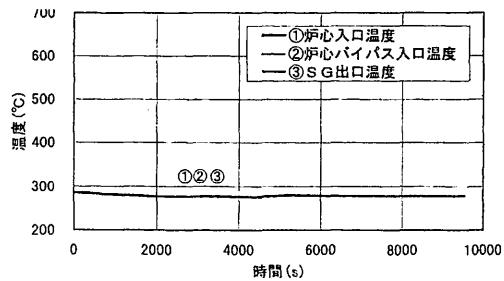
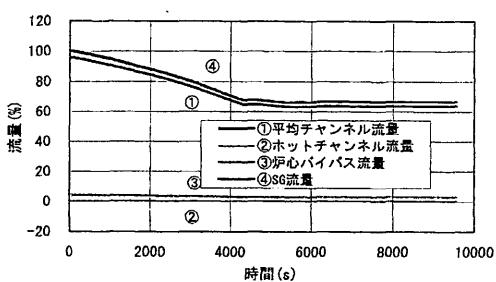
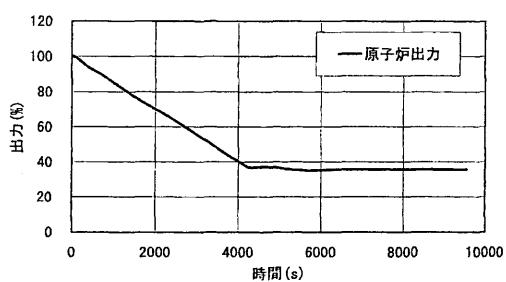
平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会



## 起動特性解析結果 (0%→100%)

## 負荷変更追従性

平成15年5月8日  
第1回研究開発報告会



## 出力変更特性解析結果 (100%→30%、1.0%/分のランプ状出力変更条件)

## SGTR評価項目

○評価対象：自然循環炉(55万kWe)

- 鉛-ビスマスと水との反応性生物
- 漏洩蒸気の炉心進入時の印加反応度（制限値：1 \$未満）
- 漏洩蒸気による循環流量低下（炉心冷却）

## SGTR評価

### (1)鉛-ビスマスと水の反応生成物

**【Pb-Biと純水との反応】** 純水系ではPb、Biは酸化されない  
(水蒸気(H<sub>2</sub>O)の化学形における)の酸素ポテンシャルの方がPb、Bi酸化物の酸素ポテンシャルよりも低い)

**【Pb-Biと溶存酸素を含む水との反応】**

生成される酸化物量はわずかであり、系統に与える影響は小さい

(水蒸気系の溶存酸素濃度は7 ppb以下)

[評価例] 水蒸気流入総量1,000 kg、溶存酸素濃度7ppbを想定した場合の酸化物生成量：W<sub>PbO</sub>=0.0976 (g)、W<sub>Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub></sub>=0.136 (g)

**【水酸化物】** 水酸化物の生成はない

(実機環境条件下では水酸化物は酸化物と水とに分解する)

**【水素化物】** Pb、Biは水素化物を生成することはない

(水蒸気中に含まれる10~20ppb程度のヒドラジン(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)から生成する水素とPb、Biとが反応してそれらの水素化物を作ることはない)

## SGTR評価

### (2)漏洩蒸気の炉心進入(自然循環炉)

事象想定：伝熱管1本ギロチン破断(1DEG)、定常リーク率=約11kg/sec

定常リーク率( $11\text{ kg/s}$ ) $\times 0.1(10\%)$

$\times$ 炉心通過時間(1.2秒)

$\times$ 水蒸気比重量(炉心部を想定： $5.78\text{ kg/m}^3$ )

$\times$ 単位体積当たりのボイド反応度( $1.67\text{ $/m}^3$ )

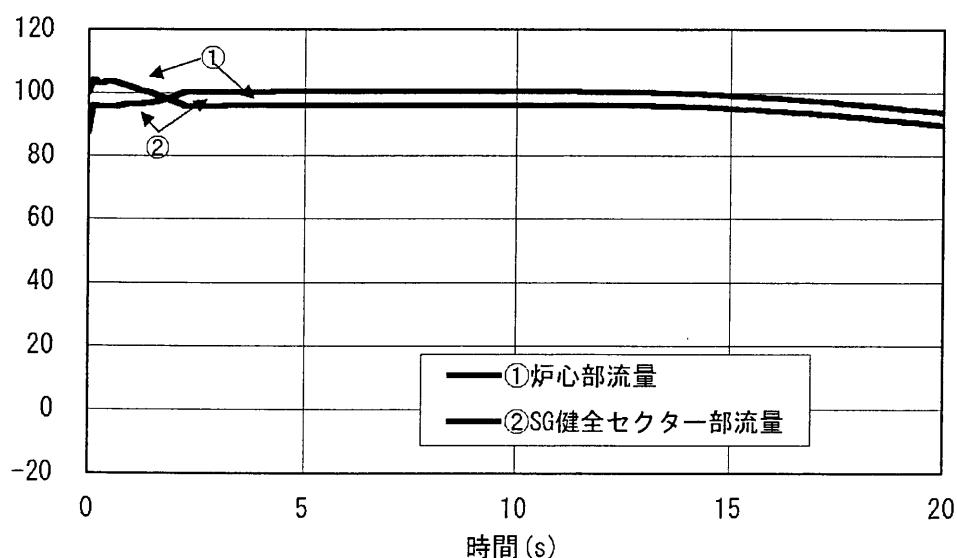
$$= \underline{\text{約 } 40\epsilon} < 1\text{ $}$$

定常リーク率の約10%が炉心に進入するとしても、印加反応度は1\$未満

## SGTR評価

### (3)漏洩蒸気による炉心流量低下(自然循環炉)

事象想定：伝熱管1本ギロチン破断(1DEG)、定常リーク率=約11kg/sec



漏洩蒸気による炉心部の流量低下は約4%であり、炉心冷却性問題なし

## まとめ

- ? Pb-Bi炉の耐震性について検討した結果、炉容器座屈、支持板上下加速度、炉心投入反応度は、M6.5及びM7.1条件共に成立する見通し
- ? 制御棒挿入性についてはUIS-炉心を結合した構造を採用することで成立する見通し
- ? キドニー型蒸気発生器の耐熱見通しについて検討した結果、分割型スタンドパイプの多層構造、伝熱管支持板接合部の鋳造構造化を採用することにより耐熱性が成立する見通し
- ? NC炉の運転性について検討した結果、24時間程度での起動及び1%/分での負荷追従に対応可能な見通し
- ? SGTR時の反応生成物は、溶存酸素に起因する酸化物が支配的であり、系統に影響を与えるほどの量とはならない見通し。また、漏洩蒸気による炉心流量低下は4%程度であり炉心冷却上問題ない見通し
- ? H15年度は、構造材最高温度をパラメータとした経済性評価用データを整備する

## 平成15年度 第1回R&amp;D報告会

**多様な炉心の炉心安全性の検討  
平成14年度 評価結果報告**

1. ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価
2. 高転換比中型炉のULOF起因過程解析

リスク評価研究グループ 飛田 吉春、佐藤 一憲、石田 政義  
安全設計グループ 丹羽 元、久保重信

**ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
ABLE集合体の特徴・目的**

**◆再臨界排除を目的とした設計方策**

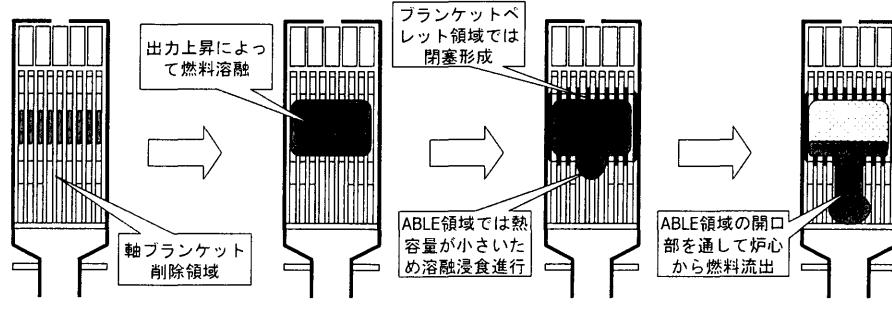
**❖ 内部ダクト内蔵型集合体**

- 燃料集合体の中心数列の燃料を内部ダクトに置き換える。
- 燃料流出経路が既存、燃料流出先は入り口プレナム領域。
- 炉心性能への影響が比較的大きい。

**❖ ABLE(Axial BLanket Eliminated)集合体**

- 軸プランケットの一部を削除して熱的浸食の容易な領域を形成し、炉心の溶融燃料の流出を促進する。
- 炉心性能への影響が小さい。燃料流出先は下部ガスプレナム領域。

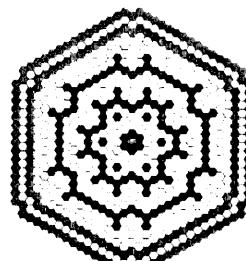
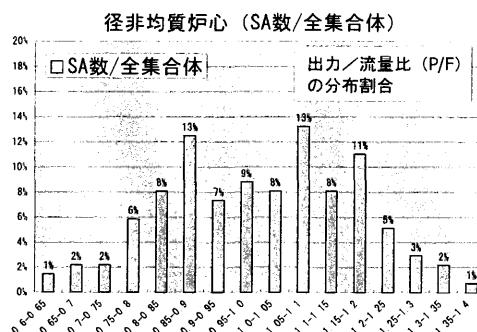
**◆ ABLEの作動原理**



ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
ABLE炉燃料流出挙動解析

◆ 目的：Na冷却MOX燃料大型炉に、ABLE集合体を装荷した場合の再臨界回避の有効性の評価

◆ 解析対象：Na冷却MOX燃料大型炉（3570MWth、径方向非均質炉心）



炉心設計データ

項目	単位	値
燃料集合体数		408
ラッパ管外対面間距離	mm	198
ラッパ管壁肉厚	mm	5
集合体ピン本数		331
燃料軸長	cm	100
ペレット外径／内径	mm	7.42 / 2.28
ピン外径／内径	mm	8.8 / 7.6
上部軸フランケット(UAB)長	cm	40
下部軸フランケット(LAB)長	cm	40
ABLEピン内蔵本数		37
流量半減時間	s	5.5
最大ボイド反応度	\$	5.0

ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
目的と解析条件・体系

◆ 目的

- ❖ 詳細な集合体規模の解析体系を用いてABLEによる燃料排出挙動の特性を検討する。
- ❖ 各P/Fの集合体毎の流出挙動から全炉心の流出量を評価する。

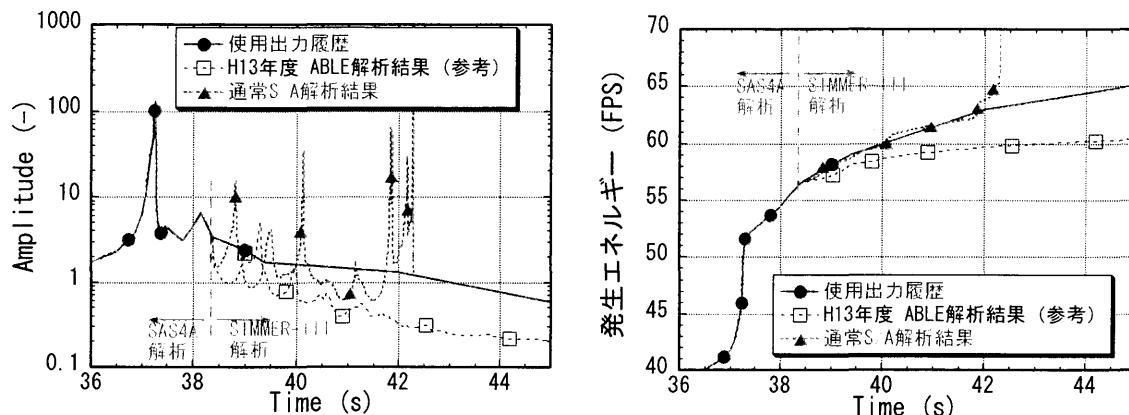
◆ 解析体系・条件

- ❖ 使用コード：SIMMER-III、径方向にはABLE領域と通常ピン束領域の2メッシュ、軸方向は最小メッシュ幅1cmの163メッシュでモデル化
- ❖ 定格出力・流量で30 s定常計算を実施した後、流量減少。

◆ エネルギー条件

- ❖ SAS4Aによる起因過程解析結果とSIMMER-IIIによる遷移過程結果に基づく出力過渡を適用する。
- ❖ 起因過程はボイド反応度を適切な値に設計することで即発臨界に至ることなくマイルドな事象推移となる。起因過程終状態で炉心燃料の平均温度は2800～2850K
- ❖ 遷移過程では、炉心からの燃料流出が生じなければ起因過程終状態の出力レベル（～数Po）を維持。
- ❖ 起因過程における炉心上部への分散燃料の落下で出力ピークが発生。集合体間のエネルギーレベルの違いのために、複数回の小ピークが発生すると考えられる。

ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
使用した出力履歴

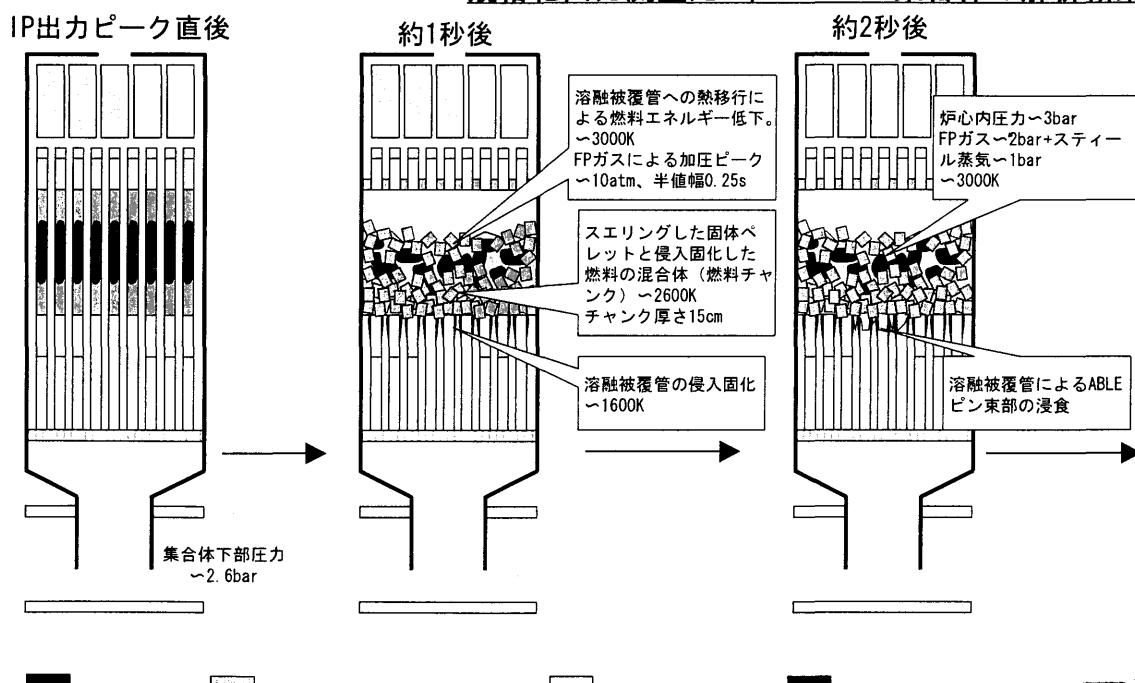


- ◆ 炉心燃料の蓄積エネルギーが燃料流出挙動を支配する物理量である。
- ◆ 通常集合体を想定した遷移過程におけるエネルギーの蓄積挙動 (SIMMER-III解析結果) をトレースするように出力履歴を設定。起因過程後、数Po～1Poを維持。

FPS (Full Power Second) : 定格出力における1秒間の発生エネルギー

ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
事象推移概念と支配現象(1/3)

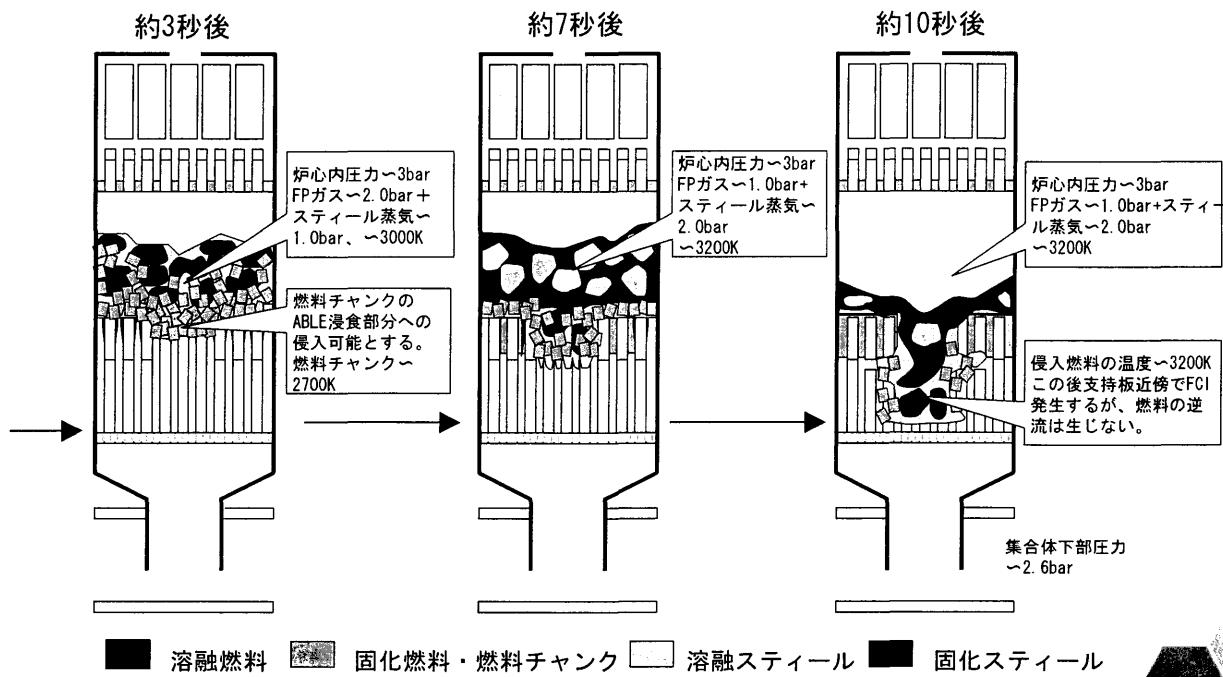
規格化出力流量比 P/F=1.1 の集合体の解析結果



■ 溶融燃料 □ 固化燃料・燃料チャンク □ 溶融スティール ■ 固化スティール

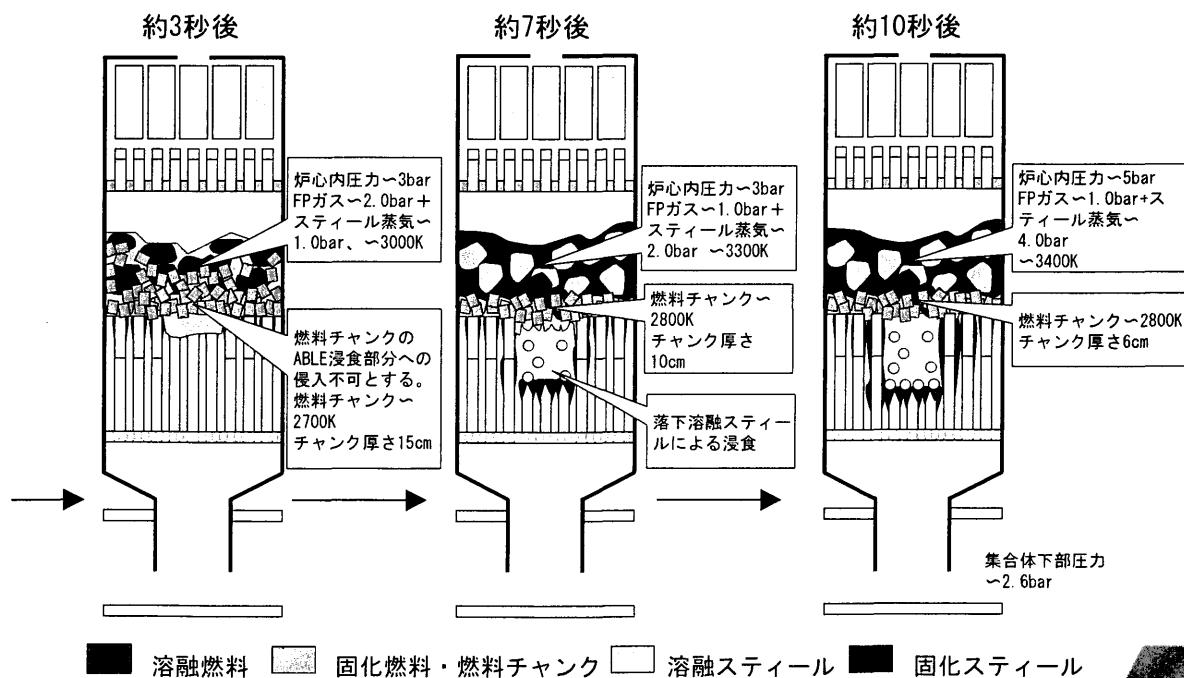
ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
事象推移概念と支配現象(2/3)

①炉心上下端チャンク燃料のABLE領域への侵入を可能と想定した場合

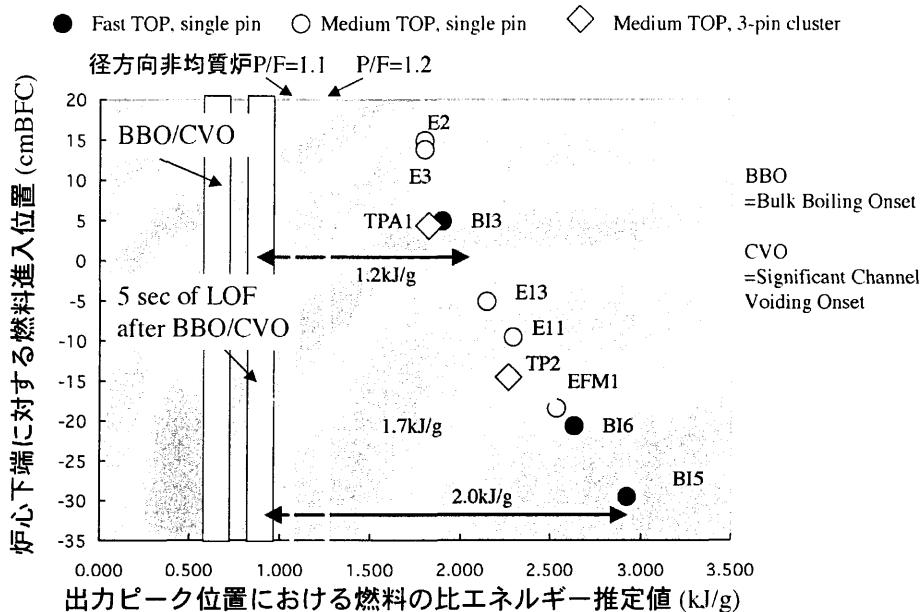


ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
事象推移概念と支配現象(3/3)

②炉心上下端チャンク燃料のABLE領域への侵入が困難と想定した場合



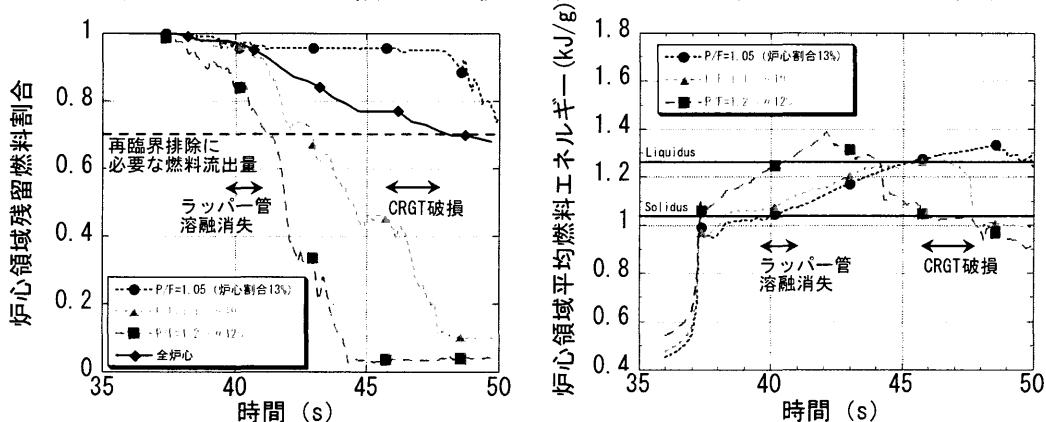
ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
CABRI試験結果との比較



起因過程がマイルドな場合は溶融した燃料がABLE領域まで到達しないため、燃料流出挙動は遷移過程のエネルギー投入とチャンク燃料の可動性に依存する。

ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
全炉心における燃料流出挙動

燃料チャンクのABLE領域への侵入を可能とした場合の燃料流出挙動



- ◆ 再臨界排除に必要な燃料流出量が確保される前に、ラッパー管溶融によって損傷領域が拡大する。
- ◆ CRGT（制御棒案内管）破損時点では、炉心燃料のエネルギーレベルが上昇しており、CRGTからの燃料流出に期待できる。一方、CRGT破損時点のFCIIによる燃料運動と再臨界の可能性について、今後の検討（低エネルギー集合体の存在と3次元性）によってその可能性が小さいこと、あるいは有意なエネルギー発生となり得ないことを確認する必要がある。

ABLE集合体による再臨界排除有効性の評価  
まとめと今後の課題

- ◆ 起因過程における出力履歴がマイルドな場合は、起因過程の発生エネルギーのみでABLEを通した燃料流出は生じず、燃料流出挙動は遷移過程のエネルギー投入とチャンク燃料の可動性に依存する。
- ◆ 炉心下端が溶融するエネルギー状態（炉心平均で1.5～1.55kJ/g）となれば、チャンク燃料の可動性に依存せず、ABLE領域へ燃料が進入できる。
- ◆ 燃料チャンクがABLEピン領域へ侵入可能であれば、厳しい再臨界に至る事象推移を防止できる可能性がある。ABLEピン領域（直径約5cm程度）に対する燃料チャンク（厚み5cm～15cm）の侵入可能性を判断する実験的知見は無く、ABLEによる再臨界排除の成立性を判断するには新たな試験研究が必要とされる。
- ◆ 燃料チャンクの進入が可能な場合においても、プール拡大過程における再臨界の可能性が小さいか発生エネルギーが有意なものでないことについて今後の確認が必要である。

高転換中型炉のULOF起因過程解析  
背景と目的

- ◆ FSの一環として内部転換比(炉心部の増殖比)を1に近づけた高転換炉心の設計が検討されている。
  - ❖ 炉心部の燃料体積率を40%近くまで増加する必要あり、そのため、従来炉心の燃料ピン(直径8.5mm)に比べて太径の燃料(直径10mm～11mm)を採用した炉心が検討されている。
  - ❖ ULOF時の「再臨界排除」を達成するための条件の一つとして、「起因過程の出力バーストをマイルドなものに抑える」(即発臨界超過が無い)ための条件として、ナトリウムボイド反応度ワース設計ノミナル値を5\$～6\$以下に抑えた設計とする。
- ◆ 高内部転換炉心の一つとして上部ナトリウムプレナム付き中型炉心(UPL120)が提案された(H13年度)
  - ❖ ピン径11.1mm、1.2m長の炉心。ボイドワース6\$あり、これを軽減するために、炉心直上に上部ナトリウムプレナム(40cm長)を設置して、ここがボイド化した場合に約-1\$の負のボイド反応度効果を期待した設計

## 高転換中型炉のULOF起因過程解析 背景と目的（つづき）

- ◆ SAS4AによるUPL120炉心のULOF起因過程解析結果が、ノミナル条件下で即発臨界を僅かに超過する結果となった(LOF-d-TOP(FCIは「ト」))
- ❖ 太径燃料(11.1mm)採用により、燃料平均比出力密度が従来大型炉(8.5mm)の約1/2と低い。
- ❖ 炉心長が1.2mの長尺
- ❖ いすれも沸騰先行集合体の燃料破損後の負の燃料分散反応度挿入挙動を、従来炉心ケースに比して遅延させる原因となり、未沸騰集合体燃料破損によるFCI正ボルト反応度挿入が1\$超過の原因。
- ❖ 低比出力密度炉心ほど規格化出力上昇に対するDopplerフィードバックが遅くなる。
- ◆ この結果から、1)炉心長の短尺化1m、2)平均比出力密度を20%程度上げる、ことを推奨した。
- ❖ 二つの新炉心Fsm100/Fsm80提案あり(H14年度、Table 1-1)、UPL120ケースとの比較の観点から、ULOF起因過程解析を実施した。

## 高転換中型炉のULOF起因過程解析 燃料温度反応度フィードバックの比較

Table 1-1 Comparison of design parameters

Proposed Core Designs ==>	120cm中型炉/FS (上部Naブレナム付) (UPL120)	100cm中型炉/FS (炉心短尺化、比出力増) (Fsm100)	80cm中型炉/FS (炉心短尺化、ボイド率減) (Fsm80)	120cm/FS大型炉 (Fs120)	80cm/FS大型炉 (Fs80)	実証炉 (Low burnup core) DFBR
Thermal power (MWh)	1190	1785	1785	3800	3800	1600
Coolant Inlet/Exit temperature (C)	395/550	395/550	395/550	395/550	395/550	395/550
Average Pu-enrichment Pu/(U+Pu) (%)	IC: 17.0/OC: 21.1	19.3/23.0	21.1/25.3	17.1/19.4	22.2/27.7	19.8
Average burnup (MWd/kgHM)	152	149	149	150	150	89
Core fuel inventory(MOX) (ton)	38	41.4	40.8	72	58	26
Average breeding ratio: Core/Core+Blanket	0.919 / 1.006	0.822 / 1.038	0.754 / 1.035	1.05	1.03	1.16
Average power density (W/cc of core vol.)	124	165	168	192	233	226
Average fuel specific power density (kWkg-MOX)	31.3	43.1	43.8	52.8	65.5	61.5
Average linear heat rating (kW/m)	21.3	24.7	25.6	27.3	26.9	25.0
Equiv. core diameter (m)	3.2	3.7	4.1	4.6	5.1	3
Core height (cm)	120	100	80	120	80	100
Axial blankets UAB/LAB (cm)	0/20	30/30	30/30	10/1.2	40/40	35/35
Fuel pin diameter (mm)	11.1	10.4	10.5	9.7	8.8	8.5
Core material Vol. fr. (%)						
Fuel	40.6	39.6	40	37.2	36.7	39
All Steel	25.3	26.5	26.66	20.7	25.4	22.8
(Cladding+wire steel only)	14.5	16.3	16.46	13	14.5	12.6
All Sodium	28.2	27.7	27	36.3	32.1	32.9
(Sodium in pin bundle)	23.7	23.4	22.75	27.8	23.2	25.7
Void(gap+hole)	5.9	6.5	6.34	5.8	5.8	5.3
Fuel + Steel Vol. Fraction inside wrapper tube (-)	0.65	0.65	0.66	0.60	0.64	0.62
No. of fuel assemblies (All)	276	333	402	462	576	295
(IC/OC)	162/114	183/150	246/156	252/210	378/198	189/96
No. of fuel pins per assembly	169	217	217	234/271	294/331	217
Inner duct (IC/OC)	None	None	None	Yes/No	Yes/No	None
No. of control rods	19	28	37	36	48	30
No. of inner blankets	None	None	None	None	None	None
Core material worth (\$)						
Fuel	83	96	99	69	100	93
All Steel	-24	-23	-21	-18	-19	-19
Clad	-14	-14	-13	-11	-11	-11
Pin-bundle sodium void	6.0 (UPL = -1.0)	5.7	4.8	7.3	5.0	3.5
Max positive void worth of above	6.0	5.7	4.9	7.4	5.2	3.7
Core Doppler Tdk/dT (not including steel Doppler)						
Na-in	-6.85E-03	-5.34E-03	-4.80E-03	-6.09E-03	-5.47E-03	-8.62E-03
Na-out	-5.12E-03	-4.23E-03	-3.90E-03	-4.44E-03	-4.04E-03	-6.85E-03
Beta effective	3.31E-03	3.29E-03	3.29E-03	3.45E-03	3.36E-03	3.55E-03

高転換中型炉のULOF起因過程解析  
炉出力と全反応度の履歴

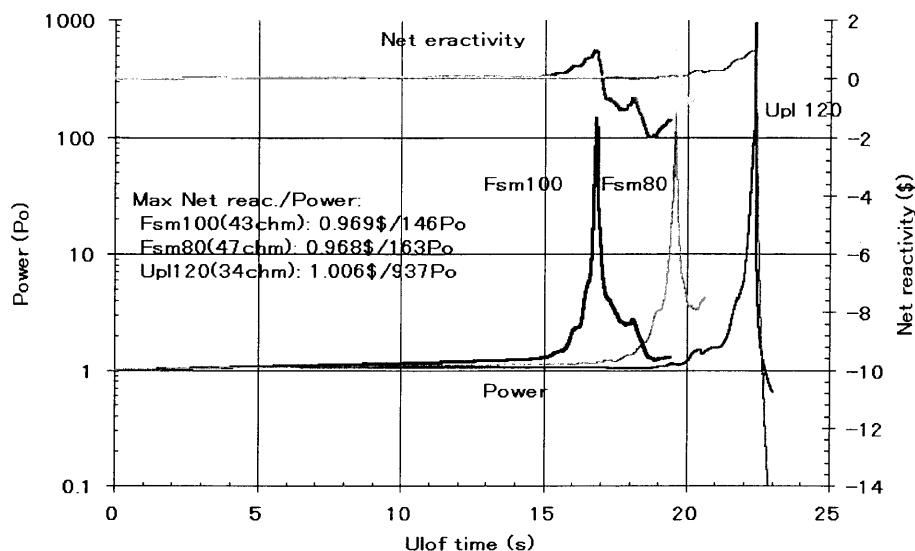


Fig.1 Power and net reactivity/Fsm80, Fsm100 vs. Upl120

高転換中型炉のULOF起因過程解析  
高転換中型炉と既往炉心設計の比較

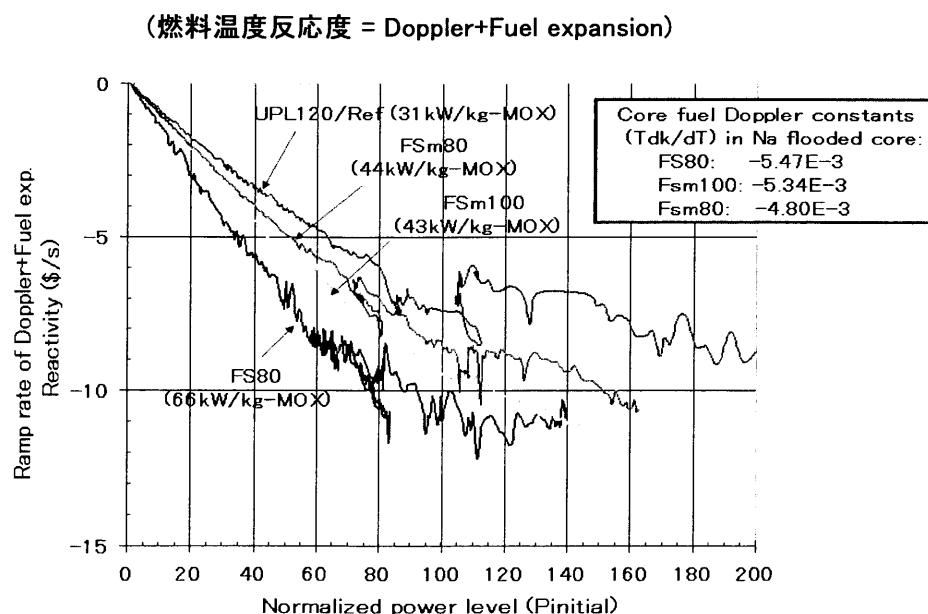


Fig.2 Comparison of ramp rates of (Doppler+Fuel exp.) reactivity vs. Power

高転換中型炉のULOF起因過程解析  
各ケースの燃料移動反応度挿入挙動の比較

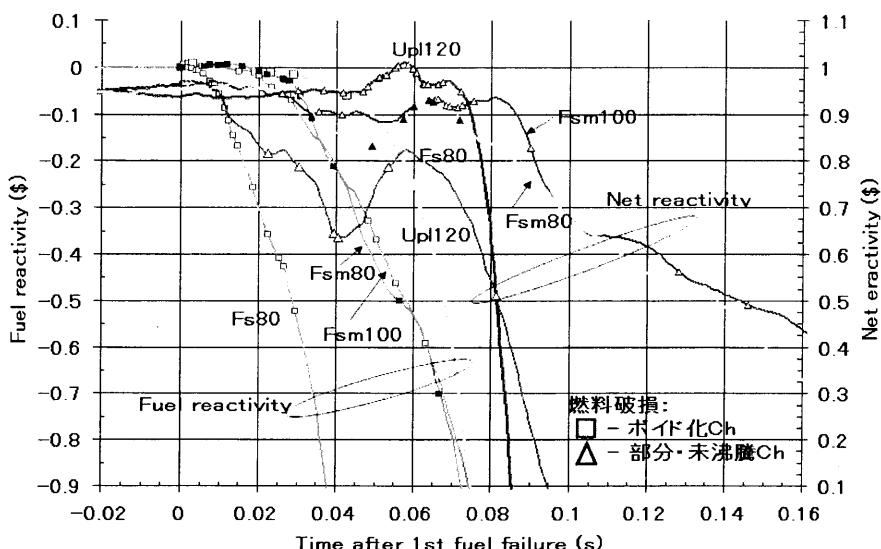


Fig.3 Fuel and Net reactivity: Fsm100/Fsm80/Upl102 vs. Fs80

Fig. 過渡末期の炉出力と燃料移動反応度挿入挙動の比較  
[Fs80(比出力密度66kW/kg)/Fsm100(43)/Fsm80(44)/Upl120(31)]  
燃料分散反応度挿入挙動の比出力密度依存性の比較

## 高転換中型炉ULOF起因過程解析まとめ

◆ UPL120炉心のULOF起因過程解析結果（即発臨界超過）を踏まえて炉心仕様を新たに検討した二炉心のULOF解析を実施

- ❖ 炉心長の短尺化→1mおよび0.8m
- ❖ 平均比出力密度を約40%上げた炉心
- ❖ ボイドワースは5\$~6\$の範囲内

◆ ULOF起因過程の結果

- ❖ いずれの炉心ケースともに、ノミナル条件下では、即発臨界未満のマイルドな出力バーストとなり、遷移過程へ移行する。
- ❖ ボイド反応度およびドップラー係数の設計不確かさ範囲内でも即発臨界超過とはならないことを確認した。
- ❖ 比出力密度を上記仕様よりも下げるとき、ULOF時の再臨界排除裕度を減少することになる。

今後の課題

◆ ABLEによる再臨界排除有効性

- ❖ 溶融領域拡大過程における再臨界事象の評価
- ❖ ABLE有効性の判断と実証に向けた試験計画の提案
- ❖ 中長期PAMR過程における臨界性評価
- ❖ 高転換比中型炉における事象推移評価
- ❖ 設計への再臨界排除方策の提案

◆ 金属燃料炉の事象推移評価

- ❖ 炉心損傷事故の事象推移評価
- ❖ 制御棒案内管を通した燃料流出挙動の詳細評価
- ❖ 再臨界挙動特性の検討 (MOX燃料炉心との比較)

# ODSフェライト鋼被覆管の実用化技術開発

平成15年5月8日

皆藤 威二

システム技術開発部  
核燃料工学グループ

## 平成14年度の進捗状況および報告内容

### ■実用規模製造技術開発

#### (1) 大型素管製造技術評価

- ・大型中空カプセル素管製造試験
- ・海外HIPビレットの熱間押出試験

#### (2) 長尺被覆管製造技術評価

- ・大型中空カプセル素管からの長尺被覆管製造試験
- ・9Cr-マルテンサイト系ODS鋼の組織制御技術開発
- ・12Cr-フェライト系ODS鋼の二段軟化熱処理技術開発

### ■照射試験準備

#### (1) 「常陽」照射試験

- ・材料照射試験(MARICO, CMIR)の照射試験計画
- ・燃料ピン照射試験(キャップセルリグ)の照射試験計画

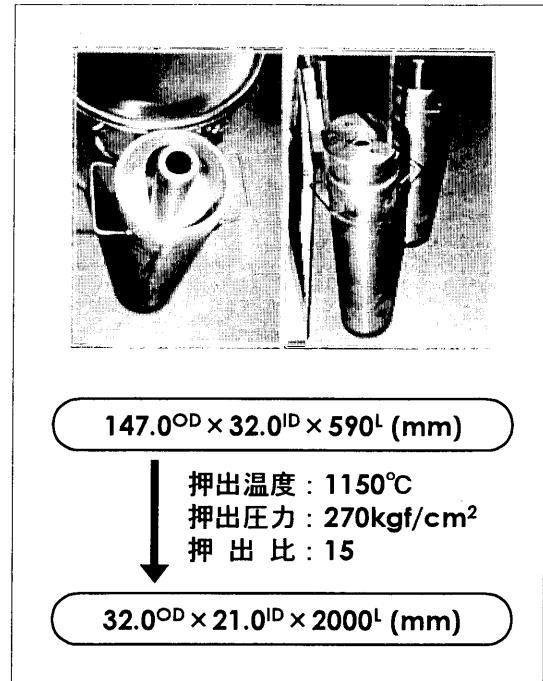
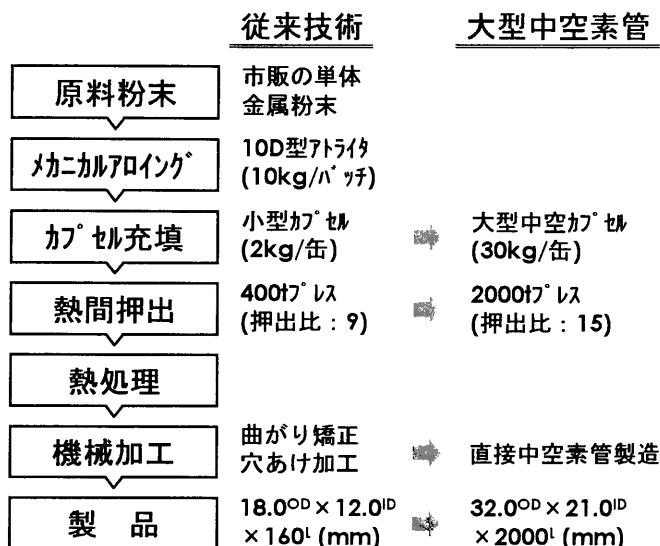
#### (2) BOR-60照射試験

- ・照射試験計画および燃料ピン設計

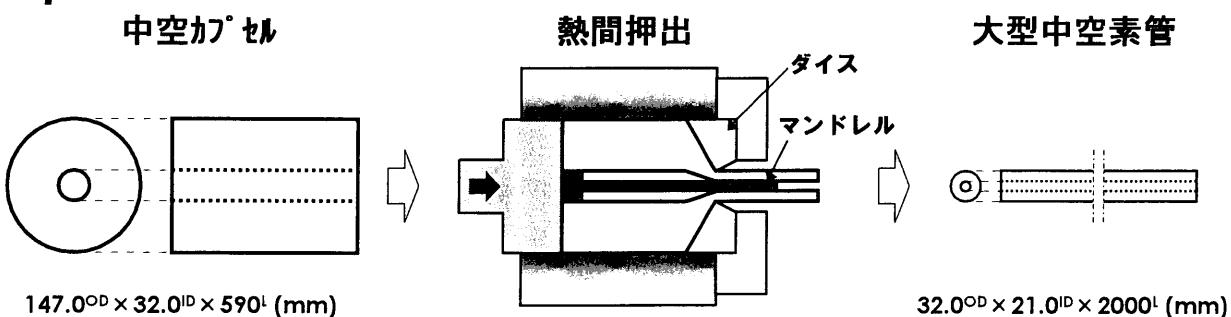
## 大型中空カプセル管製造試験(1)

- 《目的》
- ・量産用製造プロセス確立
  - ・製造コスト低減

### 《製造試験フロー》



## 大型中空カプセル管製造試験(2)



### 《製造結果》

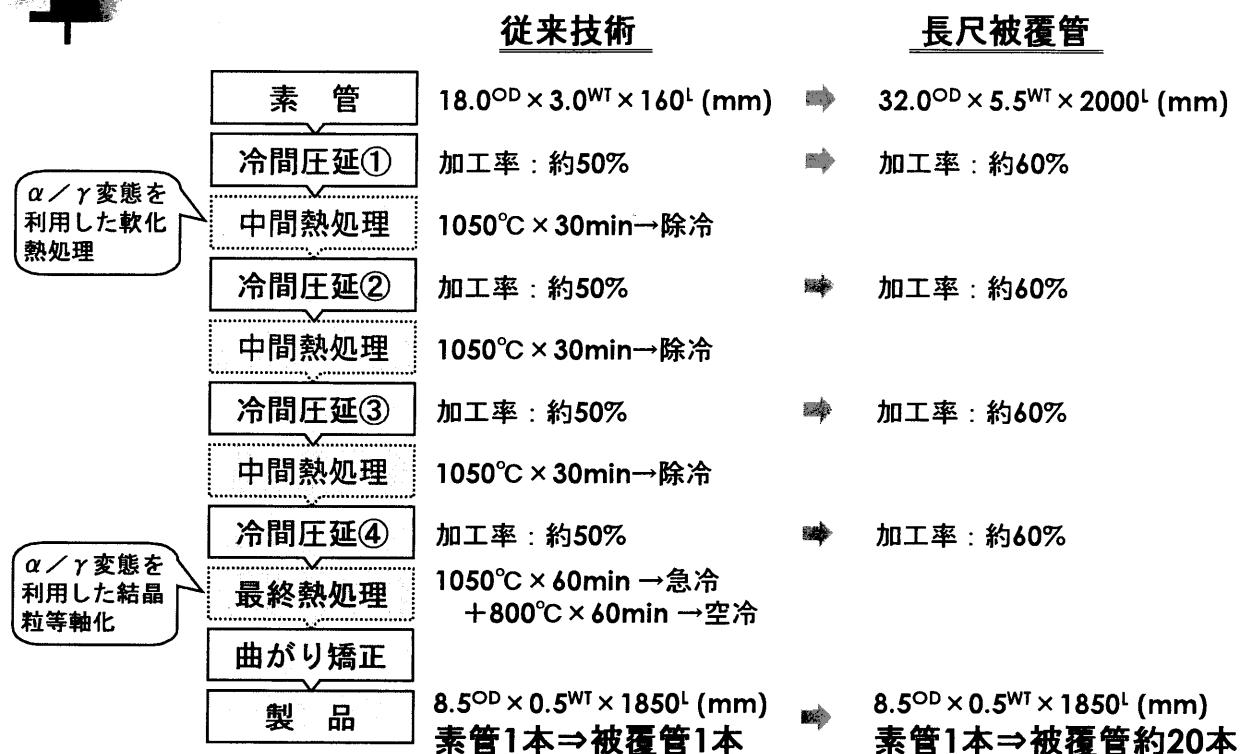
- ・大型中空カプセルを設計・製作し、2000tプレスを用いた熱間押出しによる大型中空素管製造に成功した。
- ・製造素管の寸法測定の結果、偏肉が大きいことが明らかとなった。

#### ※偏肉の原因について

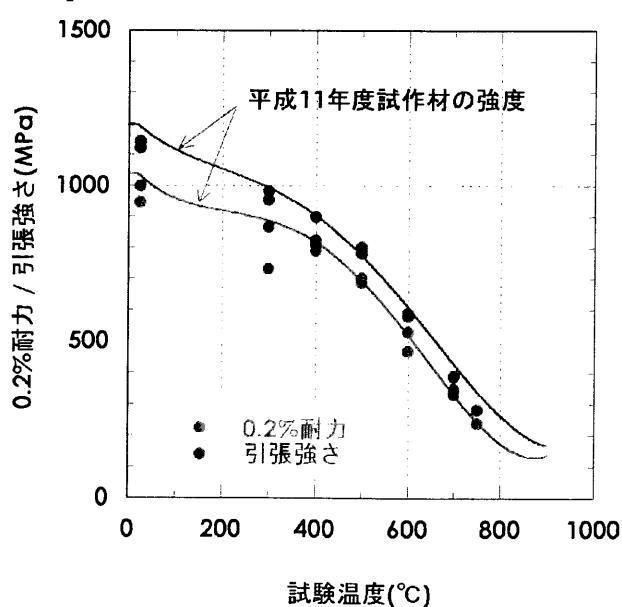
マンドレルとカプセル内径のクリアランスが大きかったことが原因である可能性が高い(マンドレル外径18mm、カプセル内径32mm)。

⇒ 平成15年度に中空カプセルの設計を見直し、最適化した条件で再度確認試験を予定

## 大型中空素管からの長尺被覆管製造試験(1)



## 大型中空素管からの長尺被覆管製造試験(2)



製造した長尺被覆管の引張試験結果

### 《製造結果》

- ・従来よりも高加工率(約60%)での冷間圧延であったが、大型中空素管から4回圧延による長尺被覆管を製造することができた。
- ・製造した長尺被覆管の強度特性および組織は、同一成分系である平成11年度試作材(M11)と同等であった。

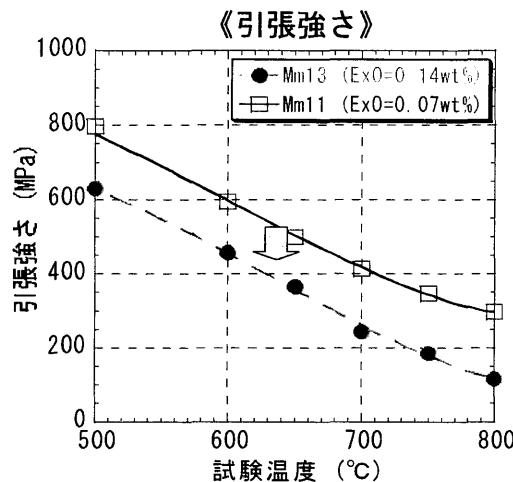
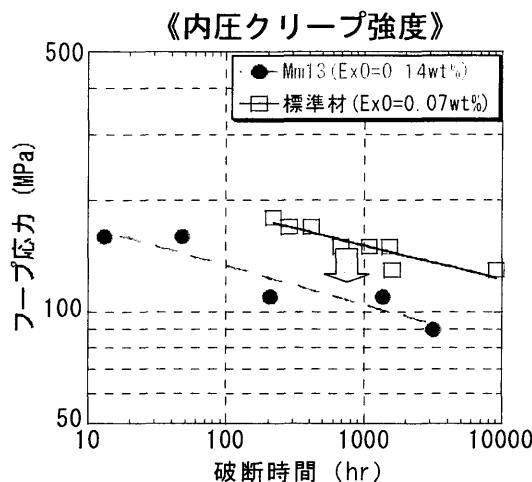


大型中空カプセル素管および長尺被覆管による実用規模での製造見通しが得られた。

## 9Cr-マルテンサイト系ODS鋼の組織制御技術開発

■平成13年度試作9Cr-マルテンサイトODS鋼<sup>[\*]</sup>被覆管(Mm13)で著しい強度低下が発生

[\*] 9Cr-マルテンサイトODS鋼の基本組成 : 0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



強度低下の原因

Mm13への過剰酸素(Ex.O)の混入?

過剰酸素(Ex.O)が強度・組織に重大な影響を及ぼす可能性

## Ex.O量, Ti添加量をパラメータとした試験・評価

試料	目標組成	特徴
Mm11, E5, E7	0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	標準材
Y1	0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.28Y	金属Y添加により過剰酸素を低減
T3	0.13C-9Cr-2W-0.20Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.17Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	過剰酸素(Ex.O)増加
T4	0.13C-9Cr-2W-0.50Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti増量
T5	0.13C-9Cr-2W-0.50Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -0.33Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti, 過剰酸素(Ex.O)增量

### ■製造プロセス

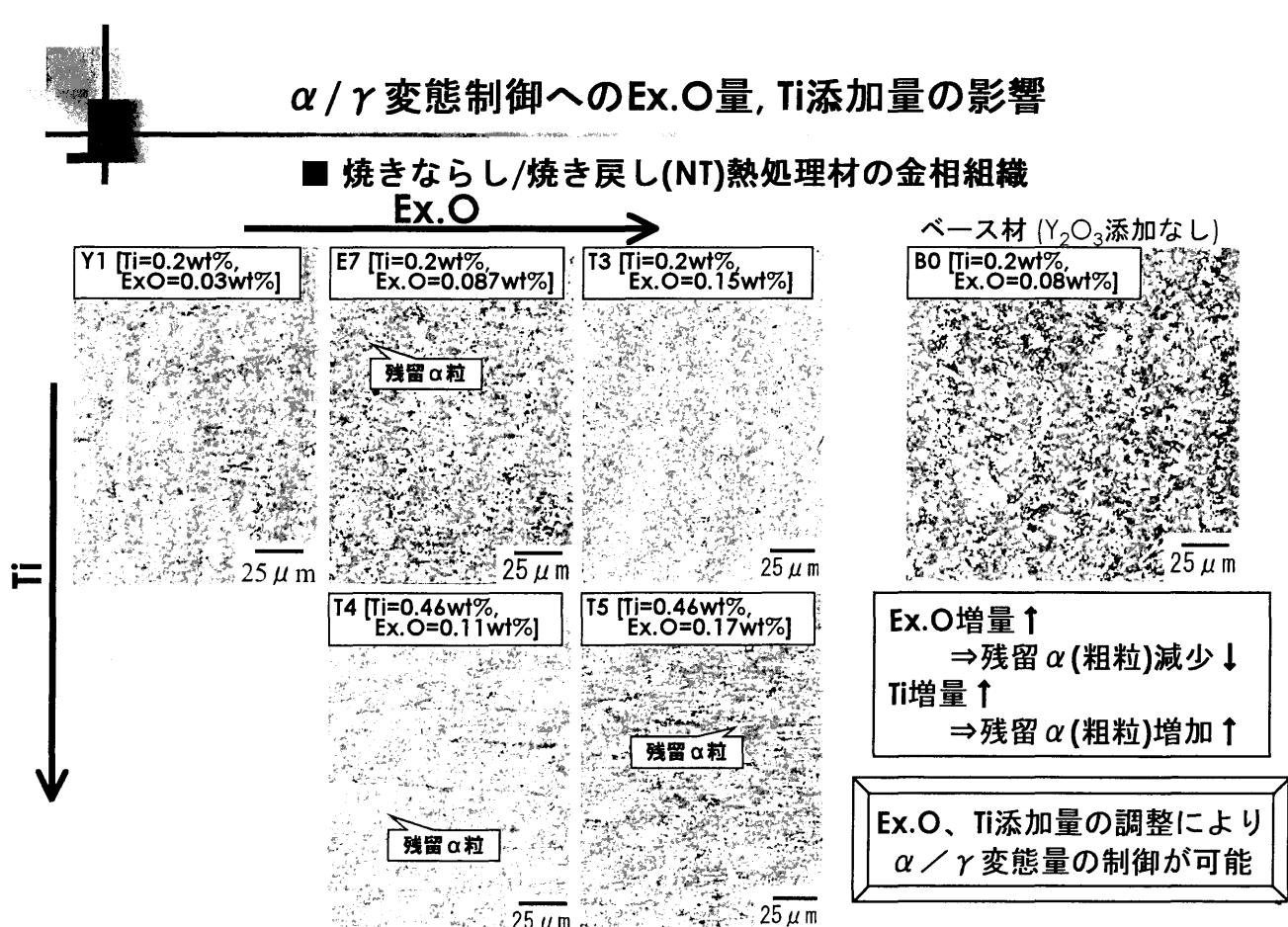
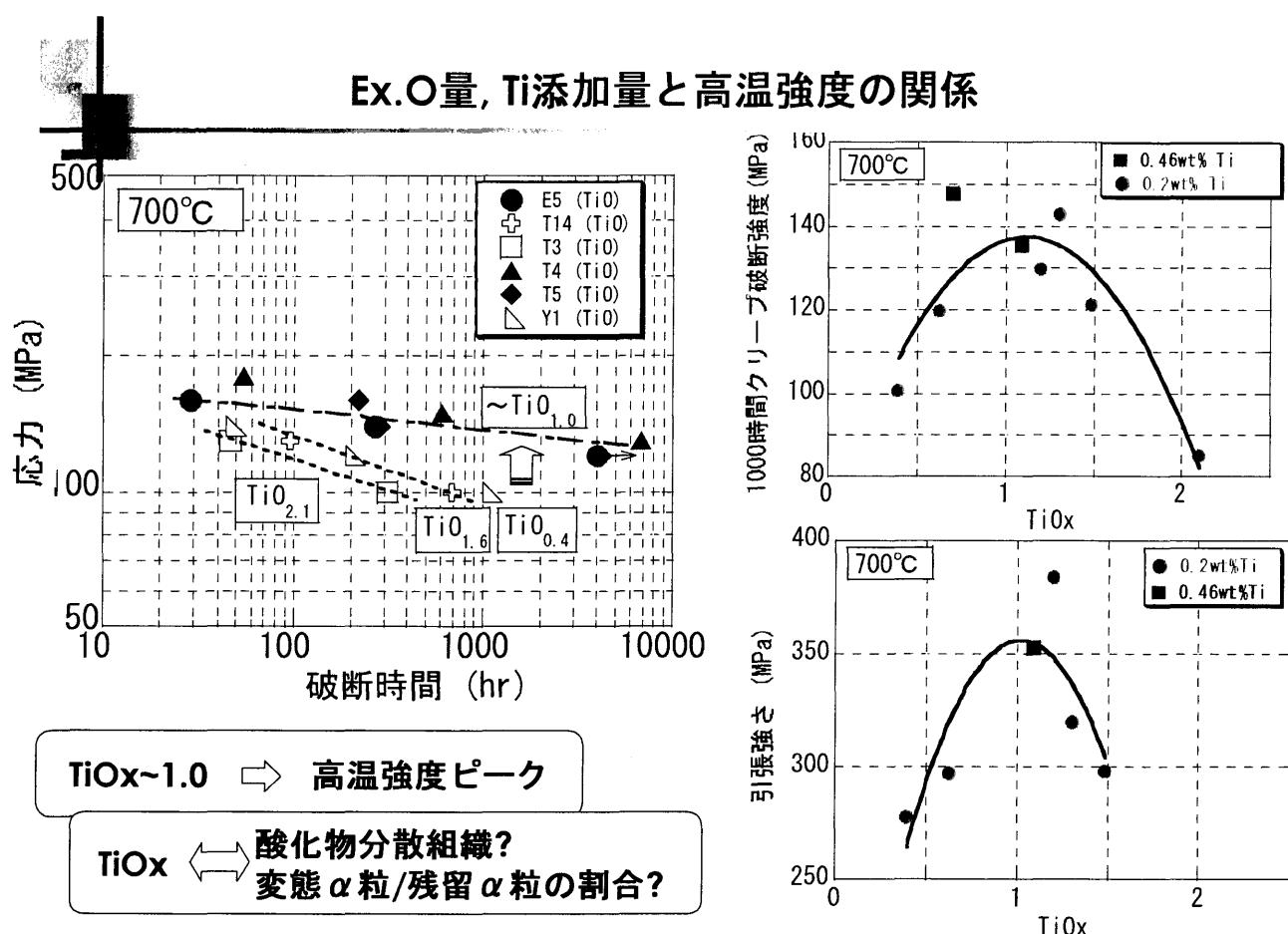
メカニカルアロイング  
220rpm × 48hr  
Arガス雰囲気

軟鋼カプセル充填、  
真空脱氣  
400°C × 10<sup>-3</sup>torr × 2hr

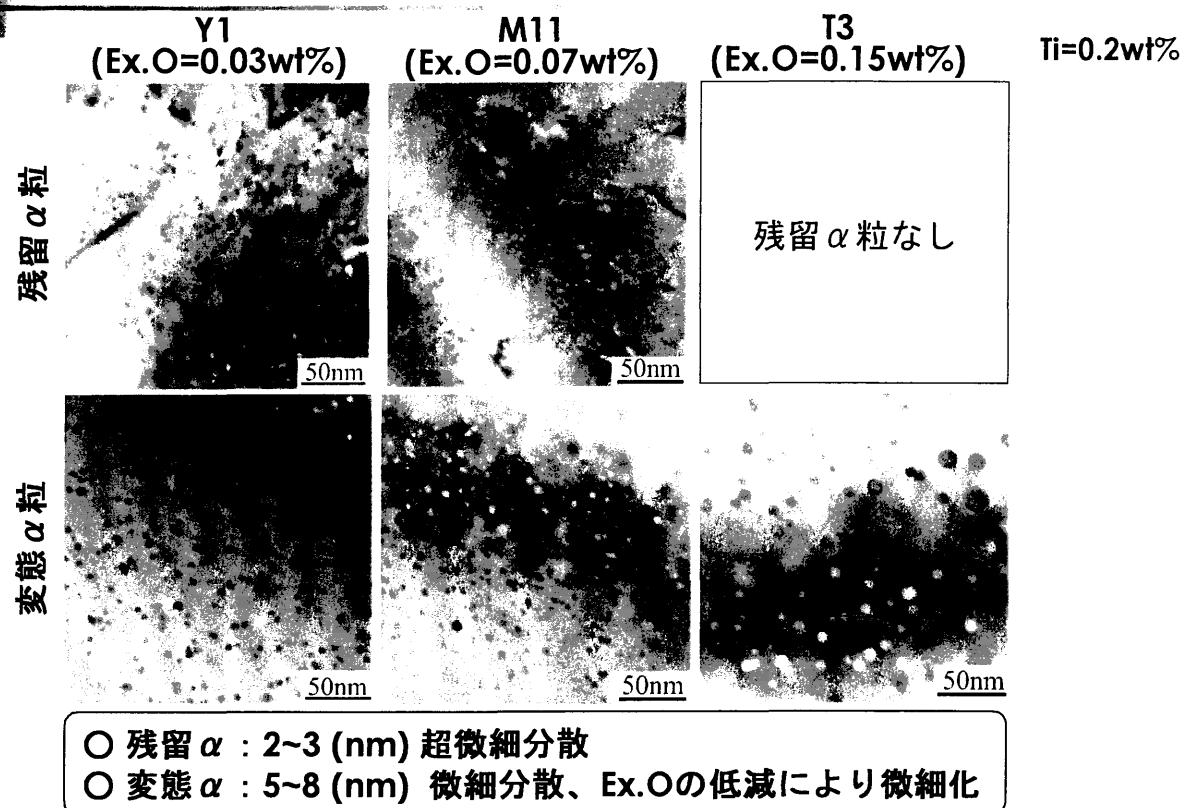
熱間押出し  
1150°C, ダイス径: φ 25

### 最終熱処理

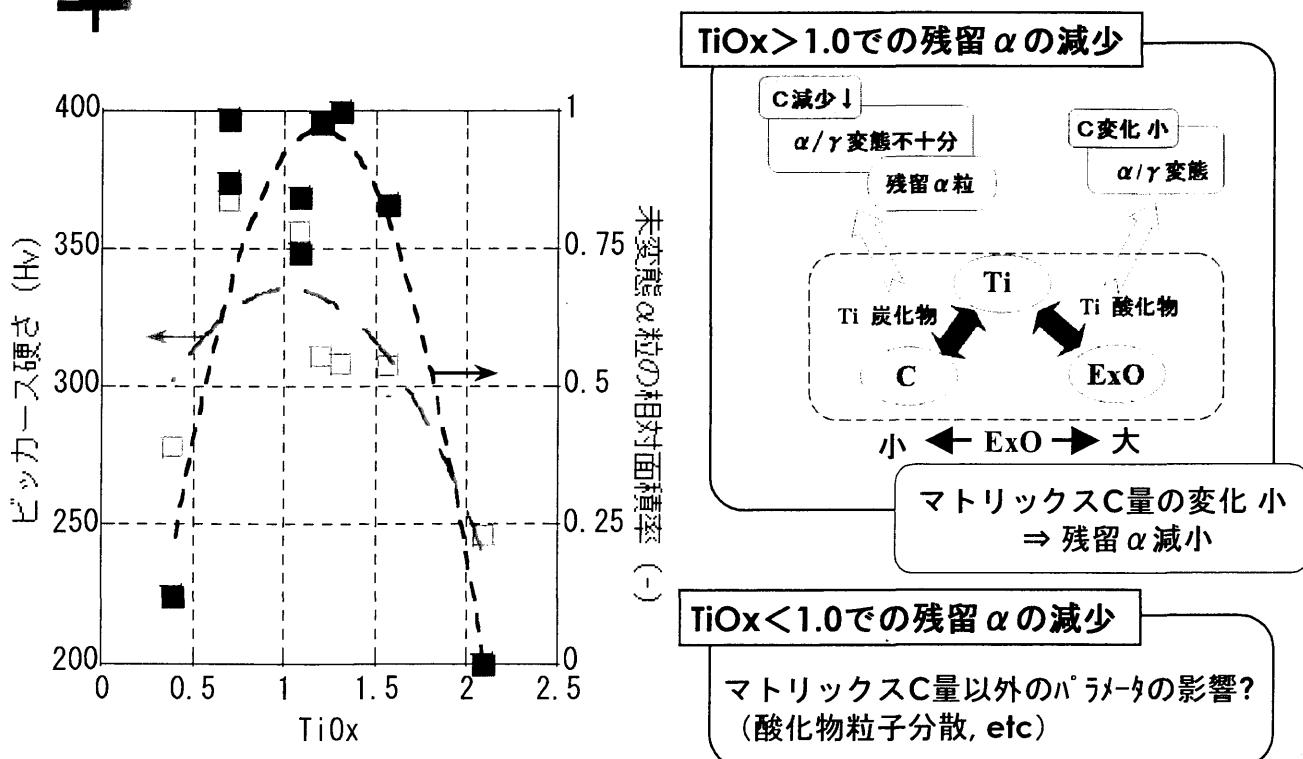
- ①炉冷 : 1050°C × 1 hr → 600°C (30°C/hr)
- ②N T : 1050°C × 1hr/AC + 800°C × 1hr/AC



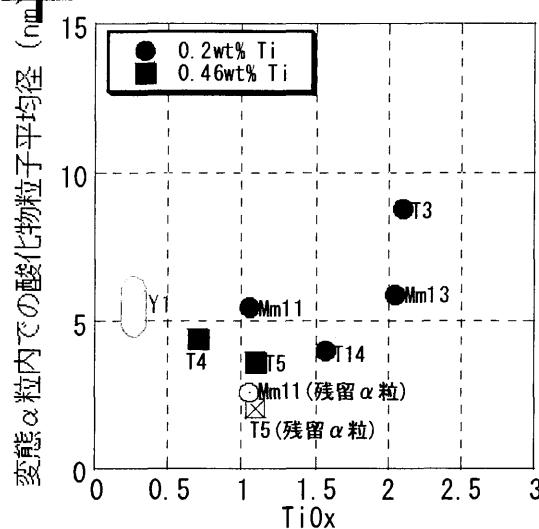
## Ex.O量, Ti添加量と酸化物分散組織の関係



## Ex.O/Tiの低減による残留 $\alpha$ 粒の増加のメカニズム



## 酸化物粒子サイズへのEx.O量, Ti添加量の影響(変態 $\alpha$ 粒)



TiO<sub>x</sub> ~1.0で高温強度がピーク

TiO<sub>x</sub>>1.0

○TiO<sub>x</sub>の低下に伴う酸化物粒子の微細高密度分散化(変態 $\alpha$ 部)

TiO<sub>x</sub><1.0

○酸化物粒子径が増加する傾向

特許4件申請

## 《9Cr-マルテンサイト系ODS鋼の組織制御技術開発のまとめ》

9Cr-マルテンサイト系ODS鋼被覆管の強度、組織のばらつきを低減し、品質および歩留まりを向上させるためには、Ex.O/Tiの最適化(~1.0近傍)は不可欠な技術である。

## ODSフェライト鋼被覆管の照射試験準備

### ■ ODSフェライト鋼被覆管の照射試験計画(案)

JFY	2001 (H13)	2002 (H14)	2003 (H15)	2004 (H16)	2005 (H17)	2006 (H18)	2007 (H19)	2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)	2011 (H23)	2012 (H24)	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)
実用化戦略調査研究	フェーズ2				フェーズ3				フェーズ4				燃料サイクルシステムの確定		
	(中間報告/実用化候補概念の選定)												基盤技術の整備完了		
「常陽」運転計画	/														
「常陽」材料照射	被覆管製造/試験片製作														
		リグ組立													
「常陽」燃料ピン照射	設工認														
	被覆管/燃料製造														
	下部端栓用レーザー溶接技術開発														
	ヒン製造/リグ組立														
「常陽」バンドル照射	設置変更/設工認														
	被覆管/燃料製造														
	ヒン製造/リグ組立														
BOR-60照射	ヒン製造/リグ組立	照射試験(1)	50Gwd/l, 25dpaのPIE												
	ヒン製造/リグ組立	照射試験(2)	100Gwd/l, 50dpaのPIE												
	ヒン製造/リグ組立	照射試験(3)	150Gwd/l, 75dpaのPIE												

## 「常陽」燃料ピン照射試験(キャップセルリグ)

### ■照射試験スケジュールおよび役割分担(案)

JFY	2002 (H14)	2003 (H15)	2004 (H16)	2005 (H17)	2006 (H18)	2007 (H19)
①設工認 《照射センター/Puセンター/核燃料Gr.》						
②製作設計 《Puセンター》						
③燃料組成選定 《照射センター/再センター/核燃料Gr.》						
④転換MOX粉製造 《再センター》						
⑤ペレット製造 《Puセンター》						
⑥被覆管製造 《核燃料Gr.》						
⑦部材準備 《調整中》						
⑧レーザー溶接(下部端栓) 《調整中》	試験	装置設計/製作	コールド試験/移設/ホット試験			
⑨燃料ピン製造 《Puセンター》						
⑩リグ組立 《照射センター》 ⇒照射試験						

- 今後の課題：①大洗/照射センター、東海事業所への作業依頼(事業所間での協力作業)  
 ②燃料装填後グローブボックス内で行う下部端栓レーザー溶接部の設計基準、検査基準等の整備、担当部署の決定 ⇒ 設工認

## BOR-60照射試験

### 《目的》

「常陽」での確性照射試験が開始するまでの補完的な位置付けで、FSフェーズ2~3においてODSフェライト鋼被覆管の実用化見通しを早期に判断することを目的にBOR-60での燃料ピン照射試験を実施する。

### 《試験条件》

燃 燃 度 : 50、100、150GWd/t  
 照 射 量 : 25、50、75dpa  
 照射温度 : 650°C(ノミナル条件)、700°C(ホットスポット条件)

### 《役割分担》

JNC : 被覆管製造、上部端栓溶接(PRW)  
 RIAR : 燃料ピン、照射リグの設計・製造、照射試験・照射後試験

### 《燃料ピン仕様》

早期に高CDF照射の実績を得ることを目的にプロトタイプ体積を変更  
 ⇒燃焼度50GWd/t(照射量25dpa)で取出す燃料ピンの一部について、プロトタイプ体積を約1/2~1/5に縮小



## BOR-60照射試験開始までのスケジュール

	2002(H14)								2003(H15)						
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
被覆管輸送(JNC)	▲ 口上書発出 (MINATOM⇒外務省)					▲ 口上書 輸出 再発出 許可			▲ RIAR 到着						
技術会議	▲ 技術会議(1)			▲ 技術会議(2)			△		▲ 技術会議(3)		↔ 製造検査				
上部端栓溶接(JNC)				マルテンサイト系	フェライト系										
燃料ピン設計・製造 照射試験(RIAR)			TIG溶接先行試験/溶接条件最適化 レーザー溶接先行試験/溶接条件最適化 ワイヤ固定試験 燃料ピン設計 照射条件予測		TIG溶接試験(本番材) ワイヤ固定試験(本番材)			MOX原料粉検査 GAN			燃料ピン製造 リグ組立	照射試験			

### ■これまでの実績

- 下部端栓溶接法の選定(TIG-End face fusion法)、ワイヤ固定方法の選定
- 燃料ピン設計(プレナム体積)、照射条件予測

### ■今後のスケジュール

- 5月から燃料ピン製造/リグ組立を開始⇒5月19日からJNCの立会検査実施  
(\*MOX原料粉の検査データ不備のため燃料ピン製造が遅延(5月12日開始予定))
- 6月25日から照射試験開始

## ま と め

ODSフェライト鋼被覆管の実用化見通しを得るため、製造技術評価・高温強度評価を実施するとともに、「常陽」およびBOR-60での燃料ピン照射試験に向けた準備を進めている。この1年間で得られた主要な成果を以下に示す。

### ■大型中空カプセル素管・長尺被覆管製造試験

大型中空カプセルを設計・製作し、熱間押出による大型中空素管を製造するとともに、冷間圧延により所定の寸法の被覆管を製造した。

⇒量産用製造プロセス確立の見通しが得られ、製造コスト低減も期待

### ■9Cr-マルテンサイト系ODS鋼の組織制御技術開発

高温強度の安定に不可欠な組織制御技術(Ex.O/Tiの最適化)を開発した。

⇒被覆管の強度、組織のばらつき低減による品質および歩留まりの向上

### ■「常陽」燃料ピン照射試験

照射試験計画を策定し、関係部署との調整を開始した。

⇒レーザー溶接部の設計基準、検査基準を早急に整備する必要有

### ■BOR-60照射試験

下部端栓溶接法を選定するとともに、燃料ピン設計を完了した。

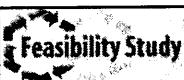
⇒2003年5月12日から燃料ピン製造開始予定⇒6月25日から照射試験開始



# LLFP核変換炉心の検討

R&D報告会  
2003年5月8日(木)

炉心燃料システムGr.  
高木直行 水野朋保

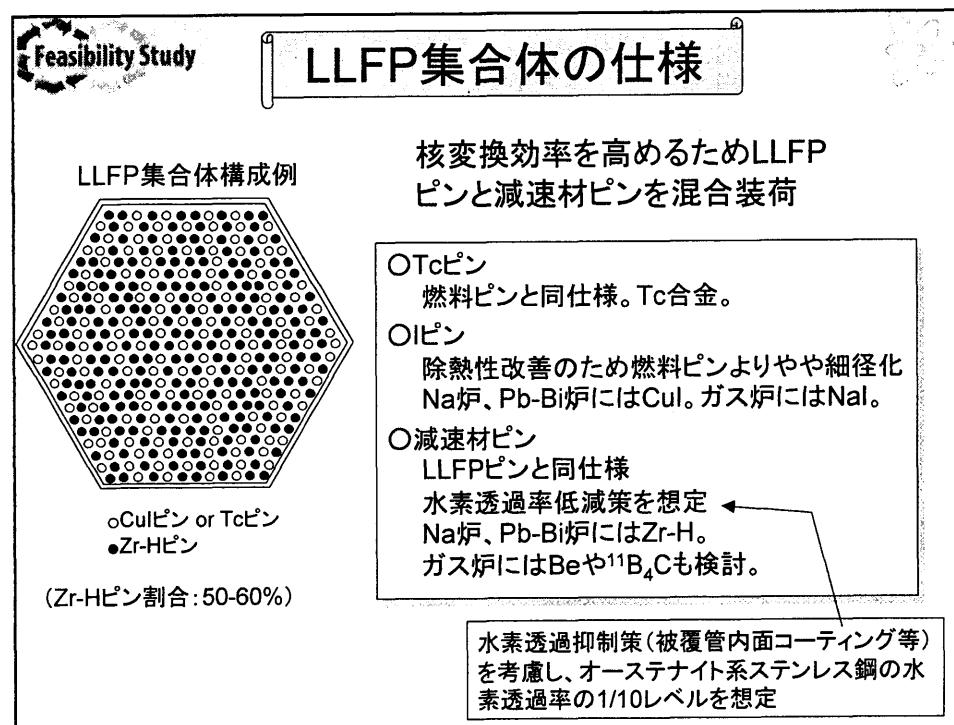
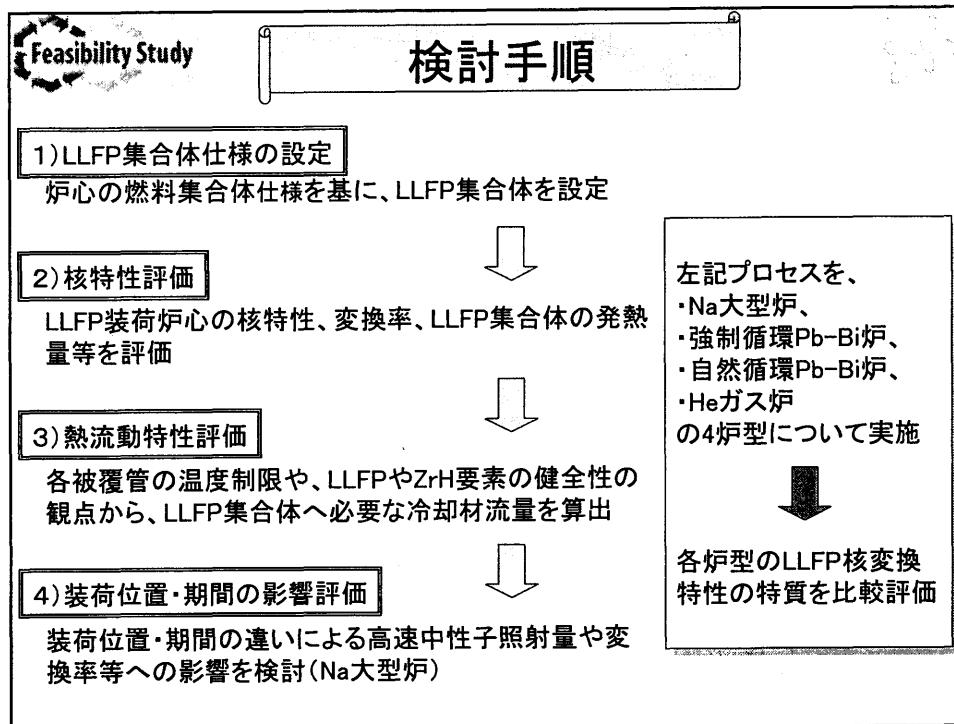


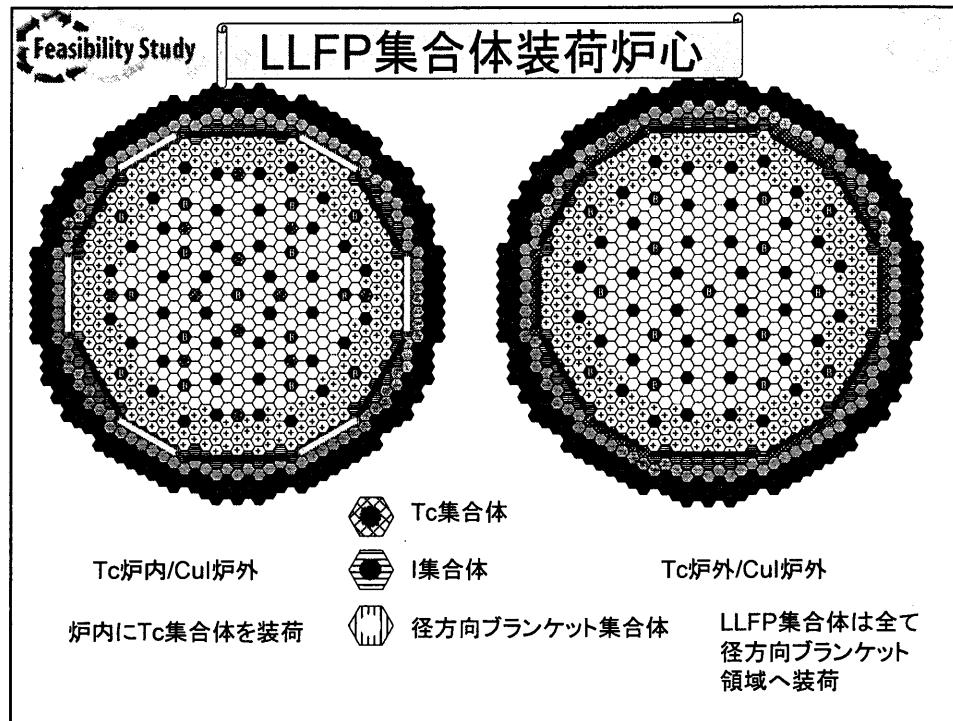
## 目的

- 各炉型におけるLLFP核変換特性を核・熱・材料の観点から検討する。
  - Na大型炉
  - 強制循環Pb-Bi炉
  - 自然循環Pb-Bi炉
  - Heガス炉
- 装荷位置\*や滞在期間の違いによる特質を検討する。

対象LLFP:  
I, Tcの二元素

\* 炉内または径方向ブランケット/遮蔽体領域





**Feasibility Study MOX燃料Na大型炉**

	Tc炉内/CuI炉外	Tc炉外/CuI炉外	I
Tc	13	—	—
I	—	56	56
炉内装荷LLFP集合体数	13	—	—
炉外装荷LLFP集合体数	—	56	56
LLFP装荷量 [kg/GWt]	168	81	675
滞在期間 [y] (サイクル数)	6 (4)	9 (6)	24 (16)
取り出し変換率 [%]	29.0	28.9	28.8
必要流量 [kg/sec/集合体]	8.0	1.5	1.8
炉心流量比率 [%]	0.57	0.46	0.50
高速中性子照射量 [ $\times 10^{23} n/cm^2$ ]	2.80	1.75	3.00
増殖比	1.02	—	1.04
LLFP装荷による増殖比低減	—	-0.15	-0.13
サポートファクタ(変換/生成)	1.0	1.0	1.0

**装荷位置の比較**

- 炉内装荷の場合、装荷量は1/4で済むが、同時に4倍頻度の取り替え必要
- 長期間のLLFP再処理量(サイクル側への負担)に違いはない。
- 変換率30%達成時の高速中性子照射量は許容されるレベルにある。
- 増殖性能等、核特性への影響は炉外装荷で小さい

**比較条件**  
取り出し核変換率=約30%  
サポートファクタ(変換量/生成量の比)=1

**Feasibility Study**

## MOX燃料Na大型炉

	Tc炉内/CuI炉外		Tc炉外/CuI炉外	
	Tc	I	Tc	I
炉内装荷LLFP集合体数	13	-	-	-
炉外装荷LLFP集合体数	-	56	51	56
LLFP装荷量 [kg/GWt]	168	81	675	81
滞在期間 [y] (サイクル数)	6 (4)	9 (6)	24 (16)	9 (6)
取り出し変換率 [%]	29.0	28.9	28.8	28.9
必要流量 [kg/sec/集合体]	8.0	1.5	1.8	1.5
炉心流量比率 [%]	0.57	0.46	0.50	0.46
高速中性子照射量 [ $\times 10^{23}n/cm^2$ ]	2.80	1.75	3.00	1.75
増殖比	1.02		1.04	
LLFP装荷による増殖比低減	-0.15		-0.13	
サポートファクタ(変換/生成)	1.0	1.0	1.0	1.0

**流量配分**

- 水素透過抑制策を仮定していることから、LLFP集合体へ配分すべき冷却材流量は全流量の約1%と小さい。

大型Na炉は、熱的制約を満たしつつ増殖比>1を維持しながら、自己生成分Tc及びIの同時変換ができる可能性がある。

**Feasibility Study**

## 窒化物燃料強制循環Pb-Bi炉 (径方向プランケット付き炉心)

	Tc	I
炉外装荷LLFP集合体数	42	49
LLFP装荷量 [kg/GWt]	814	110
滞在期間 [y] (サイクル数)	27 (18)	12 (8)
取り出し変換率 [%]	29.2	30.8
必要流量 [kg/sec/集合体]	12.0	7.0
炉心流量比率 [%]	0.65	0.45
高速中性子照射 [ $\times 10^{23}n/cm^2$ ]	2.80	1.75
増殖比	1.10	
LLFP装荷による増殖比低減	-0.14	
サポートファクタ(変換/生成)	1.0	1.0

**滞在期間**

- 変換率約30%を達するまでの年数はNa炉とほぼ同等。

**流量配分**

- LLFP集合体へ配分すべき冷却材流量は全流量の約1%と小さい。

強制循環Pb-Bi炉は、熱的制約を満たしつつ増殖比>1を維持しながら、自己生成分Tc及びIの同時変換ができる可能性がある。

**Feasibility Study**

## 窒化物燃料自然循環Pb-Bi炉 (径方向ブランケットなし炉心)

	Tc	I
炉外装荷LLFP集合体数	23	28
LLFP装荷量 [kg/GWt]	647	86
滞在期間 [y] (サイクル数)	22.5 (15)	9 (6)
取り出し変換率 [%]	30.5	29.7
必要流量 [kg/sec/集合体]	6.5	3.8
炉心流量比率 [%]	0.27	0.19
高速中性子照射量 [ $\times 10^{23}n/cm^2$ ]	2.59	1.22
増殖比	1.15	
LLFP装荷による増殖比低減	-0.08	
サポートファクタ(変換/生成)	1.0	1.0

**熱流動特性**

- LLFP集合体へ配分すべき冷却材流量は全流量の約0.5%と小さい
- 燃料に比べ出力が20%以下のLLFP集合体へも、自然循環力により水素透過等の制限を満足する必要流量が確保できる見通し

**増殖性能**

- 元々径方向ブランケットを持たない炉心なので、LLFPを装荷してもブランケットが減少せず、増殖性能への影響が小さい。

自然循環Pb-Bi炉は、熱的制約を満たしつつ十分な増殖比を維持しながら、自己生成分Tc及びIの同時変換ができる可能性がある。

**Feasibility Study**

## 窒化物燃料Heガス炉

**LLFP集合体**

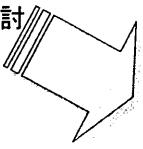
- 横方向流型Heガス炉の仕様をベースに、ピンバンドル型のLLFP集合体を設定

**ヨウ素化合物**

- ヨウ素化合物としてCuIでは融点が低く、ガス炉に適さない
- よって、融点、核変換効率や結晶構造安定性の観点から化合物形態にNaIを暫定して検討

**減速材**

- 減速材についても、冷却材入り口温度が高く、Zr-Hでは水素透過の制限が満足できないことが考えられた
- よって、Beや $^{11}B_4C$ の代替材も検討



横方向流型Heガス炉の  
LLFP核変換特性を評価

 Feasibility Study

## Heガス炉

### 熱流動特性・変換特性

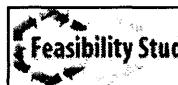
- 減速材にZr-Hを用いる場合、
  - 炉外装荷時でもLLFPの発熱が高くなり、全流量の10数%もの流量が必要
  - 同時にTc変換率も50年で23%と低い
- Be減速材を用いる場合、
  - LLFP集合体の必要流量は0.2%程度と小さい
  - しかし、60年装荷でTcの取り出し変換率は27%
  - $^{11}\text{B}_4\text{C}$ を用いる場合も同様な傾向

Heガス炉は、冷却材入り口温度が高いため、熱的制約を満たしながら増殖性能やLLFP変換性能を有するか否かを確認するには、更なる検討が必要。

 Feasibility Study

## まとめ

- 1) 炉内/炉外装荷の特質比較
  - 装荷量に差があるが、長期的にみたLLFP再処理量に違いなし。
  - 取り出し核変換率、高速中性子照射量もほぼ同等。
- 2) Na大型炉
  - 減速材ピンの水素透過が熱的制約に。
  - 水素透過抑制策を想定すれば、増殖比>1を維持しながら自己生成分Tc, Iの同時変換の可能性あり。
- 3) Pb-Bi炉
  - Pb-Bi炉はNa炉と似た変換特性を示し、増殖性能を維持しながら、自己生成分Tc, Iの同時変換の可能性あり。
  - 自然循環冷却でもLLFP集合体の冷却が可能な見通し。
- 4) Heガス炉
  - 冷却材入り口温度が高く、更なる検討が必要。



## 当面の課題 (炉心設計関連)

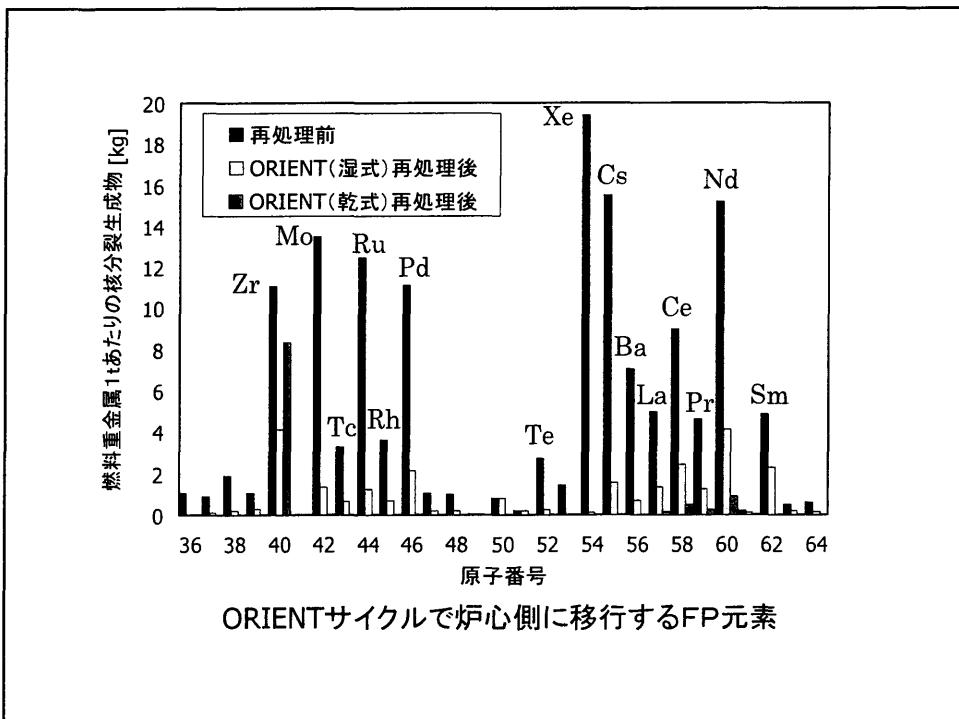
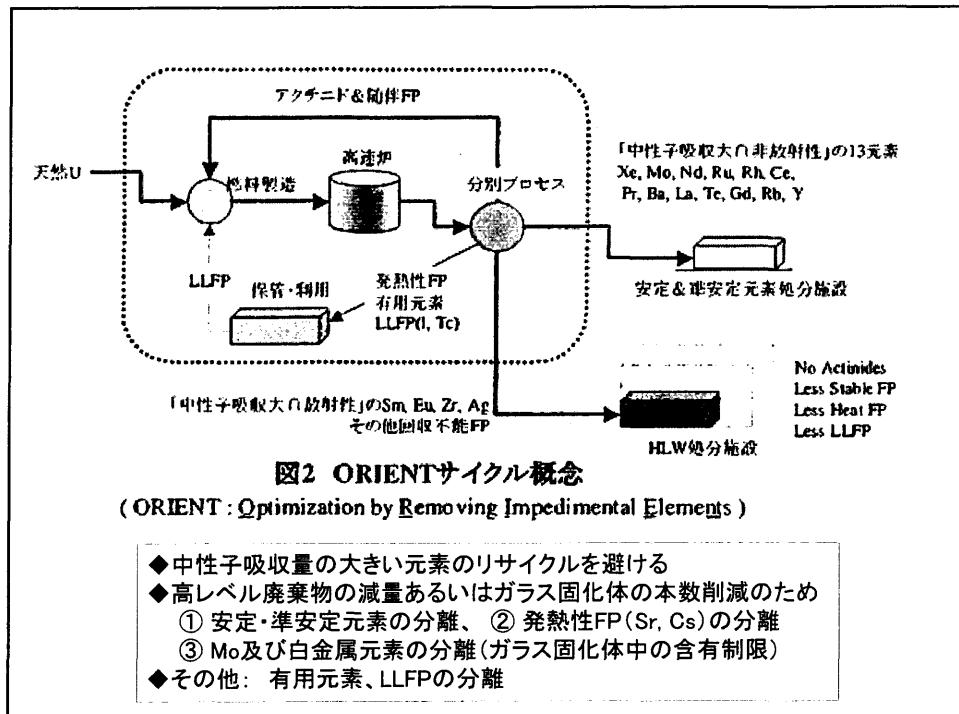
- Heガス炉のLLFP核変換対応性の継続検討
- Na冷却金属燃料炉心のLLFP核変換対応性評価
- LLFP集合体仕様の見直し  
(リサイクルを考慮した集合体概念の検討、  
水素透過評価モデルの見直し、等)
- LLFP変換炉心の動特性パラメータ評価、安全特性への影響
- LLFP変換に関わる燃料サイクルシナリオ(LLFP変換炉心導入)
  
- 要素技術開発課題
  - 水素透過抑制策(被覆管内面ライナー等)と透過率
  - LLFP化合物の物性
  - 照射試験

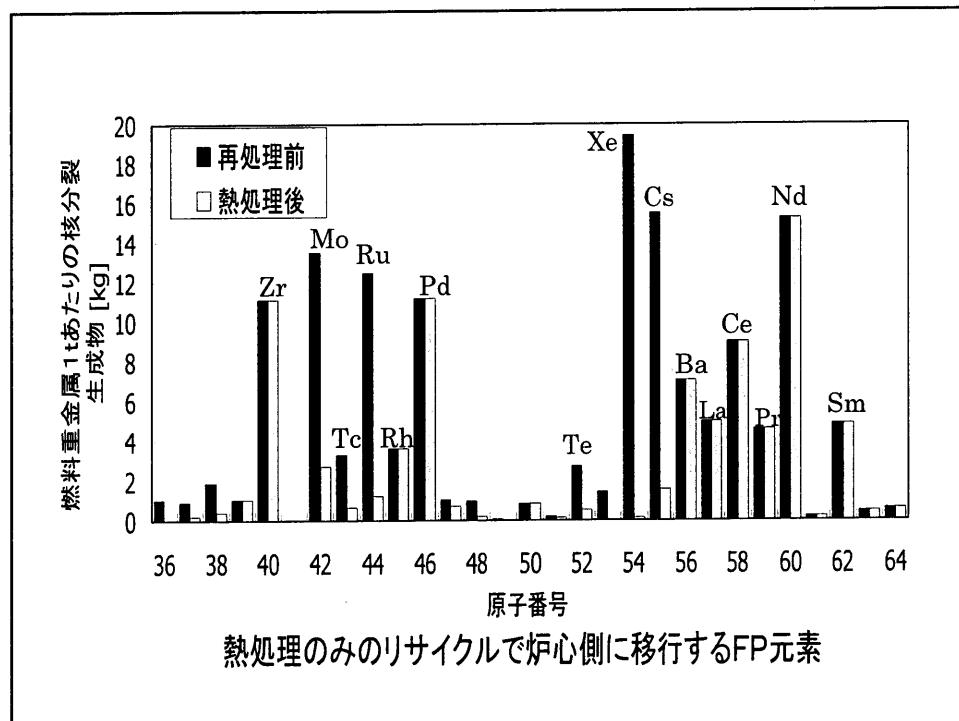
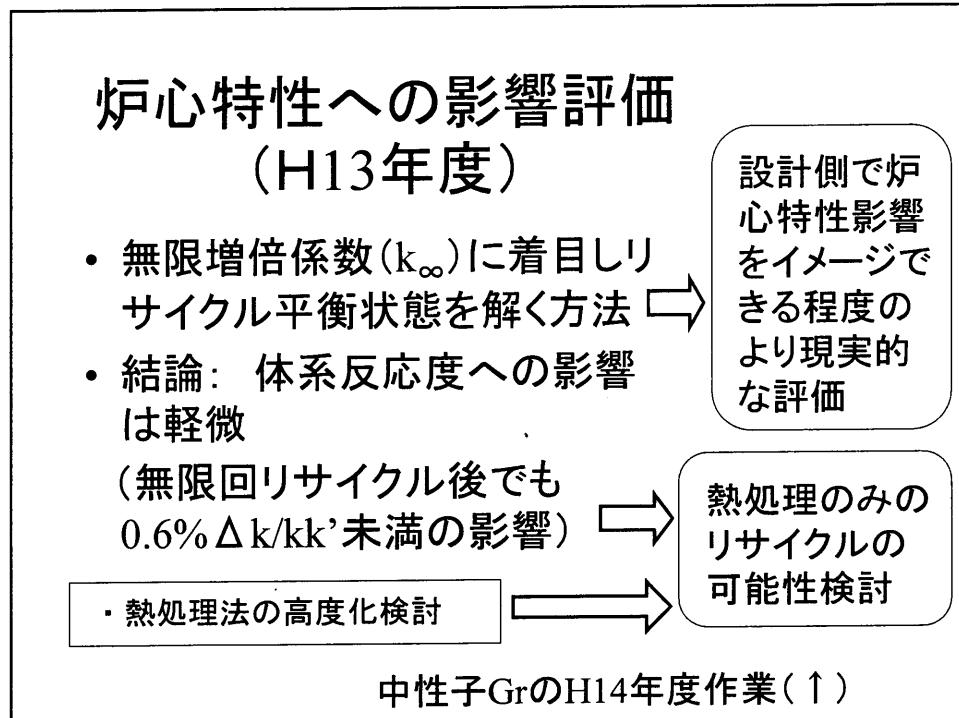
# ORIENTサイクルの炉心への 影響評価

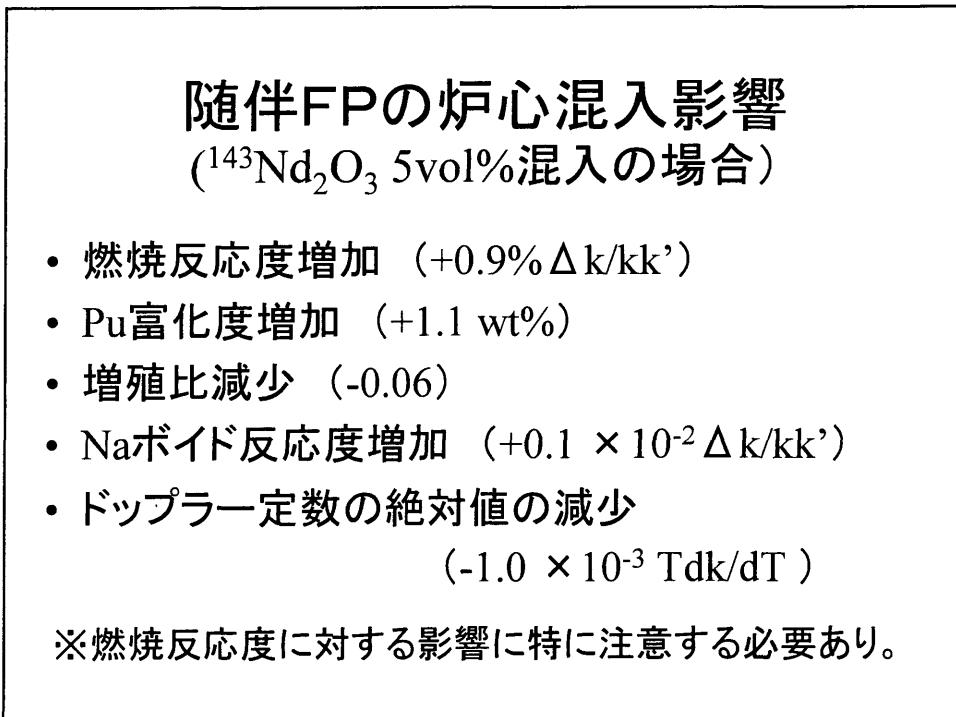
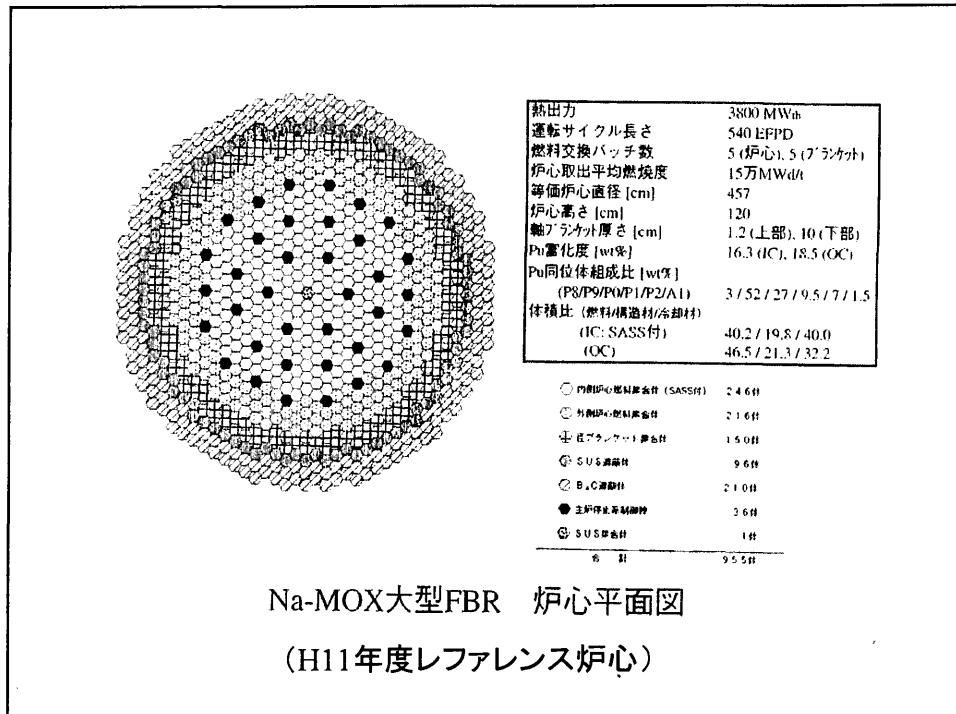
平成15年5月9日  
システム部 中性子工学Gr  
大木 繁夫

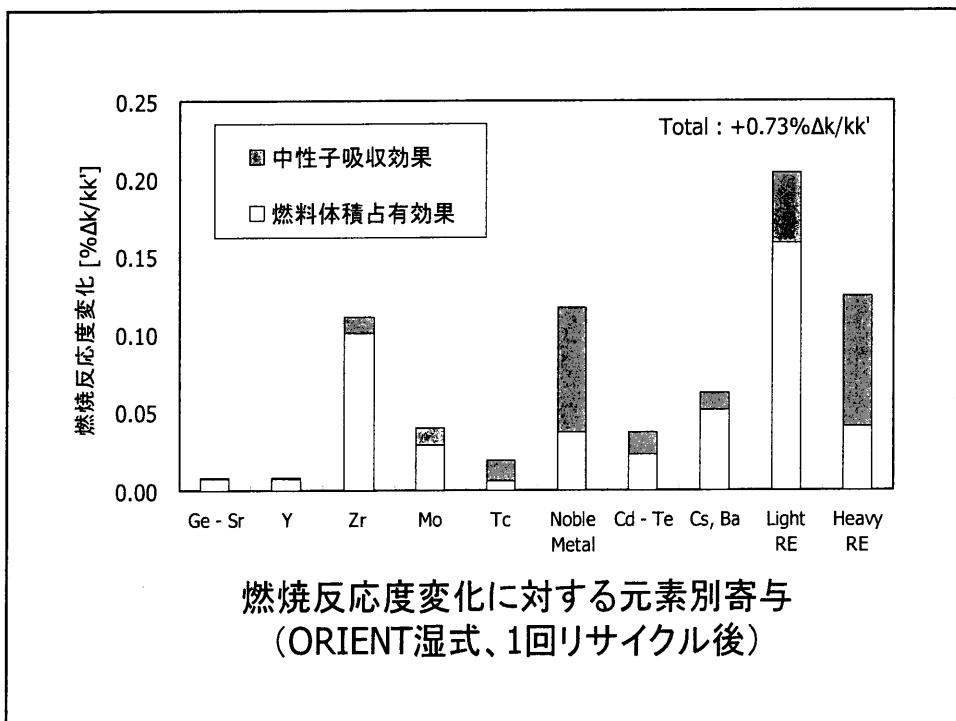
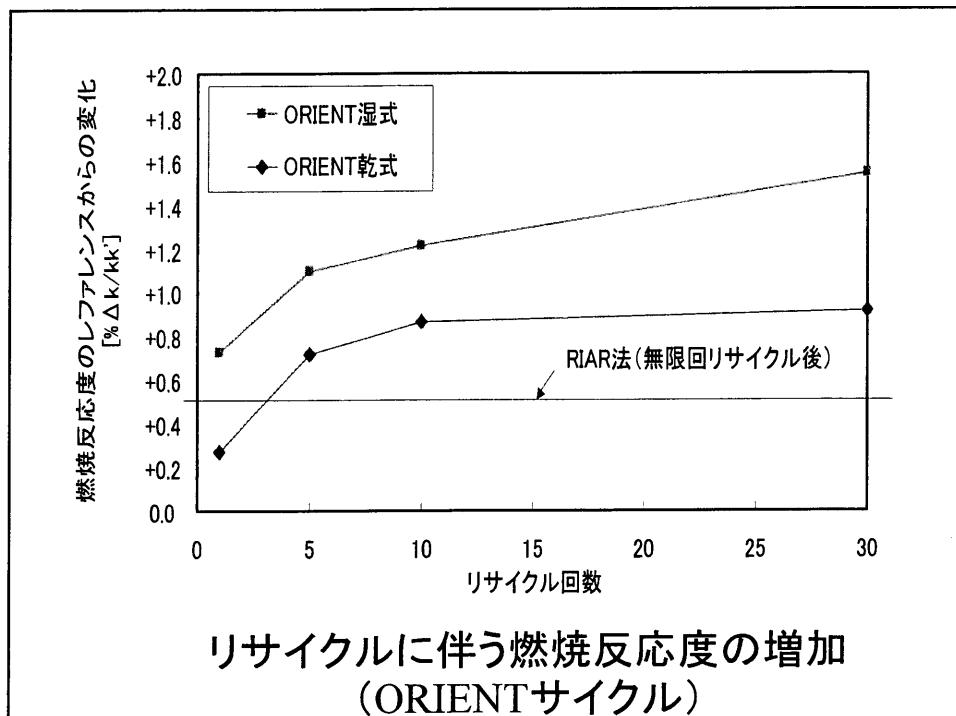
## 背景

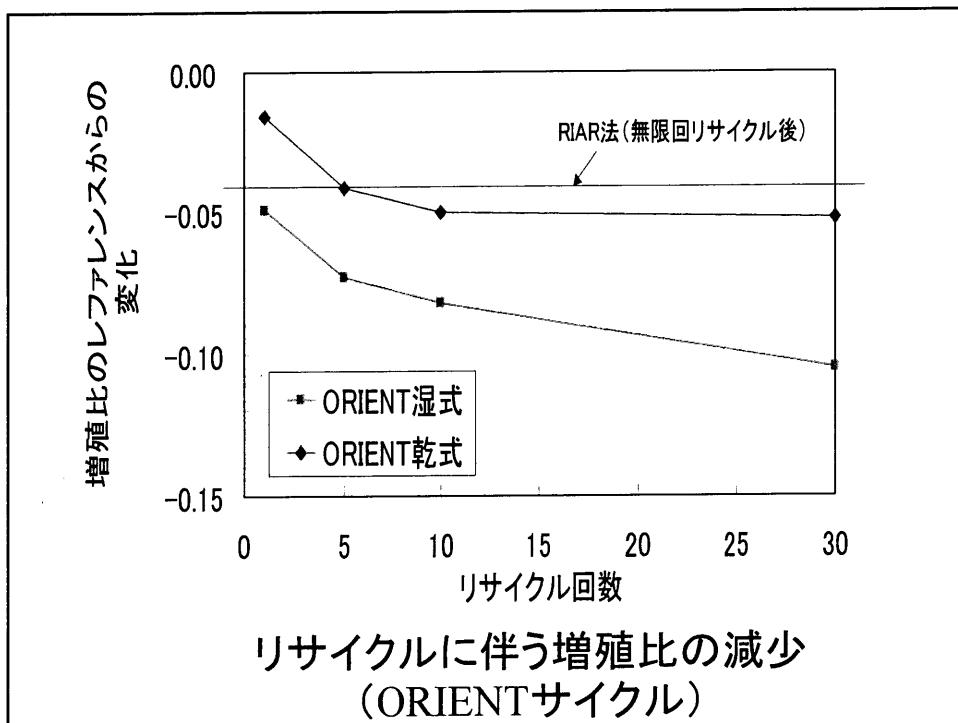
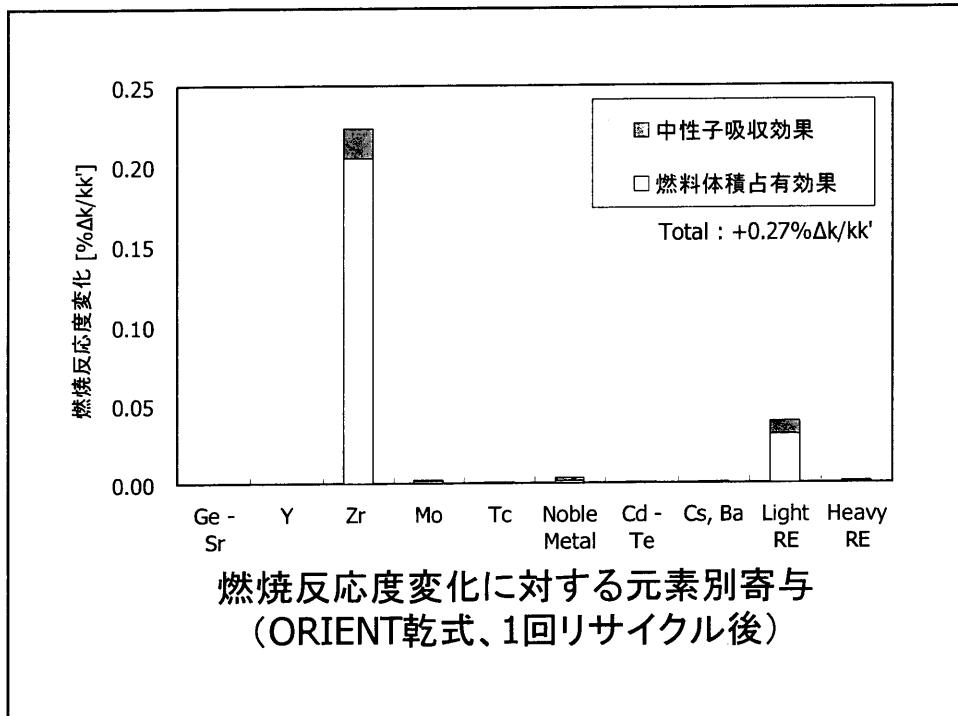
- ORIENTサイクル(Optimization by Removing Impedimental Elements)
- 発想の転換:「リサイクルの障害となる不要な物質を取り除く」
- H13年度は高レベル廃棄物低減を目標とした分離プロセス例(湿式ベース、乾式ベース)を構築











## ORIENTサイクルの炉心影響

- F/Sで検討している低除染燃料に比べ、燃焼反応度に対し2~4倍程度の影響がある。  
湿式ベース概念:  $<2\% \Delta k/kk'$   
乾式ベース概念:  $<1\% \Delta k/kk'$   
(無限回リサイクルまでを考慮)

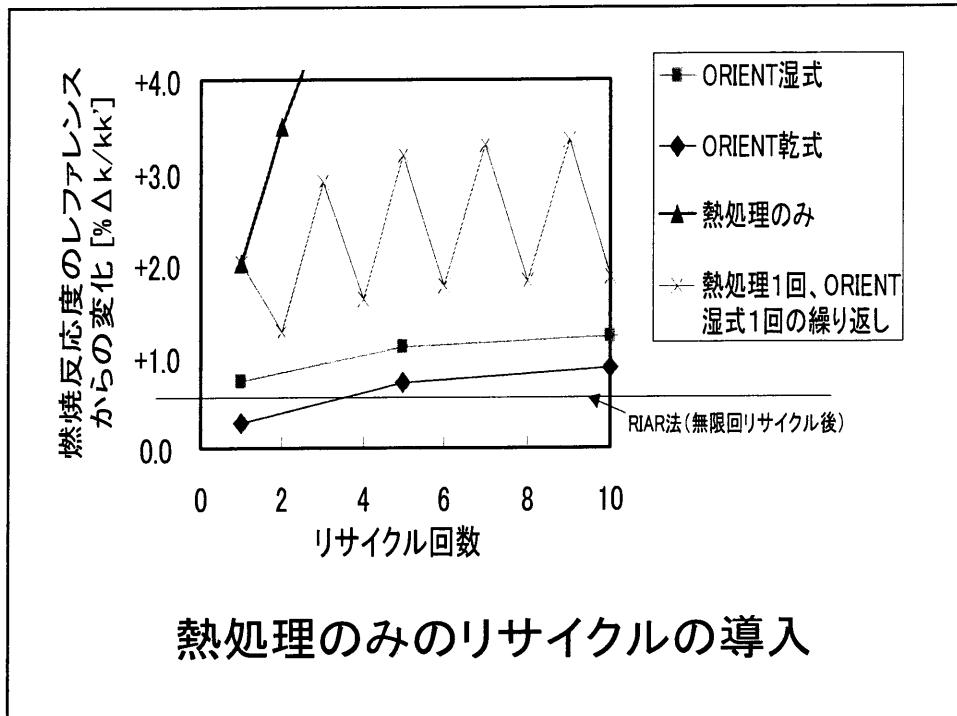


設計対応可能な範囲と判断できる。

- 吸収反応断面積の大きい元素が選択的に除かれているため、随伴FPの燃料体積占有効果が重要。 $k_{\infty}$ を用いたH13年度の評価では、この点が考慮できなかった。

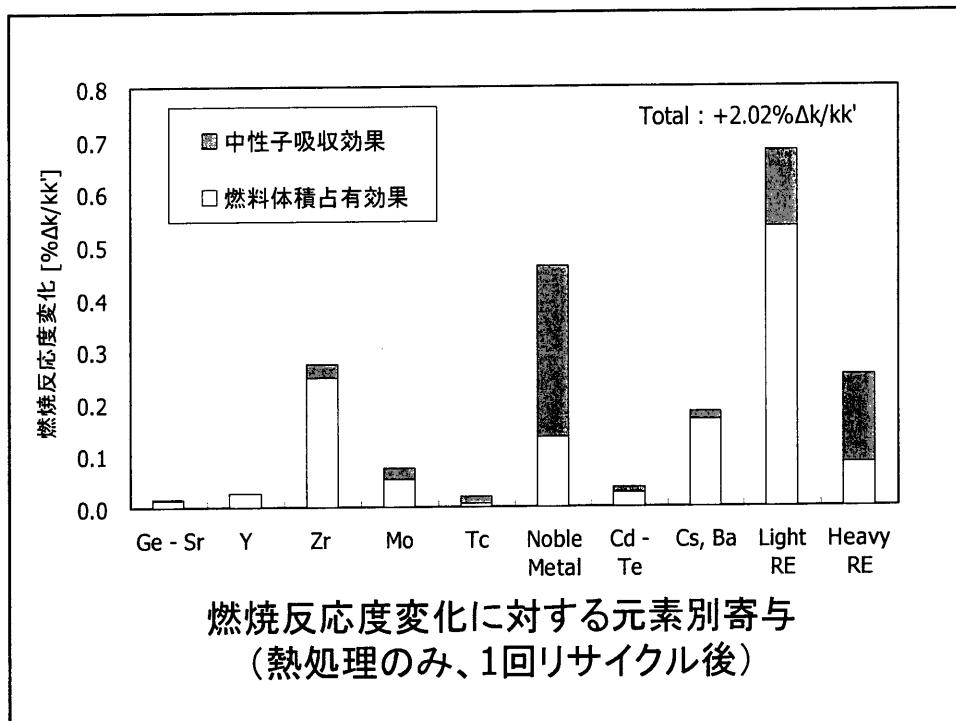
ただし、

- 今回の評価では、マルチリサイクルにおけるFP核変換の効果が未考慮。FPの蓄積を過大評価している可能性がある。  
→次年度に追加検討する。



## 熱処理のみのリサイクルの導入

- 熱処理のみで連続して2回以上リサイクルするのは困難である。
- ORIENTサイクルに熱処理のみのリサイクルを数回に1回導入するだけでも、燃焼反応度がさらに2% $\Delta k/k$ 悪化する。炉心特性に与える影響が大きく、現実的なオプションとは言い難い。



## まとめ

- 新再処理ORIENTサイクル概念の炉心特性影響評価を行った。湿式、乾式ベース概念とも、F/Sの低除染燃料の取り合い条件を上回る影響が出るが、炉心成立性を核的には見込める範囲であることがわかった。
- 熱処理のみのリサイクルの導入は炉心特性への影響が大きすぎ、現実的なオプションではない。

R&D報告会第1回  
2003年5月9日

## FBRサイクルの総合的安全評価 -乾式施設のリスク分析-

システム技術開発部  
FBRサイクル安全設計グループ  
栗坂 健一

### フェーズ2におけるリスク分析の位置づけ 燃料サイクルシステムに対する安全性の設計要求(抜粋)

#### 確率論的安全要求

決定論的安全要求を補完する目的で、当面の要求を次のように定める。  
「施設内での大規模放出事象」の発生頻度を適切に抑制する（目標値としてプラント当たり $10^{-6}/\text{年以下}$ （暫定）とともに、本事象を想定しても、閉じ込め機能に対して非信頼度を十分低く（目標値として $1/100$ 以下（暫定））維持することを目指す。

#### 作業要求

上述の安全要求への充足性を確認するために、以下を実施すること。  
・プロセス各部における放射性物質のインベントリ、放射性物質の放出経路、関係する設備や運転員操作等の信頼性、大量の放射性物質の放出を引き起こしうるエネルギー発生要因（例えば、臨界、火災、爆発）等を考慮した安全評価及びリスク評価。

## 燃料サイクル施設のリスク分析

### 分析の目的

- 燃料サイクル施設が有する放射能放出リスクの中で、特に被害の大きなリスクの概略プロファイルを把握すること。
- これを基に、F/Sフェーズ2の開発目標を達成するための安全設計を検討し、その結果を概念設計への要求として整理すること。

### 実施計画

平成13年度：湿式施設（MOX燃料、処理能力：200tHM/y）

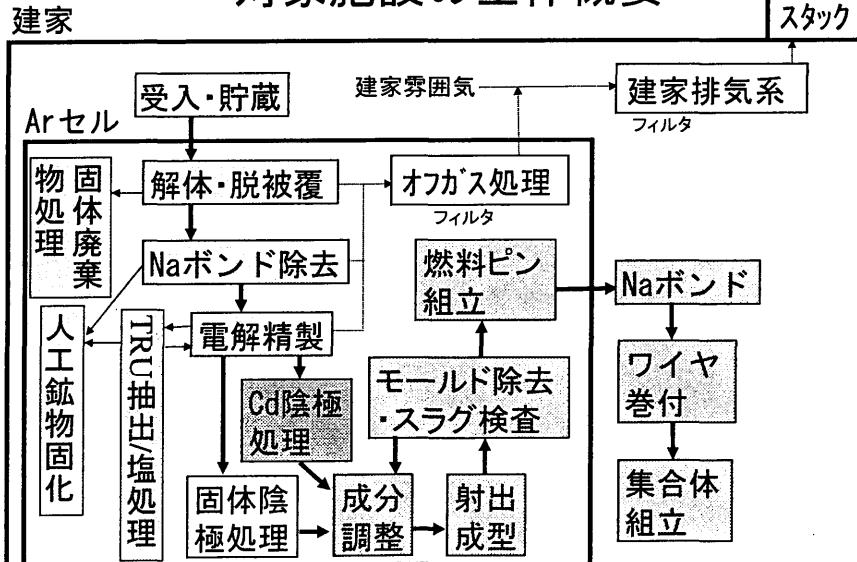
平成14年度：乾式施設（金属燃料、処理能力：38tHM/y）

放出放射能による健康影響リスクの検討

平成15年度：課題整理、中間とりまとめ

平成16-17年度：課題検討、最終とりまとめ

## 対象施設の全体概要



## リスク分析の手順

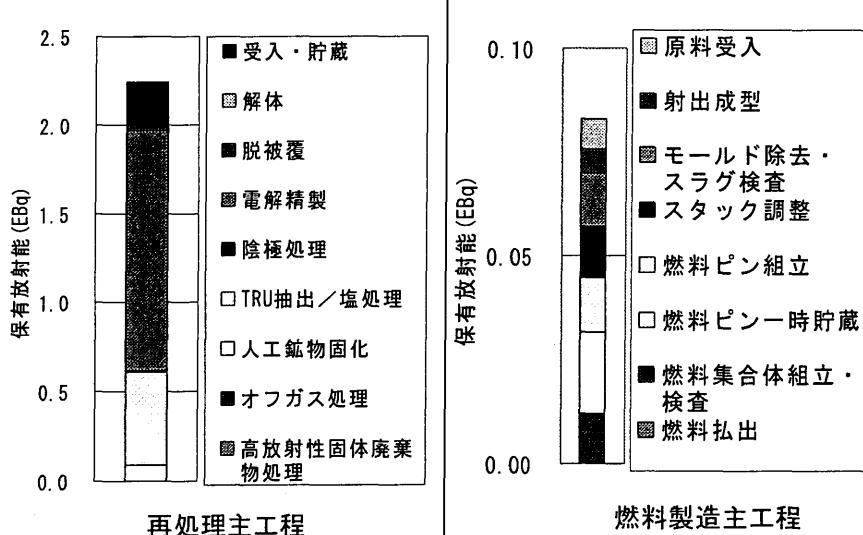
主要工程を対象として以下を実施(本日発表)

- (1) 内包する放射性物質の形態を整理。核種別保有放射能を算定。
- (2) 異常な放射性物質の施設外放出をもたらすハザードを同定。
- (3) フォールトツリー手法を活用しつつ、原因事象の発生率を算定。
- (4) 閉じ込め機能に対する原因事象の影響を検討することにより、閉じ込め機能の成否を分岐としたイベントツリーを展開した後、分岐確率を評価するとともに、放射性物質放出シーケンス毎に放出放射能を算定。

今後実施予定

- (5) 施設の立地条件(気象、人口分布)を設定。代表的なソースタームについて、一般公衆の健康影響(死亡)リスクを算定。
- (6) リスク目標値との比較により安全性を評価・判断。

## 再処理／燃料製造工程内放射能インベントリの積算



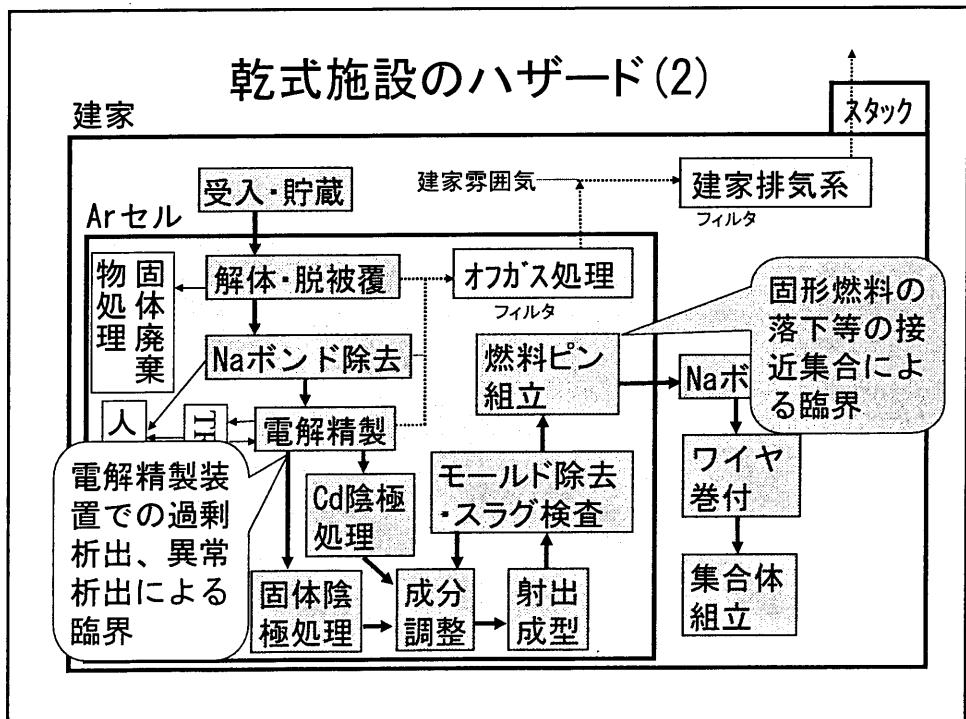
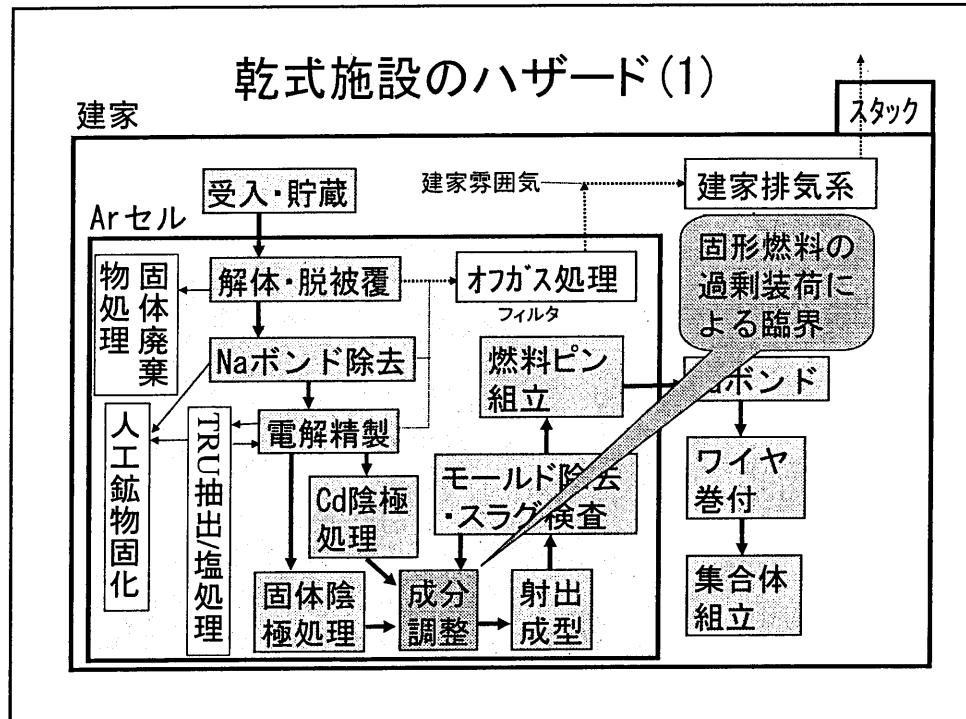
**異常事象の検討：工程内における物質の出入り、  
エネルギーの出入り及び位置の変化に関する変動項目**

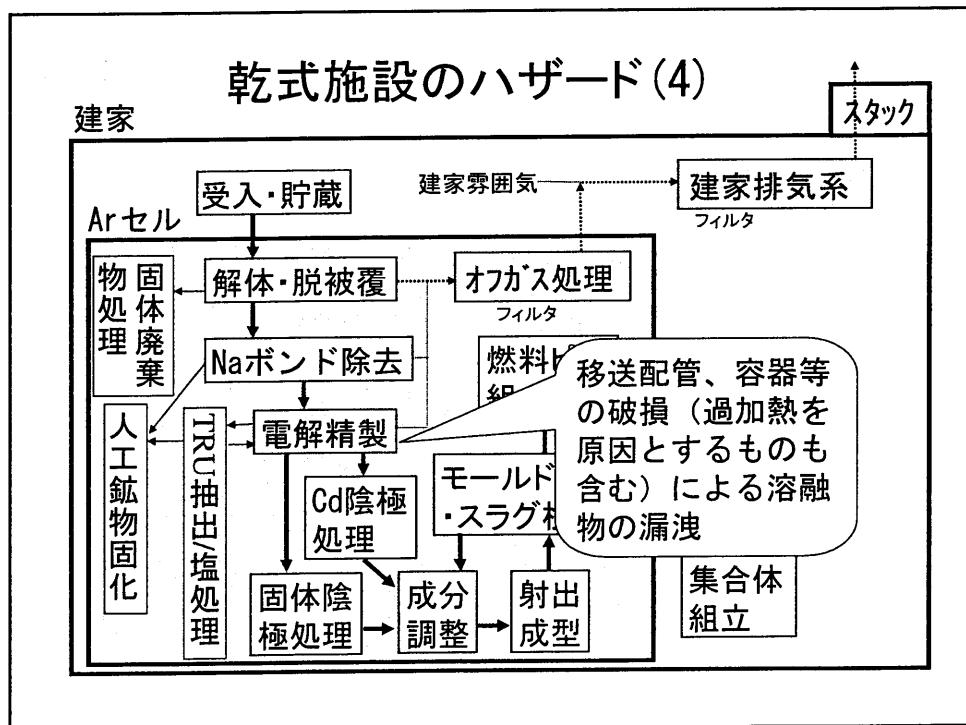
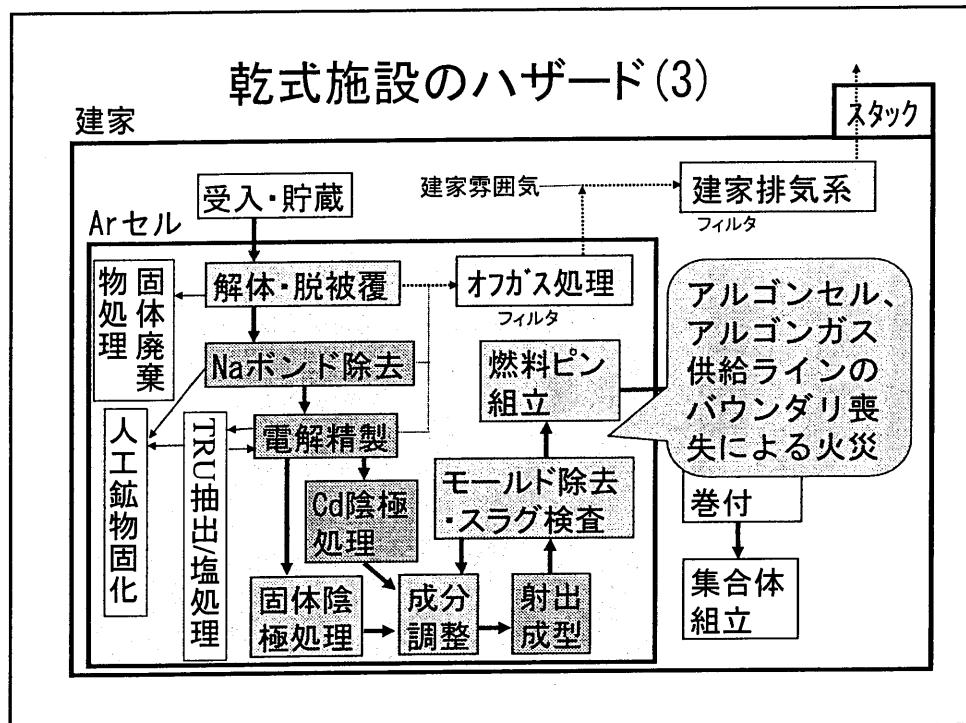
変動項目の大分類	変動項目の小分類
液体及び固体に係る異常な変化	流量の変化
	核燃料物質濃度の変動
	核分裂生成物濃度の変動
	試薬濃度の変動
	保有量の変動
	移送経路の変化、固体位置の変化
気体に係る異常な変化	電解電流の変動
	流量（又は圧力）の変動
	組成の変動
温度の異常な変化	流路の変化
	加熱能力の変動
	冷却能力の変動

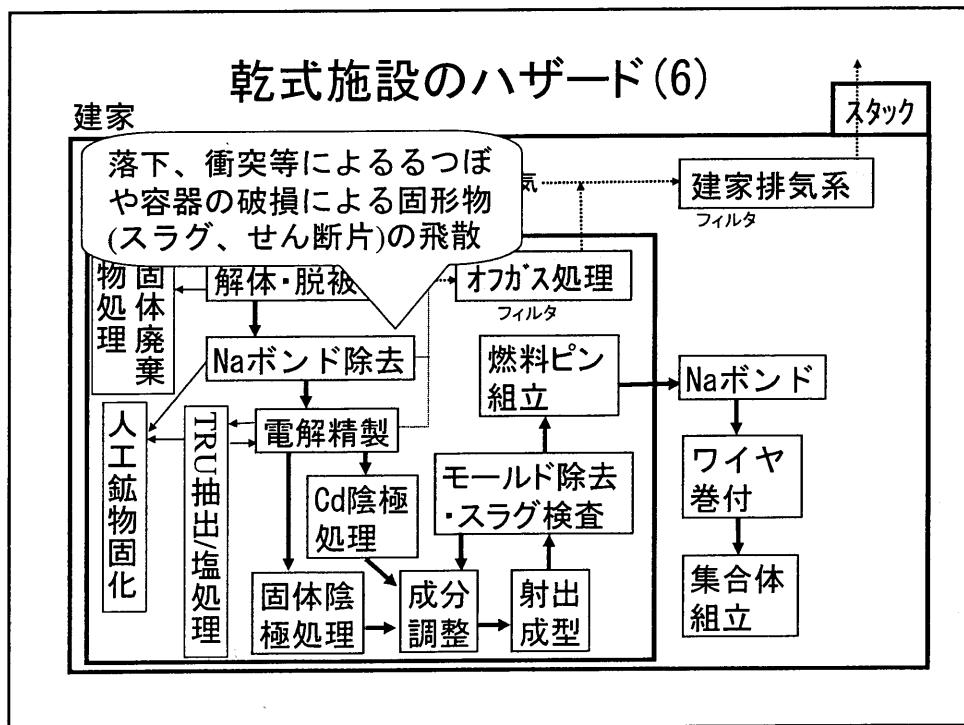
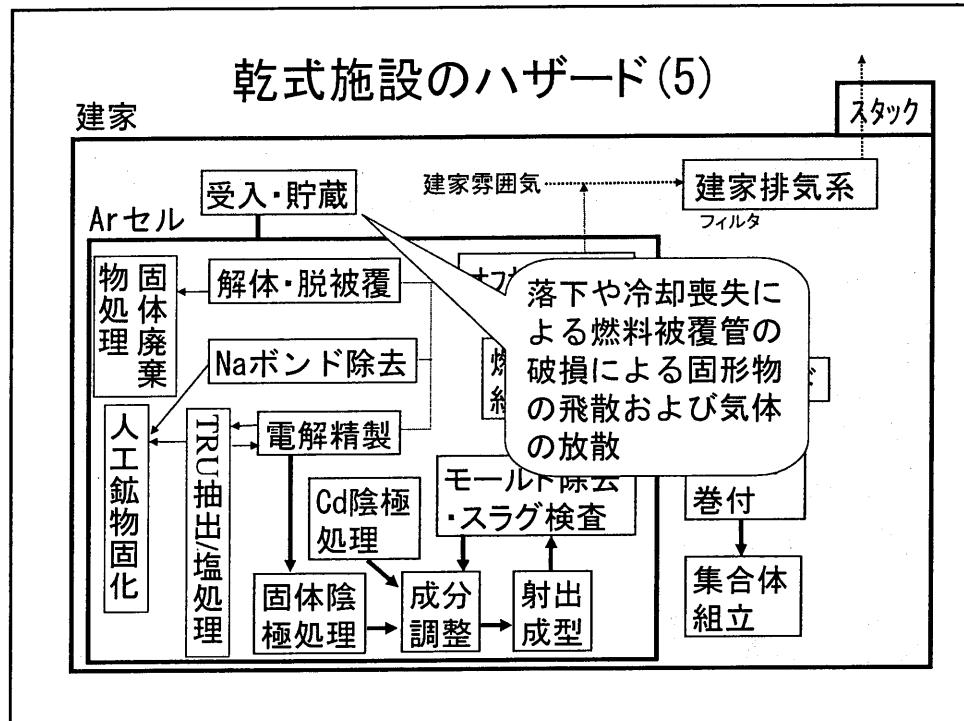
**異常事象の検討：電解精製装置の例**

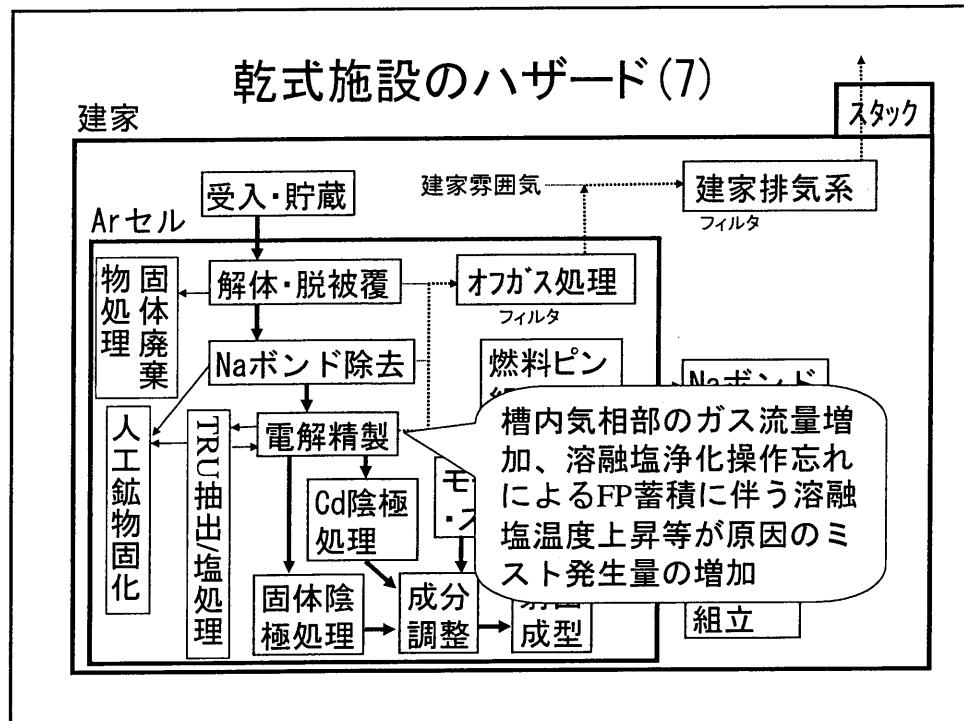
変動項目の 異常な変化	変動項目	※ 1		異常事象
		原因	結果	
液体及び 固体に係る 異常な 変化	流量	原因	結果	安全に係る該当事項がない
	試薬濃度			燃料過剰充填/蓄積
	核燃料物質濃度			燃料過剰充填/蓄積
	核分裂			F P過剰蓄積
	生成物濃度			燃料過剰充填/蓄積
	保有量（総量およ び分布）			H Mの過剰析出 H Mの異常析出 容器破損 塩の過剰供給
	移送経路			塩移送ラインの漏洩 塩移送ラインの閉塞
	固体位置			電極取扱い中落下、衝突 電極がCdプールに接触(PuがCdプールに析出)
気体に係る 異常な 変化	電解電流	原因	結果	H Mの過剰析出 H Mの異常析出
	流量又は圧力			Arガスの過剰供給
	組成			空気の流入(Arセルバウンダリ破損)
	流路			オフガスラインの閉塞 オフガスライン排風機停止
温度の 異常な 変化	加熱能力	原因	結果	過加熱、加熱機能喪失
	冷却能力			セル冷却機能喪失

※ 1 原因とは小分類の変化や変動を生じさせる原因事象を指し、結果とは小分類の変化や変動の結果として生じる事象を指す。









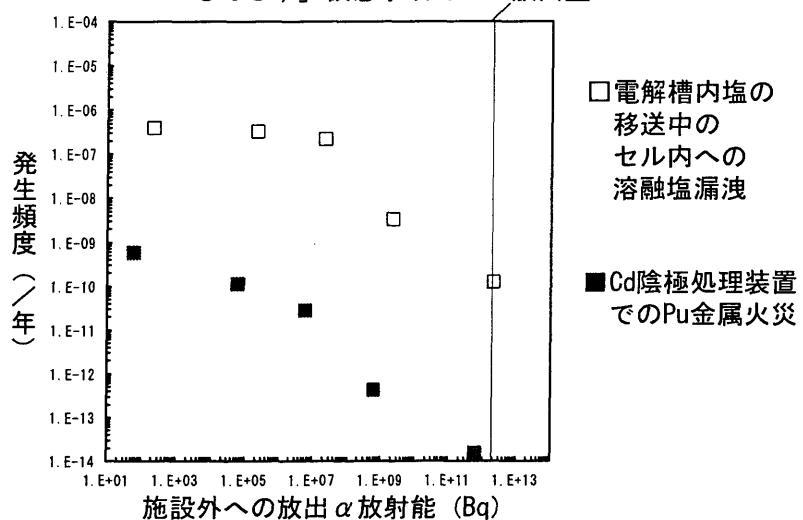
### リスク試算対象事象

大量の放射性ガスまたはエアロゾルの発生源

- (1) 電解精製装置内塩の移送中のセルへの漏洩  
→ 放射能が大きい設備を選定
- (2) Cd陰極処理装置でのプルトニウム火災  
→ 金属状態で、高温になる設備を選定
- (3) 射出成型前の成分調整での臨界事故  
→ 質量管理で防止する事象の中から選定

## 放射能放出リスクの試算値(1)

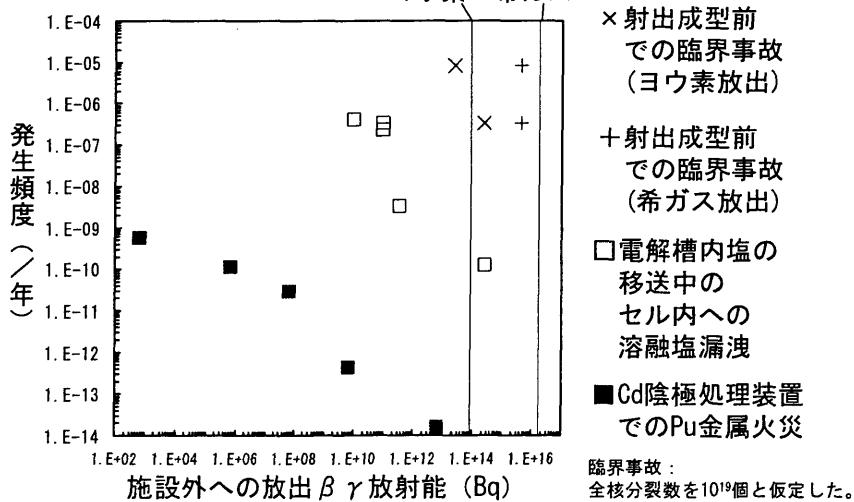
「もんじゅ」仮想事故でのPu放出量



## 放射能放出リスクの試算値(2)

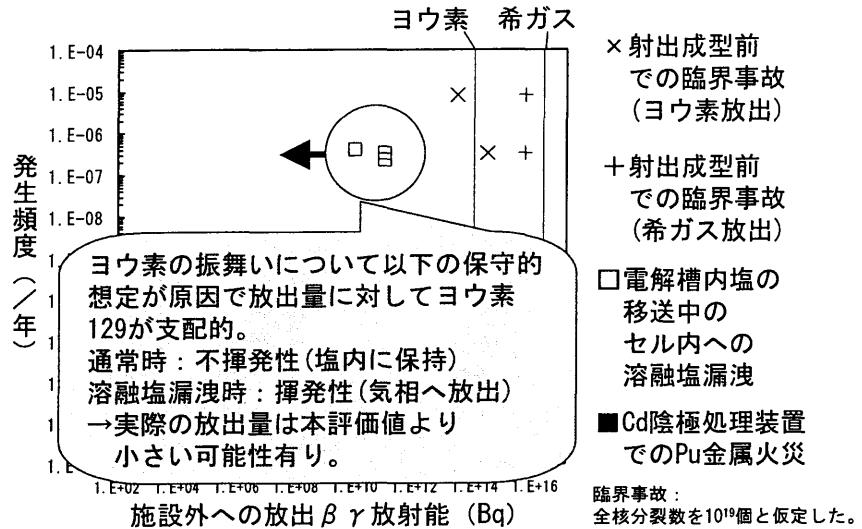
「もんじゅ」仮想事故での放出量

ヨウ素 希ガス



## 放射能放出リスクの検討(1)

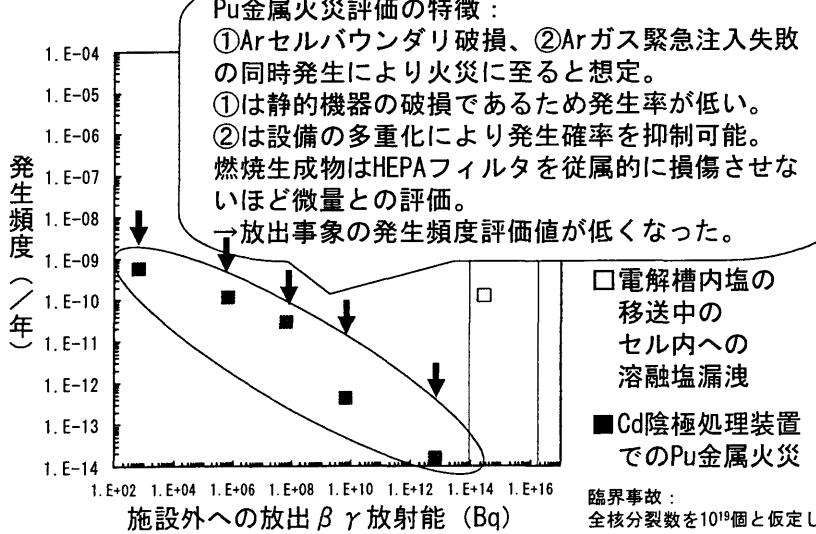
「もんじゅ」仮想事故での放出量

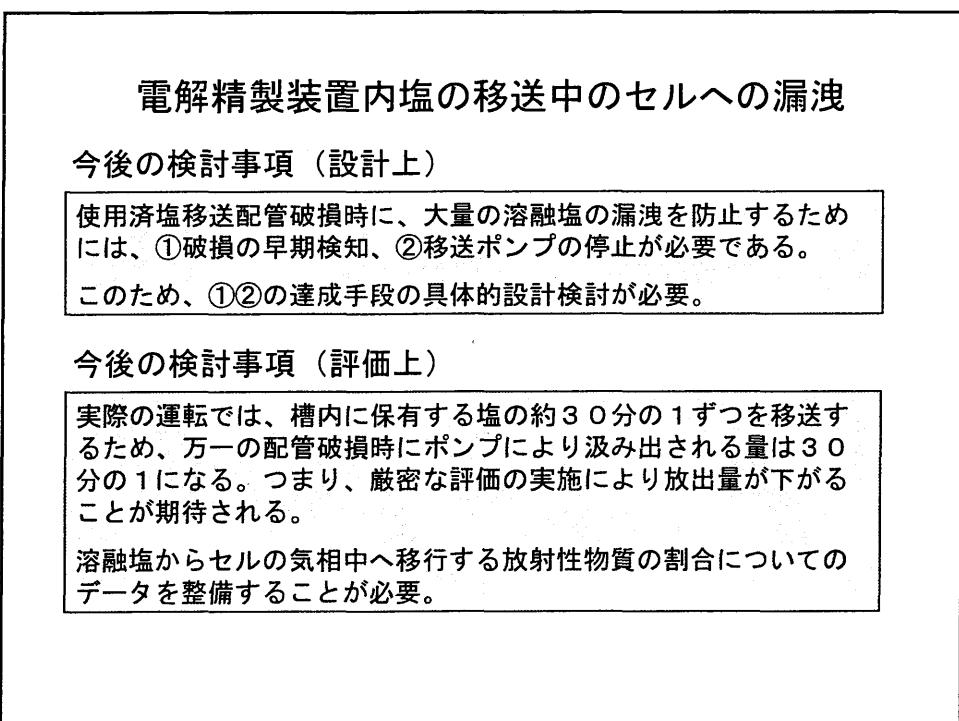
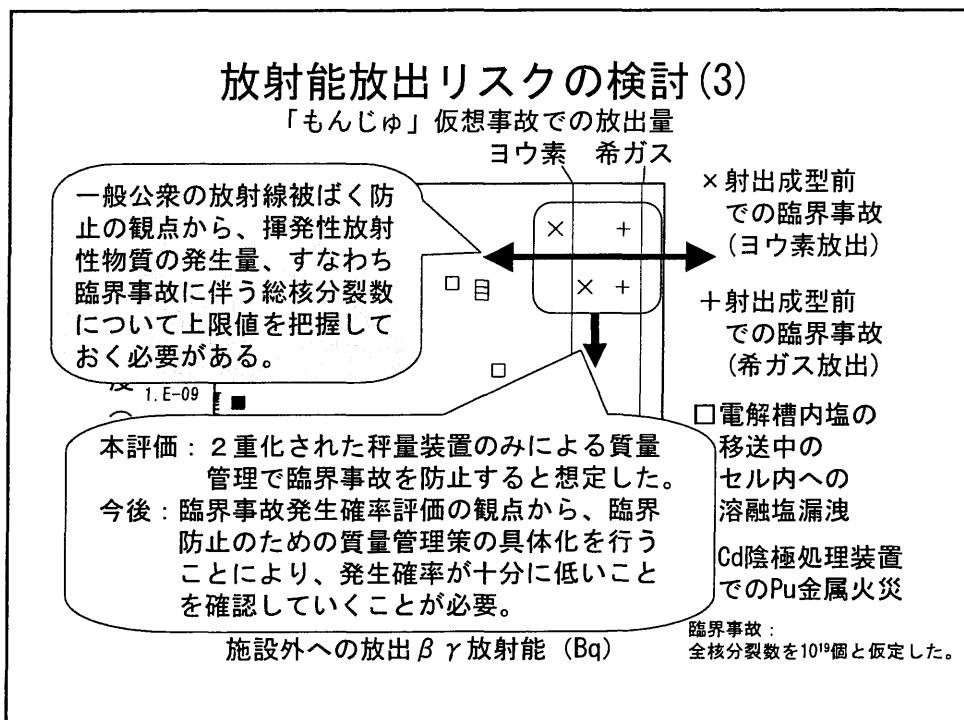


## 放射能放出リスクの検討(2)

「+」 Pu金属火災評価の特徴：

- ① Arセルバウンダリ破損、② Arガス緊急注入失敗の同時発生により火災に至ると想定。
- ①は静的機器の破損であるため発生率が低い。
- ②は設備の多重化により発生確率を抑制可能。
- 燃焼生成物はHEPAフィルタを従属的に損傷させないほど微量との評価。
- 放出事象の発生頻度評価値が低くなった。





## Cd陰極処理装置でのプルトニウム火災

### 今後の検討事項（設計上）

Arセルバウンダリ破損時に、セル内が空気雰囲気になったとしても火災が生じないように火災防止手段（例：加熱停止、冷却、セル雰囲気からの遮断）の具体的検討が必要である。

理由は以下の通り。

- Arセルは外部に対して常に負圧であるため、バウンダリの破損箇所からの空気侵入は、破損箇所を修理するまで止まらない。
- Arガス緊急注入は有限のArガスの供給であるため、短時間の空気侵入抑制効果しかもたらさない。

### 今後の検討事項（評価上）

発火温度も十分考慮に入れて、火災防止のための成功基準を具体化する必要がある。

セル冷却系の浄化機能に期待しない場合も検討しておく。

## 臨界事故

### 今後の検討事項（設計上）

臨界事故のハザードが同定された工程について、事故防止手段の具体化検討が必要。

### 今後の検討事項（評価上）

臨界事故時に他のハザード（例：電解槽破損による溶融塩漏洩、Arセル破損による火災）を誘発する可能性の観点から臨界事故時の発生エネルギーの検討が必要。なお、希ガスやヨウ素の閉じ込めの観点からは重要でない。

希ガスやヨウ素の放出量推定の観点から、臨界事故時の総核分裂数量の検討が必要。

## まとめ

施設外への大量の放射能放出をもたらす事象について、放出放射能量と発生頻度の関係を概略把握できた。

リスクの低減(安全設計)、リスクの定量化(安全評価)のために今後検討すべき事項を摘出した。

### ■施設外へ大量の放射能放出をもたらす事象

溶融塩のセル内漏洩

Pu金属火災

臨界事故

## 今後の予定

### >健康影響リスクの把握

被ばく線量(健康影響)評価を行うことによって、健康影響被害の大きさと発生頻度の関係を把握する。

### >設計要求への達成見通しの判断

社会に既存のリスクとの比較により、有意な増加に至るか否かを分析・判断する。

### >安全性についての設計要求の見直し

H13年度に設定した確率論的安全要求を上記リスク評価を基に、再度検討する。

### >湿式・乾式燃料サイクル施設の個別課題の検討

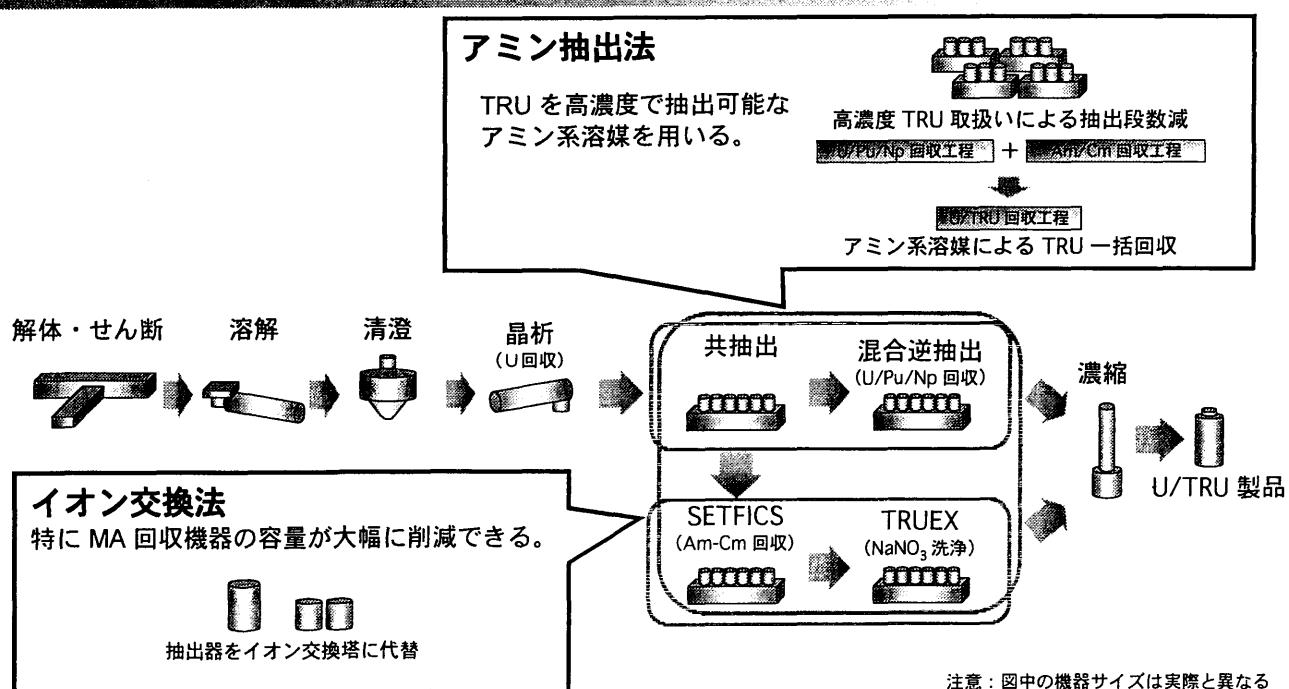
リスク分析の結果、摘出された課題を検討する。

平成15年度第1回研究開発成果報告会

## 湿式再処理システムにおける MA回収プロセス

システム技術開発部 再処理システムグループ  
駒 義和

### 湿式再処理の代替・補完技術 —マイナーアクチニド(MA: AmとCm)の分離について—



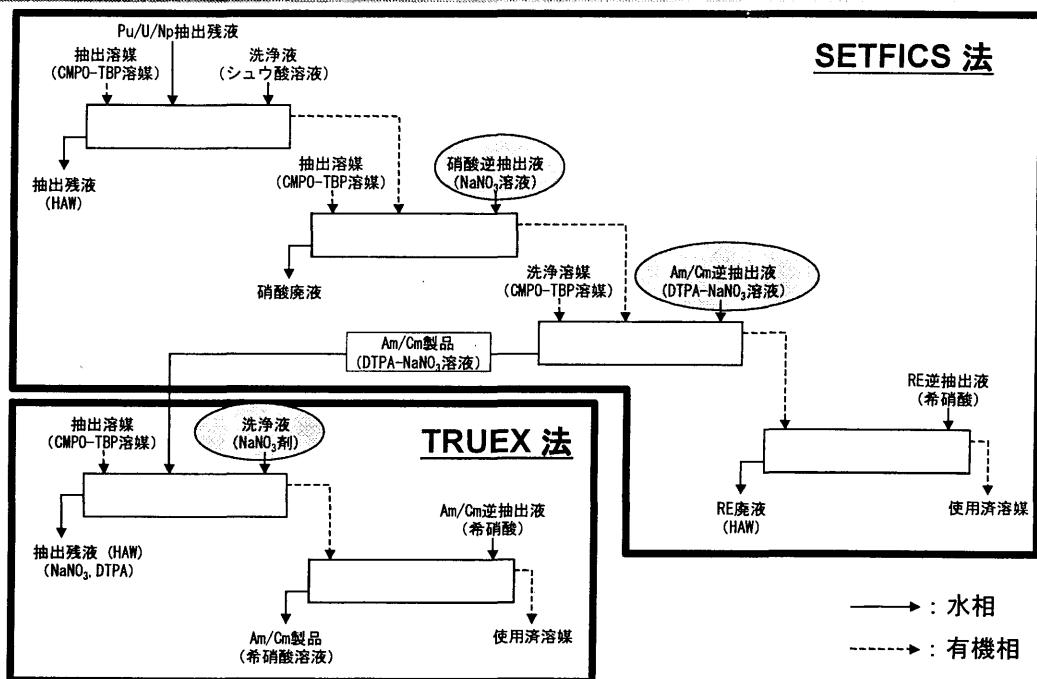
## 平成 14 年度の実施内容

- フェーズⅡにおける再処理システム設計研究の進め方
  - 代替技術（超臨界直接抽出法、改良SETFICS法、アミン抽出法、イオン交換法）の採用の可能性を、要素技術開発成果等をも踏まえて2003年度前半までに見極め、それを先進湿式法に採り込んだリファレンスシステムを2003年度に構築する
- 平成 15 年度の再設計・比較評価に向け、マイナーアクチニド (MA: Am 及び Cm) 回収プロセスの基本フローシートの確定
  - SETFICS 法
  - イオン交換法
    - ✓ MA の回収は抽出クロマトグラフィーに基づくので、以後こう呼ぶ
  - アミン抽出法

## SETFICS — プロセスの概要 —

- CMPO-TBP 混合溶媒を用いる溶媒抽出法
  - TRUEX 法に三価アクチニド ( $An(III)$ ) とランタニド ( $Ln(III)$ ) の相互分離機能を付加
- $An(III)$  と  $Ln(III)$  を共に抽出した後、 $An(III)$  を選択的に逆抽出
  - ジエチレントリアミン五酢酸 (DTPA) と塩析剤（硝酸ナトリウム  $NaNO_3$ ）の混合溶液を用いる
  - 製品に DTPA と  $NaNO_3$  が含まれるので TRUEX 法による処理を行う

## SETFICS — プロセスフローシート —



## SETFICS — 開発の主な課題 —

### ● ガラス固化体量の削減

- Na は最終的にはガラス固化体に含まれることになり、固化体量を増大させる
- Phase I の設計では従来 PUREX 工程 \* に対して SETFICS/TRUEX 工程を追加するとガラス固化体本数が約 7 倍に増大した

### ● 廃液量等の削減

- 二次廃棄物の極小化が望まれる
- 取り扱う溶液量の削減につながるので、抽出器や塔槽類のスケーラダウン効果が期待できる

\* 従来 PUREX 工程 : FBR 燃料を対象とし、抽出工程 1 サイクル、Pu 精製工程 2 サイクル、U 精製工程 2 サイクルからなる。MA は回収しない。溶媒洗浄等に Na を含む試薬を使用する。低レベル濃縮廃液の固化体を製造する。

## SETFICS － 塩析剤の比較 －

- 硝酸ナトリウムを硝酸ヒドロキシルアミン (HAN) に代替
  - 使用後、電解などにより分解処理できる点に着目
  - 再利用せずに分解処理を行う

名称	硝酸ナトリウム	硝酸ヒドロキシルアミン (HAN)
化学式	$\text{NaNO}_3$	$\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HNO}_3$
入手	容易、安価	より高価（注文生産）
常用条件における取り扱いやすさ	安定であり取り扱いやすい。	PUREX 法において還元剤として用いる場合に安定剤（ヒドラジン）を添加する必要があるなど、相対的に不安定であり、管理は繁雑となる。
使用後の処理	ガラス固化体に混入する方法が考えられる。この場合、ガラス固化体の量を増大する要因となる。	気体に分解し、環境放出しうる。
再利用	容易である。	難しい。

## SETFICS － 高装荷フローシート －

- 溶媒中に最大限の濃度で金属を抽出することにより、使用する溶媒量を最小化する
- 金属の装荷限度を制限する因子は第三相の生成
  - 高濃度の硝酸及び金属を抽出することにより、溶媒が二相に分離する現象
- 第三相の生成を抑制していく
  - 温度の上昇
  - TBP 濃度の増加
  - 極性希釈剤の利用

## SETFICS － 主なプロセスの変更点 －

### ● 溶媒組成の変更

- 0.2 M \* オクチル(フェニル)ジイソブチルカルバモイルメチルホスフィンオキシド(CMPO)-1.4 M リン酸トリブチル(TBP)一ノルマルドデカン溶媒を使用
- 従来溶媒(1.0 M TBP)に比べ、約2.5倍の濃度での金属の抽出が可能
- 従来と同様の液液抽出操作が可能

### ● 有機相／水相流量比の見直し

- 3倍以内となるように調整

### ● TRUEX 工程の段数の削減

- 抽出部は16から12段に、逆抽出部は16から8段に削減

\* M = mol/dm<sup>3</sup>

## SETFICS － 廃液量等の減少に関する見通し－

### ● HAN の適用により Na を含む廃液量をゼロに

- 従来 PUREX 工程の約0.6倍にまで減少

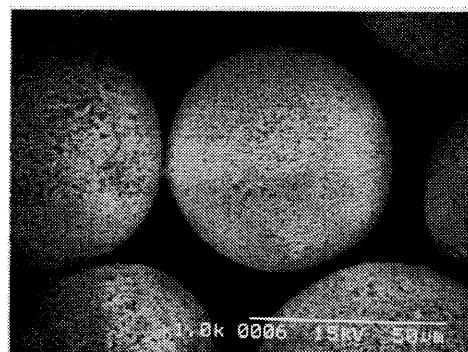
### ● 水溶液・溶媒廃液は約46% 減に

工程	溶液	流量 (200 t/y), L/day		減少割合, %
		本検討	フェーズ I 設計	
SETFICS 工程	抽出残液	4459	3251	37
	硝酸廃液	3029	10040	-70
	Ln 廃液	2472	5400	-54
	使用済み溶媒	4976	10800	-54
TRUEX 工程	抽出残液	5422	10310	-47
	An(III) 製品	551	724	-24
	使用済み溶媒	1660	1448	15
合計		22600	42000	-46

## 抽出クロマトグラフィー —プロセスの概要—

- 様々な有機抽出剤を含む吸着材を用いる
- 吸着材の坦体は、直径約  $50 \mu\text{m}$  の多孔質シリカ ( $\text{SiO}_2$ ) 粒子
- 一般的な有機高分子吸着材に比べ、より速やかに吸着平衡に達する
- 抽出剤に CMPO と Cyanex 301 \* を用いたプロセスを提案
- 遠心抽出器を用いる SETFICS 工程に比べ、建設費を  $1/3$  に削減できる可能性

\* Cyanex 301: ビス(2,4,4-トリメチルベンチル)ジチオホスフィン酸



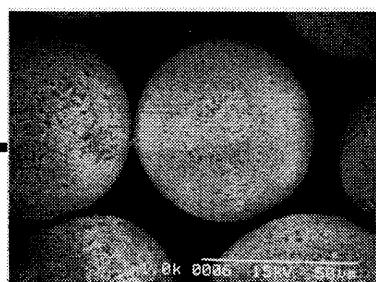
シリカベースの吸着材の外観

## 抽出クロマトグラフィー —プロセスフローシート (CMPO サイクル) —

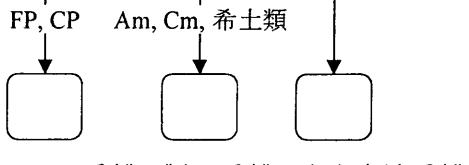
供給液	溶離液	洗浄液 (3)
4 M $\text{HNO}_3$	0.01 M $\text{HNO}_3$	0.2 M 炭酸ヒドラジン
洗浄液 (1) 4 M $\text{HNO}_3$	洗浄液 (2) 0.2 M シュウ酸ヒドラジン	洗浄液 (4) 0.01 M $\text{HNO}_3$

CMPO 分離塔  
(30 L)

分離塔に充填



CMPO/ $\text{SiO}_2\text{-P}$  吸着材



HAW 受槽 製品受槽 洗浄廃液受槽

## 抽出クロマトグラフィー — 開発の主な課題 —

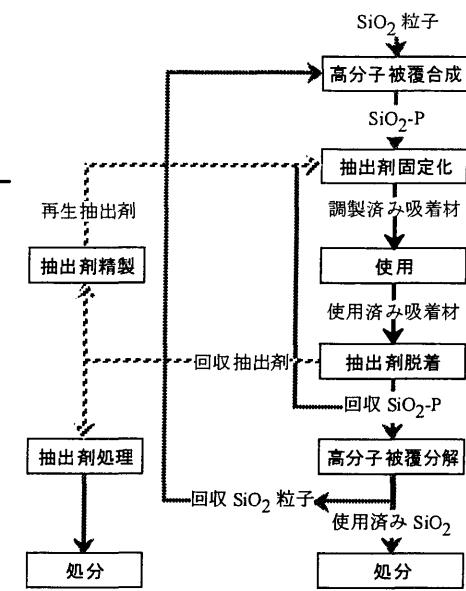
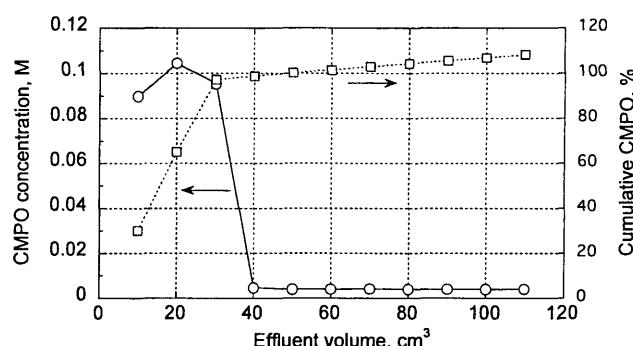
- 現実的なプロセスの構築
  - 使用済み CMPO 吸着材の処理 (H13)
  - 抽出剤の溶出液への浸出と回収 (H13-14)
- 現実的なプロセスの構築
  - SETFICS フローシートの適用 (H13)
- 安全性
  - CMPO 吸着材の熱分解特性 (H13)
  - 耐放射線性 ( $\gamma$ )、耐酸性等 (H14-)
  - 使用条件での気体の発生、熱の発生に対する対応
- プロセス機器開発
  - 分離塔、回収塔など、塔類の設計
  - 溶出液の分画のための計装・機器

## 抽出クロマトグラフィー — 吸着材の構造など —

- 多孔質  $\text{SiO}_2$  粒子の表面にポリマー（スチレンジビニルベンゼン）を被覆する
  - “ $\text{SiO}_2\text{-P}$ ”と称する
  - 直径約  $50 \mu\text{m}$ 、空孔率 0.7、細孔径約  $600 \text{ nm}$  の粒子を用いる
  - ポリマーの重量は約 18 %
- $\text{SiO}_2\text{-P}$  の表面に抽出剤を固定化する
  - ジクロロメタンで希釀した抽出剤を接触して調製
  - 様々な抽出剤を固定化可能
  - CMPO、HDEHP、Cyanex 301、R-BTP、クラウンエーテルを含む吸着剤を合成した実績
  - ポリマーにイオン交換基を固定するとイオン交換体となる

## 抽出クロマトグラフィー — 吸着材の再利用 —

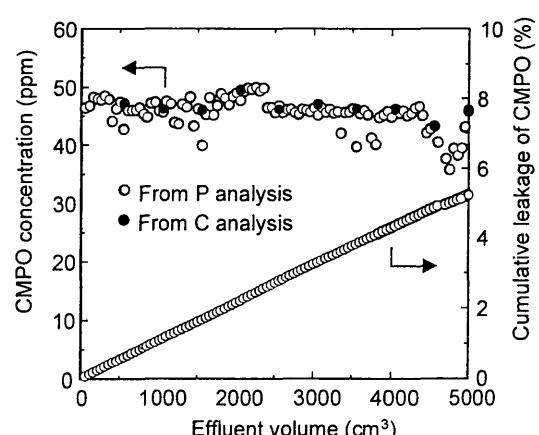
- 吸着材から抽出剤（CMPO 等）を溶出
  - 有機溶剤（アセトン、ジクロロメタン）を用いて脱着
- ポリマーが損傷している場合にはポリマーを分解し、再利用もしくは処分する。



使用済み吸着材の処理

## 抽出クロマトグラフィー — 溶出した抽出剤の回収 —

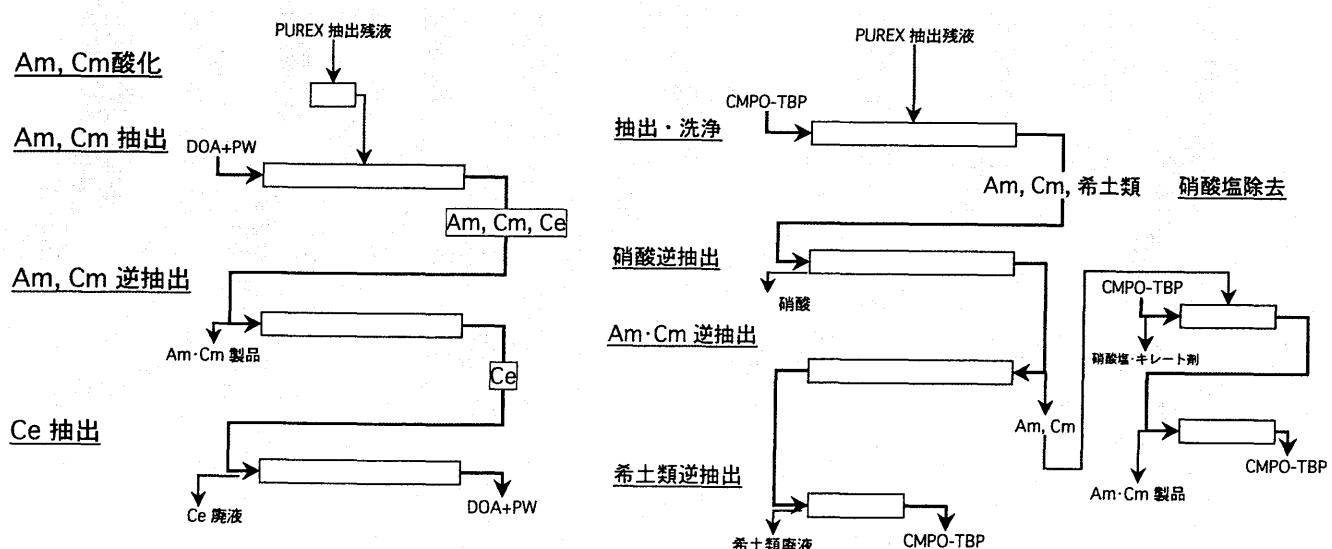
- 抽出剤の溶解度に依存して溶出液に損失
  - CMPO の場合、約 45 カラム体積の溶液を供給すると、1 % が流出
  - SiO<sub>2</sub>-P や活性炭等により回収が可能
  - 従来の遠心抽出器からカラムに変更
- 吸着材の損失量の最小化
  - 溶離液を予め抽出剤で飽和させる処理が有効
  - 吸着材の交換回数を低減することができる



## アミン抽出 －プロセスの概要－

- PUREX 工程からの高酸性廃液から Am と Cm を選択的に回収する
- 三価である Am と Cm を四価に酸化し、アミン抽出剤で抽出
  - 電解酸化を利用する
  - Am(IV) 及び Cm(IV) は不安定なので、多価陰イオン（リンタングステン酸  $K_{10}P_2W_{17}O_{61}$ ）と錯形成させる
    - ✓ 見かけの酸化電位が下がる
    - ✓ 陰イオン錯体となるので、これをアミンで抽出
  - ジオクチルアミン (DOA) を利用
  - Ce(IV) が共に抽出されるので相互分離するための対応が必要

## アミン抽出 －プロセスフローシート－

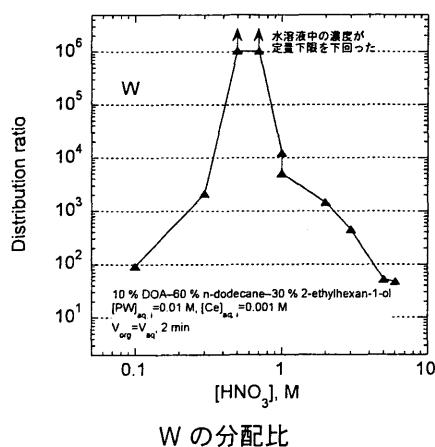
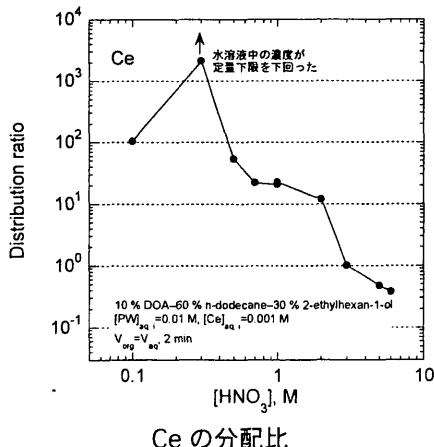
アミン抽出法SETFICS 法

## アミン抽出 — 開発の主な課題 —

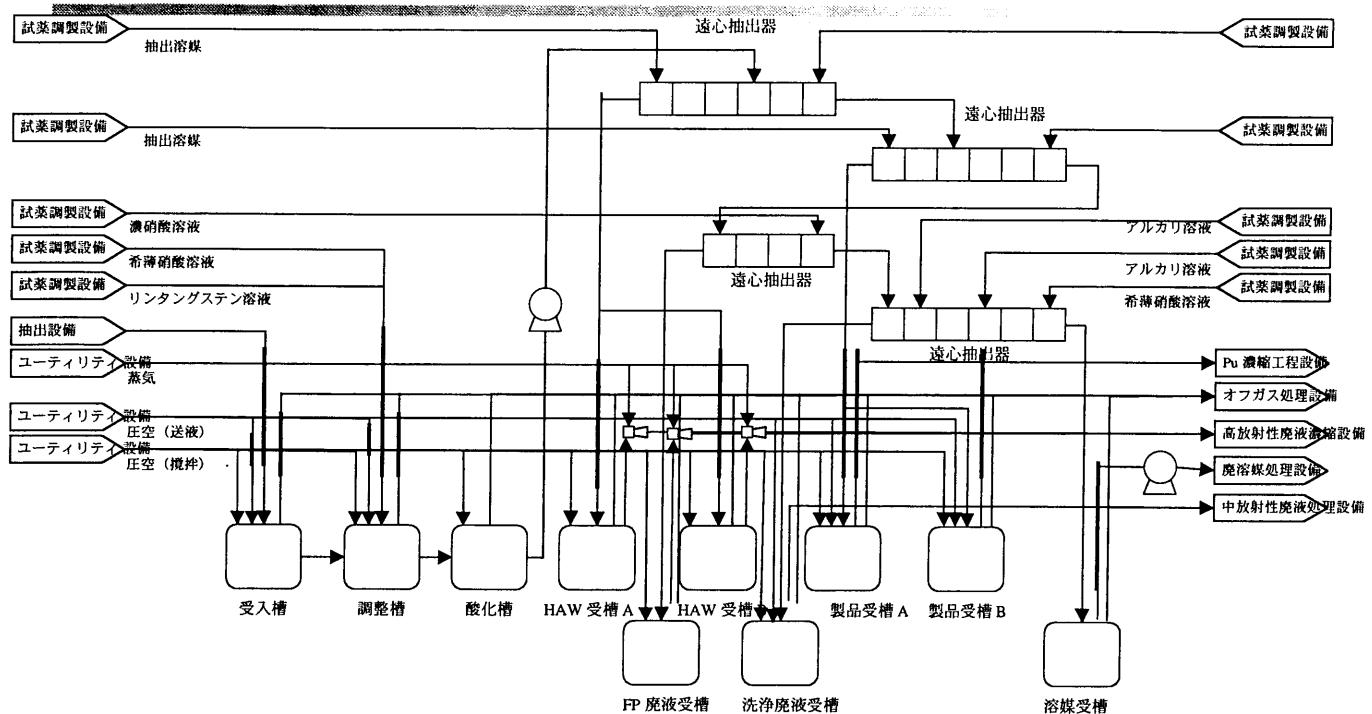
- Phase I とプロセスの目的を変えたので、新たに分離プロセスを構築することが必要
- 抽出剤の選定、溶媒組成の決定
- 抽出条件の決定
  - 水溶液の酸濃度が高まると、酸化と抽出が困難となる
  - 処理対象の溶液を希釀すると、廃液を増加する要因となる
  - 回収と廃液の最小化を両立する条件の探索
- 逆抽出条件の決定
  - Ce と Am-Cm の相互分離条件の探索
- リンタンクスティン酸の挙動把握
  - 廃棄物への移行を最小化するよう制御する必要がある

## アミン抽出 — Ce とリンタンクスティン酸の抽出 —

- コールド試験による基礎試験を実施
- 低酸濃度で Ce が抽出
  - 2 M 以下で分配比は 10 を超える
- リンタンクスティン酸の分配比は十分に高い
  - 廃液に移行しない



## アミン抽出 －検討したプロセスフローダイアグラム－



## アミン抽出 －Am と Cm の酸化－

- Am と Cm の酸化電位は非常に高い
  - 確実な酸化と酸化状態の十分な安定化が必須
  - 実験研究による実証を優先して検討する必要がある

主要な陽イオンの酸化還元電位

反応	電位, V
$\text{U}^{4+}/\text{UO}_2^{2+}$	+0.27
$\text{Pu}^{3+}/\text{Pu}^{4+}$	+1.01
$\text{Am}^{3+}/\text{Am}^{4+}$	+2.62
$\text{Cm}^{3+}/\text{Cm}^{4+}$	+3.1
$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$	+0.771
$\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$	+1.71

主な還元剤の酸化還元電位

反応	電位, V
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}$	+1.36
$\text{MnO}_4^-/\text{MnO}_2$	+1.70
$\text{Ag}^{2+}/\text{Ag}^+$	+1.980
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$	+1.96
$\text{O}_3/\text{O}_2$	+2.075

## まとめ

- MA 分離の候補技術の基本フローシートを設定した。
- SETFICS 法
  - 廃棄物の低減を主な目的としてフローシートを見直し、塩析剤のソルトフリー化、発生廃液量の低減の見通しを得た。
- イオン交換法（抽出クロマトグラフィー）
  - 使用済み吸着材等の処理に関する工程等を付加し、より現実的なフローシートとすることができた。
- アミン抽出
  - コールド試験の結果を元に、基本フローシートを作成した。

## 今後の予定

- 湿式リファレンスシステムの MA 回収プロセスを選定するため、候補技術（SETFICS 法、イオン交換法、アミン抽出）について廃棄物発生量や建設費等を評価する設計研究を行う
  - 技術情報は、今年度行う湿式再処理システム全体の設計作業に反映する
- 選定の後、当該技術の主要な開発課題を解決していく



分離核変換研究の位置付け  
原子力委員会見解

原子力委員会決定(平成12年4月)

◇ HLWの減容等処分に係わる負担軽減や資源としての有効利用等  
有用な技術となる可能性がある。

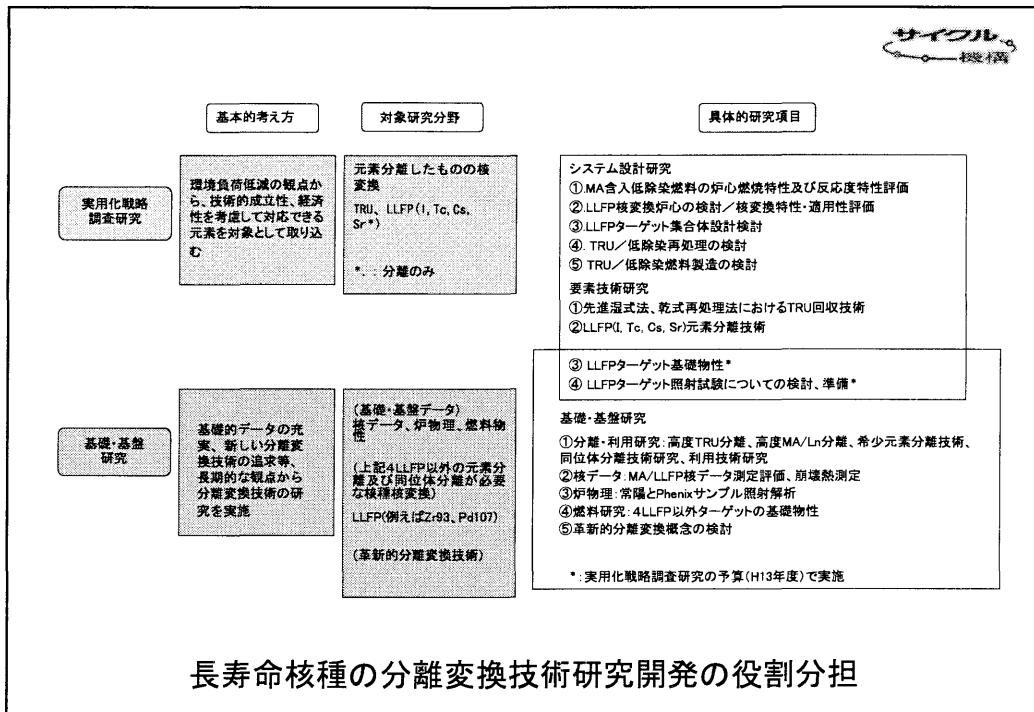
◇ 分離核変換技術開発は、  
核燃料サイクル検討と連動させその一環として進める。

◇ 国内外の研究機関との協力により効率的に研究を進める。  
◇ 既存技術のみでなく斬新な発想が必要。

若き技術者に魅力ある環境作りが必要。

・実用化戦略調査研究  
・基礎・基盤研究

システム設計研究  
要素技術開発  
共通技術及び基礎的  
色彩の強い研究



サイクル。  
核燃料サイクル

### 分離変換技術開発の意義・目的

《 分離変換技術は、原子力利用の結果生じる放射性廃棄物の中に存在する長寿命核種を短寿命化あるいは安定核種に変換し、放射能及び潜在毒性が人類の時間スケールをはるかに越える長期間に及ぶことに起因する不安を軽減すると共に、最終処分される廃棄体量低減や処分場の合理化に繋がる可能性を秘めた核燃料リサイクルの高度化技術である。 》

すなわち分離変換技術は、長寿命の放射性核種の廃棄量そのものを減ずることにより、能動的に廃棄物の潜在的危険性の低減を目指すものであり、生活環境に潜在的危険性を顕在化させない地層処分技術と相互に補完することにより、一層の環境対策の向上を図るものである。

さらに、アクチニドの回収率を向上すると共に、全アクチニドをリサイクルして燃焼させることによるウラン資源利用率のさらなる向上や、白金族元素等の希少金属の回収、有効利用等の可能性も併せ持つ技術である。

分離変換技術はこれらの可能性を追求することにより社会の原子力に対する理解と受容度を高めることに寄与するものである。》

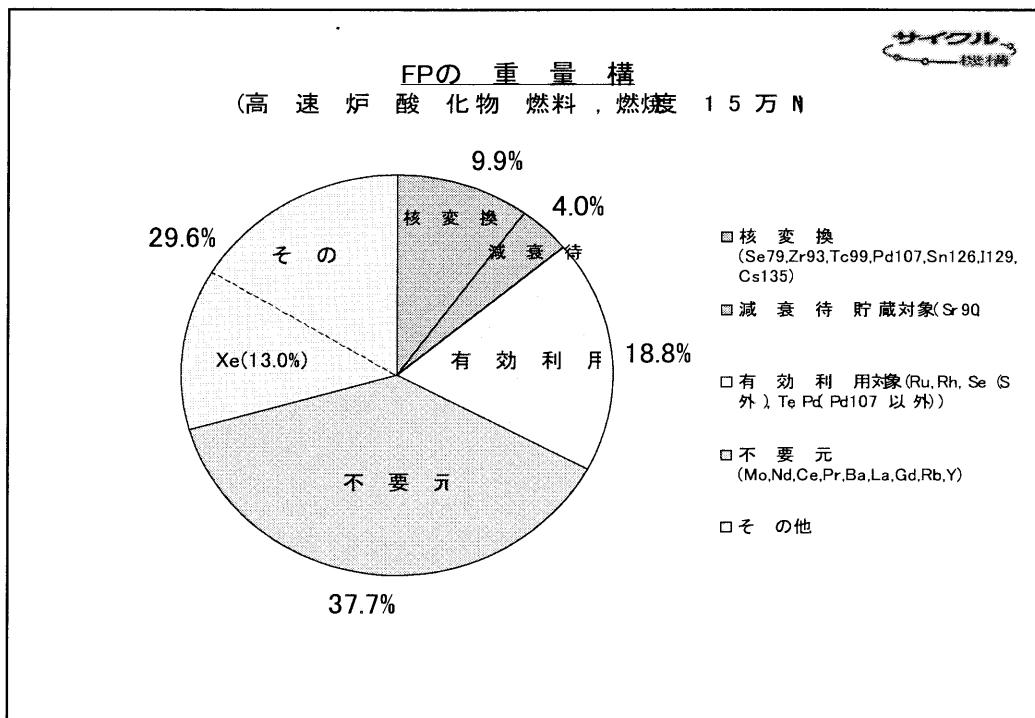
分離核変換対象核種						
段階	放射能及び放射性毒性の観点 (CsとSrは分離のみ、他は分離&核変換)		地層処分の観点		有効利用の観点 (基本的に分離のみ)	
	放射能	放射性毒性	処分場面積等削減 (分離のみ)	被爆リスク低減 (分離&核変換)	触媒他化学利用	放射化学的利用
第1段階* (当面) 5年後に実験室 レベルを終了	U,Np,Cm(99%) Pu,Am(99%) Tc99(99%)	U,Np,Am,Cm(99%) Pu(99%)	(1/2に低減) Sr, Cs(90%) Mo(80%)	(1/10に低減) I(99%)	Pd, Tc	熱源: Cs, Sr 放射線源: Cs
第2段階** (中間) 15年後に実験室 レベルを終了	U,Np,Am,Cm(99.9%) Pu(99.9%) Se79,Pd107, Sn126(99%) Cs135,Zr93,Tc99, Cs137,Sr90, Sm151(99.9%)	U,Np,Cm(99.9%) Pu,Am(99.9%) Cs137,Sr90(99%)	(1/5に低減) Sr, Cs(99%) Mo, Nd, Ru, Rh, Ce, Pr, Ba, La, Te, Gd, Rb, Y, Pd	(1/100に低減) I(99%) C14, Cl36 (放射化生成物) (1/10)	Pd, Tc, Ru, Rh, Se, Te	Cs, Sr, Ru, Rh, Pd

\*システム外に放出するものの放射能及び潜在的な放射性毒性を1000年後に軽水炉ワンスルーのそれの1/100程度に低減する。

\*\*システム外に放出するものの放射能及び潜在的な放射性毒性を100年以降において軽水炉ワンスルーのそれの1/1000程度に低減する。

究極 (理想)	放射性廃棄物のツケを後世代に残さないよう、システム外に放出するものの放射能及び潜在的な放射性毒性を一世代相当で供給した天然ウラン以下にする。 また、地層処分の負担軽減(1/10)、被爆リスク低減(1/1000)に寄与するFPの分離・核変換を進め、さらに有効利用可能な希少有用元素分離により放射性廃棄物のポジティブ面を助長する。
------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

注) カッコ内数値はシステム全体としての回収率



## 放射性廃棄物と放射分離化学

### ◆ 廃棄物(一般廃棄物)管理思想の変遷

(1960年代) 希釀して拡散 → 濃縮して封入 → 貯蔵して崩壊  
→ 分別して分解、リサイクル(21世紀)

### ◆ 廃棄物(物質)から見た視点

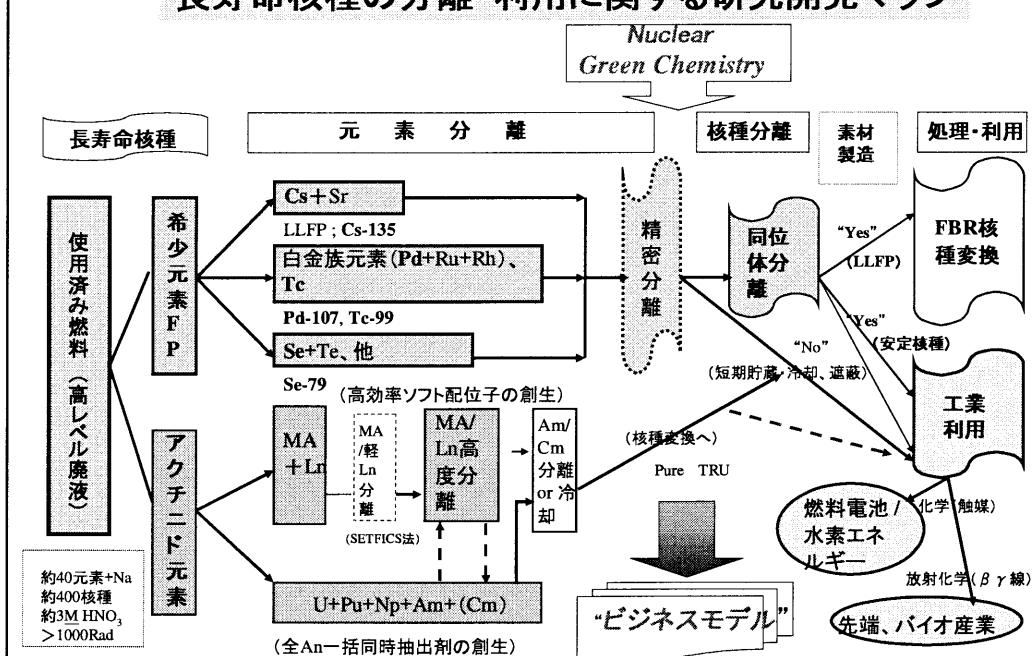
長寿命核種(An, LLFP)の長期(超世代)放射能(-因子);  
分離(元素+同位体) ⇒ 物理的核変換  
希少元素FPの豊潤性(vs. 天然元素の希少性)(+因子);  
分離(元素(+同位体)) ⇒ 化学・放射化学利用(@希少価値)

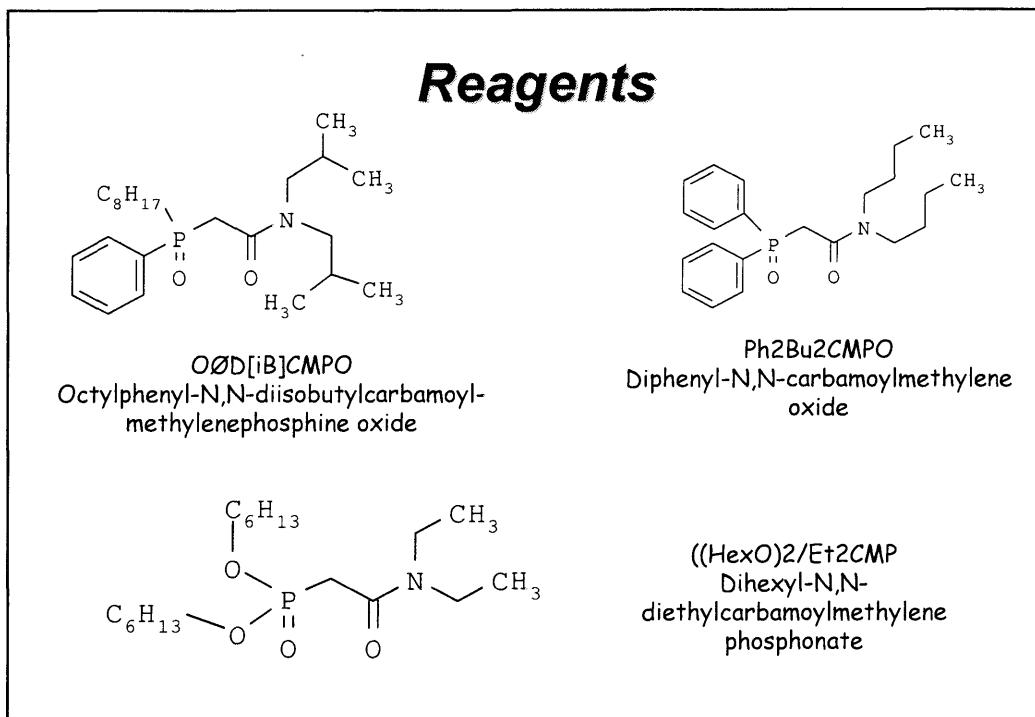
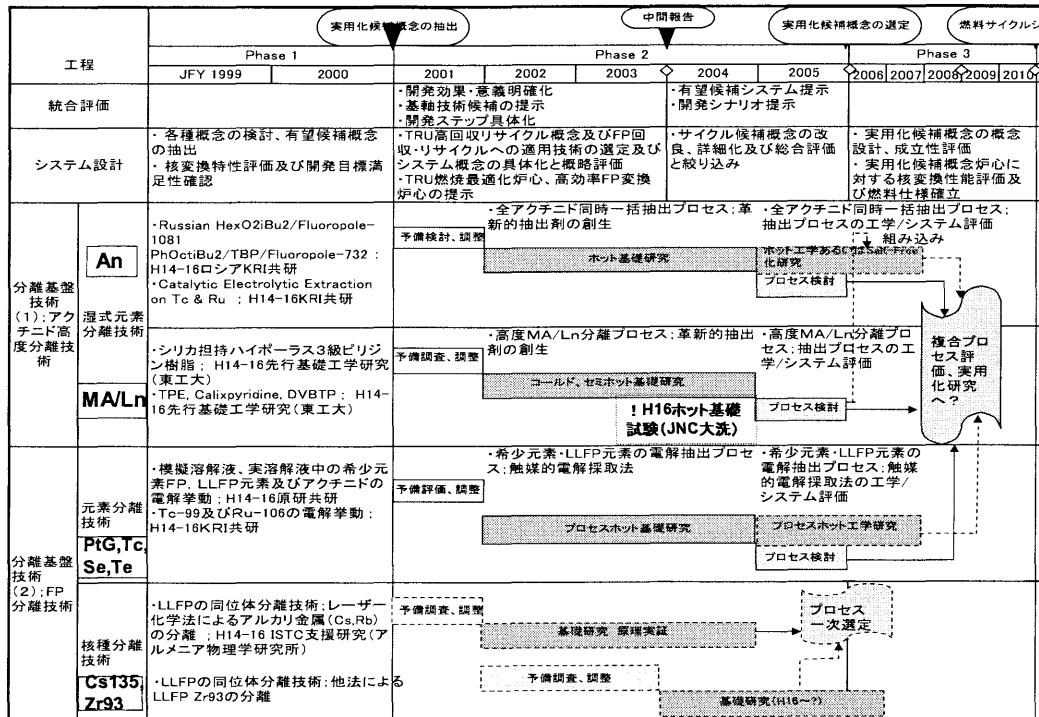
### ◆ 放射分離化学に課せられる要件

混合イオン系(>40元素)、高酸化性(高濃度硝酸溶液)、高放射性  
分離効率、経済性、遠隔自動制御、安全性、二次廃棄物  
⇒ *Green Chemistry, Salt-Free (in Situ Electrochemistry, etc)*

M.Ozawa,21/9/2001

### 長寿命核種の分離・利用に関する研究開発マップ



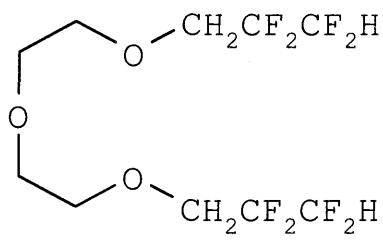


### 第3相の生成を回避するには----

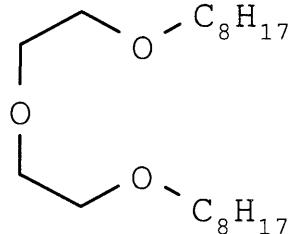
- ・操作条件の選定：
    - ・TBP濃度の増加
    - ・昇温
    - ・その他
  - ・希釀剤の選定：
    - ・飽和炭化水素希釀剤の分子重量の低減、  
短炭素鎖長
    - ・炭素鎖の分岐
    - ・少量の芳香族炭化水素の存在
    - ・アルコールなど極性化合物\*の存在
- (\* 極性の指標：誘電率 $\varepsilon$ )

↔ 希釀剤の特性に着目すると、Fluoropoleはその誘電率 $\varepsilon$ がエタノールや超臨界水に匹敵、有機極性溶媒とみなすことができる。一種の“イオン性液体”。

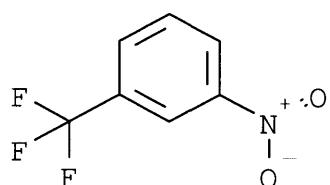
### Diluents



Ditetrafluoropropyl ether of  
diethylene glycol (fluoropole-1083)



Dioctylether of diethylene glycol



Metanitrobenzo-trifluoride  
(fluoropole-732)

研究計画 ⇔ 約3年間の基礎研究により、以下の溶媒抽出分離試験(I～III)及び電気化学的分離試験(IV)を行う

研究手法 ⇔ ・単味 → 混合系(複雑系へ)  
   ・コールド(トレース)→ホット(放射化学系へ)  
   ・回分、静的→多段、連続(システム工学系へ)

- I. 新規溶媒の基本的抽出・逆抽出分離特性及び抽出メカニズムの確認  
 -抽出特性; 2002年度 \* アクチニド(U,Th-Pu,Np,Eu-Am)、FP(Fe,Zr,Mo)  
 -逆抽出特性; 2004年度 \* 同上元素使用
- II. 第3相生成及び生成条件の明確化及びメカニズムの解明(2003年度)
- III. 実溶解除液などを用いた静的試験及び動的試験(多段抽出試験による抽出フローシートの確認)(2004年度)
- IV. 触媒的電解採取法による抽出妨害核種の選択的分離に関するホット基礎試験  
 -Tc基礎電気化学; 2002年度  
 -Ru基礎電気化学; 2003年度  
 -Tc-99, Ru-106電解採取試験; 2004年度

*Formation of precipitates or third organic phase in extraction of U and Eu*

Feed organic solution	Aqueous initial concentration, g/l		Presence of third phase or precipitate third phase*
	U	Eu	
0.2 M OØD[iB]CMPO in 30% TBP + dodecane		300	third phase**
	5	-	no
	20		precipitate
	50		precipitate
	100		precipitate
	276		precipitate
0.2 M OØD[iB]CMPO in fluoropole-1083	50	2	precipitate
	276		precipitate
	-	300	no
0.2 M OØD[iB]CMPO in 10% TBP in fluoropole-1083	50	2	precipitate
	276		precipitate
	-	300	no
30 % (HexO) <sub>2</sub> Et <sub>2</sub> CMP in fluoropole-1083	50		no
	100		no
	200		no
0.2 M OØD[iB]CMPO in 30% TBP + fluoropole-732	50	2	no
	276		no
	-	300	no
		2	no

表 硝酸ウラニル溶液( $C_{aq}^{init.}$  80gU/l, 2MHNO<sub>3</sub>)におけるAn, Euの分配比 (O/A=1, Temp. 22±2°C)  
30 % (HexO)<sub>2</sub>/Et<sub>2</sub> in fluoropol-1083系

Element	U	Pu	Np	An	Eu
D	17	45	7	2, 1	1, 4

## 電力時事通信(平成13年7月27日)

平成13年7月27日 電 力 時 事 通 信 第三種郵便物認可 第5240号

て試験に入る予定。

省工庁の「燃料電池実用化戦略研究会」

来年度予算要求控え報告書の再吟味へ

省工庁長官の私的研究会「燃料電池実用化戦略研究会」は来月八日に会合を開き、この場で一月にまとめた燃料電池実用化・普及への課題等に係わる報告書内容をさらに煮詰めることとした。来年度予算要求時期を控え燃料電池の普及促進を図るために具体的な施策を整理することが目的。燃料電池戦略研究会は燃料電池導入の意義を明確化するとともに、その実用化に向けた課題の抽出と課題解決の方針を探るため昨年十二月に発足したもの。

同研究会が一月にまとめた報告書では▽燃料電池の実用化・普及に向けた課題は燃料電池本体(スタッフ)改質器、水素燃料貯蔵、全体システム等について、高効率化、耐久性等の向上に向けた技術開発が必要▽特に固体高分子電解質膜製造の低コスト化、白金触媒の使用量低減によるコスト化等が課題▽触媒に使用される希少な資源の制約、固体高分子電解質膜に使用されるフッ素系化合物についての廃棄・処分の問題、社会的受容性の醸成・向上、研究開発に携わる人材不足への対応が必要▽燃料電池の燃料となる水素をどのように製造・供給するかが、その燃料供給インフラの整備と合わせて大きな課題一等としている。

都の葛西処理場、NAS電池が10月に運転  
インバーター込みKW当たり価格は31万円

東京都下水道局が江戸川区の葛西処理場で施工中のNA

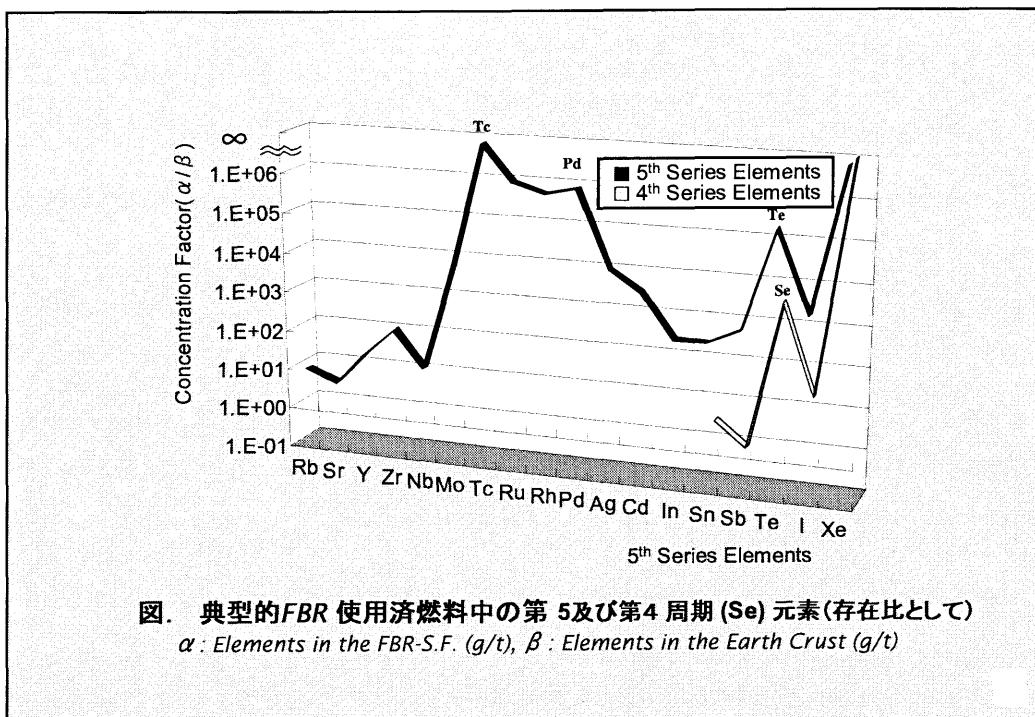
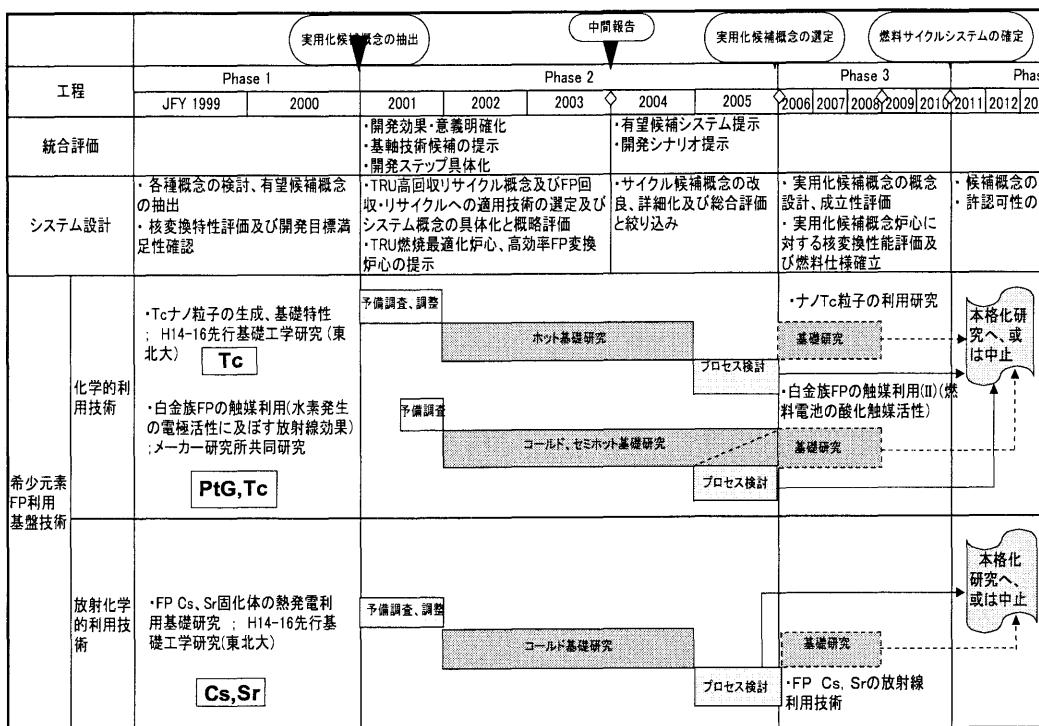
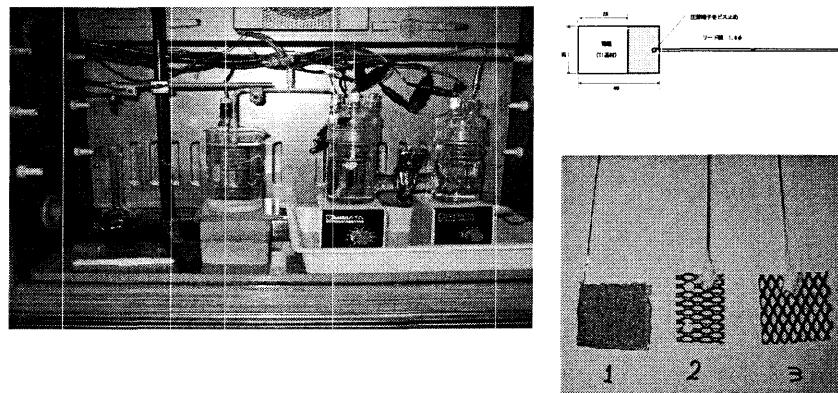


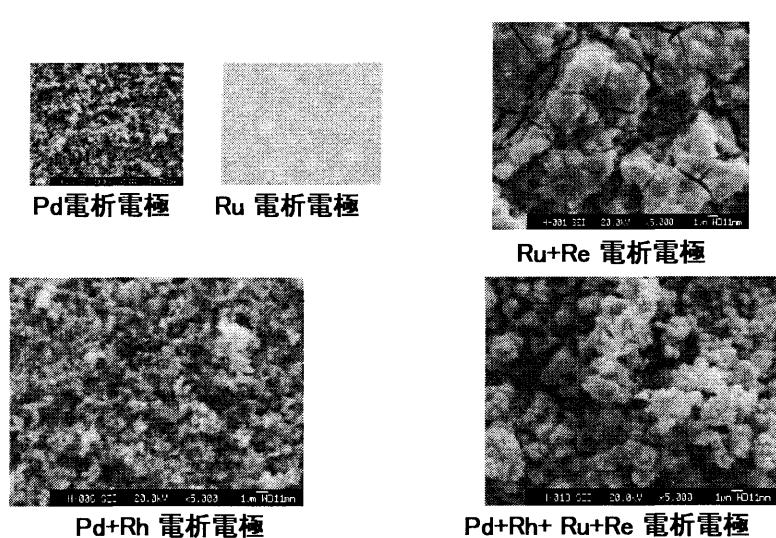
図. 典型的FBR 使用済燃料中の第5及び第4周期 (Se) 元素(存在比として)  
 $\alpha$ : Elements in the FBR-S.F. (g/t),  $\beta$ : Elements in the Earth Crust (g/t)

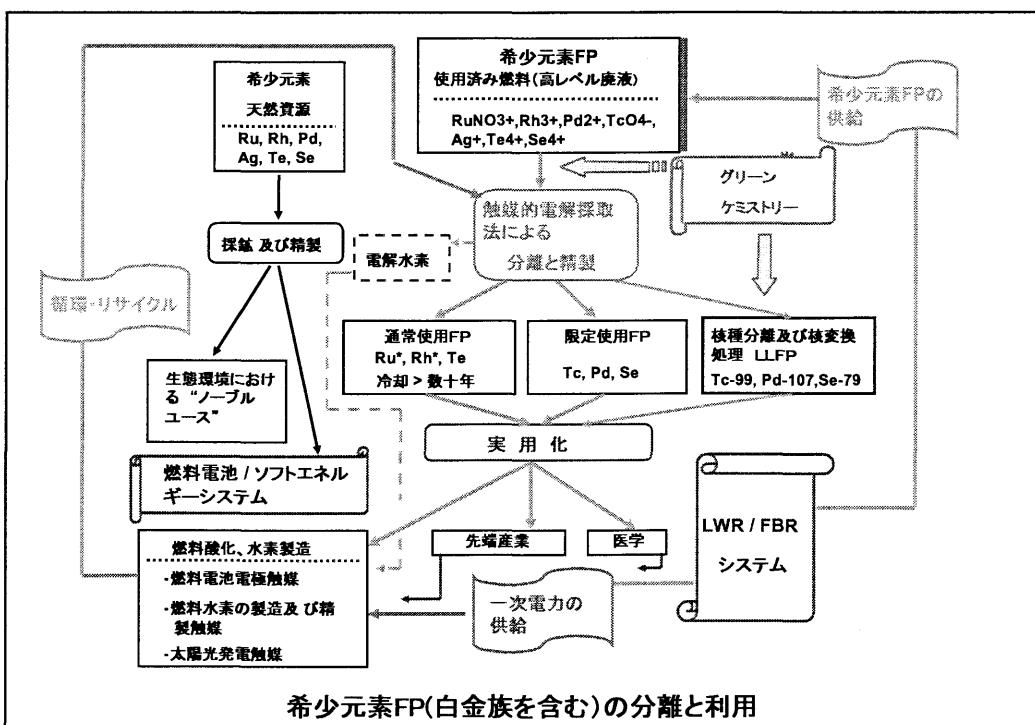
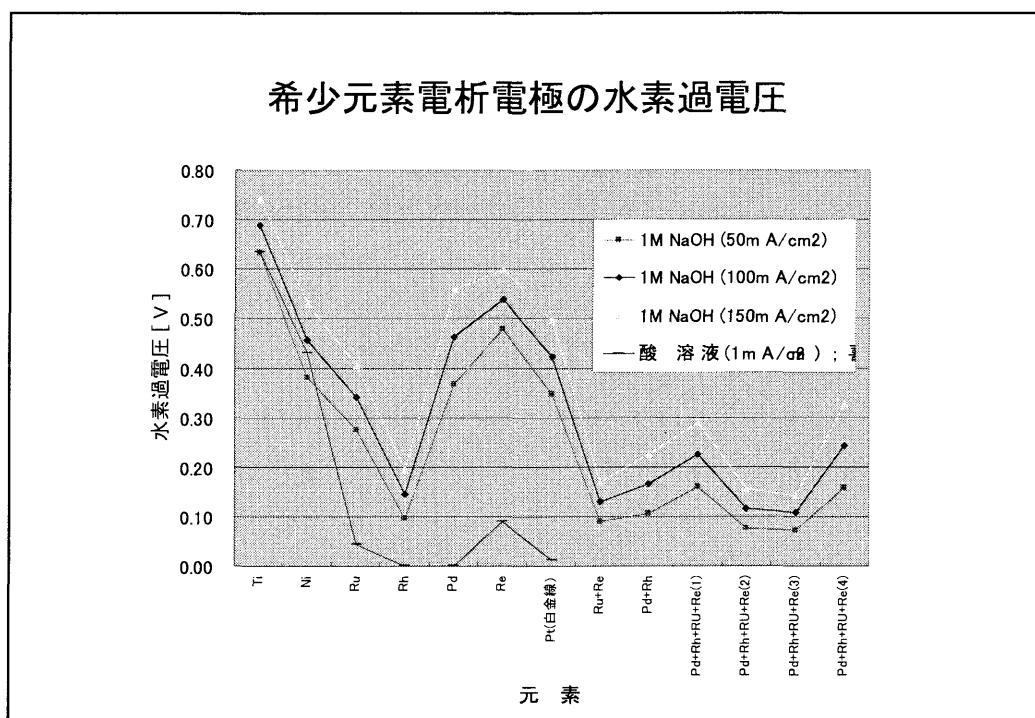


### 電解試験装置の外観



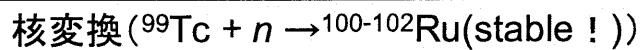
### 希少元素触媒電析電極の結晶形状 SEM分析(倍率;x 5,000)





## ■テクネチウム(<sup>99</sup>Tc)の核変換;“Nanomoney”として

- 人工放射性元素、放射性なので“ナノマネー”にはならない
- ◆ Tc-99 / t-SF(FBR)⇒約900万円(#プライス=製造コストとする)
- 一方、安定Ru同位体は極めて高価



- 非放射性なので“ナノマネー”になりうる? 核変換後、Ru/Tcの高度分離(SF=ca.10<sup>8</sup>)が必要(ロシアの評価)
- ◆ Ru-100 / t-SF(FBR)⇒約40億円
- 核変換は環境負荷の低減、資産価値の創成に寄与。同位体分離は必要なし。
- 欧米、ロシアはTcの核変換試験実施中(⇒ロシアはPd,Rh資源は豊富だがRuは僅少)  
*Modern Vision of Tc-99 Fate ; Born to burn, and this fire will give not ash but the noble metal*

## Nanomoney

Tangible Nanomoney by R.A.Freitas Jr., *Nanotechnology Industries Newsletter*, Issue II, July 2000, pp.2-11

*Nanomoney* ナノテクの社会にあって有効な貨幣(有形資産)とは?

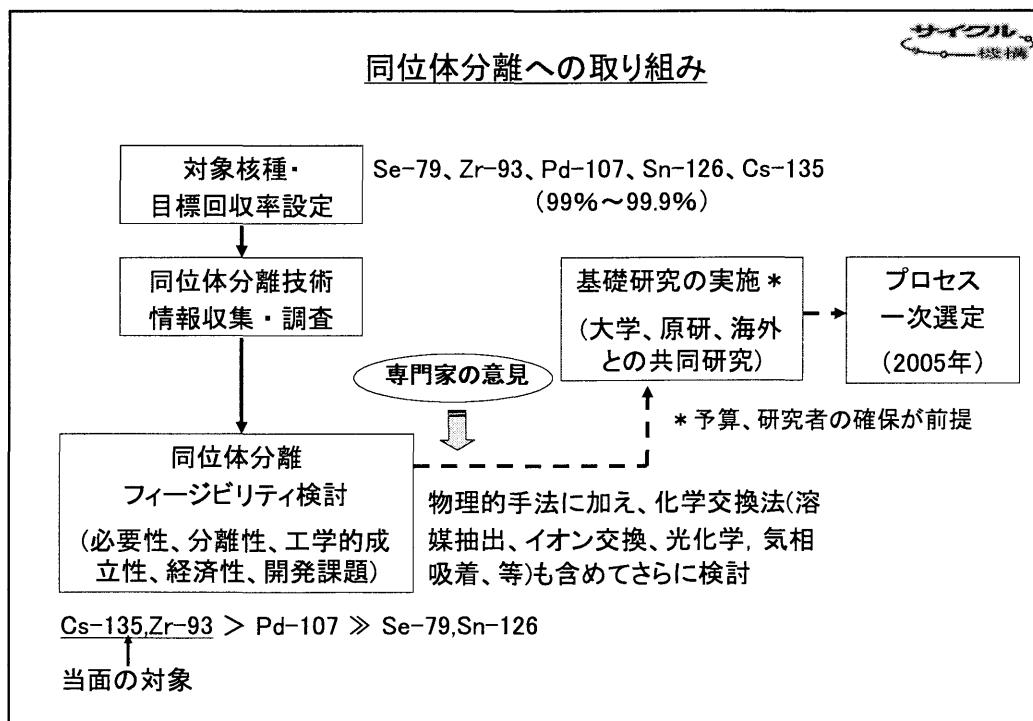
### ■貨幣の役割;価値の貯蔵、流通媒体、信頼性

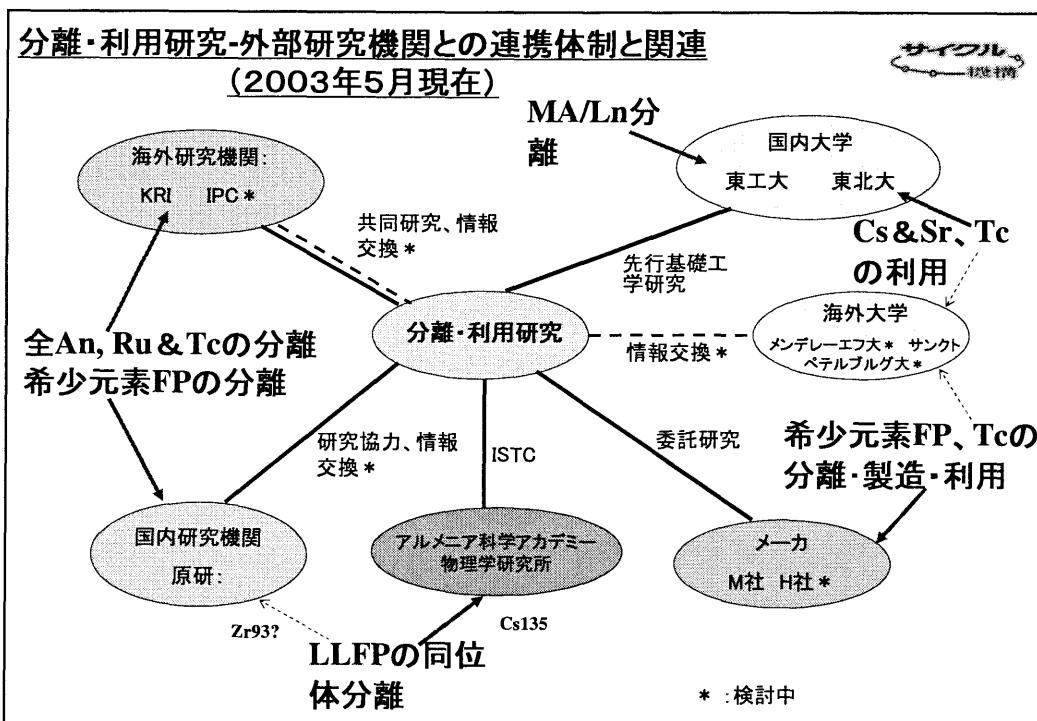
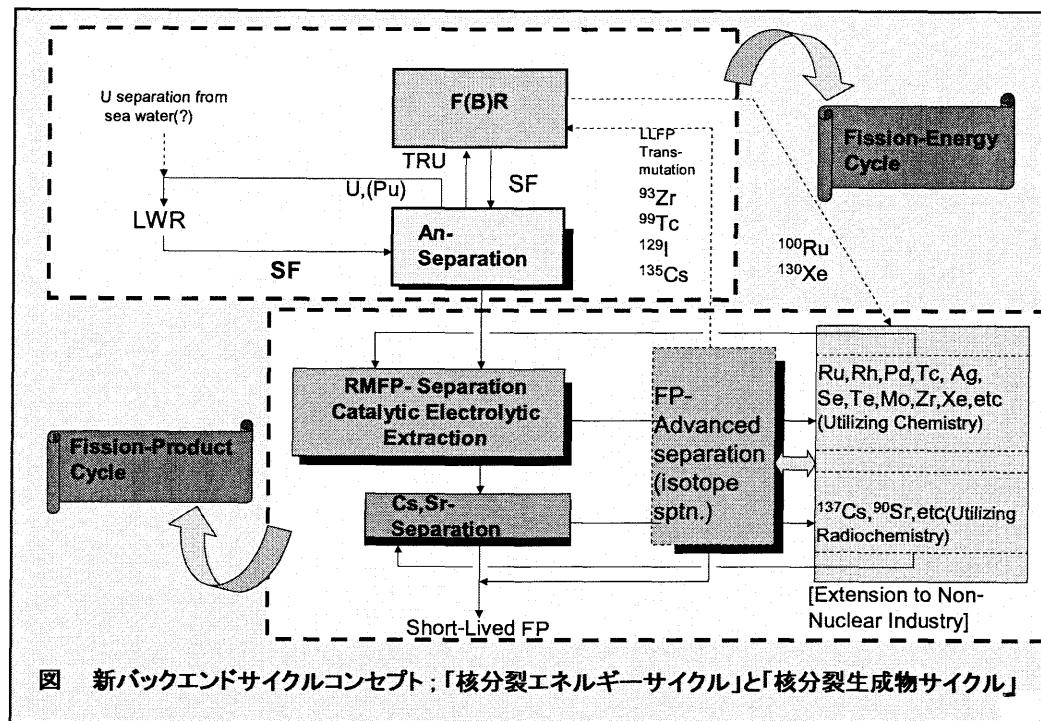
- 1) 価値の貯蔵効率; 単位量、質あたり高価値であること
- 2) 持ち運びが容易なこと
- 3) 物理的に安定であること
- 4) 本質的、物理的に危険でないこと(放射性、毒性、爆発性、等)
- 5) 偽造しにくいこと
- 6) 製造コストより廉価で複製できないこと
- 7) 貨幣価値は直ちに認識可能のこと
- 8) 貨幣はその物理的形態によって自己価値を有すること

### ■ナノテク社会では、上記クライテリアの全ては満足できなくなる

- 1) 現行の紙幣、コインは容易く偽造できる
- 2) ダイヤモンドもデスクトップマシンで製造できる

Nanomoney : SF中の希少元素FP(同位体)の潜在的価値 (Tangible Nanomoney by R.A.Freitas Jr., Nanotechnology Industries Newsletter, Issue II, July 2000, pp.2-11)										
元素	同位体	市場価格 の例*(\$/t) A	市場価格の例 円 /g Int'l. 27th Feb. 2003 A	条件 等 SF中の存在量 (FBR 件 : 15万MWd/t(g/t)) B	SF中の同位 体 (%)	放射性・非 放射性	半減期の 例	SF溶 解率 (%) C	CEE 回収 率(%) D	資産価値としての核種(SF1トン当たり) A*B*C*D
Tc	Tc98	300億	est.	2.66E-02	0	rad. $\beta$ $\gamma$	4.2x10 <sup>4</sup> y	80	90	942万 $\Rightarrow$ 40億6558万 (Ru100に核変換の場合)
	Tc99	ca.100 製造コスト		1.09E+03	100	radioactive $\beta$	2.1x10 <sup>3</sup> y			
Ru	Ru99	39,040		2.55E-02	0			70	90	4億503万 31億2674万 23億4535万 27億2432万
	Ru100	43,170		1.38E+02	33					
	Ru101	35,050		1.18E+03	28.6					
	Ru102	29,410		1.52E+03	36.4					
	Ru104	27,300		1.32E+03	31.6					
	Ru106			1.47E+01	0.4	radioactive $\beta$	372.6d			
Rh	Rh102			4.39E-03	0			80	90	321万
	Rh103	29		1.28E+03	100					
	Rh106			1.38E-05	0	radioactive $\beta$	29.80s			
Pd	Pd104	63,800		1.71E+02	5			80	99	10億3687万 8億7354万
	Pd105			9.85E+02	28.6					
	Pd106			1.07E+03	31					
	Pd107			5.67E+02	16.4	radioactive $\beta$	7x10 <sup>4</sup> y			
	Pd108			5.20E+02	15					
	Pd110	67,090		1.37E+02	4					
Se	Se76			3.25E-02	0			80	90	
	Se77			1.86	2.7					
	Se78			5.37	7.8					
	Se79			8.57	12.5	radioactive $\beta$	6x10 <sup>4</sup> y			
	Se80			1.67E+01	24.4					
	Se82			3.60E+01	52.6					
Te	Te122	76,850		1.37E+00	0			80	90	3437万 8437万 2億4828万
	Te123	14万	est.	5.27E-02	0	radioactive	1.3x10 <sup>13</sup> y			
	Te124	29,230		1.16E+00	0					
	Te125	16,040		2.48E+01	2.8					
	Te126	8,950		4.02E+00	0					
	Te128	4,340		2.25E+02	25.1					
U	Te130	4,490		6.40E+02	71.4	radioactive	2.4x10 <sup>21</sup> y			
	U234	61,800		6.94E+01		radioactive	2.454x10 <sup>5</sup> y			
	Ag	0.2	20,16							
	Au	10	1455							
	Ru	30								
	Rh									
Natural	Pd		980							
	Pt	12	2756							
	Diamond	28,000	1,126,514/ct							





## 外部発表及び成果物(FY2001-2002)

### 原子力学会 ; 研究開発シナリオ

- ◆ (1) Green Chemistryからのアプローチ 2001年秋  
研究開発の視点、構想、Green Chemistryの分離手法、希少元素FPの分離技術
- ◆ (2)二座配位型有機リン配位子による高度化再処理プロセスの検討 2002年春  
アクチニド分離の合理化、再処理・TRU分離融合プロセス、ロシア共研
- ◆ (3) LLFPの同位体分離技術 2002年秋  
分離ニーズ(環境負荷)と効果(中性子効率)、優先核種、同位体技術
- ◆ (4) 分離・利用 研究開発ロードマップ 2003年春  
研究開発計画(スケジュール、ゴール)、トピックス(新視点)

### 原子力学会(今後) ; 要素技術

- ◆ 2003年秋以降
  - ・電解水素生成反応における模擬希少元素FPの触媒活性
  - ・CMP-F, CMPO-TBP-F抽出プロセス

その他 ; 委員会報告3件、国際学会報告4(+2)件、ジャーナル論文3件、シンポジウム、研究会報告3件、特許1件

## ロード・マップを貫く戦略と視点

### ■ 分離技術

#### 「環境調和型」放射分離化学

#### Salt-free技術

#### Catalytic Electrolytic Extraction (CEE) 法

### ■ 利用に向けて

#### 原子力(集中型) / 水素・燃料電池(分散型) 共生エネルギーシステム

#### 希少元素の新資源配分

- 天然資源⇒ノーブルユース、FP資源⇒産業利用、希少価値

#### 戦略的燃料サイクル概念

- *Fission-Energy cycle*
- *Fission-Product cycle*

# 候補概念のサイクル諸量予備評価

大洗工学センター  
システム技術開発部 FBRサイクル解析Gr.

塩谷 洋樹

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 発表概要

1. 評価の目的と3つの導入シナリオ
  - 予備評価の目的
  - 3つの導入シナリオ概要
2. FBRサイクル導入シナリオ1～3の紹介
  - 炉心のタイプ(バランス型、経済性重視型、リプレース型)
  - シナリオ1(ウラン資源のリサイクル利用)
  - シナリオ2(プルトニウム利用技術の実践と環境保全)
  - シナリオ3(原子力利用の拡大)
3. 解析ケースの紹介と前提条件
  - シナリオ1～3における解析ケースと主な前提条件
4. 解析結果の概要
  - シナリオ1～3の結果
5. 中間とりまとめ本評価への課題

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 1. 評価の目的と3つの導入シナリオ

### 【目的】

中間とりまとめ時のサイクル諸量評価ケースへの反映  
解析ツール(FAMILY-EX)の適用範囲検討と問題点抽出

### 【3つの導入シナリオ】

#### シナリオ1. ウラン資源のリサイクル利用

LWRからFBRへの速やかなリプレースを行い、ウラン資源の有効利用を図るシナリオ  
(導入する炉型の違いによる諸量上の影響も検討する)

#### シナリオ2. プルトニウム利用技術の実践と環境保全

(サイクル施設に比べて) FBRのみを先行導入し、遠い将来には放射性廃棄物の  
毒性低減を志向したFBRを導入するシナリオ

#### シナリオ3. 原子力の利用拡大

基幹電源に加えて、水素製造用FBRを導入するシナリオ

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 2. 炉心のタイプ

### 【バランス型炉心】

- ・LWRからの速やかなリプレースと経済性の双方に配慮した炉心
- ・増殖比が1.1強、炉内Pu丰度はおよそ5トン～9トン

### 【経済性重視型炉心】

- ・経済性の向上を志向(炉内Pu丰度は大きい)
- ・低増殖比なので、増殖不要となった時期に導入することを想定

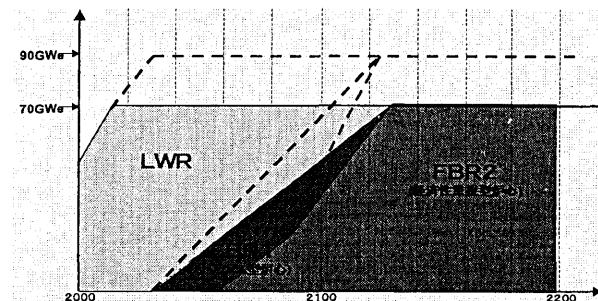
### 【リプレース重視型炉心】

- ・LWRからの速やかなリプレースを志向
- ・増殖比が大きく、炉内Pu丰度は小さい

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 2. シナリオ1(ウラン資源のリサイクル利用)

- LWRからFBRへのリプレースを進め、ウラン資源を有効に利用するシナリオ
- FBR概念等の違いによるサイクル諸量上の差を検討

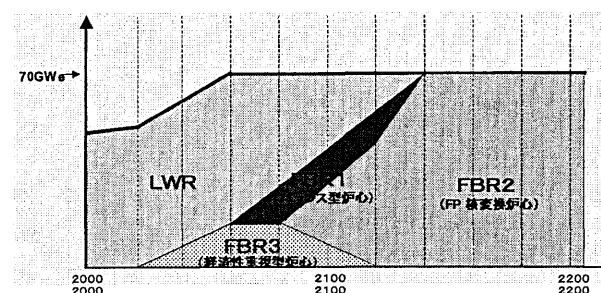


- 2030年FBR(サイクル)導入(2050年:1ケース)
- 設備容量70GWe (90GWe:大型MOX、中型金属の2ケース)
- リプレース重視型の炉の導入(1ケース)
- MOX燃料炉→金属燃料炉の導入(1ケース)
- 中型(金属)燃料炉(70GWe:1ケース、90GWe:1ケース)
- 増殖が不要となった時点で経済性重視型FBRを導入

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 2. シナリオ2 (プルトニウム利用技術の実践と環境保全)

- 経済性を有するFBRを先行導入し、遠い将来には、放射性廃棄物の毒性低減を志向したFBRを導入するシナリオ

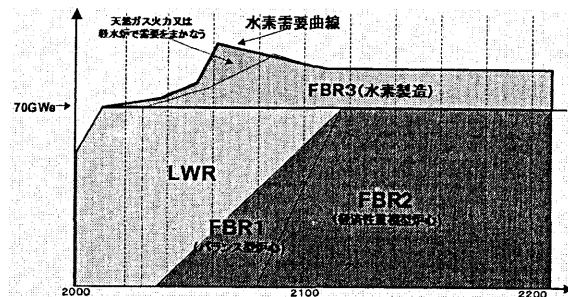


- 2020年にFBR(経済性重視型)を先行して導入(軽水炉再処理からのPuのみで燃料を製造)
- 燃料サイクル施設は2040年導入
- 増殖が不要となった時点で、LLFP核変換炉を想定したFBRを導入
- 原子力設備容量70GWe

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 2. シナリオ3(原子力の利用拡大)

- 将来の水素社会を想定し、基幹電源用に加えて、水素製造用FBRを導入するシナリオ



- 2030年にFBR(サイクル)を導入
- 増殖が不要となった時点で、経済性重視型FBRを導入
- 基幹電源用設備容量70GW<sub>e</sub>
- 水素製造用(電力に換算した設備容量:水素需要及び水素製造効率による)  
(低温水蒸気改質法:20GW<sub>e</sub>相当、高温熱化学法、電気分解法約50GW<sub>e</sub>相当)
- 発電用ではなく、水素製造用FBRの導入を優先すると想定

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 3. シナリオ1解析ケース

	FBR1	FBR2	FBR1 導入年	設備 容量	備考
1-1	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX 経済性重視型	2030	70GW <sub>e</sub>	・レフレンスケース ・MA蓄積量評価を実施
1-2	Na-大型-MOX リプレース重視型	Na-大型-MOX 経済性重視型	2030	70GW <sub>e</sub>	・リプレース重視型の導入効果を評価
1-3	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-金属 経済性重視型	2030	70GW <sub>e</sub>	・MOX燃料炉を2030年導入 ・性能が向上した金属燃料炉を2050年導入
1-4	Na-中型-金属 バランス型	Na-中型-金属 経済性重視型	2050	70GW <sub>e</sub>	・(開発に時間を要するが、リプレースの早い) 金属燃料炉を2050年導入
1-5	Pb-Bi-中型塗化物 バランス型	Pb-Bi-中型塗化物 経済性重視型	2030	70GW <sub>e</sub>	・Pb-Bi炉の性能をレフレンスと比べるため導入年を2030年に固定
1-6	Heガス-大型 塗化物被覆粒子 バランス型	Heガス-大型 塗化物被覆粒子 経済性重視型	2030	70GW <sub>e</sub>	・He炉の性能をレフレンスと比べるため導入年を2030年に固定
1-7	水増殖炉(BWR型) 型の違いなし	水増殖炉(BWR型) 型の違いなし	2030	70GW <sub>e</sub>	・水炉の性能をレフレンスと比べる ・インベントリ大、増殖比小(フェーズ1の設計)
1-8	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX 経済性重視型	2030	90GW <sub>e</sub>	・設備容量90GW <sub>e</sub> となったときの影響評価
1-9	Na-中型-金属 バランス型	Na-中型-金属 経済性重視型	2030	90GW <sub>e</sub>	・設備容量90GW <sub>e</sub> 時の金属燃料炉導入の 効果を評価。他の炉型については70GW <sub>e</sub> の ケースから推定可能

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

### 3. シナリオ2解析ケース

	FBR3 先行導入炉 (技術実証炉)	FBR1 増殖性重視	FBR2 LLFP核変換	FBR3 導入年	FBR1 導入年	設備 容量	備考
2-1	Na-大型-MOX 経済性重視型	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX LLFP核変換炉 (改良バランス型)	2020	2040	70GWe	・炉のみを2020年導入 ・LLFP核変換を想定した炉 を将来導入

### 3. シナリオ3解析ケース

	FBR1 増殖性重視	FBR2 経済性重視	FBR3 水素製造	FBR1 FBR3 導入年	設備 容量	水素製造 設備容量	備考
3-1	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX 経済性重視型	Na-大型-MOX バランス型／ 経済性重視型	2030	70GWe	約20GWe相当 水蒸気改質法	・水素製造用FBR レファレンス
3-2	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX 経済性重視型	He-大型-窒化物 バランス型／ 経済性重視型	2030	70GWe	約20GWe相当 水蒸気改質法	・MOX炉と窒化物 炉の差を検討
3-3	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX 経済性重視型	Na-大型-MOX バランス型／ 経済性重視型	2030	70GWe	約50GWe相当 電気分解法	・改質法と電気分 解法の差を評価
3-4	Na-大型-MOX バランス型	Na-大型-MOX 経済性重視型	He-大型-窒化物 バランス型／ 経済性重視型	2030	70GWe	約50GWe相当 熱化学法	・改質法と熱化学 法の差を評価
3-5	Na-大型-MOX リプレース 重視型	Na-大型-MOX 経済性重視型	Na-大型-MOX バランス型／ 経済性重視型	2030	70GWe	約50GWe相当 電気分解法	・リプレース重視 型の導入効果を 評価

平成15年度 第1回R&amp;D報告会(2003.5.9)

### 3. 主な前提条件

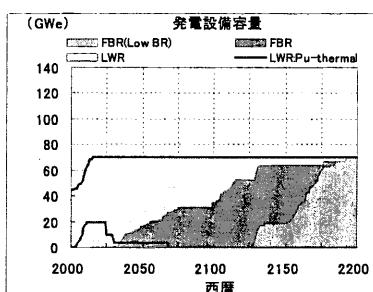
#### ■ 諸量評価ツールであるFAMILY-EX4.8を用いて評価

前提条件	設定値	
解析期間	2000～2200年	
導入設備容量	全シナリオ	基幹電源70GWe (一部90GWe)
	シナリオ3	水素製造約20～約50GWe相当
プルサーマル導入量	・15～20GWe程度	
再処理設備容量	LWR	800t/y(現実的な見通しとして、六カ所の稼動 のみを前提とする)
	Puサーマル	FBR再処理で処理(現実的判断)
	FBR	全量再処理
導入開始年	シナリオ1 シナリオ3	2030年を基本
	シナリオ2	2020年(サイクル施設は2040年導入)
炉外サイクル時間	5年	
MAの取り扱い	代表1ケースで評価	

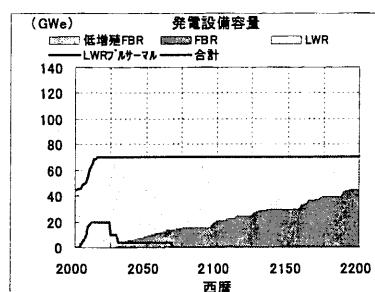
平成15年度 第1回R&amp;D報告会(2003.5.9)

## 4. シナリオ1の結果(1) (ウラン資源のリサイクル利用)

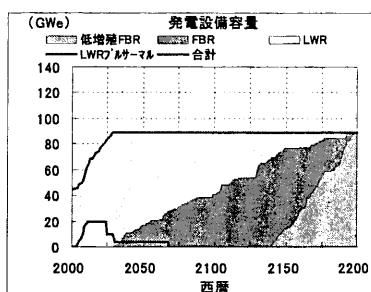
ケース1-1  
Na冷却大型MOX炉  
2030年導入、70GWe



ケース1-7  
水冷却大型MOX(BWR型)炉  
2030年導入、70GWe



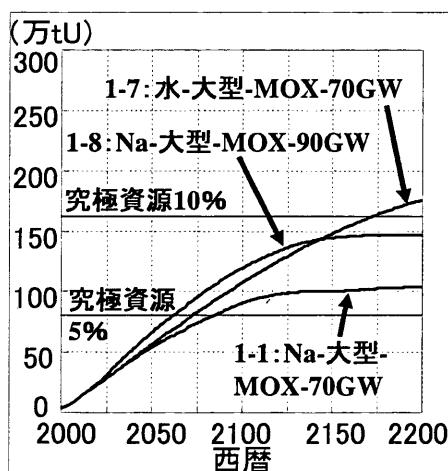
ケース1-8  
Na冷却大型MOX炉  
2030年導入、90GWe



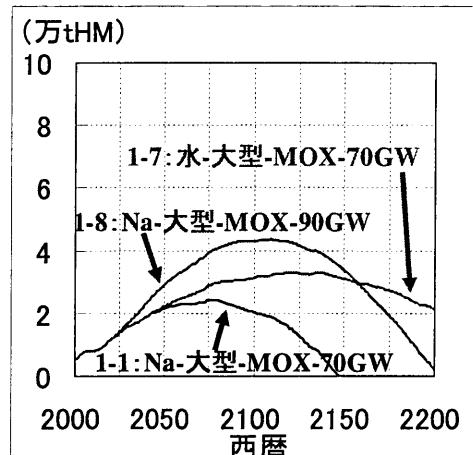
- 水炉の導入が遅い(2200年時点でもリプレース未了)が、他は炉型による差は大きくない(金属燃料炉は導入速度が若干速い)
- 設備容量が90GWeになると、導入に若干(大きくない)時間を要する

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 4. シナリオ1の結果(2)(ウラン資源のリサイクル利用)



天然ウラン累積需要量  
(70GWケース、水炉ケース、90GWケース)



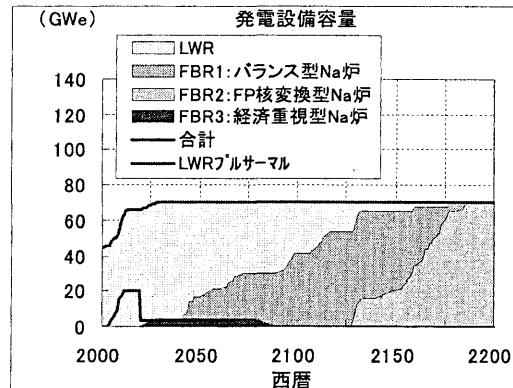
使用済燃料貯蔵量(冷却中を除く)  
(70GWケース、水炉ケース、90GWケース)

- 天然ウラン累積需要量については、70GWeの場合は概ね100万tU内外(水炉は大きい)。90GWeの場合は若干大きい
- 使用済燃料貯蔵についても、70GWeの場合は概ね2万~3万tHMで、2150年頃までに不要となる(水炉は長期間必要)。90GWeの場合は、4万tHM内外で2150~2200年頃まで貯蔵施設が必要となる

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 4. シナリオ2の結果 (プルトニウム利用技術の実践と環境保全)

ケース2  
Na冷却大型MOX炉2020年導入  
サイクル施設2040年導入  
設備容量70GWe  
増殖不要となった時点で、  
LLFP核変換を想定したFBR導入

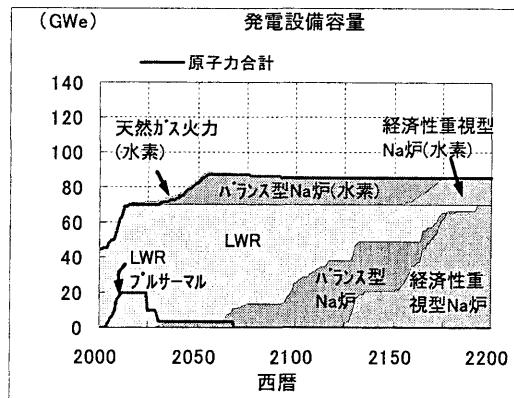


- 今回の評価では、諸量上の大ない影響なし
- 先行導入できるFBRは4.5GWe程度(軽水炉再処理量による)
- LLFP核変換そのものの諸量上の効果はFAMILY-EXでは解析できない  
(逆に言えば今回の評価では、LLFP核変換炉導入の影響なし)

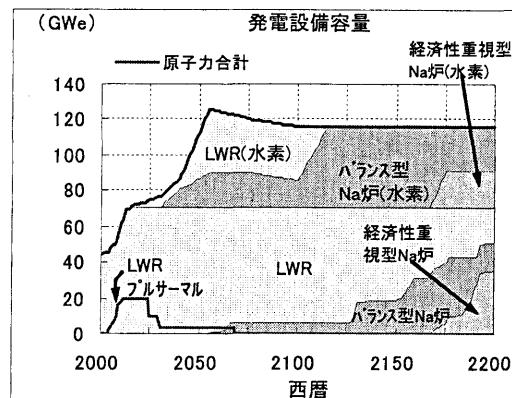
平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 4. シナリオ3の結果(1)(原子力の利用拡大)

ケース3-1  
Na冷却大型MOX炉2030年導入  
発電用70GWe  
水素製造用約20GWe相当



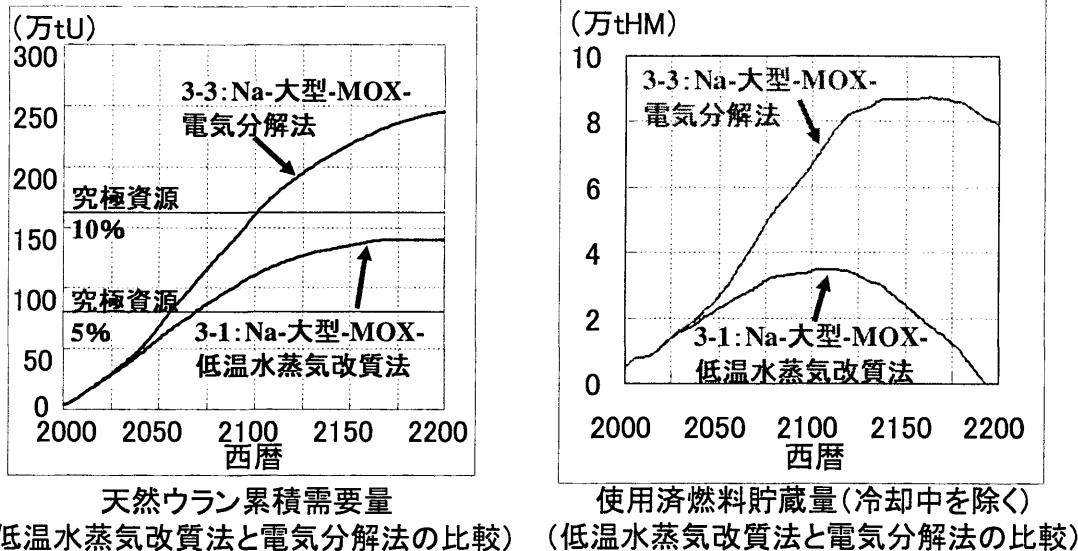
ケース3-3  
Na冷却大型MOX炉2030年導入  
発電用70GWe  
水素製造用約50GWe相当



- 水素製造用FBRの導入が約50GWe相当の場合、リプレースに時間をする

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 4. シナリオ3の結果(2)(原子力の利用拡大)



- 天然ウラン累積需要量については、水素製造用FBRの導入が約50GWe相当の場合は約250万tU(2200年時点)に達する
- 使用済燃料貯蔵についても、水素製造用FBRの導入が約50GWe相当の場合は8万tHM内外となり、2200年以降も貯蔵施設が必要となる

平成15年度 第1回R&D報告会(2003.5.9)

## 5. 中間とりまとめ本評価への課題

- 水炉は導入が遅く、天然ウラン累積需要量や使用済燃料貯蔵量が多い
- 分離・核変換技術の諸量上の効果を評価する場合、核種ごとの炉心装荷量、取出量データや簡易化した燃焼計算が必要(別の諸量評価ツールが必要)
- 水素製造のため、発電設備容量換算で約50GWe相当のFBR増設が必要な場合には、LWR再処理設備容量の増加、リプレース重視型炉心の採用等を検討する必要
- 先行導入、多目的利用の評価にあたっては、より現実的なシナリオ(細かい条件も必要)を作成する必要

## 第 2 回 R & D 報告会

[平成 15 年 7 月 4 日]



## 東海再処理施設酸回収工程のスチームジェット 腐食故障の調査結果(1)

# —マクロ観察結果と調査計画—

平成15年7月4日

核燃料サイクル開発機構 東海事業所  
再処理センター 処理部 化学処理第一課

白水 秀知

### 1. 報告内容

#### (1) マクロ観察結果と調査計画

マクロ的に欠陥状況を把握

○SJ内外の表面観察、欠陥断面観察

○PT検査、X線透過試験

※観察にはCCD拡大顕微鏡を使用



腐食メカニズムの解明にむけた調査、腐食要因のまとめ

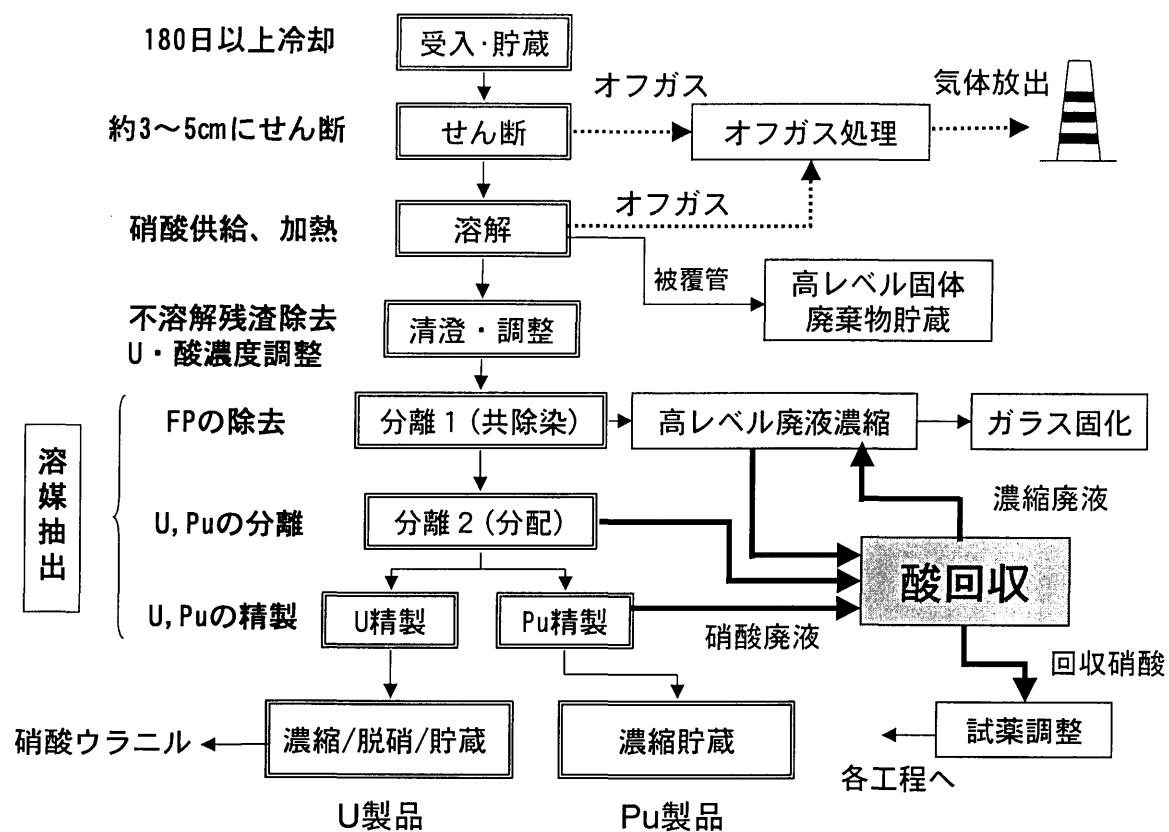
#### (2) 腐食部位の金属組織観察

#### (3) 腐食部位の温度評価

#### (4) 腐食要因のまとめと対策への反映 (腐食試験結果)

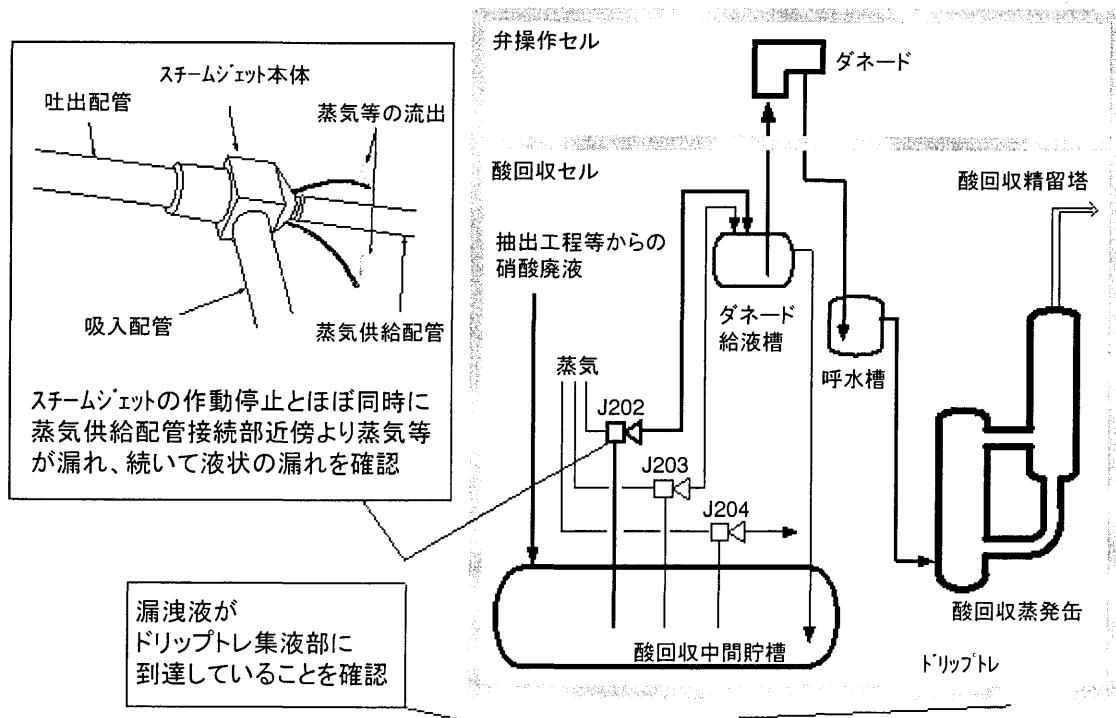
## 2. 再処理工程の概要

サイクル  
機構

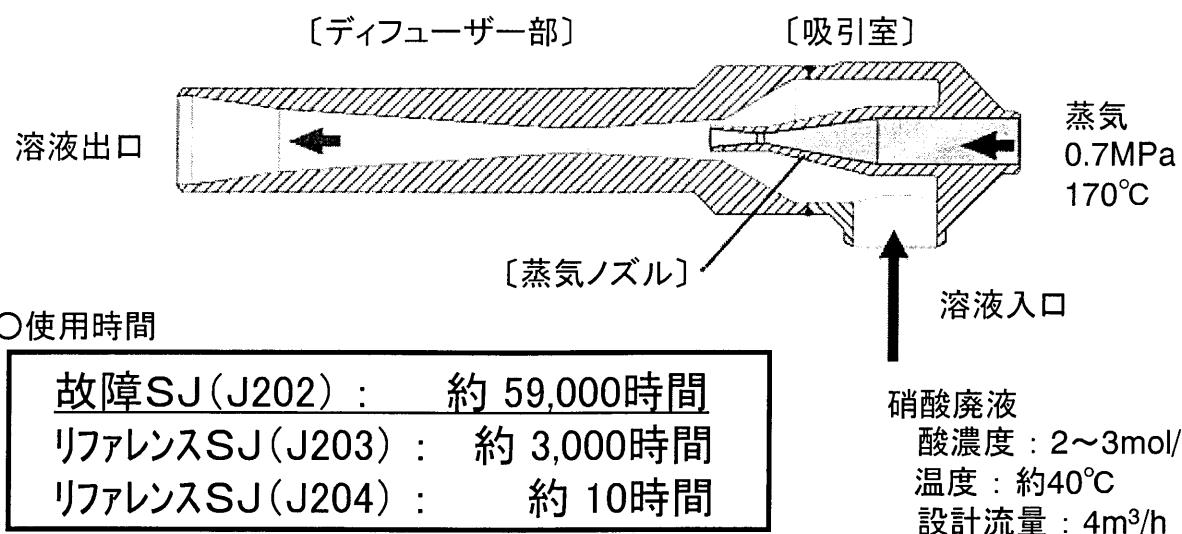
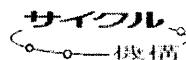


## 3. 酸回収工程の概要及び発生事象の確認

サイクル  
機構



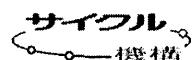
## 4. スチームジェットの使用環境



### ○硝酸廃液の液組成

硝酸 (mol/l)	U (g/l)	Pu (mg/l)	Ru (mg/l)	Np (mg/l)	Fe (mg/l)	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)
2~3	<0.01	<0.05	0.005 ~0.007	0.4 ~1.5	3.3 ~5.3	0.9 ~1.3	0.4 ~0.9

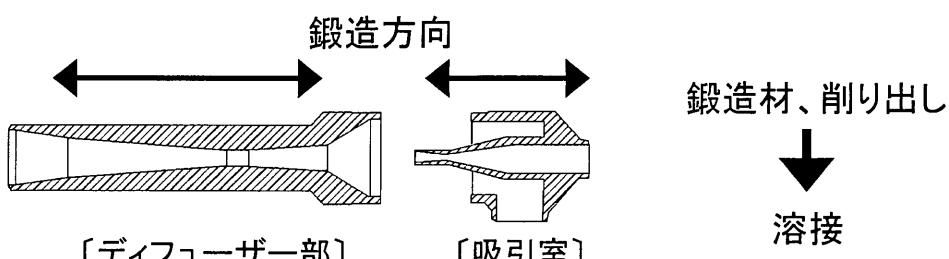
## 5. スチームジェットの材質



### ○製造時期

東海再処理施設建設時(約30年前) フランス製

### ○加工方法



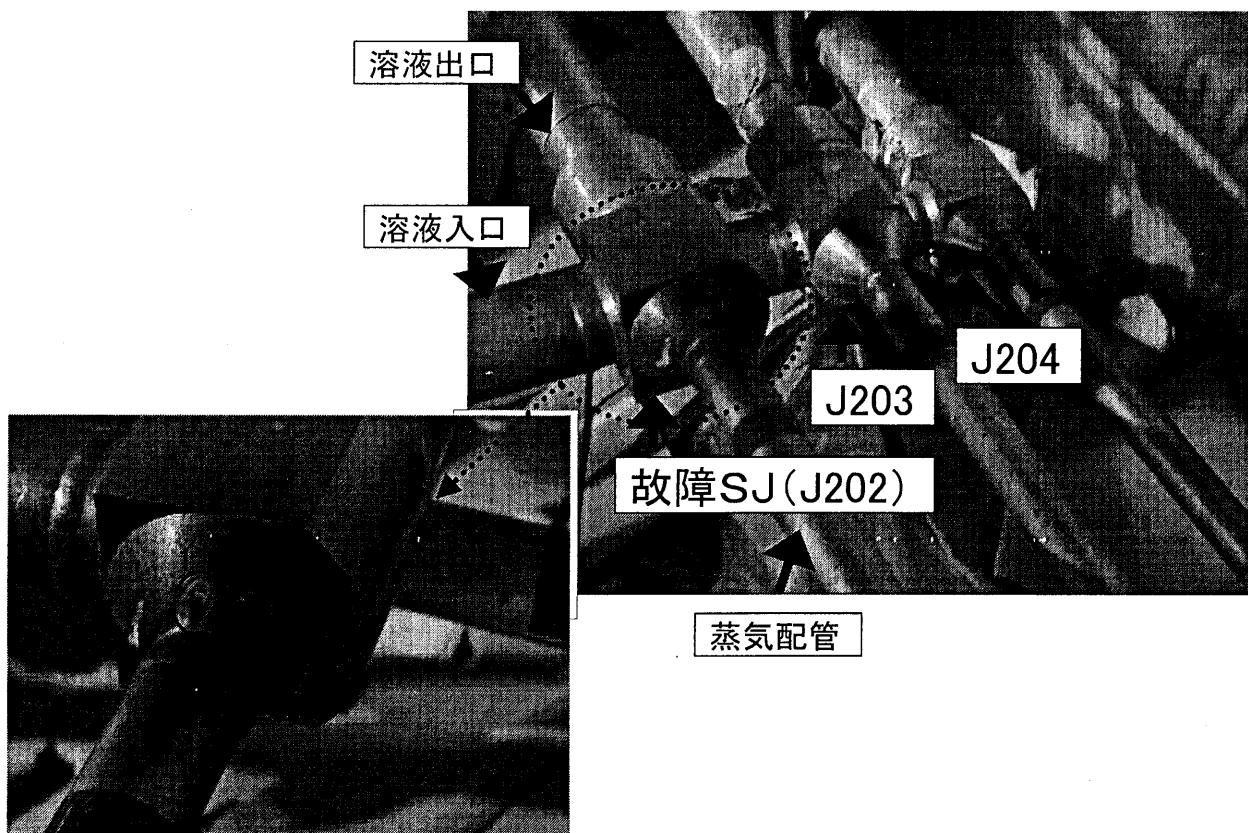
### ○材質

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
スチームジェット 吸引室 Z3CN1810 (ミルシート値)	0.015	0.47	1.75	0.033	0.014	10.00	17.30
JIS規格値 SUS304L	<0.03	<1.0	<2.0	<0.04	<0.03	9 ~ 13	18~20

→ 故障スチームジェットはSUS304L相当材

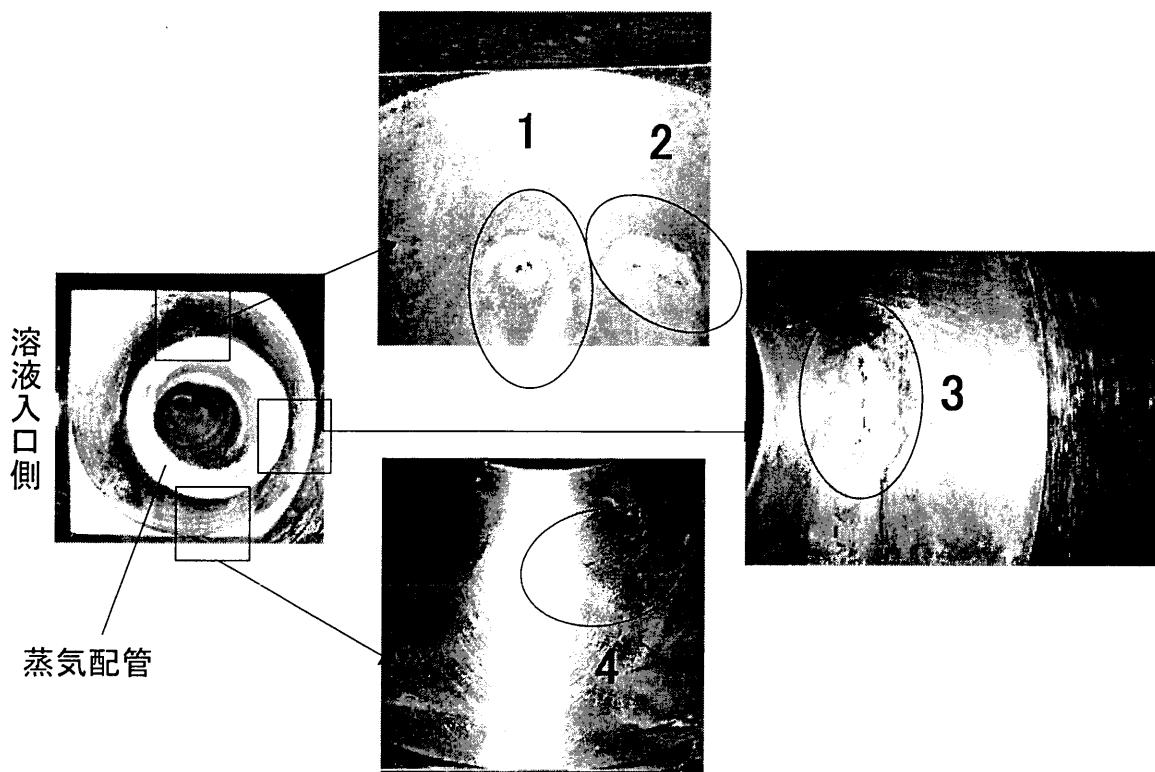
## 6 セル内観察

サイクル  
機構

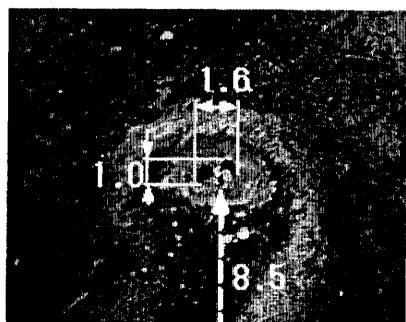


## 7. 外表面観察 — 故障SJ欠陥部 —

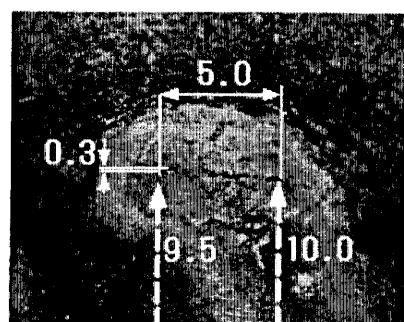
サイクル  
機構



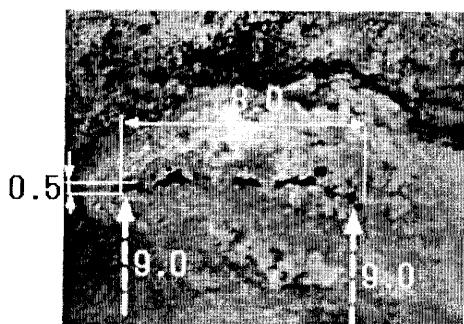
## 8. 外表面観察 一欠陥部拡大一

サイクル  
機構

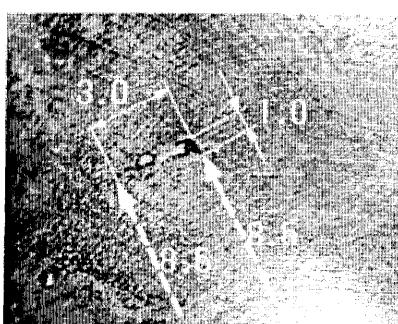
(1) 欠陥部1



(2) 欠陥部2



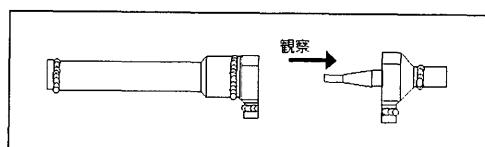
(3) 欠陥部3



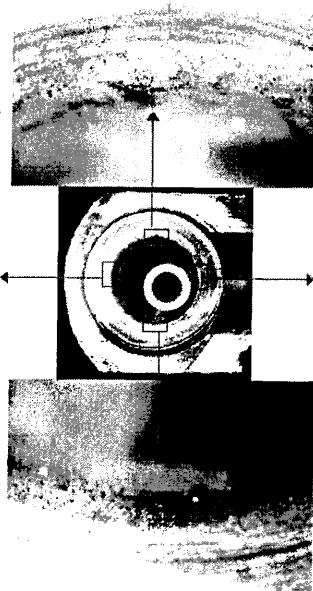
(4) 欠陥部4

※ 単位:mm  
写真下が蒸気配管側。  
矢印破線は蒸気配管からの距離を示す。  
写真により観察倍率は異なる。

## 9. 内表面観察 一ノズル付け根部拡大(1)一

サイクル  
機構

(溶液入口反対側)

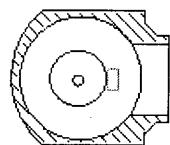
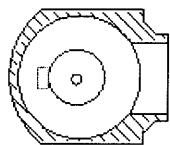


(溶液入口側)

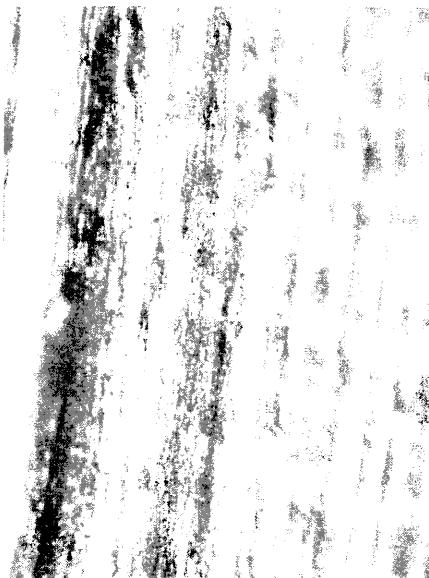
溶液入口側を除く部分 → 表面の荒れ、微小な孔を確認

## 10. 内表面観察 — ノズル付け根部拡大(2) —

サイクル  
機構



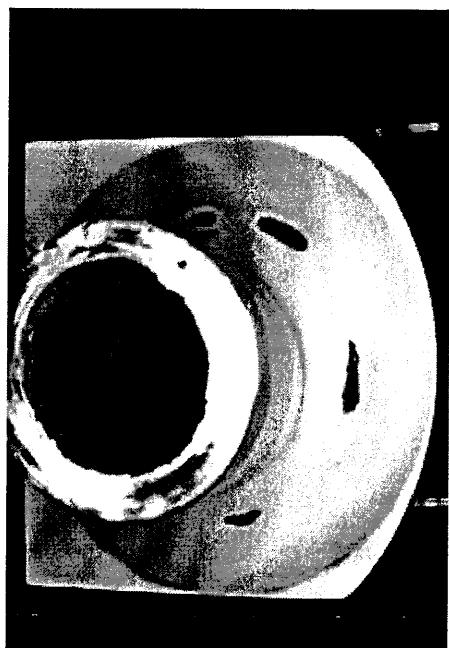
(1) 溶液入口反対側



(2) 溶液入口側

## 11. PT検査結果

サイクル  
機構



4箇所の欠陥部に赤色指示

(1) 外表面

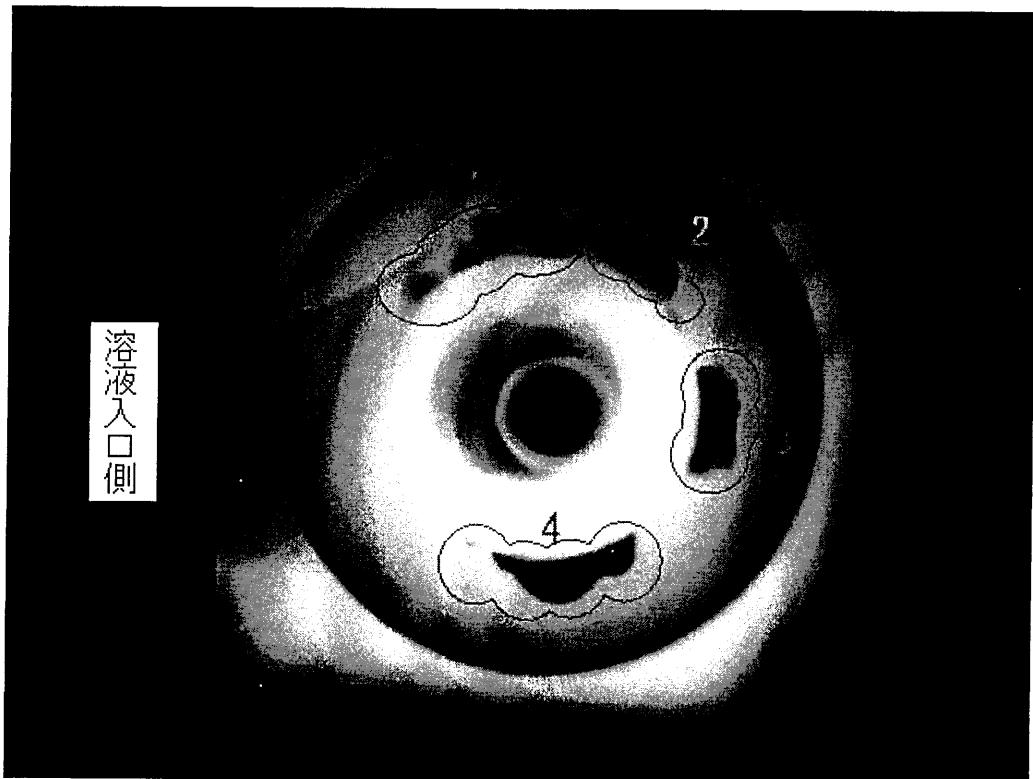


ノズル付け根付近  
溶液入口反対側3/4周に赤色指示

(2) 内表面

## 12. X線透過試験結果

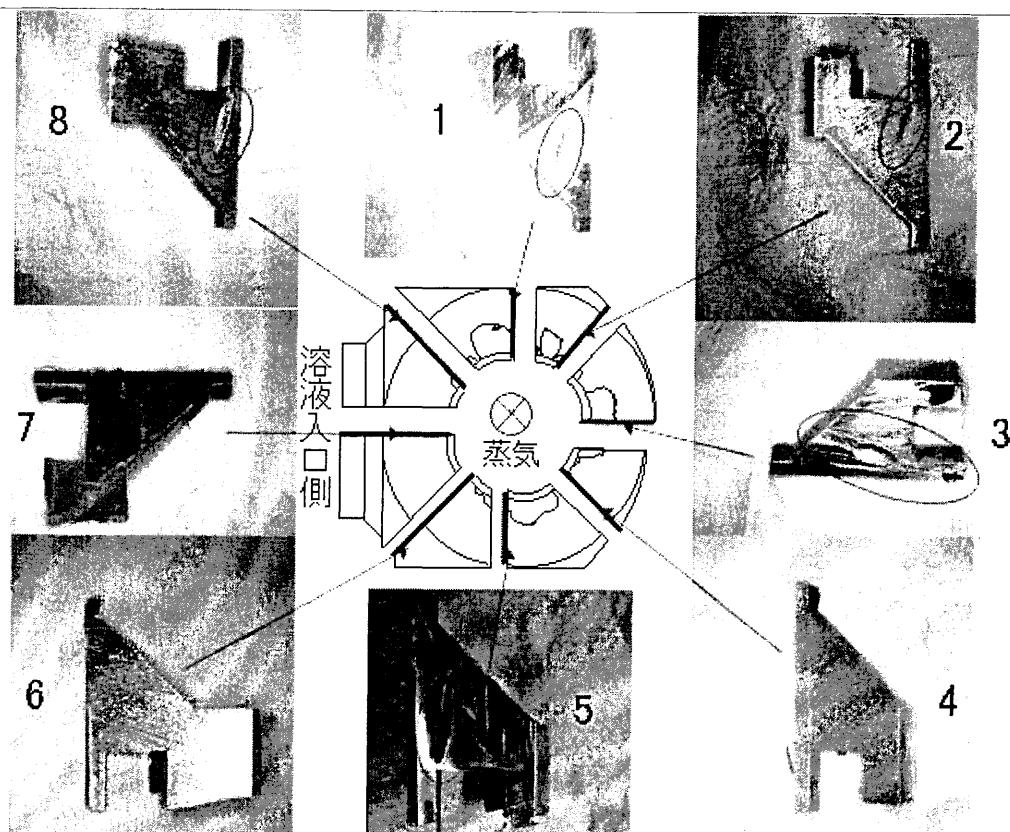
サイクル  
機構



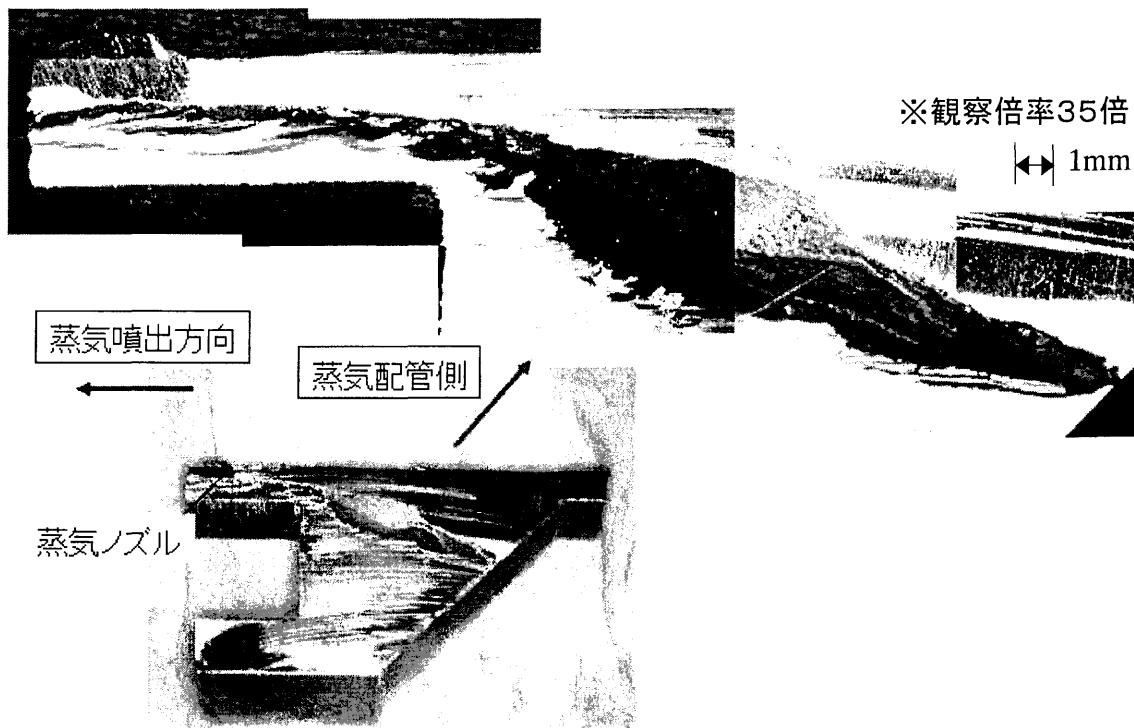
※蒸気配管側から照射

## 13. 斷面観察 — 切断面 —

サイクル  
機構



## 14. 断面観察 — 切断面3の拡大 —



## 15. マクロ観察のまとめ

## ○外表面

蒸気配管側表面に4箇所の欠陥

- ・同心円状、溶液入口反対側
- ・ワレではなく複数の孔が繋がった状況で腐食の特徴有

## ○内表面

吸引室内の蒸気ノズル付け根周辺に多数の微小な孔

- ・溶液入口側を除く部分
- ・PT検査にて赤色指示

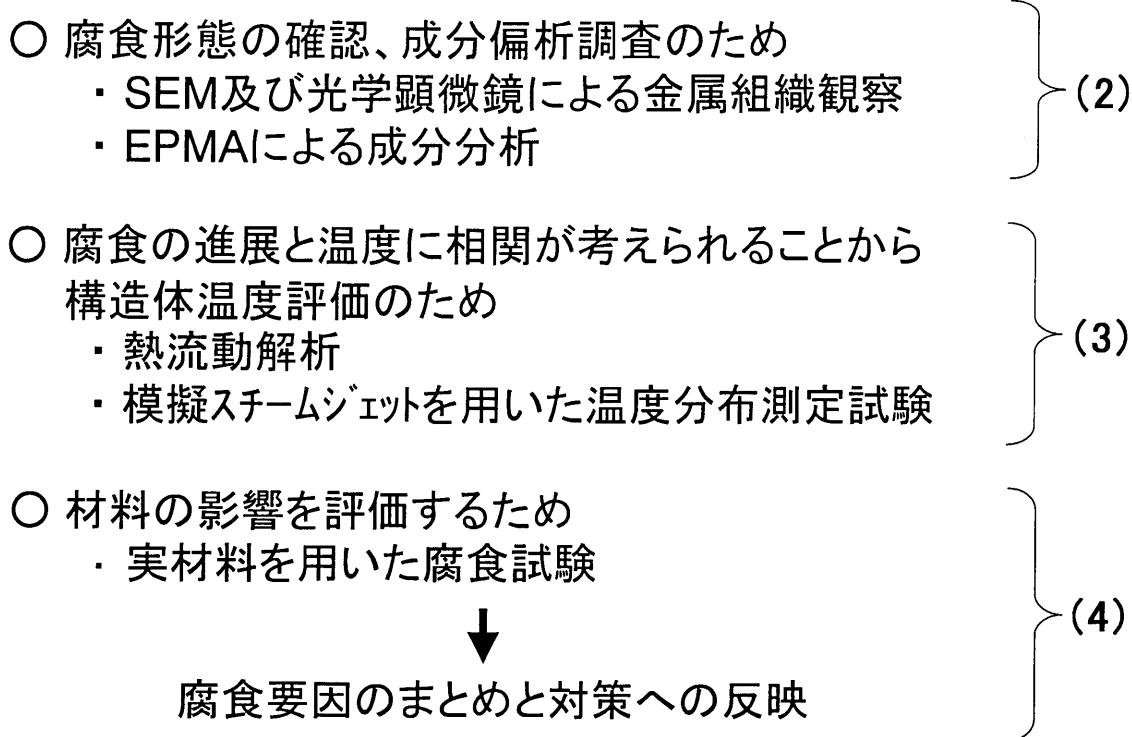
## ○構造体内部

構造体内部では蒸気配管から離れる方向に一定の角度で腐食が進行し大きな空洞を形成しながら外表面に到達

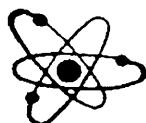
- ・空洞部は蒸気配管を下側とする翼断面形状
- ・蒸気ノズル付け根から数mm入ったところから空洞形成
- ・溶液入口反対側では、蒸気ノズル内部へも進行

## ○J203、J204 : マクロ的観察での欠陥はなし

## 16. 腐食メカニズム解明にむけた調査事項

- 腐食形態の確認、成分偏析調査のため
    - ・ SEM及び光学顕微鏡による金属組織観察
    - ・ EPMAによる成分分析
  - 腐食の進展と温度に相関が考えられることから構造体温度評価のため
    - ・ 熱流動解析
    - ・ 模擬スチームジェットを用いた温度分布測定試験
  - 材料の影響を評価するため
    - ・ 実材料を用いた腐食試験
- ↓
- 腐食要因のまとめと対策への反映
- 
- The diagram illustrates the investigation process. It starts with three main items in a vertical list, each preceded by a circle (○). Item 1 is '腐食形態の確認、成分偏析調査のため' with sub-points 'SEM及び光学顕微鏡による金属組織観察' and 'EPMAによる成分分析'. Item 2 is '腐食の進展と温度に相関が考えられることから構造体温度評価のため' with sub-points '熱流動解析' and '模擬スチームジェットを用いた温度分布測定試験'. Item 3 is '材料の影響を評価するため' with a sub-point '実材料を用いた腐食試験'. A large bracket on the right side groups these three items under the label '(2)', '(3)', and '(4)' respectively. Below these three groups, a downward arrow points to the final outcome: '腐食要因のまとめと対策への反映'.

# 東海再処理施設酸回収工程の スチームジェット腐食故障の調査結果 —腐食部位の金属組織観察—



照射施設運転管理センター

燃料材料試験部

照射燃料集合体試験室

田 中 康 介

## 報告内容

Japan Nuclear Cycle Development Institute



(1) マクロ観察結果と調査計画

(2) 腐食部位の金属組織観察

(観察及び分析の着目点)

- ・腐食形態の把握
- ・介在物の有無及びマトリックスの元素分布確認

(試験項目)

- ・光学顕微鏡(OM)観察 ---- 研磨後, エッティング後組織
- ・走査型電子顕微鏡(SEM)観察 ---- 二次電子像
- ・X線マイクロアナライザ(EPMA)分析 ---- 定性, 線, 面分析

(3) 腐食部位の温度評価

(4) 腐食要因のまとめと対策への反映

## 試験対象試料

Japan Nuclear Cycle Development Institute



東海事業所  
再処理施設

マクロ観察・試料切り出し



・故障したスチームジェット (SJ)

⇒ 59000時間使用

・リファレンス用スチームジェット (R-SJ)

⇒ SJと使用条件及び材料規格が同じで、  
3000時間使用したスチームジェット

大洗工学センター  
照射燃料集合体試験施設(FMF)

金属組織観察

核燃料物質使用施設であるFMFの  
使用目的を変更する許認可を実施

## 試料採取位置

Japan Nuclear Cycle Development Institute



SJ

### ミクロ組織観察の着目点

### 試料採取位置

- ✓ 欠陥及び空洞が観察された部位 ----- 溶液入口反対側
- ✓ 欠陥及び空洞が観察されなかった部位 --- 溶液入口側
- ✓ 溶液と接する部位 ----- 吸引室内表面近傍
- ✓ 吸引室内表面での変色箇所 ----- 蒸気ノズル付け根近傍

R-SJ

✓ SJで欠陥及び空洞が観察された位置に相当する部位

## 観察及び分析対象面

Japan Nuclear Cycle Development Institute



鍛造加工により材料が流れている方向：加工フロー方向

加工フロー方向



(断面図)

蒸気ノズル

加工フロー方向と垂直

加工フロー方向と平行

吸引室

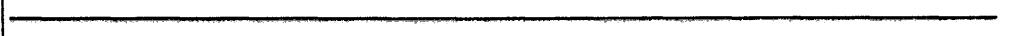
蒸気ノズル

吸引室

蒸気ノズル

溶液入口

溶液入口

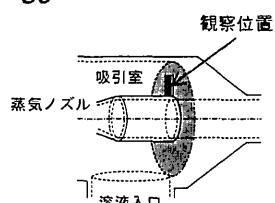


## 吸引室内表面観察結果

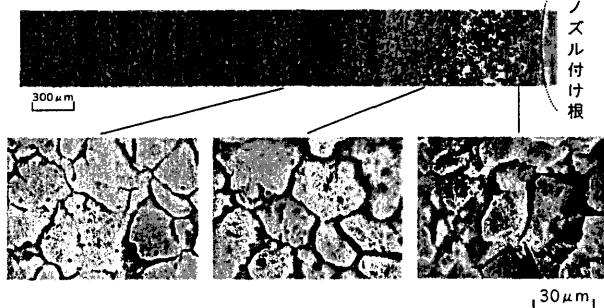
Japan Nuclear Cycle Development Institute



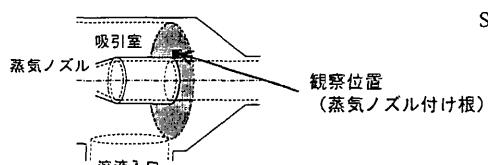
SJ



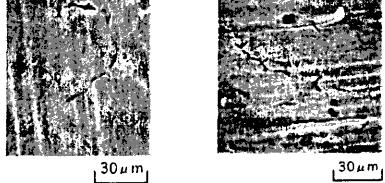
SEM



R-SJ



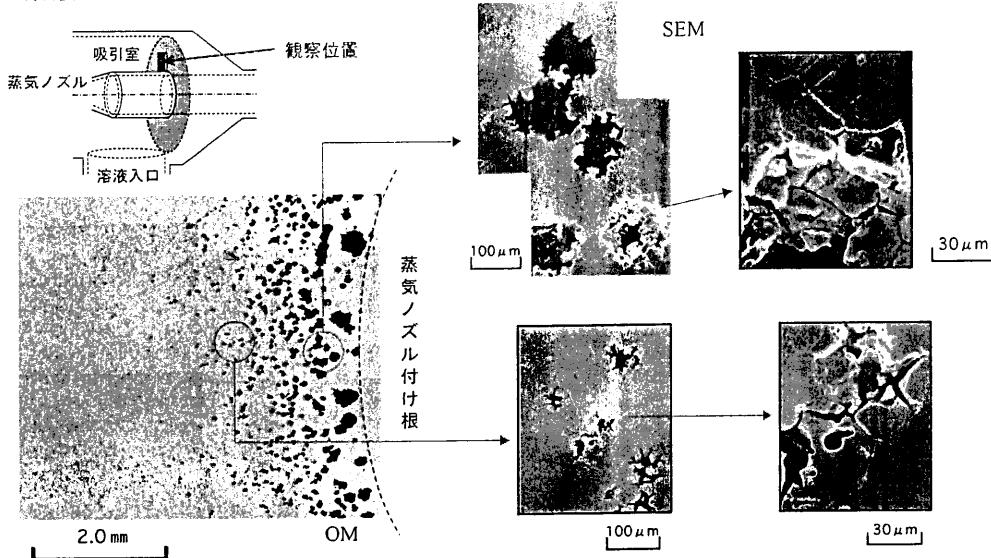
SEM



## 断面組織観察結果 1

Japan Nuclear Cycle Development Institute

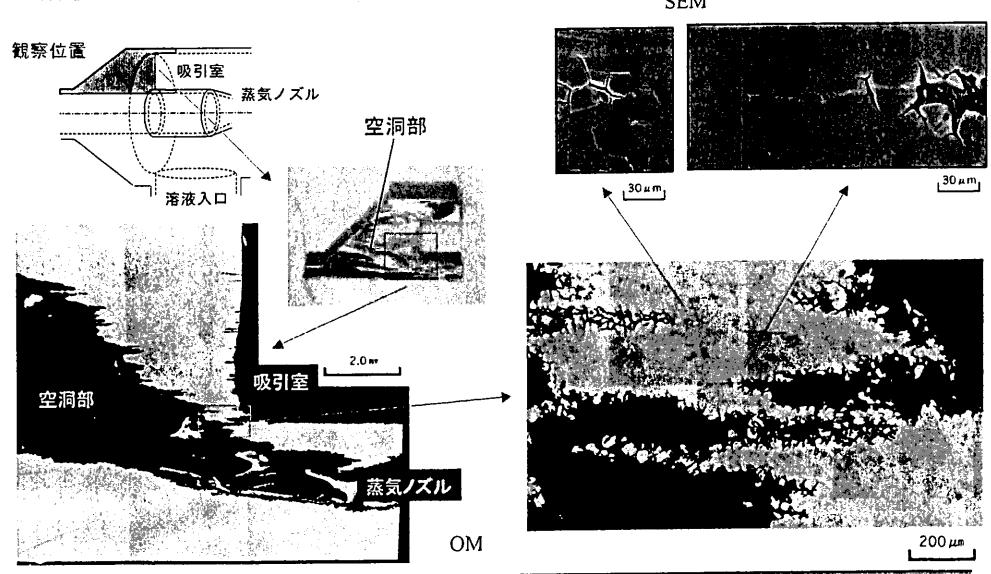
SJ溶液入口反対側：加工フロー一垂直面

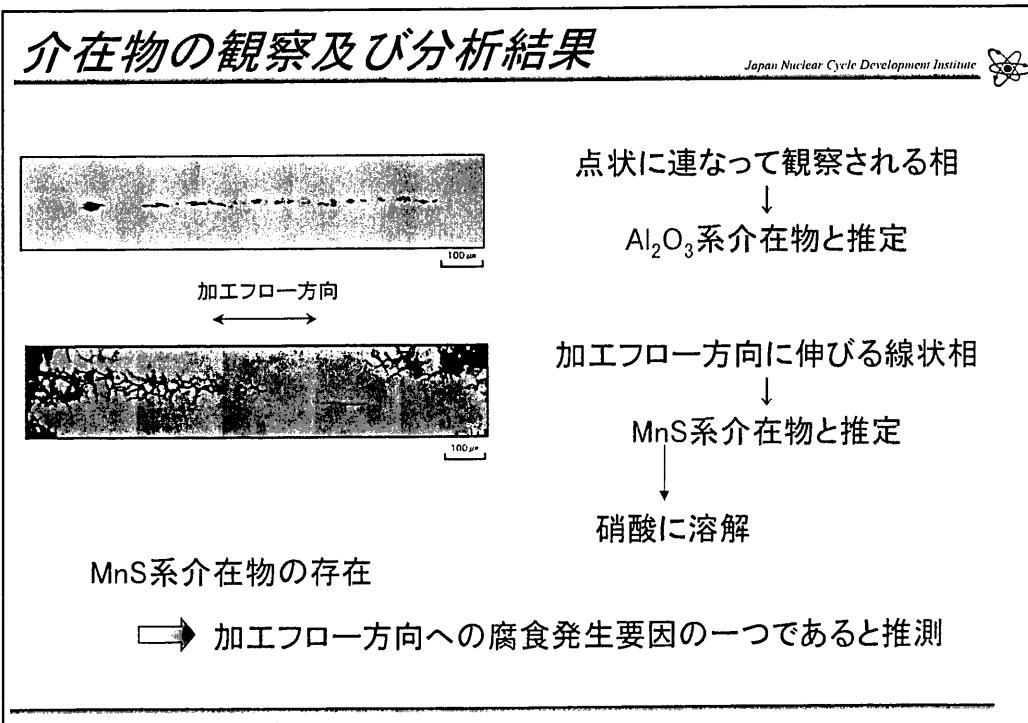
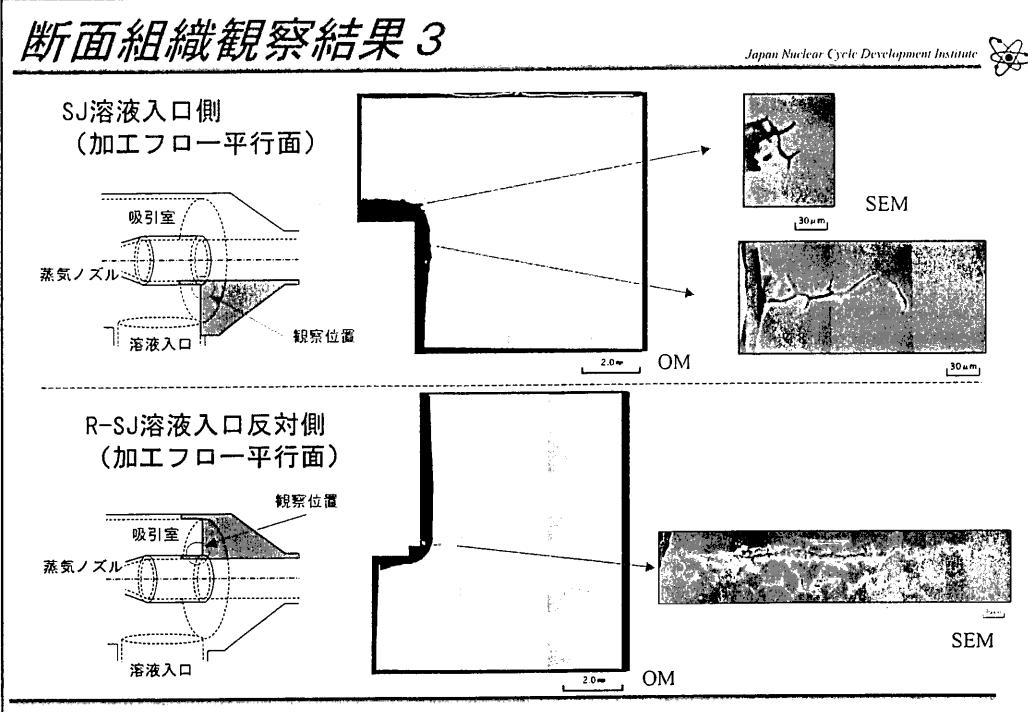


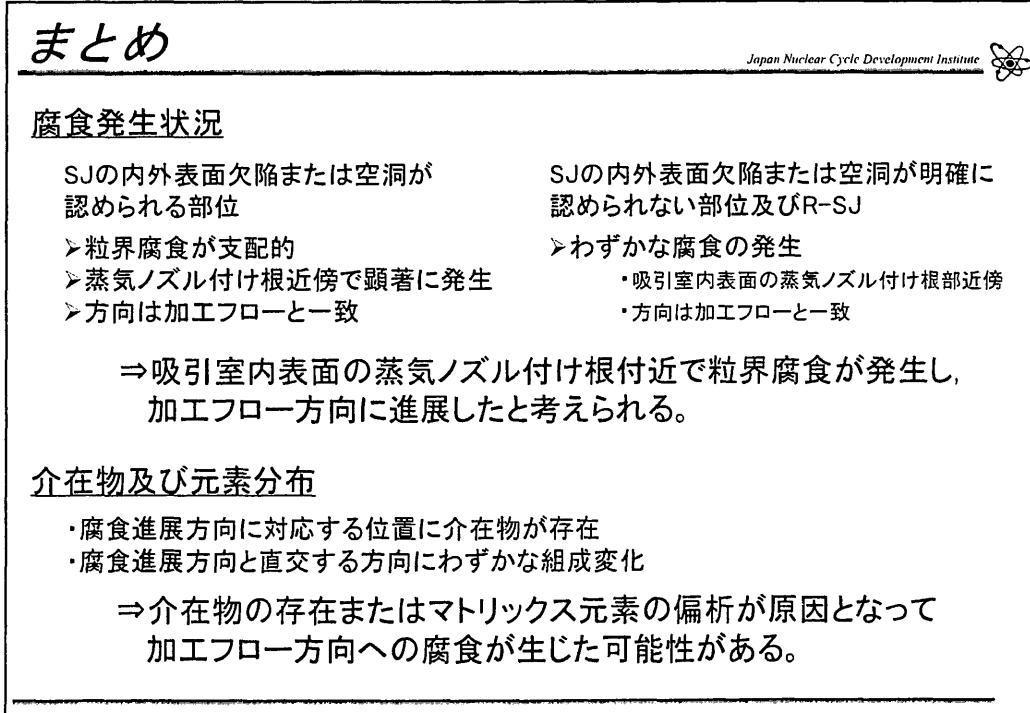
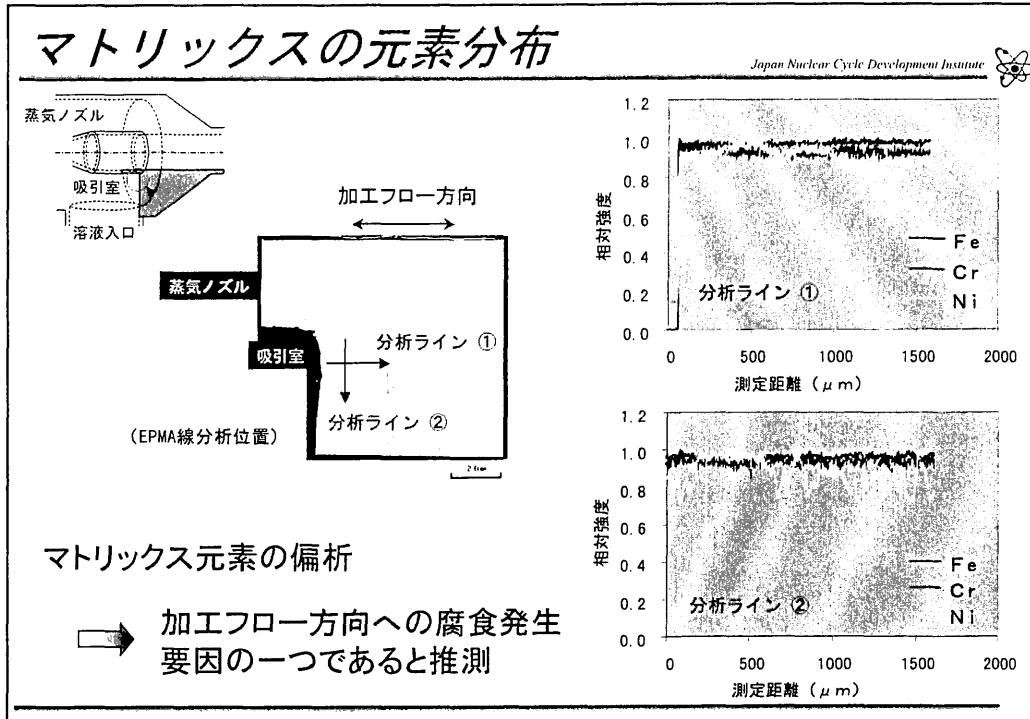
## 断面組織観察結果 2

Japan Nuclear Cycle Development Institute

SJ溶液入口反対側：加工フロー一平行面







## 東海再処理施設酸回収工程の スチームジェット腐食故障の調査結果

### (3)腐食部位の温度評価

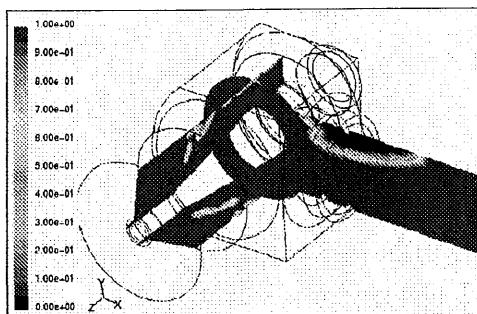
R&D報告会  
2003年7月4日

大洗工学センター  
流体計算工学研究グループ  
山口 彰

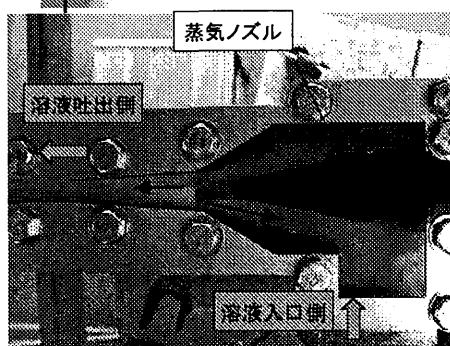
## 解析の流れ

- 運転条件での解析
  - 入口流速の影響を評価
    - 吸引セル内部が二相状態である可能性
  - 腐食孔が存在するときの温度分布
    - 腐食の進行方向と温度分布
- 試験の予備検討
  - 熱電対孔をあけたときの温度分布への影響
  - 改良スチームジェットの温度評価

## ボイド関数分布



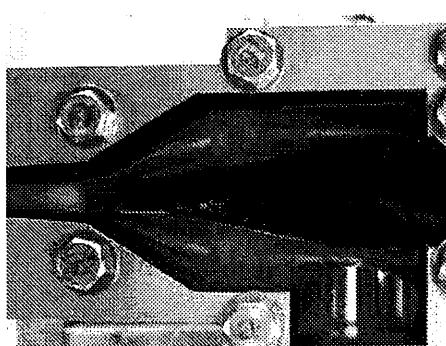
## スチームジェット内部流況の観察



(1)起動時の状態

(特徴)

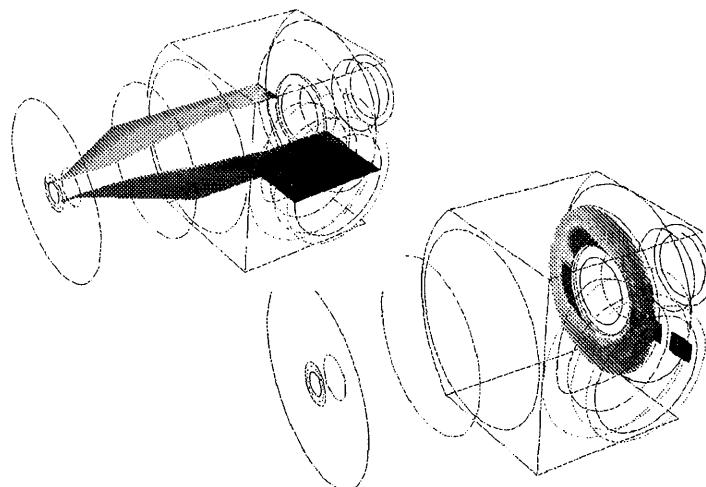
- 起動時、吸引室内部は気相が残存し流れが不均一
- 吸引室内部の気相は排出され、円滑な流動状態



(2)送液中の流动状態

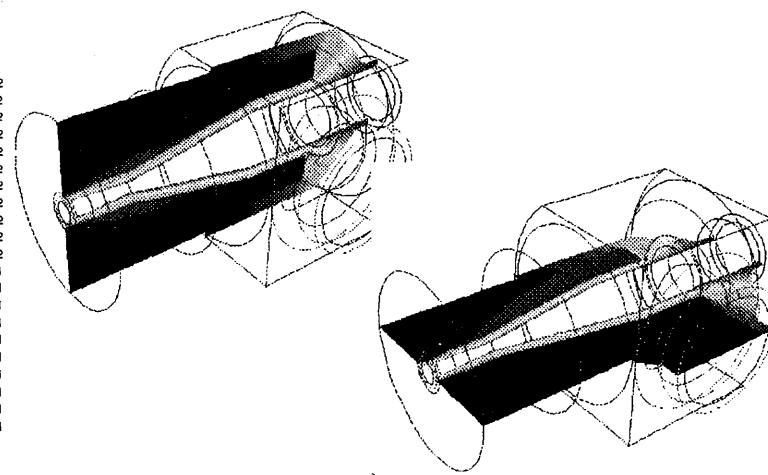
## 内部流体温度

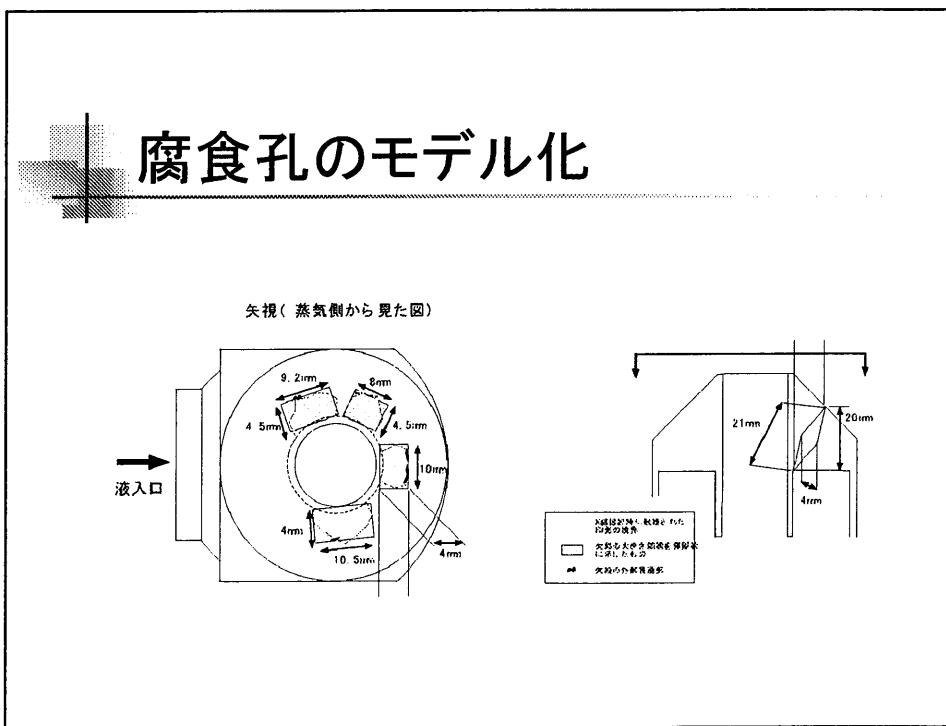
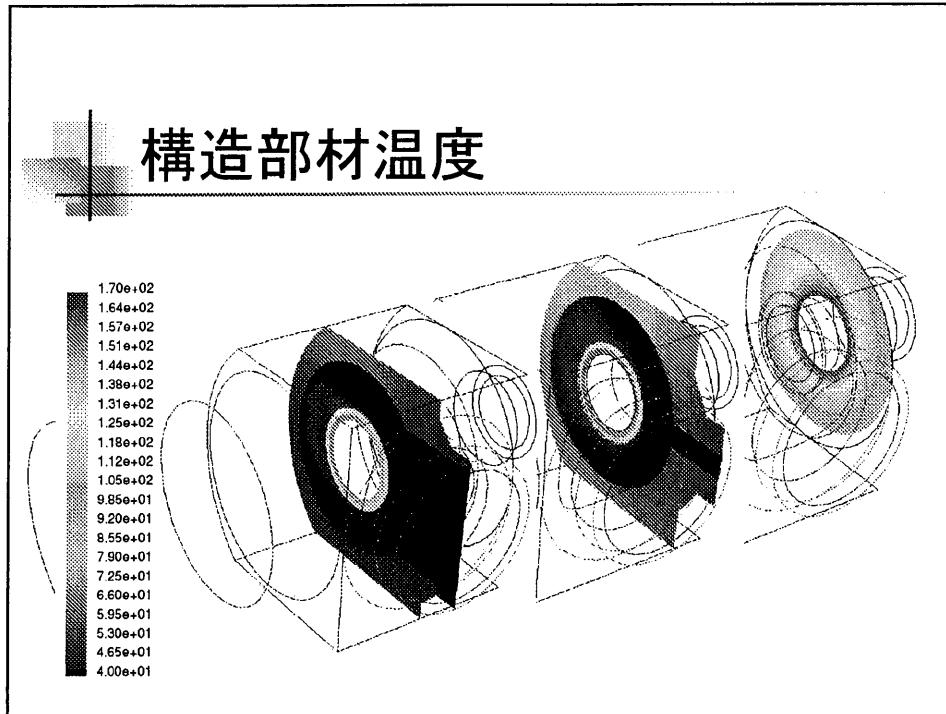
4.50e+01  
4.48e+01  
4.45e+01  
4.43e+01  
4.40e+01  
4.38e+01  
4.35e+01  
4.33e+01  
4.30e+01  
4.28e+01  
4.25e+01  
4.23e+01  
4.20e+01  
4.18e+01  
4.15e+01  
4.13e+01  
4.10e+01  
4.08e+01  
4.05e+01  
4.03e+01  
4.00e+01

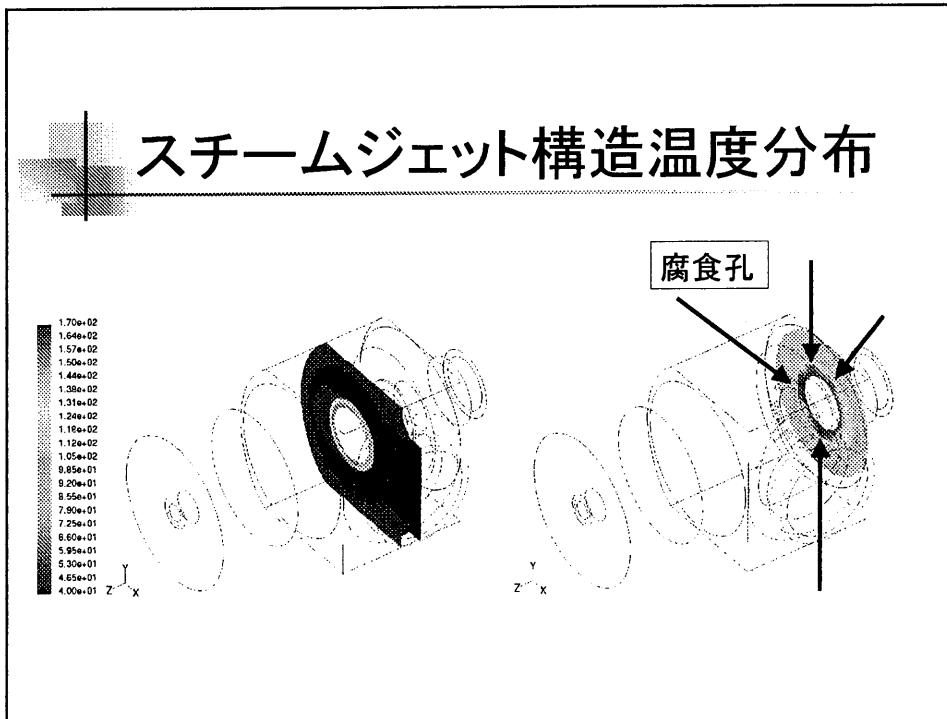
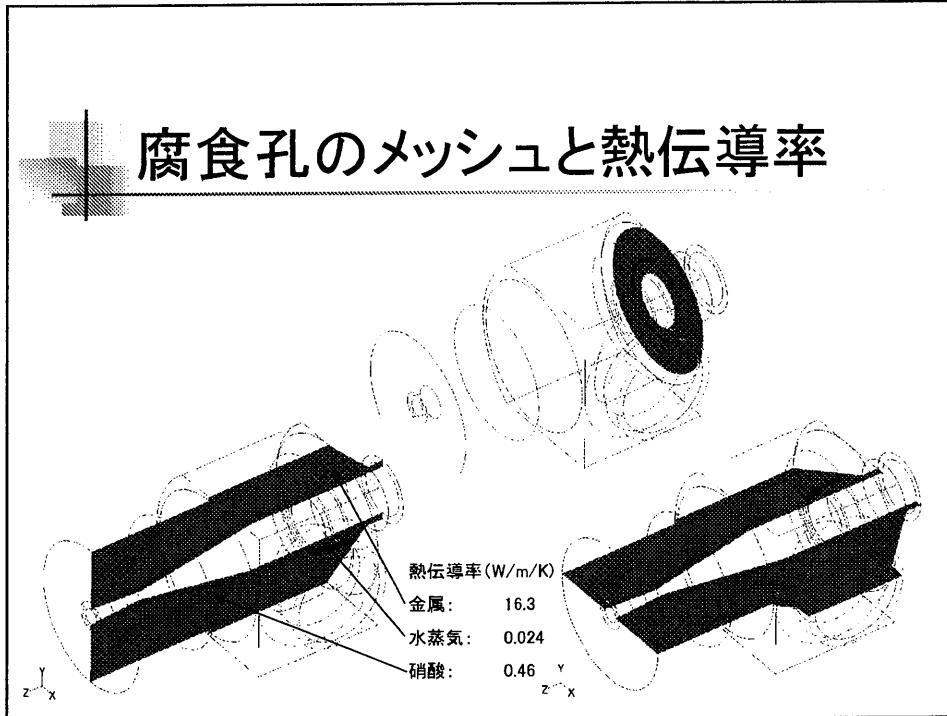


## 構造部材温度

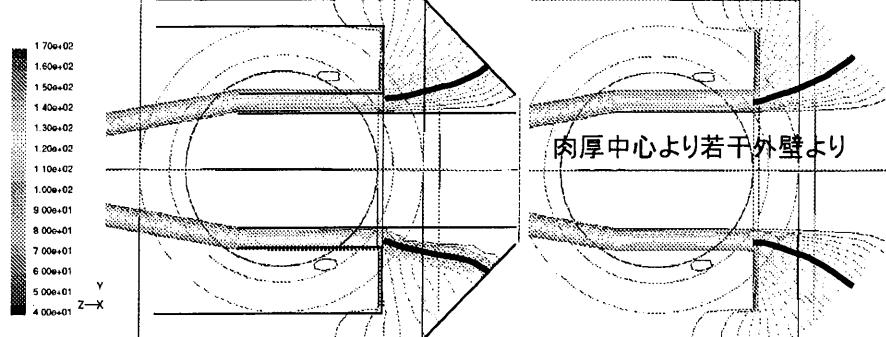
1.70e+02  
1.64e+02  
1.57e+02  
1.50e+02  
1.44e+02  
1.38e+02  
1.31e+02  
1.24e+02  
1.18e+02  
1.12e+02  
1.05e+02  
9.95e+01  
9.20e+01  
8.55e+01  
7.90e+01  
7.25e+01  
6.60e+01  
5.95e+01  
5.30e+01  
4.65e+01  
4.00e+01





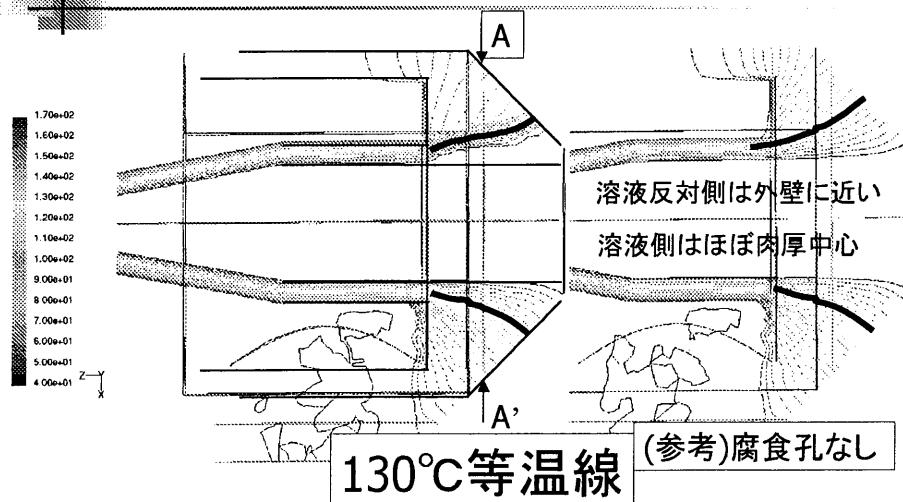


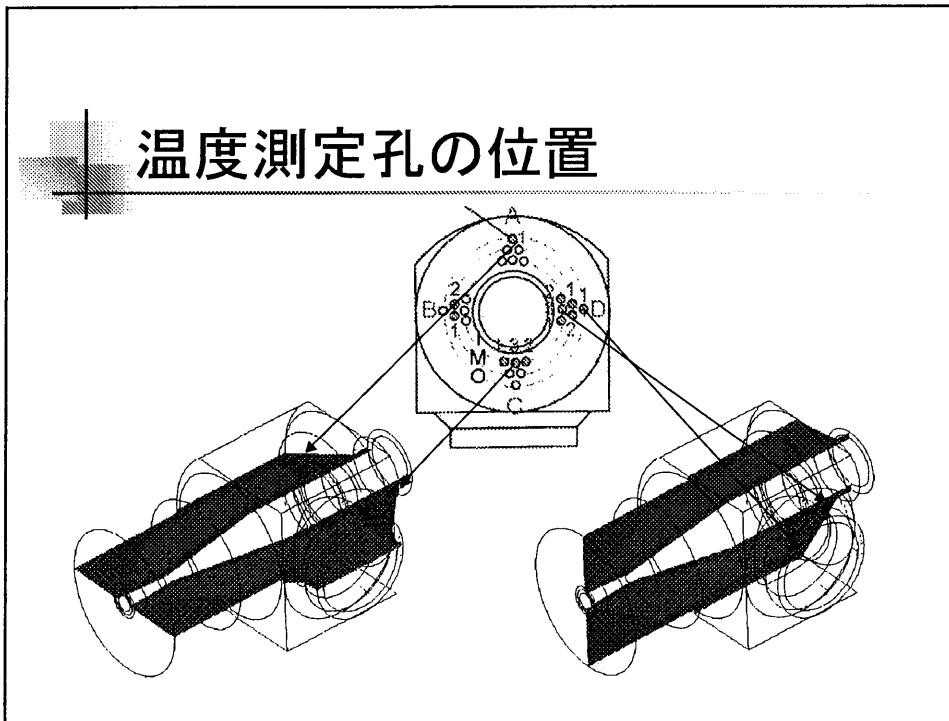
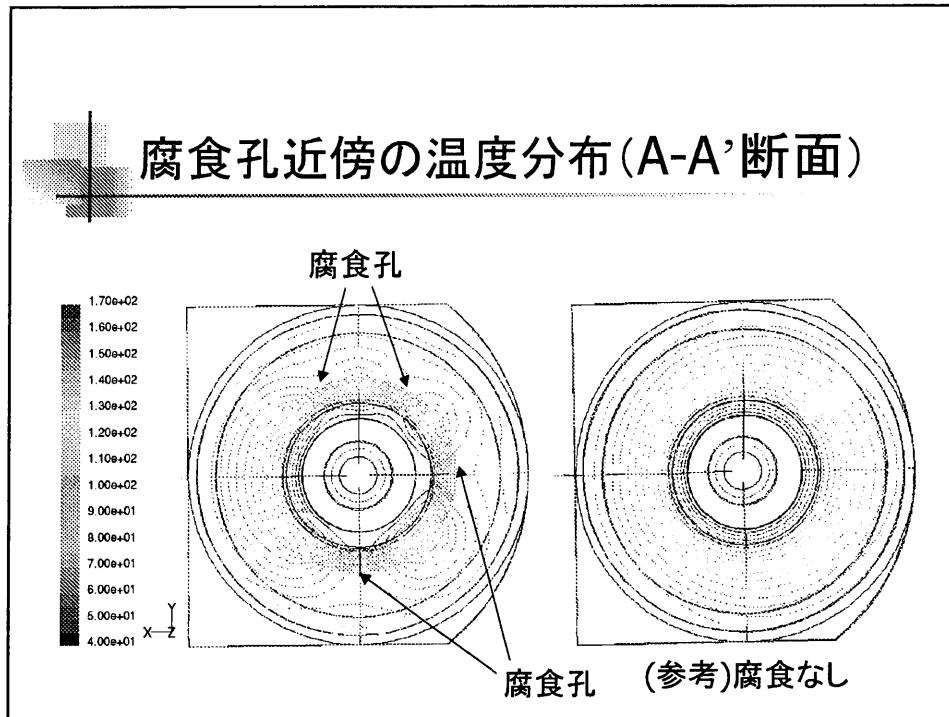
## 腐食孔近傍温度分布(鉛直断面)



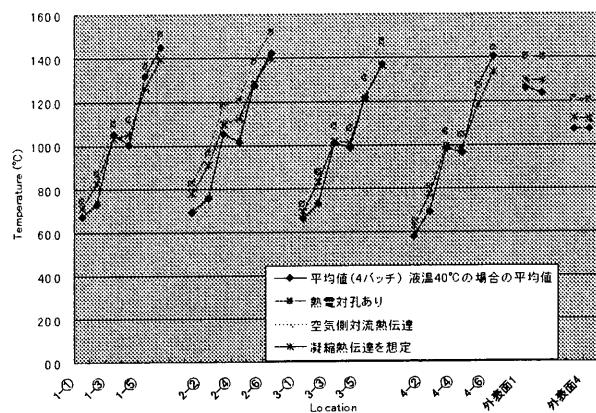
130°C等温線 (参考)腐食孔なし

## 腐食孔近傍温度分布(水平断面)

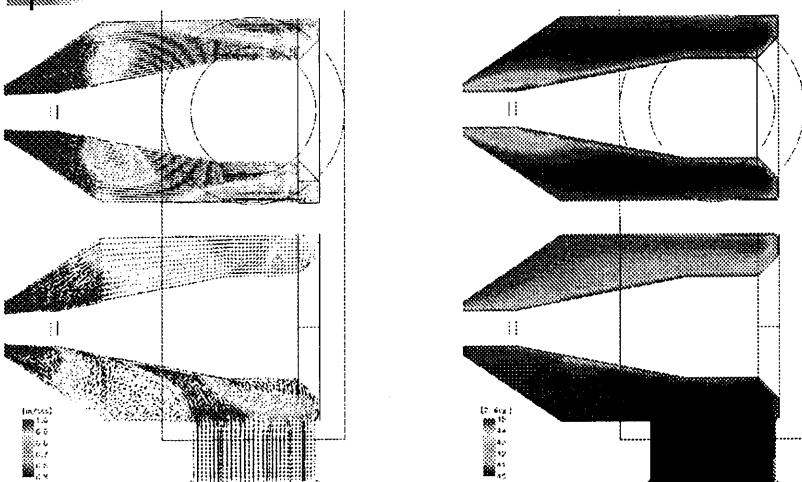




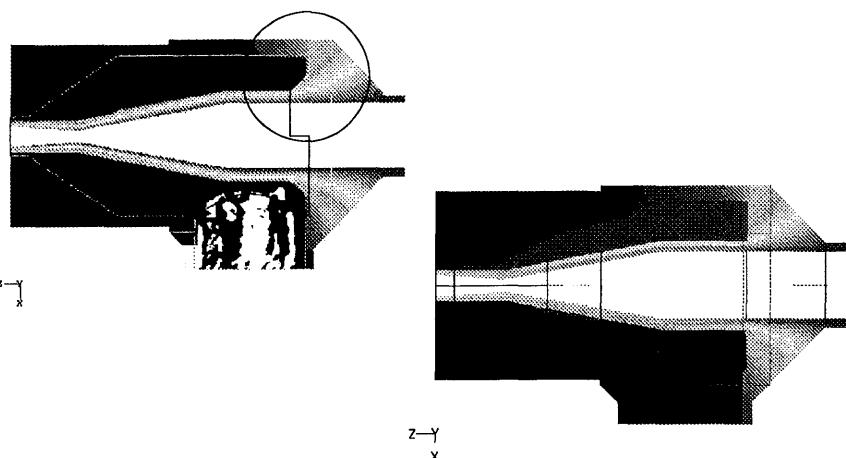
## 温度測定試験との比較



## 改良スチームジェット 流速と温度



## 蒸気ジェット部の温度分布



## まとめ

- 热流动特性
  - スチームジェット内部は液相、上下対称；左右非対称
- 溶液温度と腐食状況
  - 腐食が顕著に認められた部分の溶液温度は最も高い。
- 構造体温度と腐食状況
  - 腐食起点と考えられる蒸気ノズル付け根部は、吸引室内部の接液部の中で最も温度が高い。
  - 腐食の認められなかった溶液入口側の構造体温度は相対的に低い。
- 空洞部の温度
  - 空洞部の温度は、内部と外表面の測定結果から約120°C前後と考えられる。
- 改良形状により温度分布は改善



## 東海再処理施設酸回収工程のスチームジェット 腐食故障の調査結果(4)

### — 腐食要因のまとめと対策への反映 —

平成15年7月4日

核燃料サイクル開発機構 東海事業所  
再処理センター 処理部 化学処理第一課

林 晋一郎

### 1. 報告内容



- (1) マクロ観察結果と調査計画
- (2) 腐食部位の金属組織観察
- (3) 腐食部位の温度評価
- (4) 腐食要因のまとめと対策への反映

#### ○ 腐食試験

浸せき試験

温度の影響評価試験

#### ○ 腐食原因のまとめ

#### ○ 対策（管理への反映事項）

## 2. 腐食試験の目的



### ○観察及び温度評価からの知見

- ・腐食は鍛造面に生じた微少な孔から進行
- ・材料の加工方向への腐食進行が著しい。

### 1. 浸せき試験

- ・鍛造面での腐食起点の確認
- ・実材料により腐食の異方性の再現性を評価
- ・異方性を抑えた新材料(R-SUS材)の効果確認

### 2. 伝熱面試験

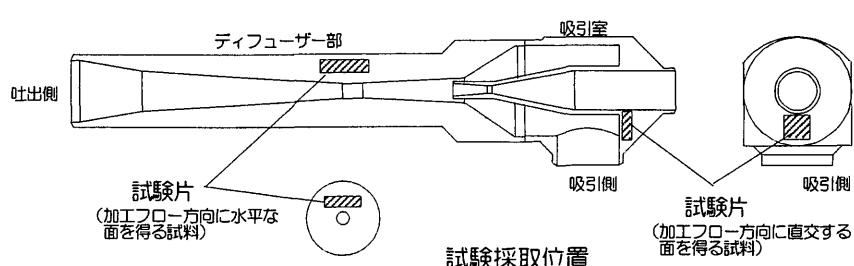
- ・実材料の腐食への温度影響を評価
- ・特に硝酸沸騰面の状態確認

## 3. 腐食試験(浸せき試験)



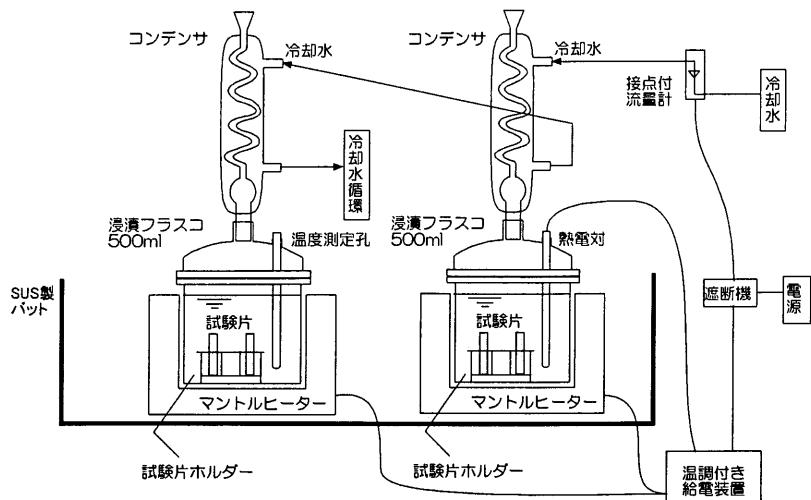
- －スチームジェットから採取した試験片の腐食状況の観察を行い、腐食メカニズムを推定する。
- －鍛造方向(加工フロー)の腐食への影響を確認する。
- －加工フロー腐食防止に効果のある、2次溶解法(ESR)で製作したステンレス鋼の腐食試験を行い比較する。

### ・組成



	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	備考
スチーム ジェット	0.027	0.47	1.67	0.024	0.010	9.26	17.68	ディフューザー側 Φ65鋼棒
	0.015	0.47	1.75	0.033	0.014	10.00	17.30	吸引室側 Φ90鋼棒
参照 R-SUS 304ULC SA材	0.010	0.22	0.17	0.007	0.001	10.28	18.07	ESR クラスSA
JIS SUS304L	<0.03	<1.0	<2.0	<0.04	<0.03	9~13	18~20	

## 4. 腐食試験装置



浸せき試験装置

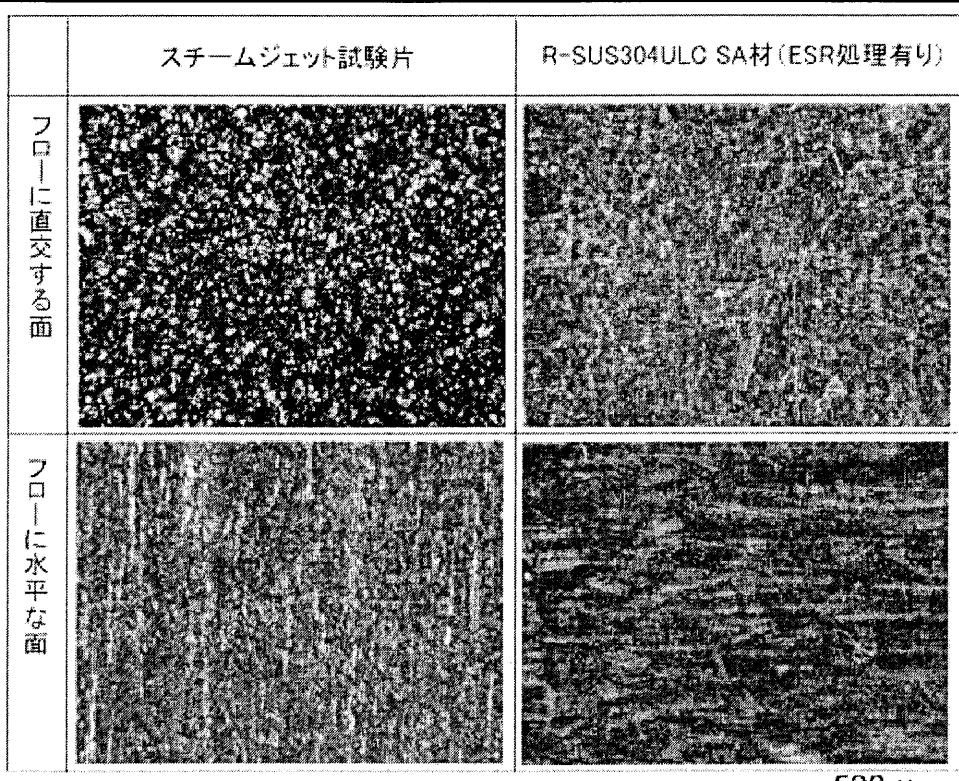
## 試験条件(加速条件)

① 8N沸騰硝酸  
(液の更新は無し)

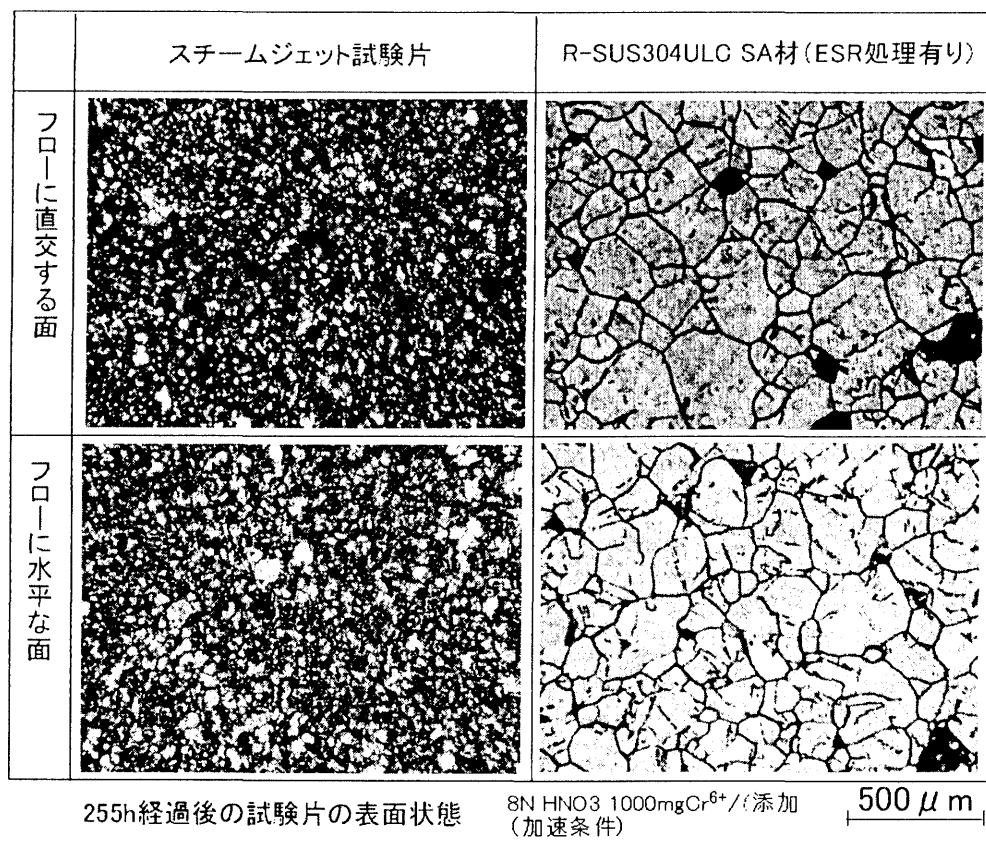
② 8N沸騰硝酸  
1000mgCr<sup>6+</sup>/ℓ添加  
(液の更新は無し)

約48時間毎に取り出し、  
表面観察、重量測定を実施。  
延べ255h浸せきした。

## 5. 腐食試験結果 その1 (8N硝酸)



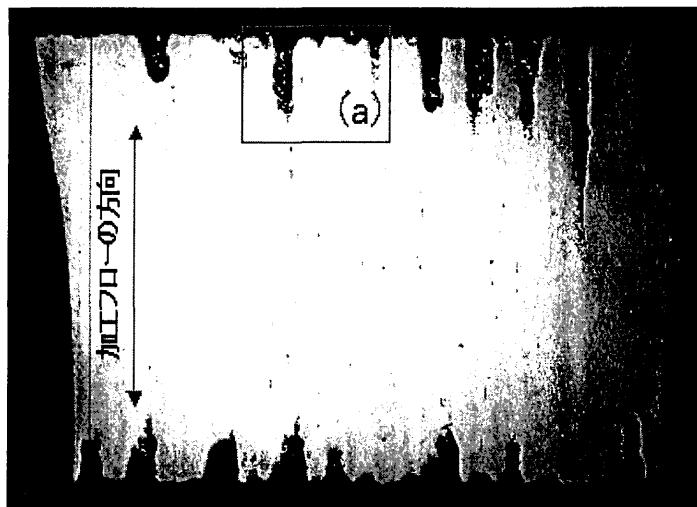
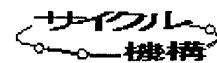
## 6. 腐食試験結果 その2 (8N硝酸+Cr<sup>6+</sup>添加)



## 7. 腐食試験結果

試験片 材質	試験条件	試験片の表面と加工 フロー方向の関係	腐食速度(g/m <sup>2</sup> ·h)				
			0	1.0	2.0	3.0	4.0
スチーム ジェット 試料	8mol/l 硝酸 沸騰条件	加工フローに直交する面					
		加工フローに水平な面	□				
	8mol/l 硝酸 + 1g/l Cr(VI)添加 沸騰条件	加工フローに直交する面					
		加工フローに水平な面					
R-SUS 304ULC· SA材	8mol/l 硝酸 沸騰条件	加工フローに直交する面	□				
		加工フローに水平な面	□				
	8mol/l 硝酸 + 1g/l Cr(VI)添加 沸騰条件	加工フローに直交する面	□				
		加工フローに水平な面	□				
		加工フローに水平な面	□				

## 8. 腐食試験結果 断面

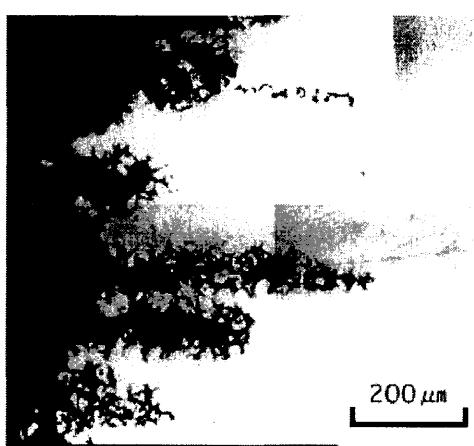
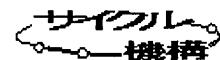


(a) 部拡大

スチームジェット試験片の断面（加工フローに直交する面）  
8N硝酸浸漬試験終了後 エッチング処理有り

※腐食は、加工フロー方向に孔状に進行しており、加工フロー腐食が発生することを確認した。  
腐食の形状は、故障ジェットと同様であり、また、文献の事例に類似していた。  
介在物の腐食発生への影響を確認したが、関連は認められなかった。

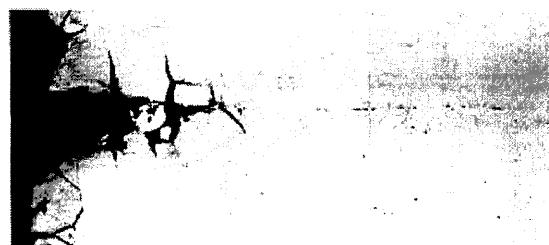
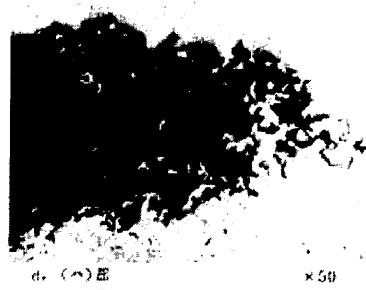
## 9. 加工フロー腐食事例との比較



故障したスチームジェット腐食部の断面

### 加工フロー腐食の原因として

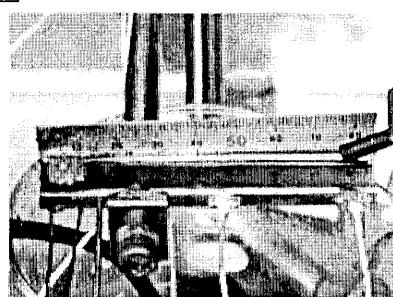
- ・O<sub>2</sub>負偏析
  - ・P等微量不純物元素の偏析
- が報告されている。

(東海再処理施設の腐食環境と機器の腐食速度評価  
サイクル機構技報No.14)

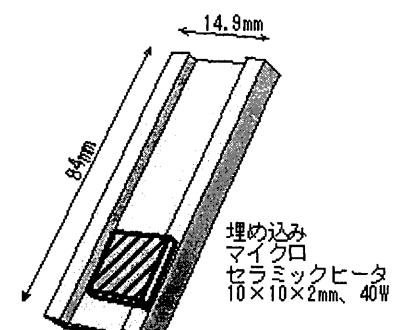
(再処理施設耐食安全性実証試験 検討委員会・腐食専門部会報告書 昭和62年6月 住友化学工業㈱)

## 10. 腐食試験 その2 (温度の影響評価)

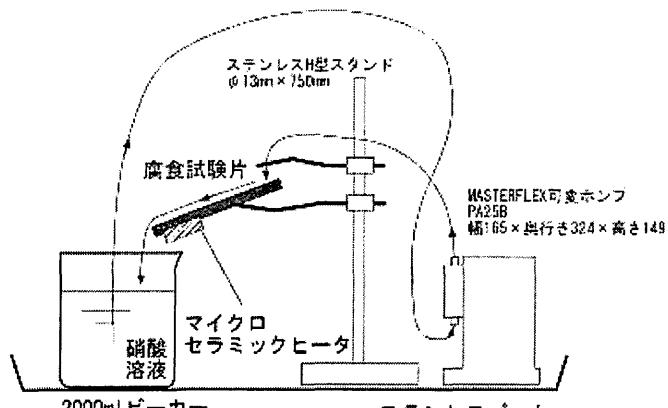
サイクル  
機構



試験状況



幅11mm、深さ1.5mmの溝加工  
腐食試験片形状

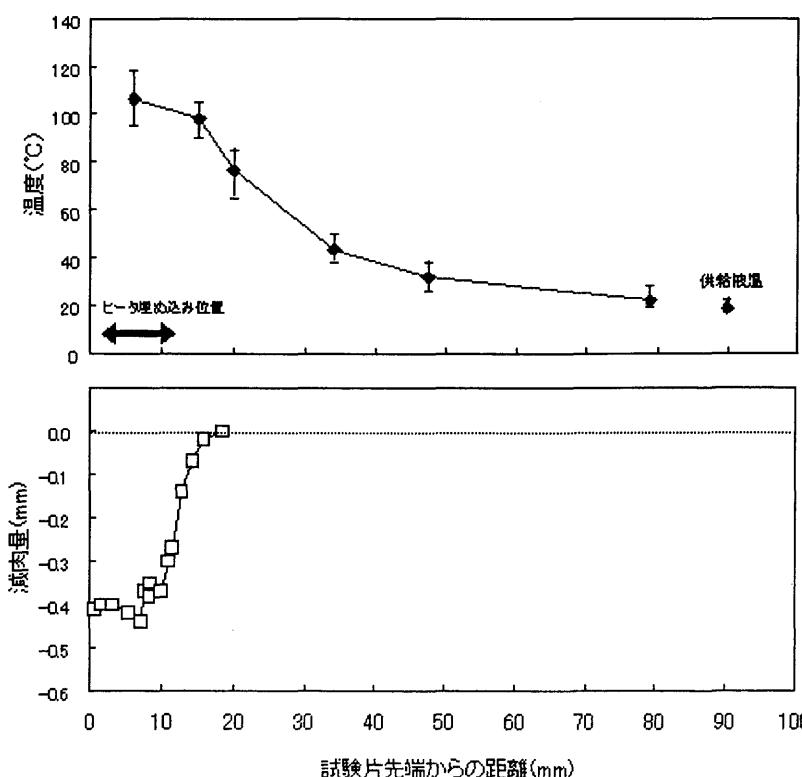


試験装置概要

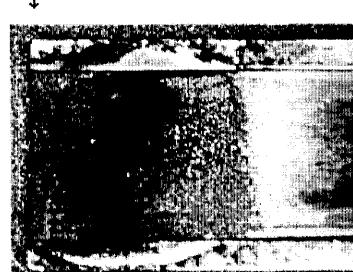
試験液 8N硝酸 + 1000 mgCr<sup>6+</sup>/ℓ添加  
供給流量 平均23 ml/h  
(1~2滴/分の速度で間欠的に試験片上端に滴下)

## 11. 腐食試験結果(温度の影響評価)

サイクル  
機構



試験片先端



ヒータ埋込み位置

腐食試験後の試験片先端部

## 12. 腐食試験のまとめ

### ・浸漬試験

- －スチームジェット試験片は、鍛造面に腐食孔が発生し進行。
- －スチームジェット試験片は、腐食に対し顕著な異方性を示した。
- －スチームジェット試験片で観察された腐食の形態は、故障したスチームジェットの腐食部及び文献で見られた加工フロー腐食に類似していた。
- －R-SUS304ULC(SA材)は、スチームジェット試験片に比較し腐食速度は小さく、異方性も無かった。
- －介在物と腐食の関連は観察されなかった。

### ・温度の影響評価

- －試験片の温度100°C付近を境にし、温度の高い領域で急激に腐食が進むことが観察された。

## 13. スチームジェット腐食のまとめ

### ・腐食原因

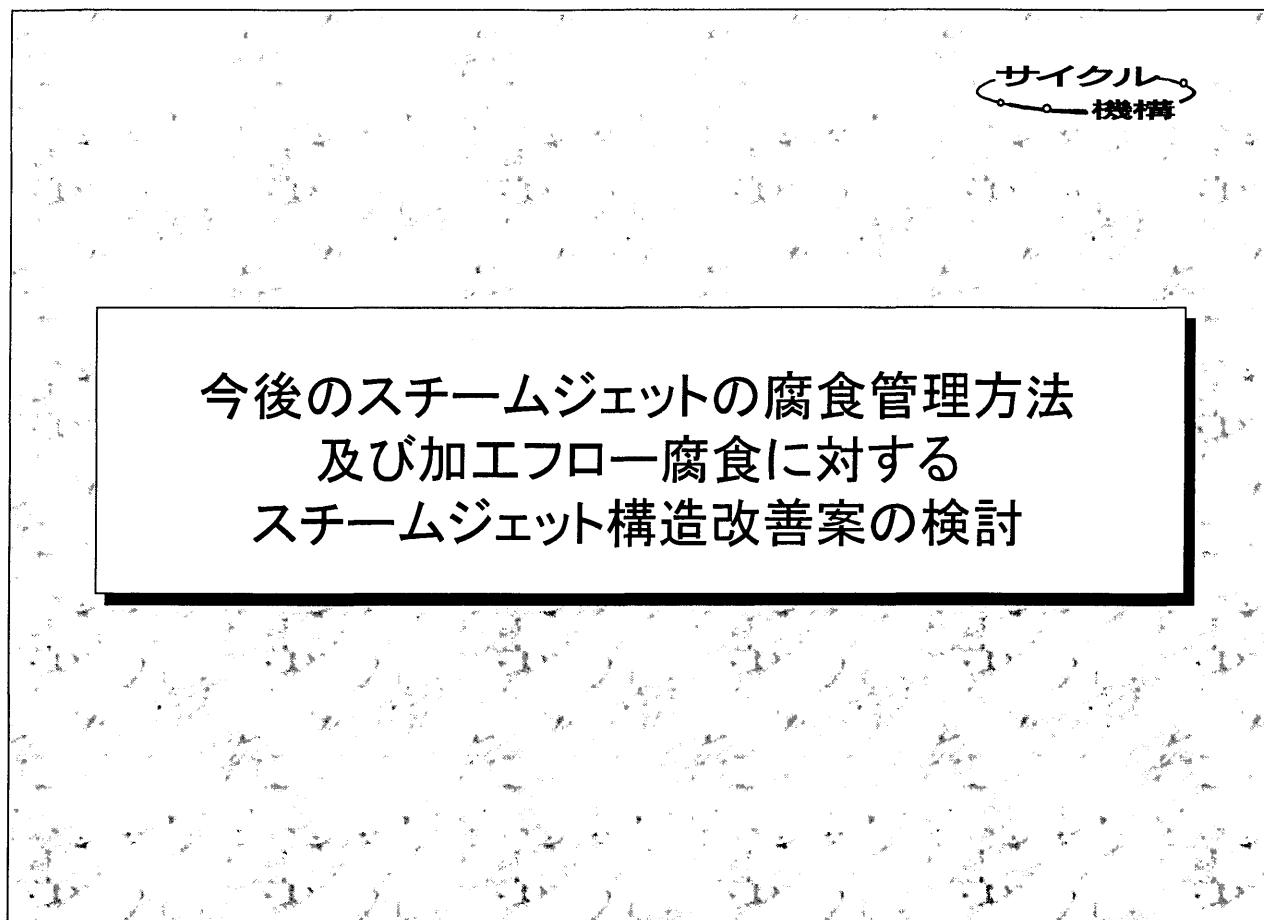
- －材料製造時の微量元素あるいは合金元素の偏析によって発生したと考えられる腐食に弱い部分が、スチームジェット製作時の鍛造加工によって方向性を持つて分布したため、加工フロー腐食が発生したものと推定される。

### ・腐食メカニズム

- －吸引室表面で、加工フロー腐食により小孔状の腐食が発生した。
- －小孔状の腐食がスチームジェット内部の100°C以上の高温域に達すると、温度の影響及び硝酸、Crイオンの濃縮により、加工フロー腐食が加速され空洞を形成した。
- －空洞が120°Cの温度領域にそって成長したのは、120°Cが硝酸・水溶液系の共沸点であるためと考えられる。それ以上の温度の領域では、硝酸溶液が気体となつたため腐食が抑えられたと考えられる。

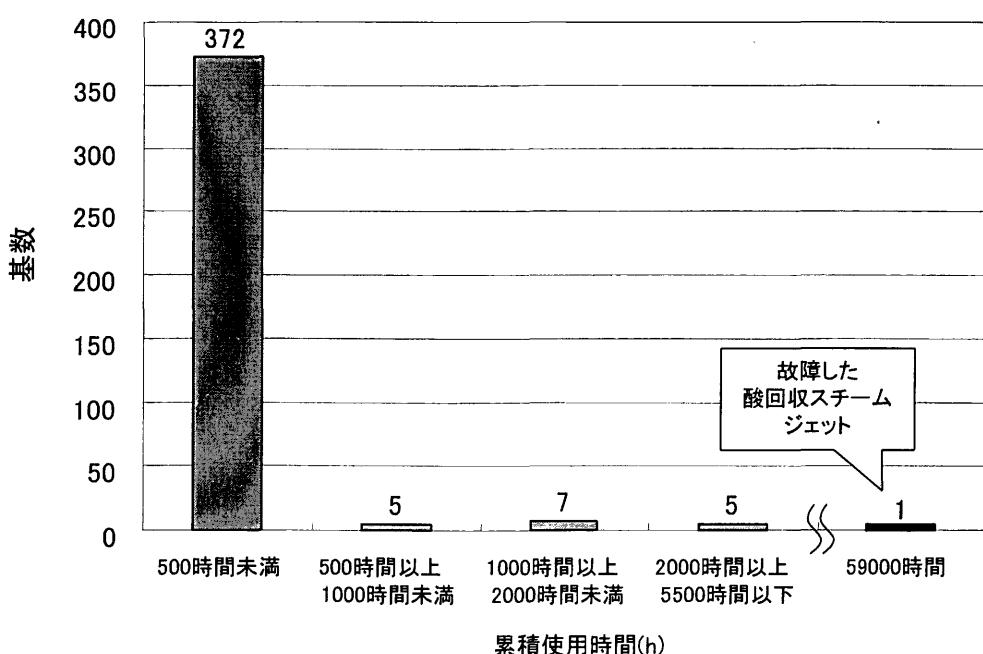
### ・加工フロー腐食対策

- －ステンレス鋼鍛造材の加工フロー腐食対策として、ESR等の2次溶解法により製造し、不純物を低減した材料を用いることは有効である。



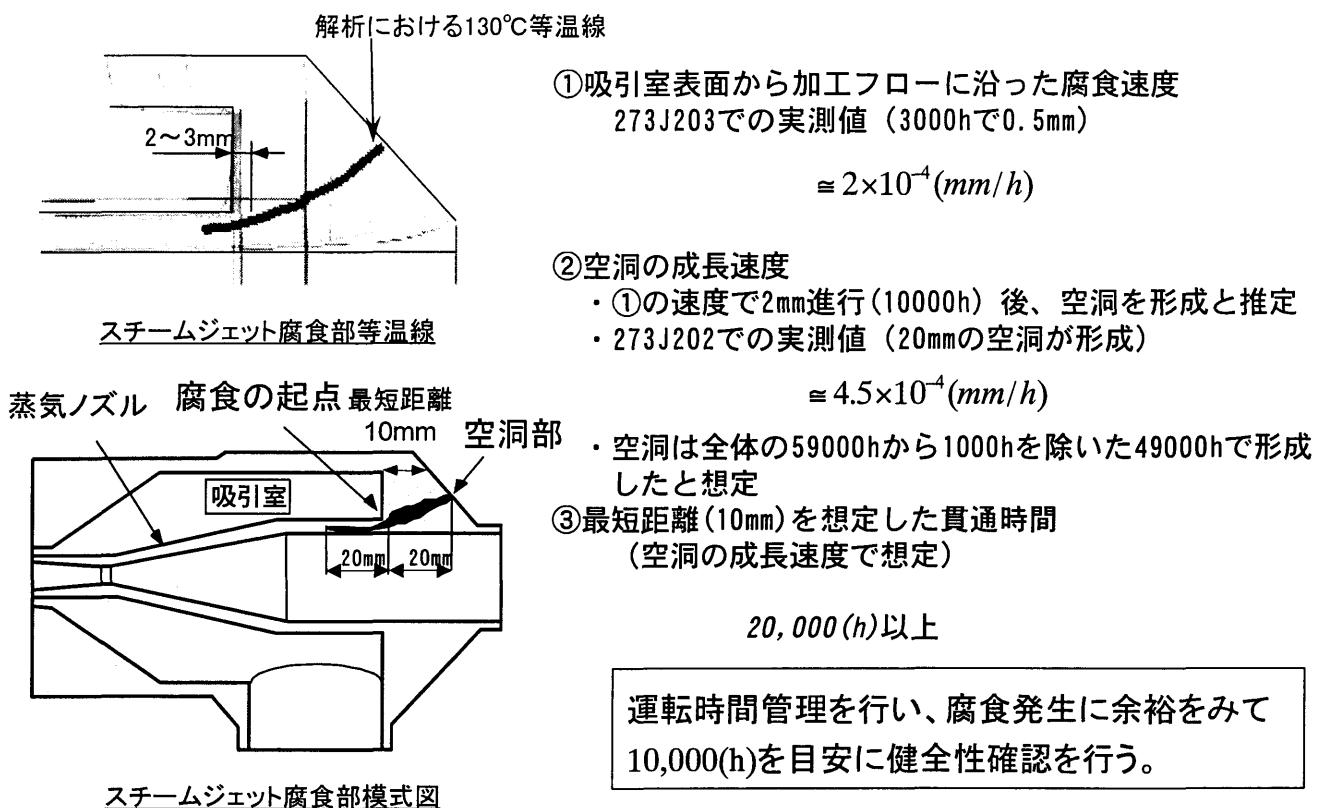
### 14. 東海再処理施設のスチームジェットの使用実績

サイクル 機構



東海再処理施設のスチームジェットの使用実績

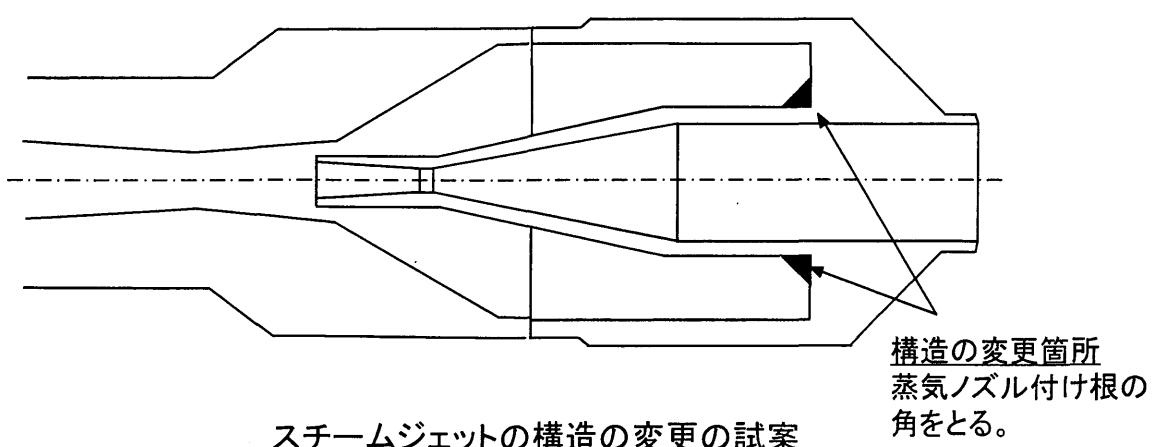
## 15. 対策(今後の管理)



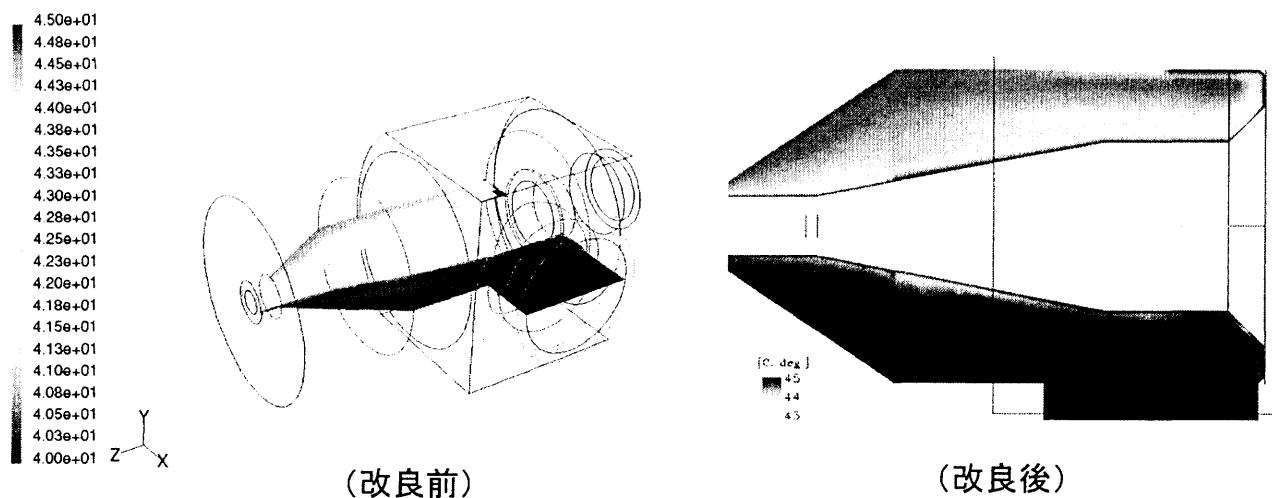
## 16. 対策（構造の検討）



- 腐食対策の検討
  - スチームジェットの形状変更による  
蒸気ノズル付け根部の温度分布の改善
- 熱及び液流動解析による確認



## 17. 構造の検討結果(温度評価)



- 吸引室内の液流動が改善され、液温が低下することが確認でき、吸引室表面の温度低下が期待される。
- 蒸気ノズル付け根から外壁までの距離を長くでき、加工フロー腐食が発生した場合でも、腐食が貫通するまでの時間を長くすることができる。
- 数値解析は、構造検討・設計評価に有用。

## 18. まとめ(1)



### 一大洗工学センターとの協力一

- 照射燃料集合体試験施設(FMF)における、金属組織観察による腐食部位の評価(実施にあたっては、FMFの使用目的に再処理工程の材料も取り扱えるよう使用変更を行なった。)
- 要素技術開発部における、熱流動解析による構造体の温度評価及び振動解析による振動影響が要因から排除されることの確認
- 要素技術開発部における、東海で実施した腐食試験(コールド)材料片の金属組織観察・評価
- 解析と腐食に関し、これらの部署から4名の専門家に評価会議の評価委員として参加頂いた。

## 19. まとめ(2)

### —調査結果の報告—

- 日本原燃との技術情報交換会で報告(平成15年3月14日)
- 原子力学会「2003年春の大会」で4件を報告(平成15年3月27日)
- 保安院(規制課4/22、防災課5/1)に報告書により調査結果を説明

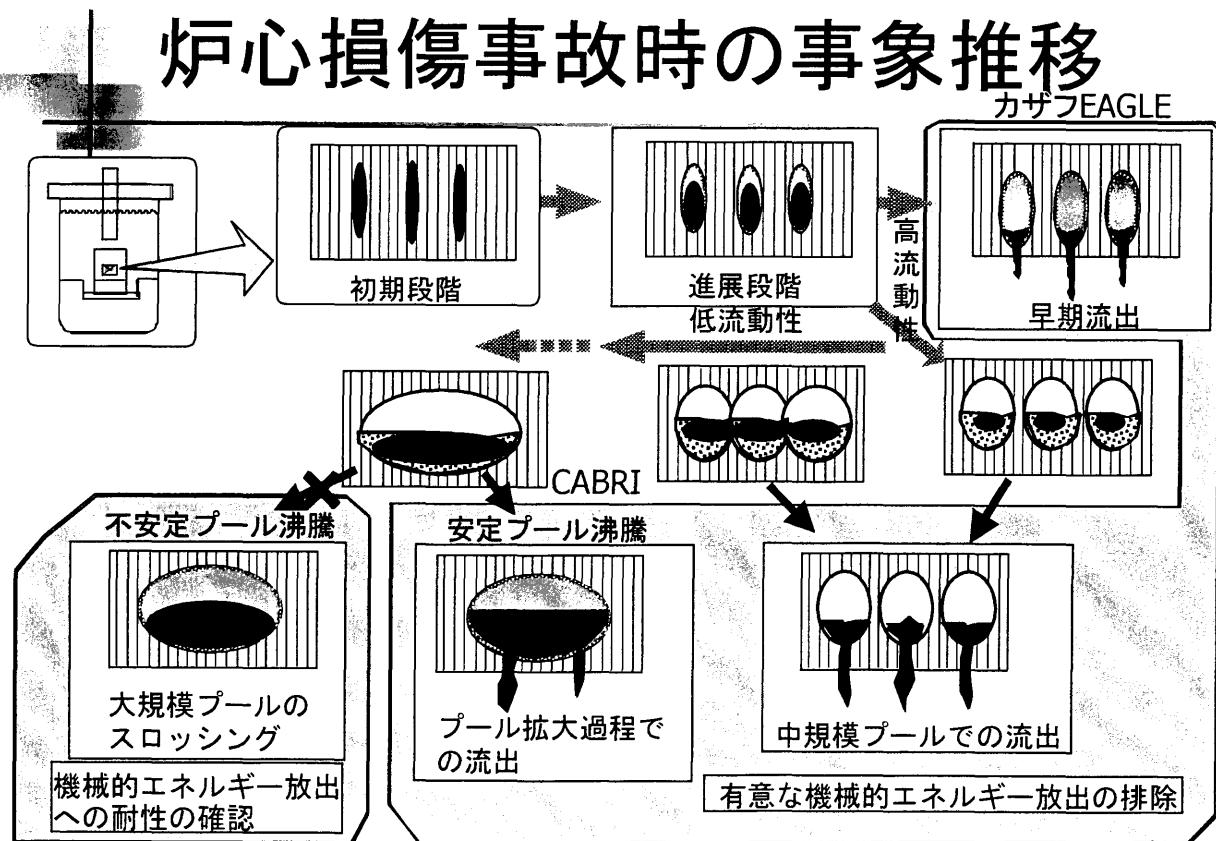
### —総括—

- 大洗工学センターの協力を得ることで、金属学的評価及び計算解析を行うことができ、より技術的な調査が行えた。
- 解析と試験を組み合わせ、信頼性の高い故障解析を行うことができ、これらのアプローチ手法について、日本原燃とも共有化できた。
- 外部専門家を含めた評価会議を設置することで、幅広い知見を反映することができ、透明性を確保し、より確実な調査となつた。

# CABRI-RAFT TPA2試験の評価

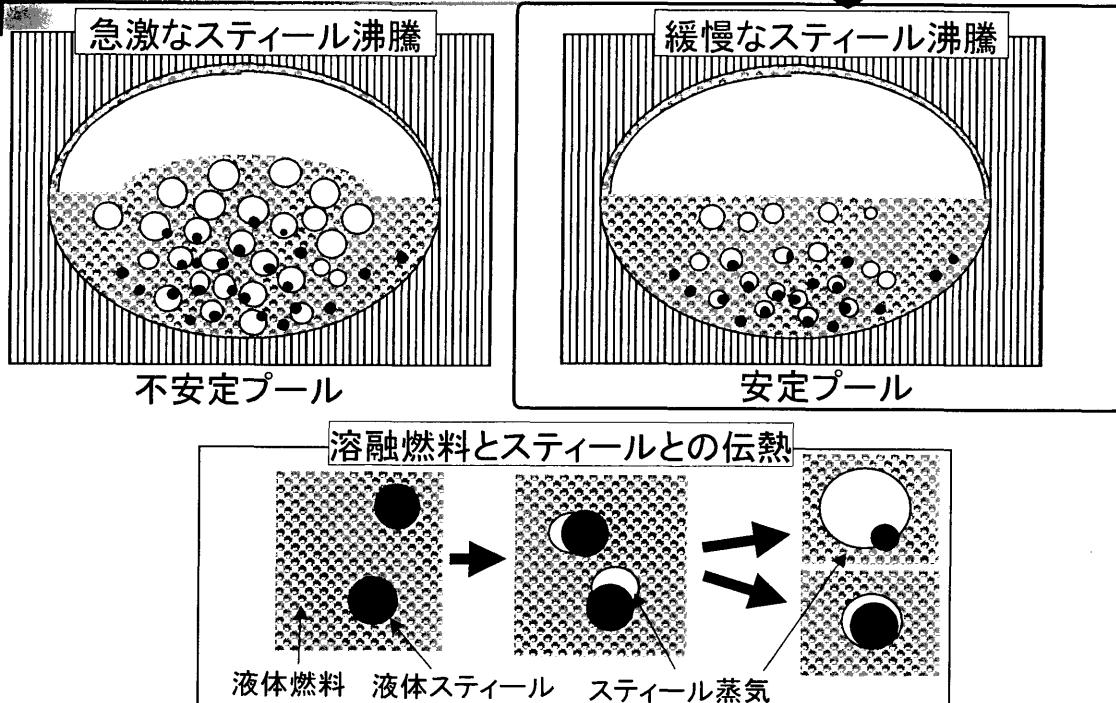
平成15年 7月 4日

要素技術開発部 リスク評価研究Gr.  
山野秀将

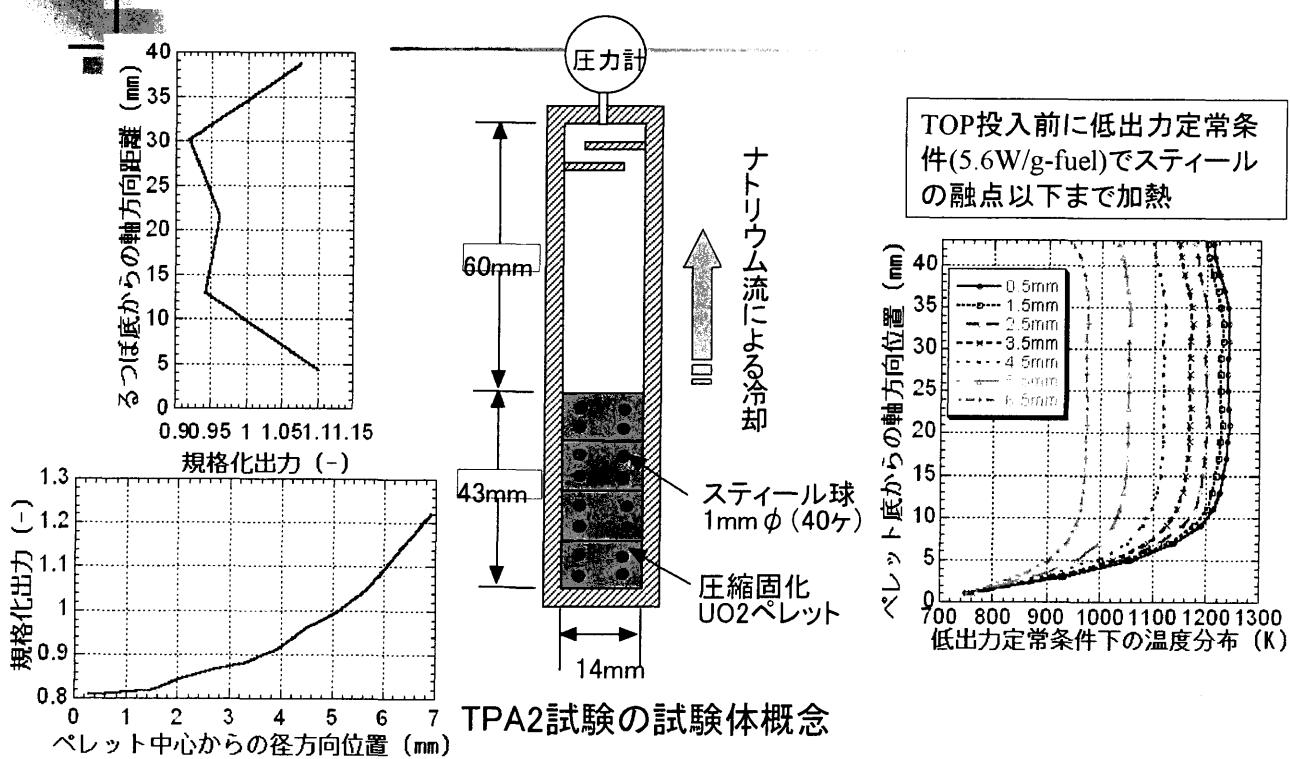


# 沸騰プール挙動

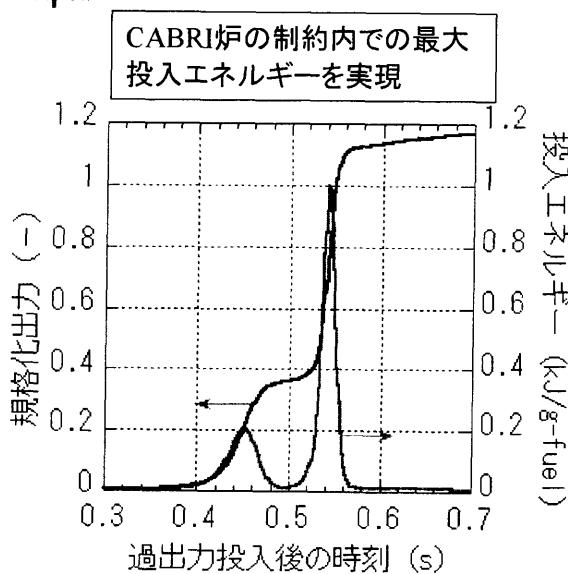
確認すべき対象



## TPA2試験条件 (出力分布と初期燃料温度)

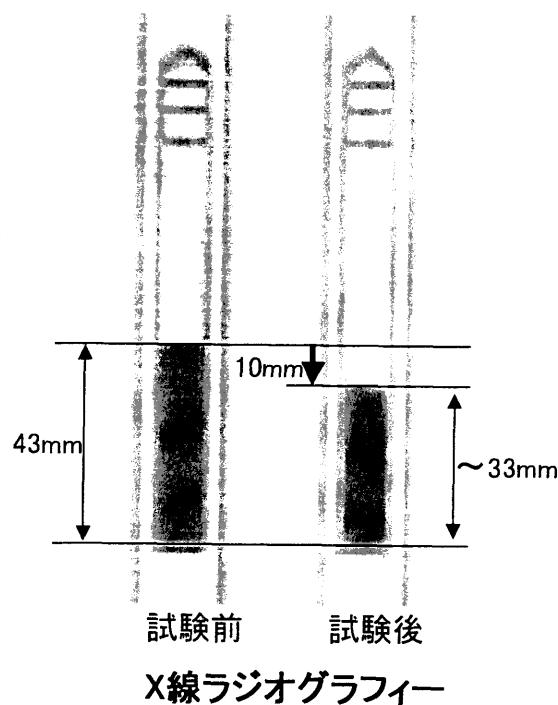
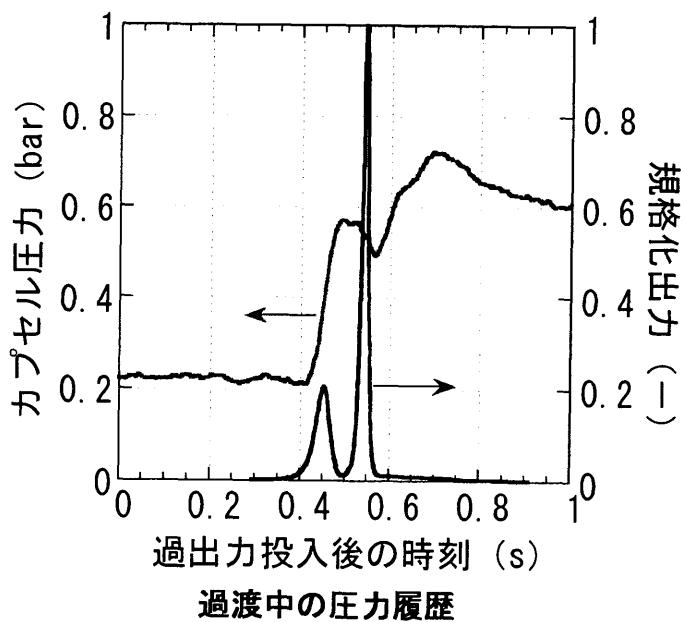


# TPA2試験条件 (出力パルス履歴と計装)

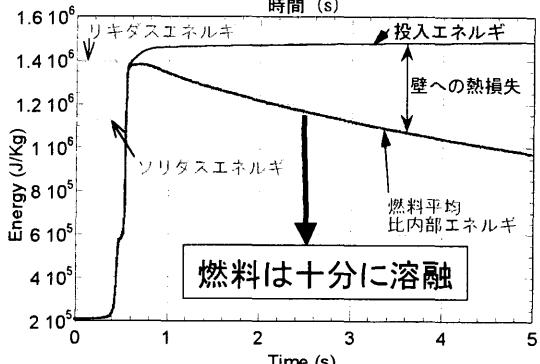
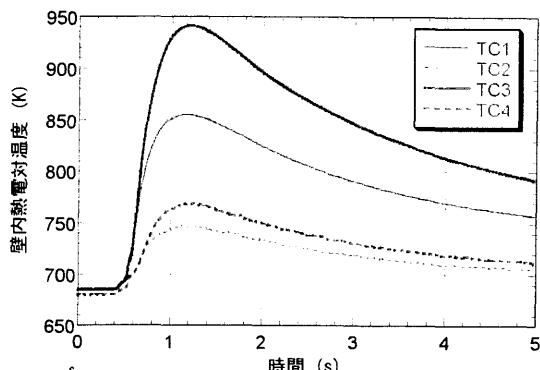
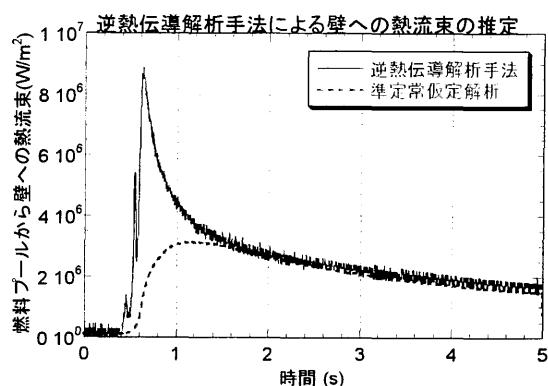
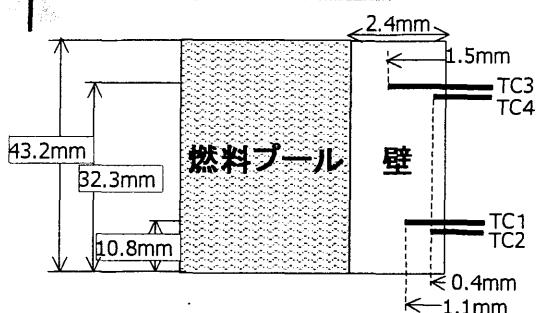


- ◆ 過渡時計測データ
  - カプセル内圧力
  - Na冷却材流量・温度
  - 燃料温度(サブカプセル)
  - るつぼ壁温度
  - 高速中性子ホドスコープ
- ◆ 非破壊検査
  - X線ラジオグラフィー
  - X線トモグラフィー
  - ガンマスキャン
- ◆ 破壊検査
  - 金相写真

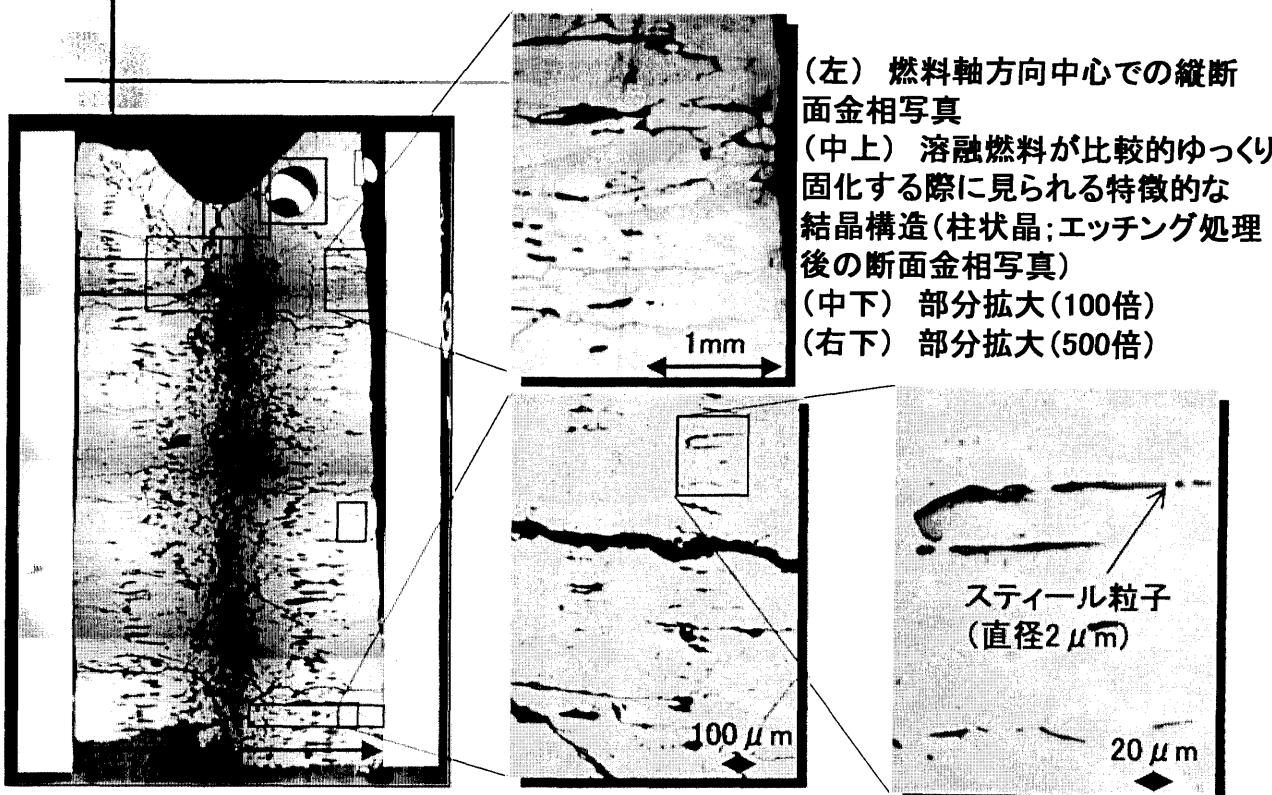
# 実験結果 (圧力履歴と非破壊検査)



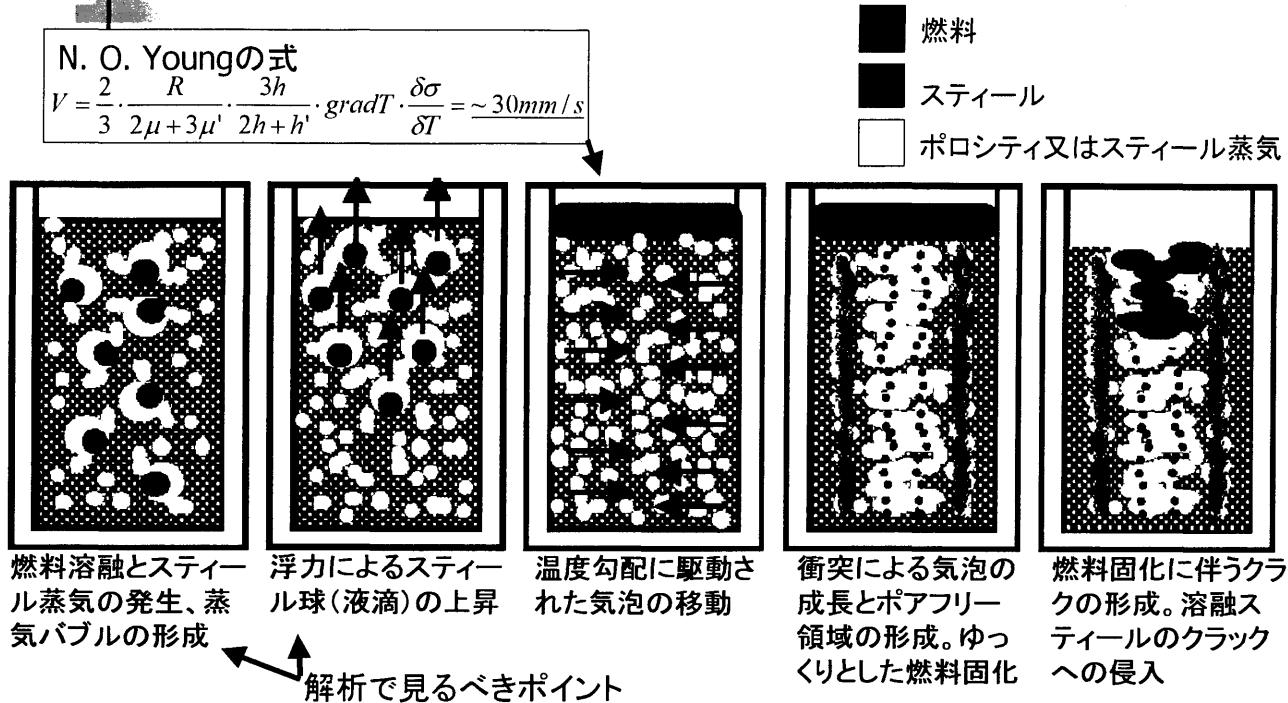
# 平均燃料温度の推定



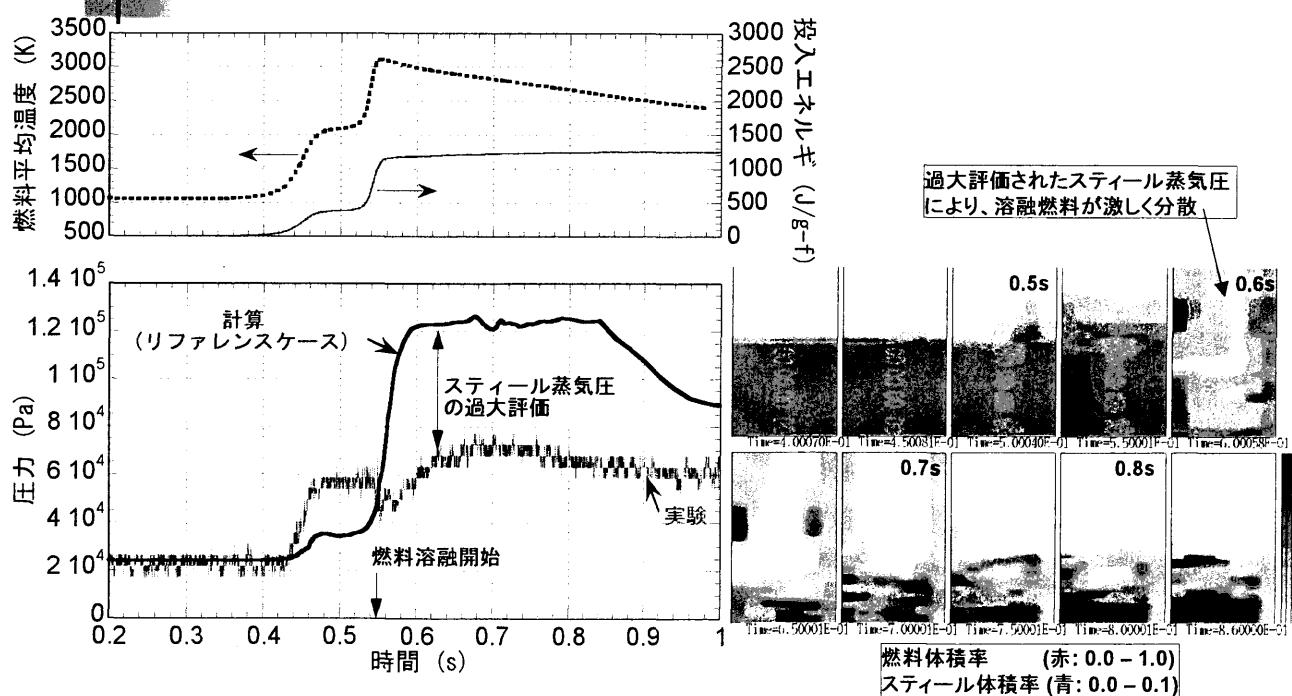
# TPA2試験燃料の断面金相写真



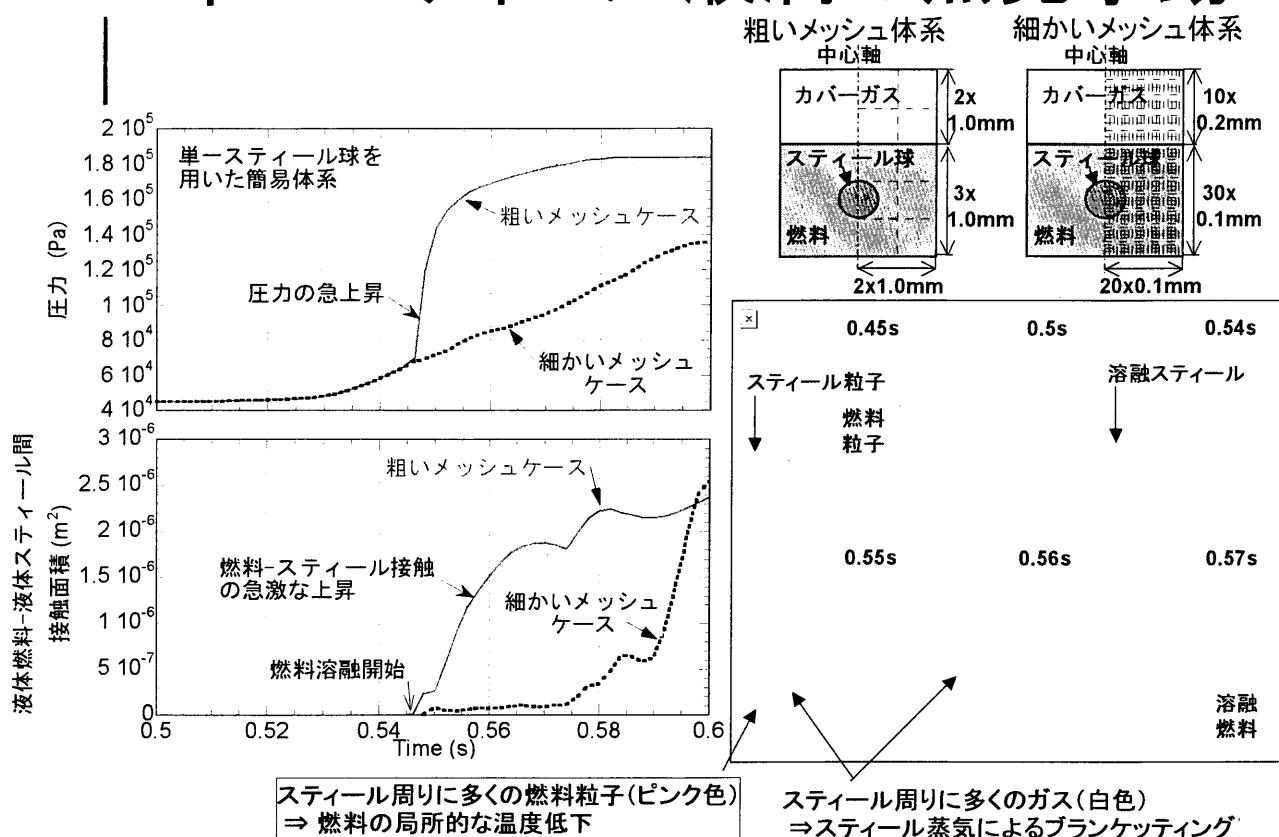
# 推定される事象推移シナリオ



## SIMMER-IIIによるTPA2試験のシミュレーション

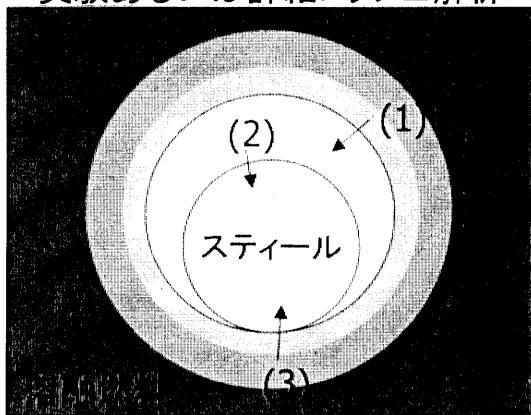


# 単一スティール液滴の蒸発挙動

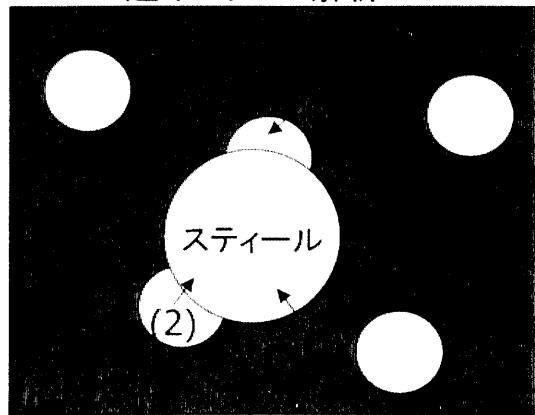


## 伝熱メカニズム

実験あるいは詳細メッシュ解析



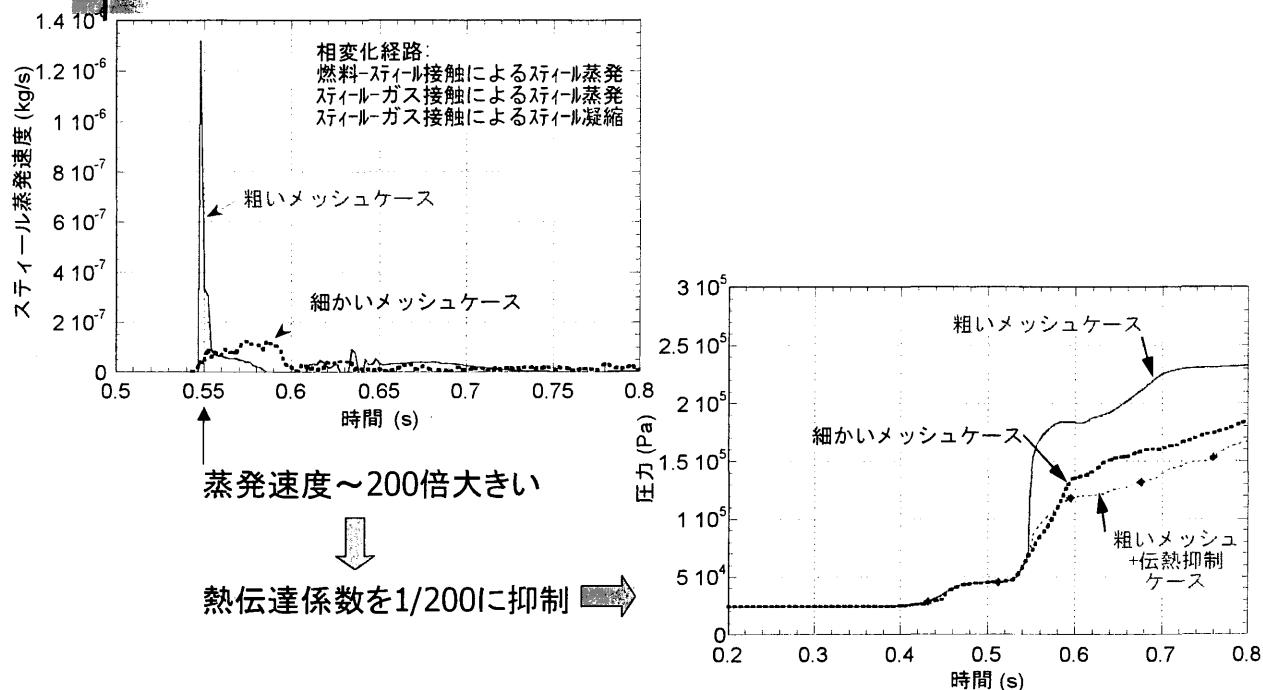
通常メッシュ解析



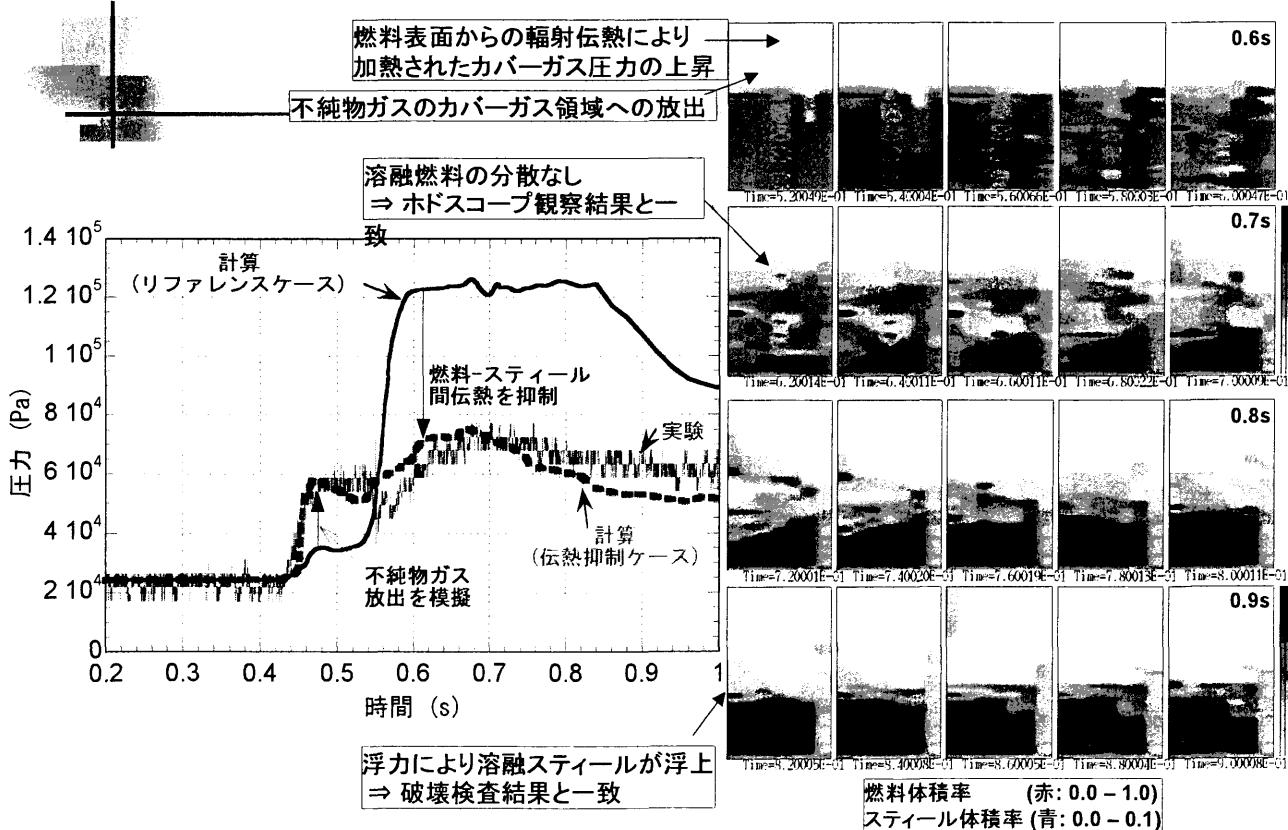
SIMMERによる通常メッシュ解析は

- (1) スティール周りの液体燃料温度を高く評価するため、熱流束を過大評価。
- (2) スティール周りのガス温度を高く評価するため、熱流束を過大評価。
- (3) スティール周りの液体燃料温度を高く評価し、かつスティール蒸気によるブランケットティング効果を模擬できないため、熱流束を過大評価。

# 単一スティール液滴の伝熱を抑制した場合の蒸発挙動



## 伝熱抑制メカニズムを考慮した解析結果



## 結論

- 試験シナリオを推定。
- 溶融スティールは浮力により浮上。
- 燃料/スティール間の熱伝達はスティール周りの蒸気形成及び局所的な温度低下によって抑制。
- 伝熱抑制効果を考慮して、TPA2試験における圧力上昇挙動を再現。
- 実機適用に当たってはモデル改良が必要。
- 今後、仏BALL-TRAP試験との相互比較。

## 第3回 R & D報告会

[平成 15 年 9 月 12 日]



## 報告内容

1. 炉内照射下クリープ試験の概要と  
破断試料の同定実績
2. レーザ共鳴イオン化質量分析法  
(RIMS) の概要
3. システム設計・製作
4. 性能評価（検出感度、同位体比分析精度）
5. 炉内照射クリープ試験へのRIMS適用結果
6. まとめ

# 炉内照射下クリープ試験の概要

## 試験目的 :

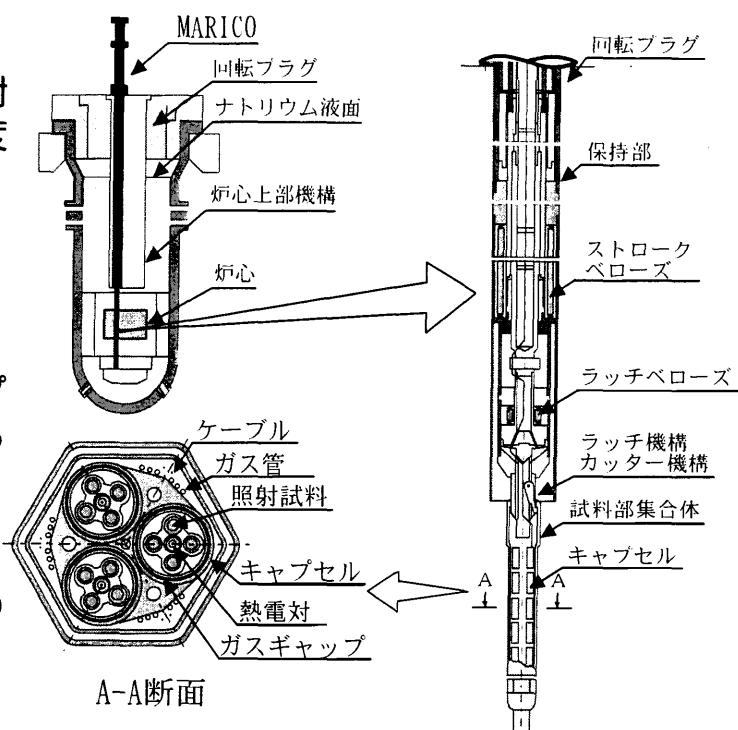
燃料被覆管材料の中性子照射下での内圧クリープ破断強度を測定する。

## 試験方法 :

充填ガスにより内圧を約10～50MPaに加圧した試験試料を炉内で照射中にクリープ破断させ、試料が破断に至るまでの照射時間を測定する。

## 温度制御方法 :

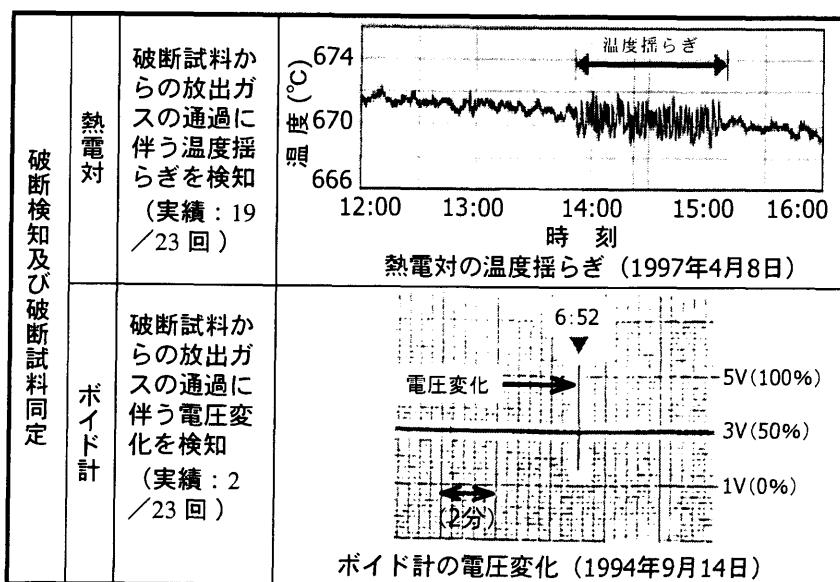
キャプセルに設けた二重壁の空間にAr, Heの混合ガスを通気し、その混合比を変えることにより熱伝導率を調節する。温度制御幅は±4°C。



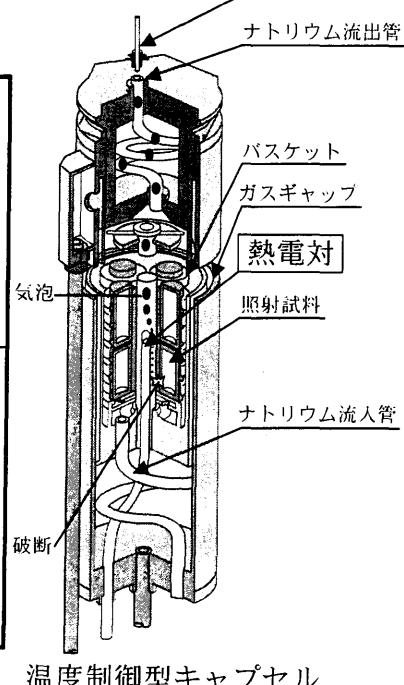
照射装置 (MARICO : Material Testing Rig with Temperature Control) の概略

# 炉内照射下クリープ試験試料の 破断検知及び同定 (1)

本試験では、試料が破断に至るまでの照射時間を精度良く測定することが重要。ボイド計  
→ どの試料がいつ破断したかを正確に検知する。

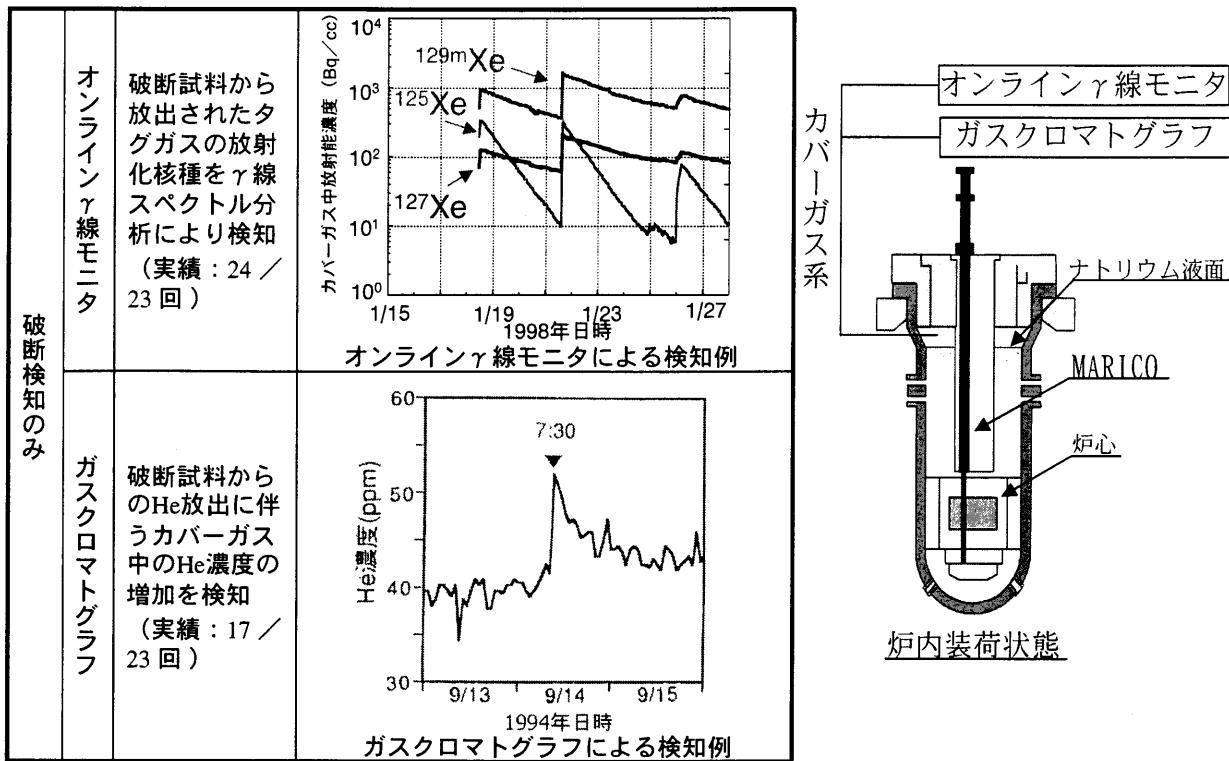


\* PIEにより、23試料の破断を確認。

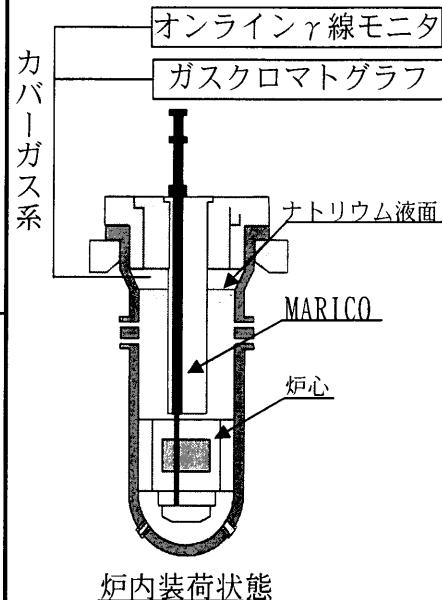


温度制御型キャップセル

# 炉内照射下クリープ試験試料の 破断検知及び同定 (2)



\* PIEにより、23試料の破断を確認。



## タグガス分析による破断試料同定法

照射試料には、試料毎に組成比の異なる非放射性のXe、Krの混合ガス（タグガス）がHeとともに加圧封入されている。



試料破断時に放出されるタグガスの組成を分析することにより、破断した試料の同定が可能。

- タグガスの全量（約1.8cc）が $6.5\text{m}^3$ のカバーガス空間に拡散すると、その濃度は300ppbに低下する。



存在比1%の同位体比を得るために、3ppbを定量できる検出感度が必要。



ガスマス（定量下限100ppb）では測定精度が不十分。

### タグガスの仕様

タグガス 番号	同位対比	
	$^{78}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	$^{80}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$
A	0.048	0.240
B	0.093	0.241
C	0.144	0.236
D	0.181	0.238
E	0.085	0.422
F	0.134	0.427
G	0.167	0.431
H	0.208	0.426

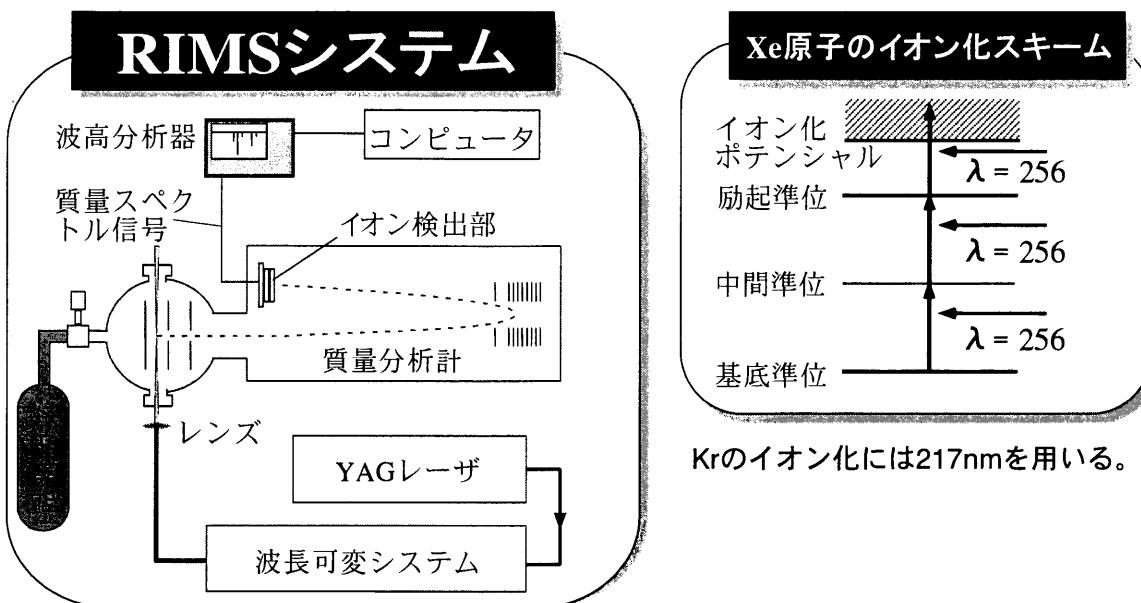
封入量 He : 52~62cc、Kr, Xe : 1.8~2.1cc  
放出後、カバーガス空間 $6.5\text{m}^3$ に移行

# レーザ共鳴イオン化質量分析法

(RIMS: Laser Resonance Ionization Mass Spectrometry)

特長

非常に高感度な分析手法  
同重体（クラスター）干渉の影響が無視できる。  
⇒同位体比測定に対し、信頼性が非常に高い。



## レーザ部の設計

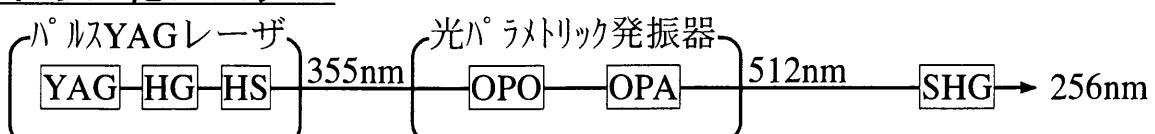
光パラメトリック発振によりXe、Kr共鳴励起用レーザ光を発振  
(光軸と結晶軸のなす角を変化させて波長を選択する技術)

- ・レーザ出力等の動作特性が長期間安定
- ・固体酸化物結晶を用い、取り扱いが比較的容易

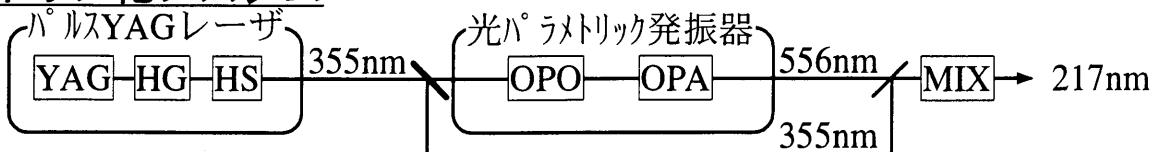
レーザ光出力 : 8mJ/pulse

レーザ光パルス周波数 : 10Hz

### Xeイオン化システム



### Krイオン化システム



YAG : YAG共振器

OPO : 光パラメトリック共振器

SHG : 第2高調波発生器

HG : 高調波発生器

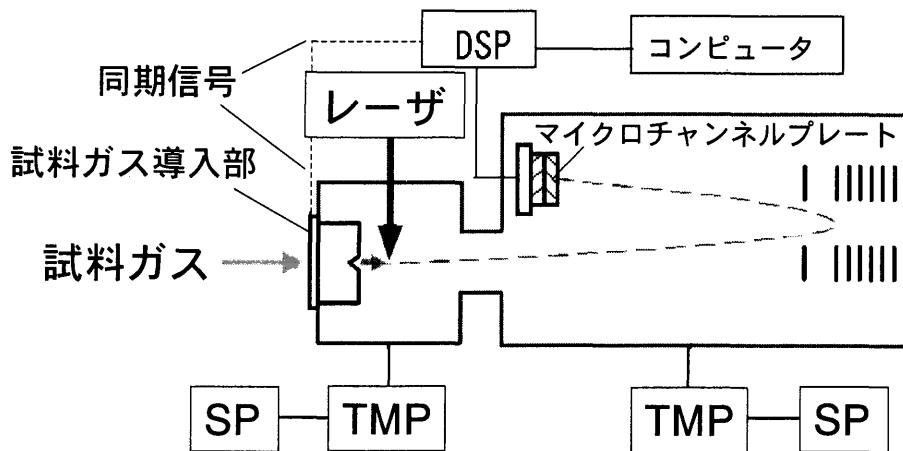
OPA : 光パラメトリック増幅器

MIX : 和周波混合発生器

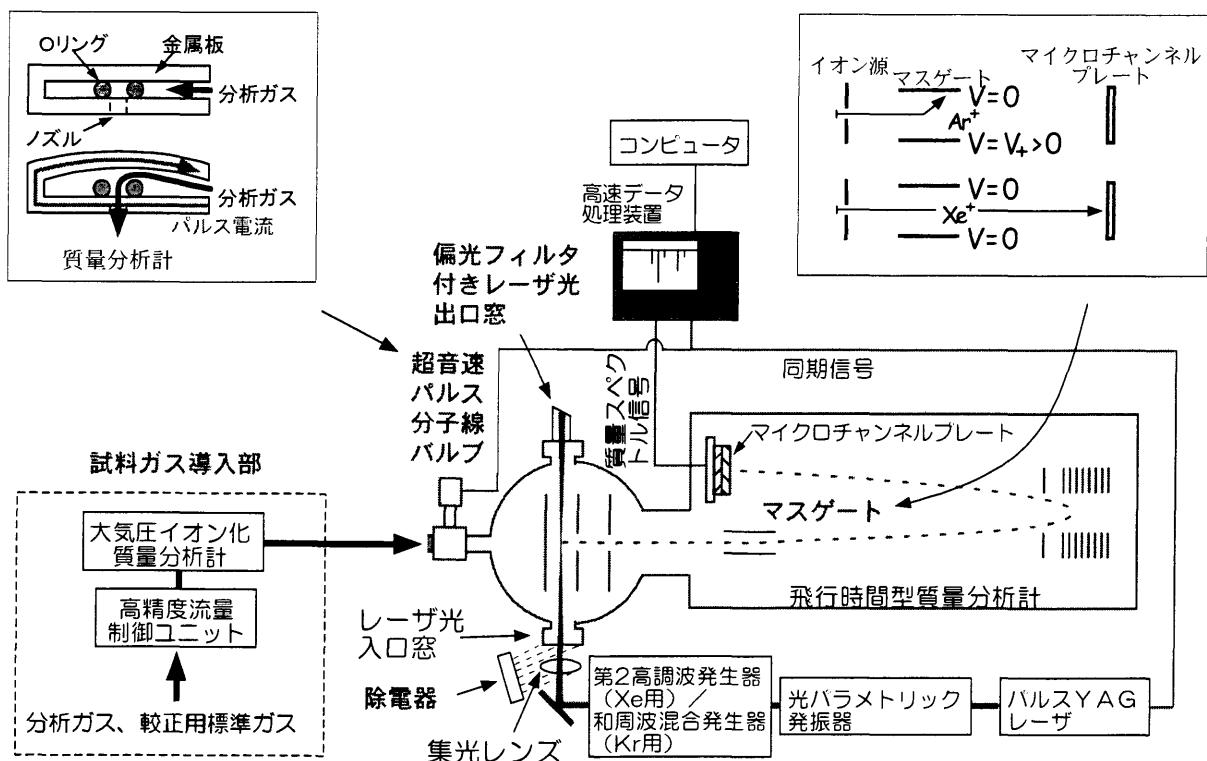
HS : 高調波分離器

# 質量分析部の設計

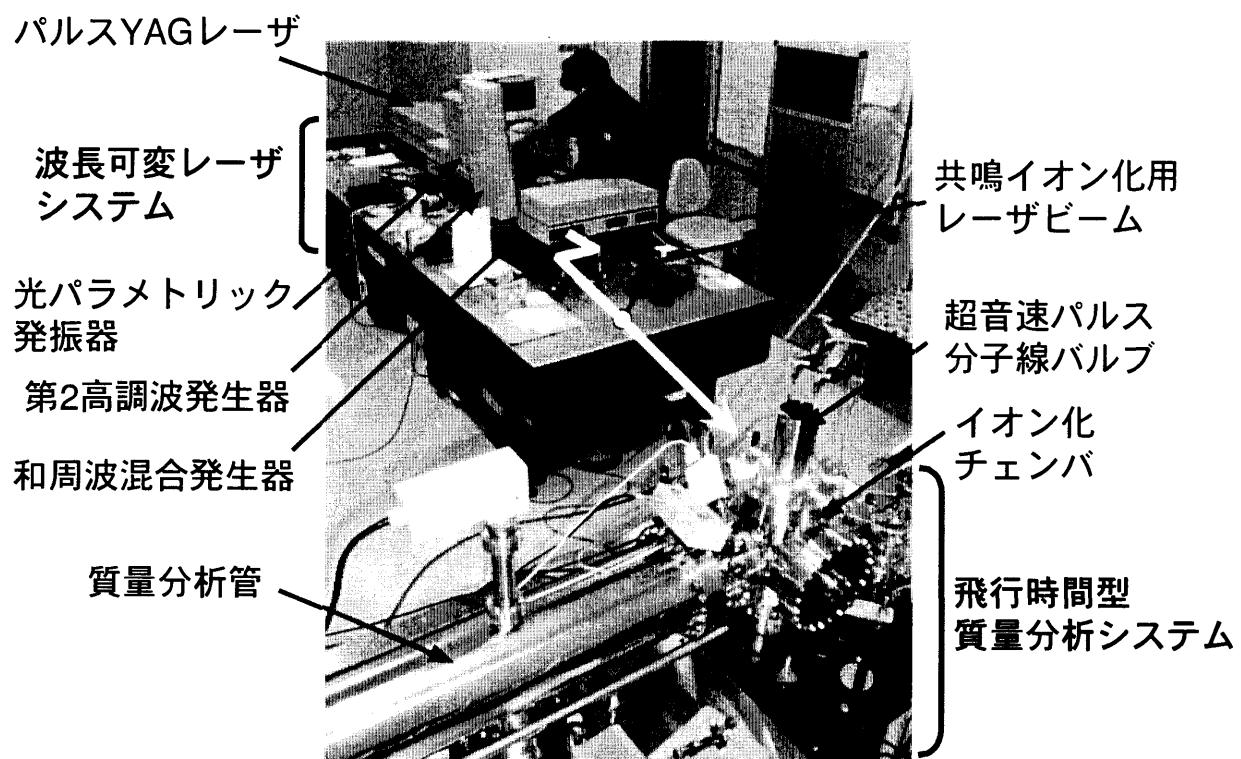
- 反射型飛行時間方式を採用
  - 飛行時間方式：原理的に全イオンを検出 → 高感度化
  - 反射型：飛行時間収差の補正 → 高質量分解能化
- 真空排気系は、ターボ分子ポンプ(TMP)、スクロールポンプ(SP)の採用によるオイルフリー化
- イオン検出部にマイクロチャンネルプレート、高速データ処理用にデジタルシグナルプロセッサ(DSP)を採用



## RIMSシステムの検出感度の向上



# RIMSシステム外観



## Xe、Krの質量スペクトル測定結果

天然組成のXeを含む標準Arガスを測定

- 元素濃度 1 ppb (同位体濃度は1~300ppt)
- 元素濃度 0.1 ppb (同位体濃度は0.1~30ppt)

検出限界(BGのゆらぎの3倍) 0.7 ppt

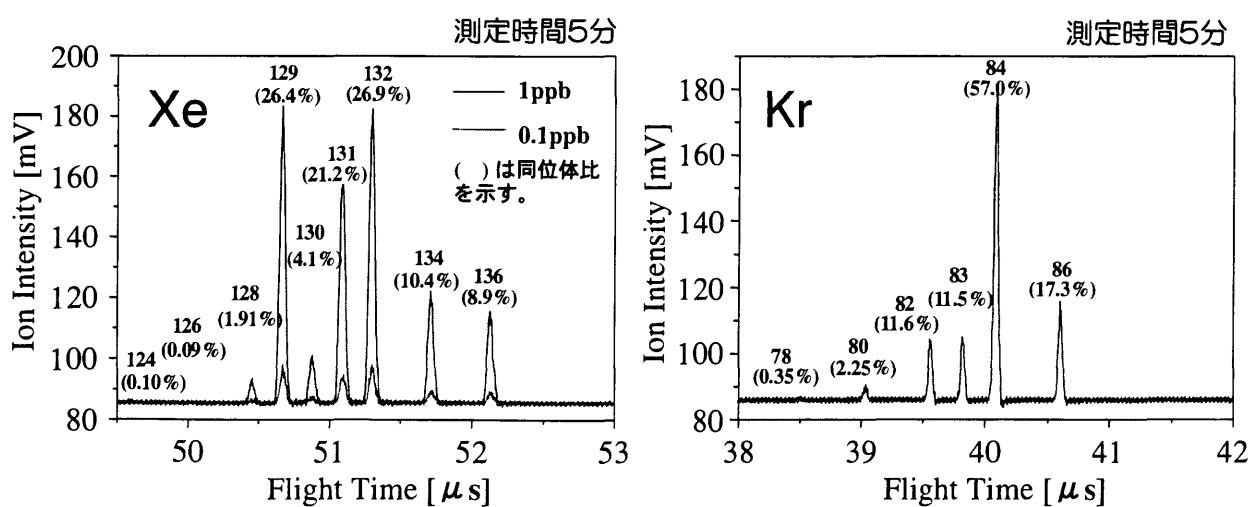
定量下限(BGのゆらぎの10倍) 2.2 ppt

天然組成のKrを含む標準Arガスを測定

- 元素濃度 10 ppb (同位体濃度は30ppt~6ppb)

検出限界(BGのゆらぎの3倍) 30 ppt

定量下限(BGのゆらぎの10倍) 100 ppt



# 同位体比測定結果

10ppbのXe、Kr（天然組成）を繰り返し測定

- ・ 同位体間に系統的なずれが見られる（下図）  
→ 標準ガスを用いた較正により補正できる。

## 同位体比測定精度

補正なし

Xe

Kr

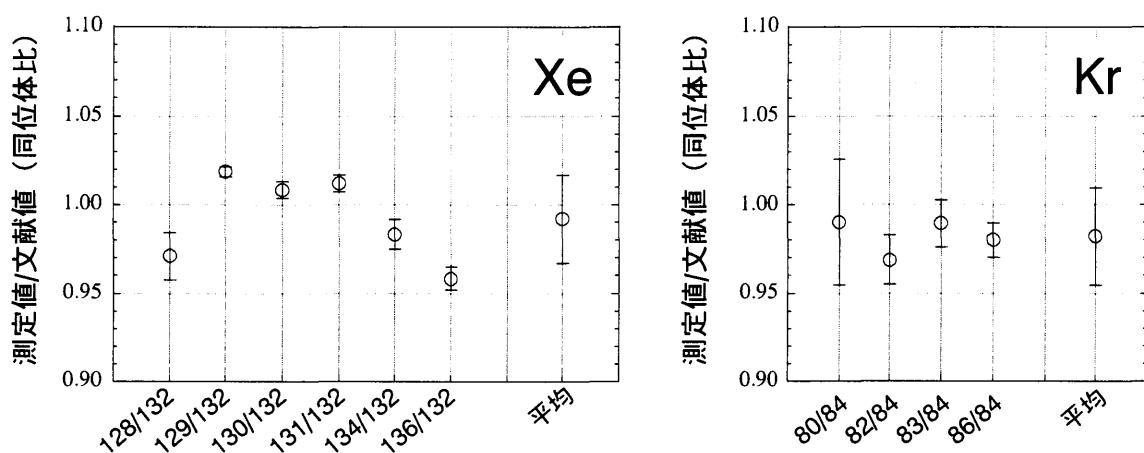
補正あり

$\pm 2.5\%$

$\pm 2.8\%$

$\pm 0.75\%$

$\pm 2.1\%$



## RIMSによる破断試料同定方法

1. オンラインγ線モニタにより、試料破断を検知。
2. カバーガスを採取し、RIMSによりタグガス核種の同位体比を測定してタグガスの種類を同定。

### (1) 各運転サイクルの1回目の破断

RIMSによる測定結果と同位体比が最も良く一致するタグガスを推定。

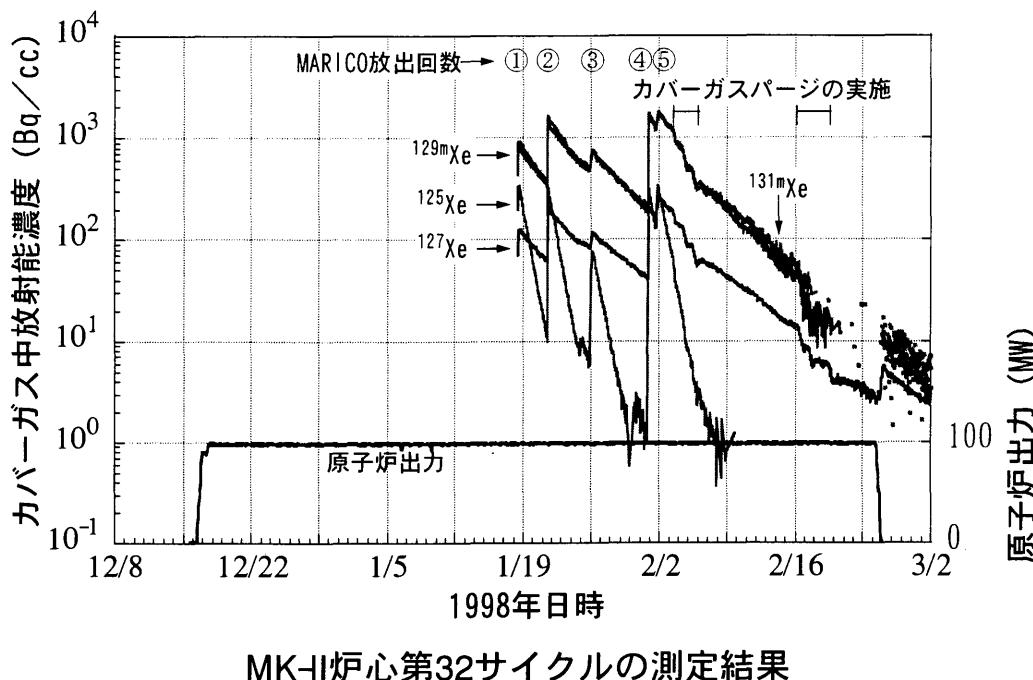
### (2) 各運転サイクルの2回目以降の破断

8種類のタグガスの同位体比<sup>\*1</sup>に、既放出（同定済）のタグガスのカバーガス内残留分<sup>\*2</sup>を加えた値が、RIMSによる測定結果と最も良く一致するタグガスを推定。

\*1 カバーガスへのタグガスの放出率は100%と仮定。

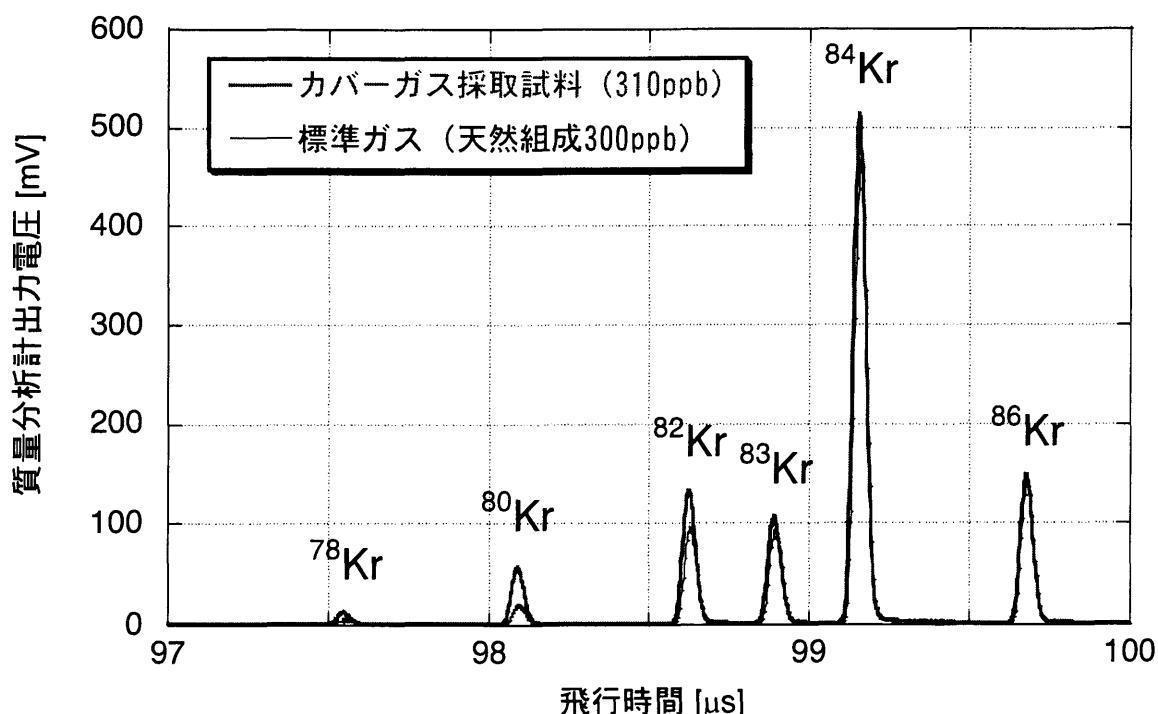
\*2 オンラインγ線モニタによる放射性核種の減衰曲線から、カバーガスの排出率を求め（3日間で半減程度）、希釀効果を補正。

# オンラインγ線モニタによる 試料破断の検知例



# RIMSによる質量スペクトル測定例

MK-II炉心第32サイクルの第1回放出後に採取したカバーガス中のタガガス分析結果



# RIMSによるタグガスの同位体比分析例

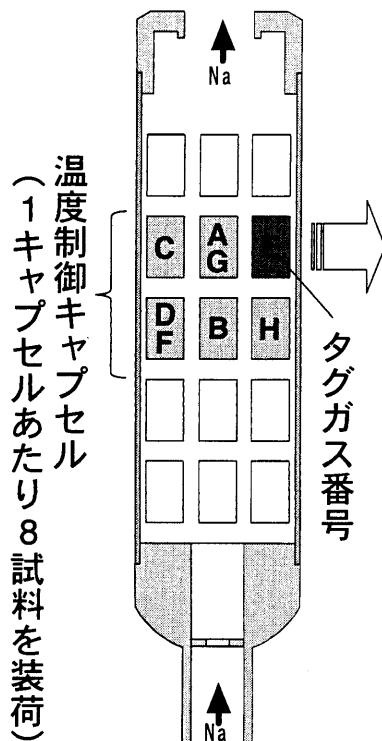
(MK-II炉心第32サイクルの第1回放出時)

		測定値	試料に封入したタグガスの同位体比							
			A	B	C	D	E*	F	G	H
同位体比	$^{78}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	0.087	0.048	0.093	0.144	0.181	0.085	0.134	0.167	0.208
	$^{80}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	0.422	0.240	0.241	0.236	0.238	0.422	0.427	0.431	0.426
RIMSによる推定			×	×	×	×	○	×	×	×
温度揺らぎによる推定							○			

\* PIEにより、タグガスEを封入した試料の破断を確認

- ・ RIMSによるタグガス核種の同位体比測定結果より、放出されたタグガスを1種類に絞り込むことができた。

## 破断試料の同定結果



試料番号	目標破断時間	破断試料の同定実績 <sup>*1</sup>			PIE <sup>*4</sup> ・外観観察 ・重量変化測定	
		検出No.	ボイド計	熱電対		
①	500	29-1 <sup>*2</sup>	○	○	— <sup>*3</sup>	○
②	1000	29-3	○	○	—	○
③	1500	30-4	×	○	—	○
④	2000	31-2	×	○	○	○
⑤	3000	32-1	×	○	○	○
⑥	4000	32-5	×	○	○	○
⑦	6000	—				未破断
⑧	8000	—				未破断

\*1 タグガス番号Eを同定できたケースを○で示す。

\*2 MK-II炉心第29サイクル運転中の第1回目の破断を示す。

\*3 RIMSによる分析は未実施。

\*4 破断を確認できた試料を○で示す。

MARICO内の  
キャップセル配置

RIMSを用いたタグガス分析による  
破断試料の同定法を確立

## まとめ

レーザを用いた超高感度タグガス分析技術を開発し、炉内照射下クリープ試験の破断試料同定技術を確立した。

## 今後の予定

1. MK-III炉心における炉内照射下クリープ試験 (MARICO-2)への適用 → 破断試料の確実な同定
2. タギング法破損燃料検出 (FFDL) やカバーガス中の希ガスFP分析への適用
  - ・「常陽」実機カバーガス分析を通じての運用整備・データ蓄積
  - ・「常陽」での燃料破損模擬試験、RTCB試験（燃料被覆管が破損限界に到るまで照射を継続する試験）によるRIMSシステムの実証  
⇒「もんじゅ」のFFDLの高度化
3. 他分野への応用（タグガス放射化断面積測定等）

## 平成15年度第3回R & D報告会

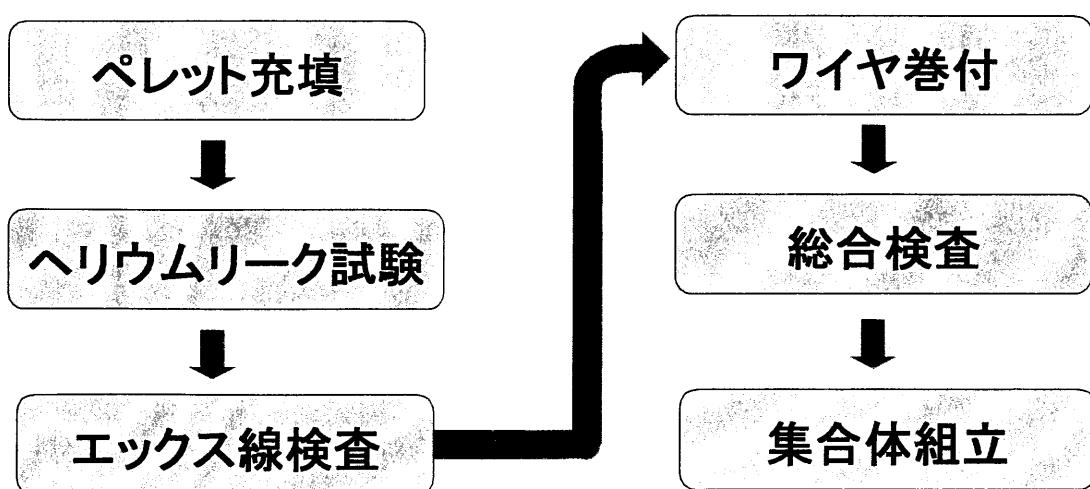
### MK-III燃料の製造 —PNC 1520製部材の溶接経験—

平成15年9月12日

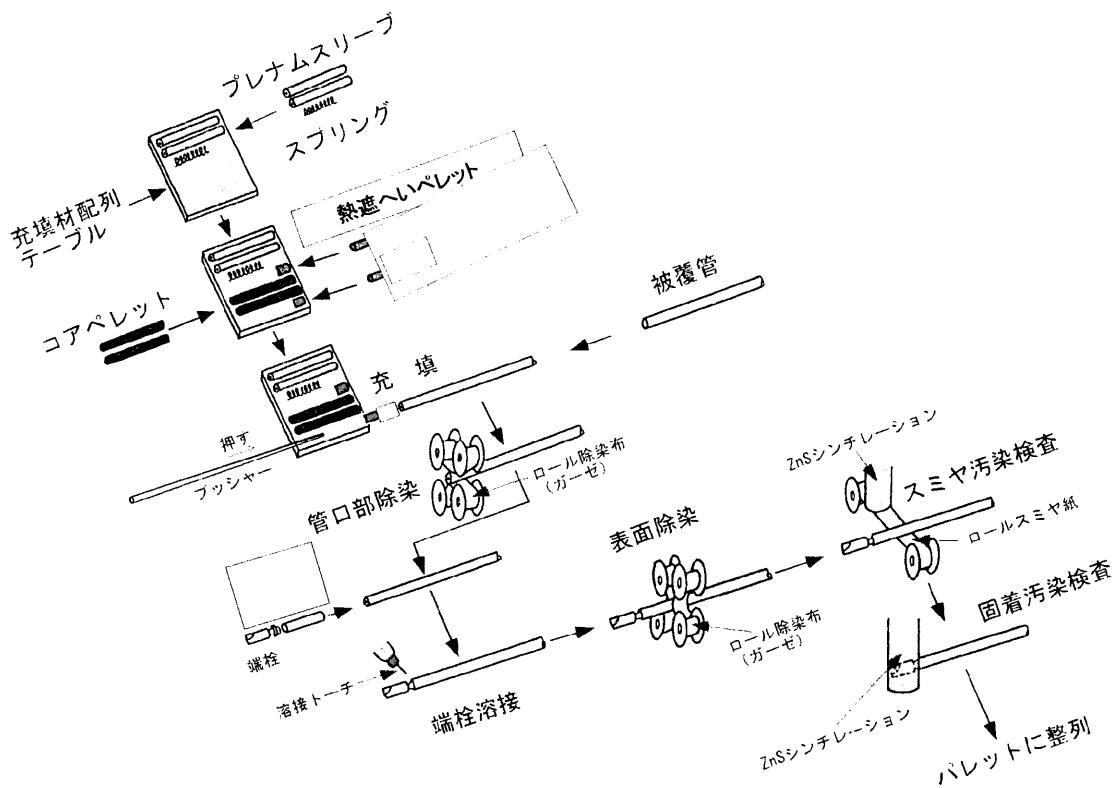
東海事業所プルトニウム燃料センター 製造加工部 加工課

青木伸廣

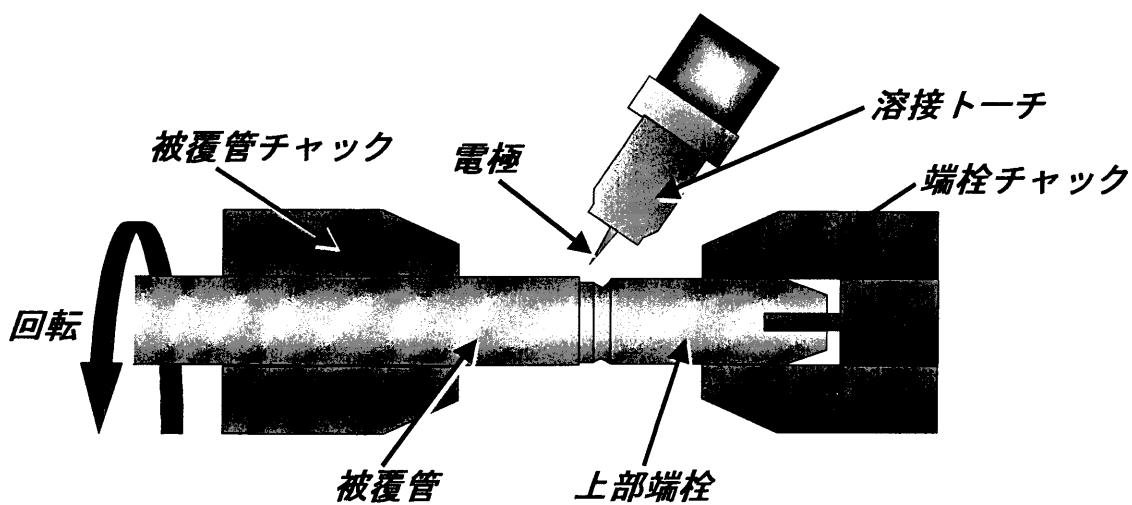
## 加工組立工程プロセスフロー



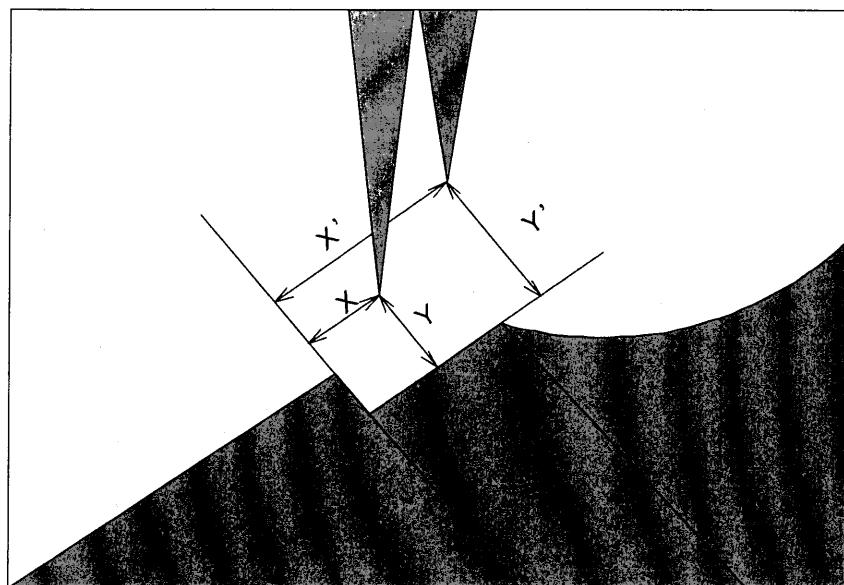
## ペレット充填工程の概要



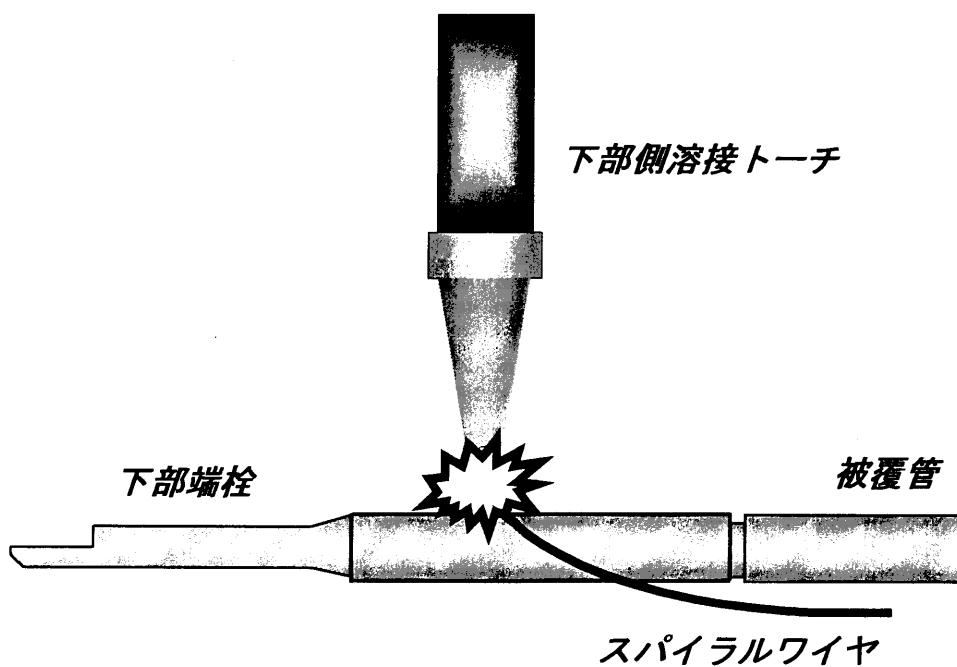
## 上部端栓溶接の概要(1)



## 上部端栓溶接の概要(2) (画像解析装置による電極位置決め)

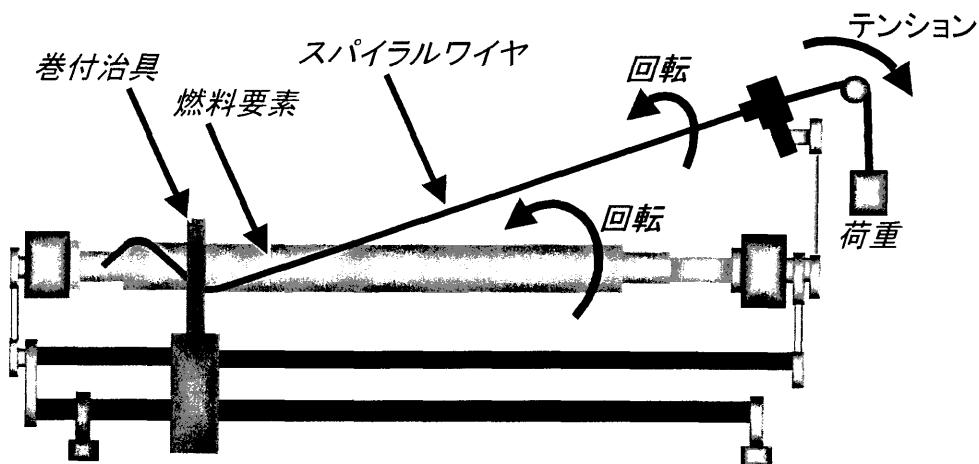


## ワイヤ巻付工程の概要(1) (下部側玉止め溶接)



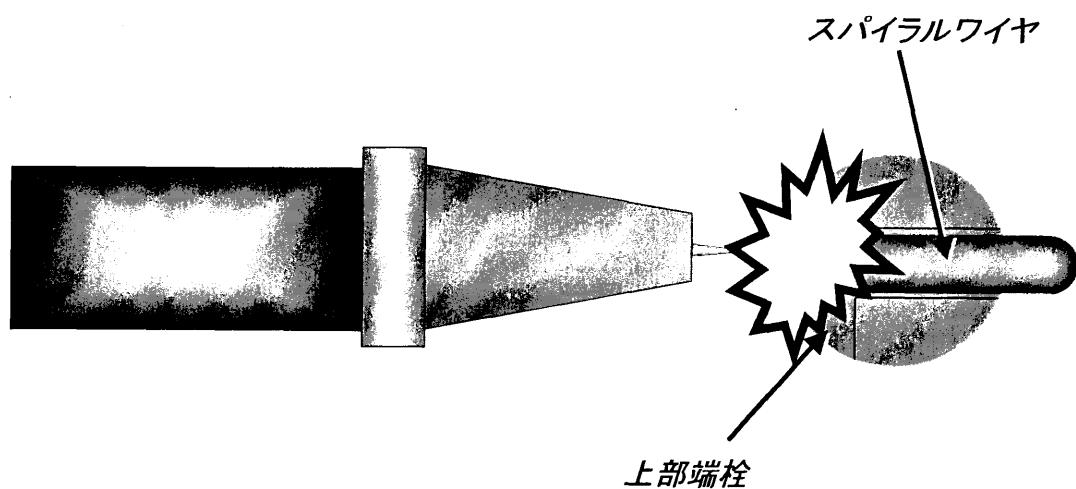
## ワイヤ巻付工程の概要(2)

(ワイヤ巻き付けの原理)

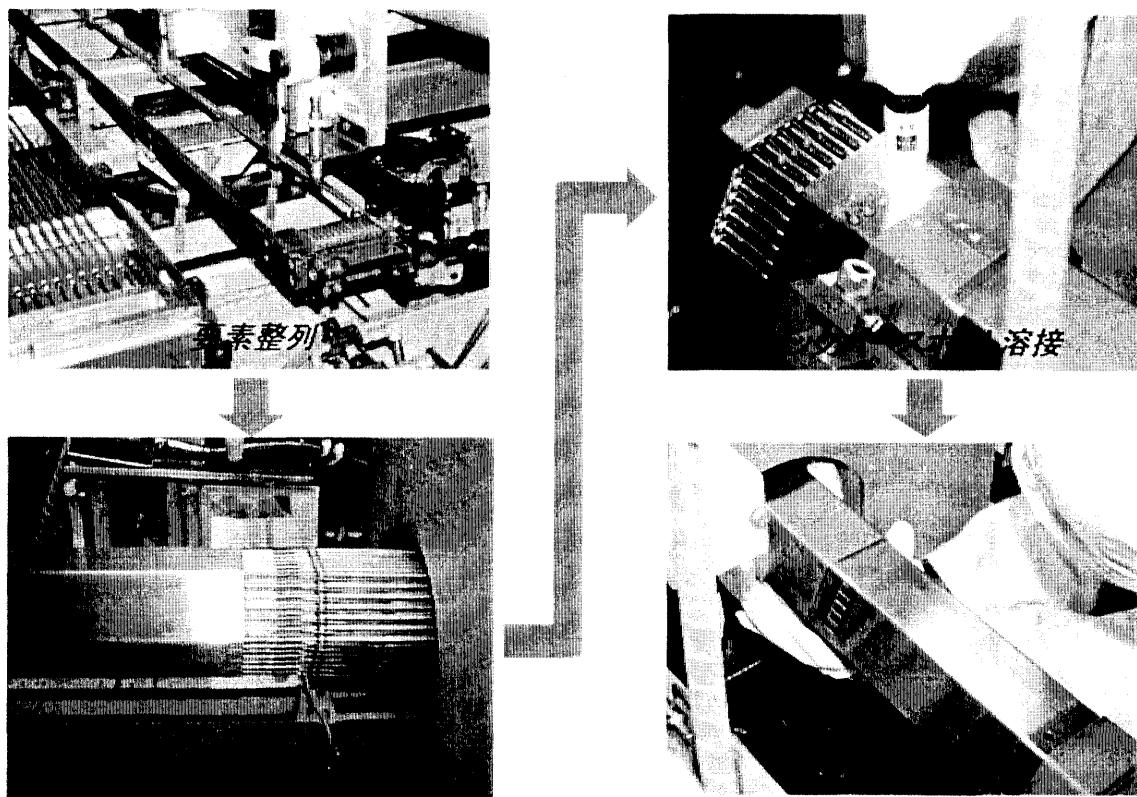


## ワイヤ巻付工程の概要(3)

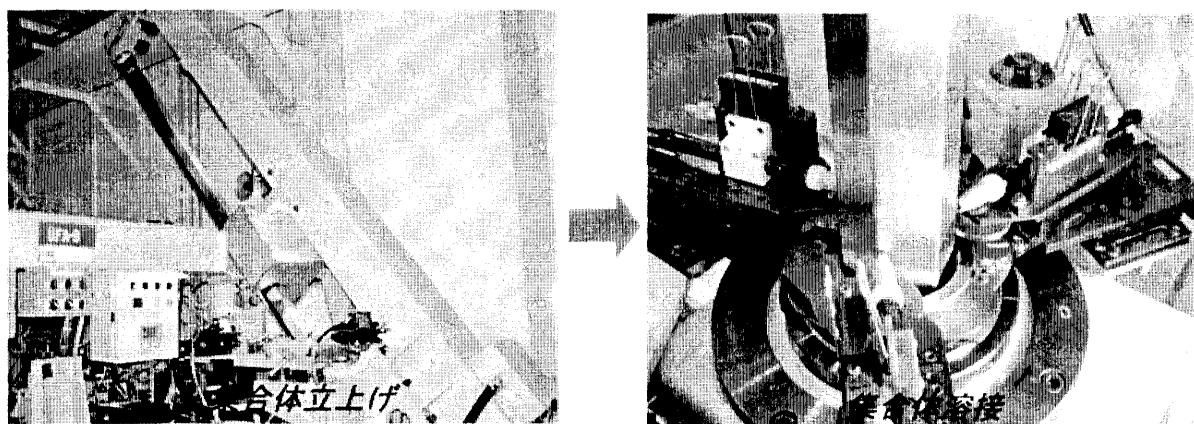
(上部側玉止め溶接)



## 集合体組立工程の概要(1)



## 集合体組立工程の概要(2)



## PNC1520鋼とSUS316相当ステンレス鋼の化学成分比較

化学成分	規格範囲(wt.%)	
	PNC1520鋼	SUS316相当ステンレス鋼
C	0.040 ~ 0.080	0.040 ~ 0.080
Si	<u>0.60 ~ 1.00</u>	<u>≤1.00</u>
Mn	<u>1.40 ~ 2.00</u>	<u>≤2.00</u>
P	<u>0.015 ~ 0.040</u>	<u>≤0.040</u>
S	≤ 0.010	≤ 0.010
Ni	<u>19.50 ~ 21.50</u>	<u>13.00 ~ 14.00</u>
Cr	<u>13.50 ~ 15.50</u>	<u>16.00 ~ 18.00</u>
Mo	2.00 ~ 3.00	2.00 ~ 3.00
Co	≤ 0.05	≤ 0.10
B	<u>0.0020 ~ 0.0060</u>	<u>≤ 0.0100</u>
N	≤ 0.010	≤ 0.010
Cu	≤ 0.20	≤ 0.20
Ti	<u>0.15 ~ 0.35</u>	<u>≤ 0.10</u>
V	≤ 0.20	≤ 0.20
Nb	0.05 ~ 0.15	Nb+Ta ≤ 0.10
Al	≤ 0.050	≤ 0.050
Zr	≤ 0.10	≤ 0.10
O	≤ 0.0040	—

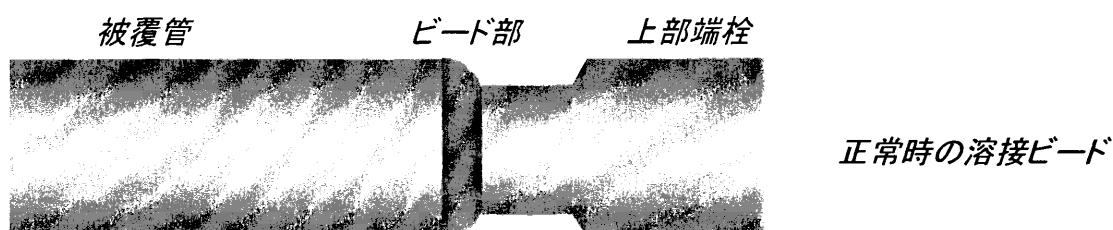
## 上部端栓溶接における問題点 (溶接ビードの乱れ)

※MK-II 6次取替製造キャンペーン中に発生(2本)

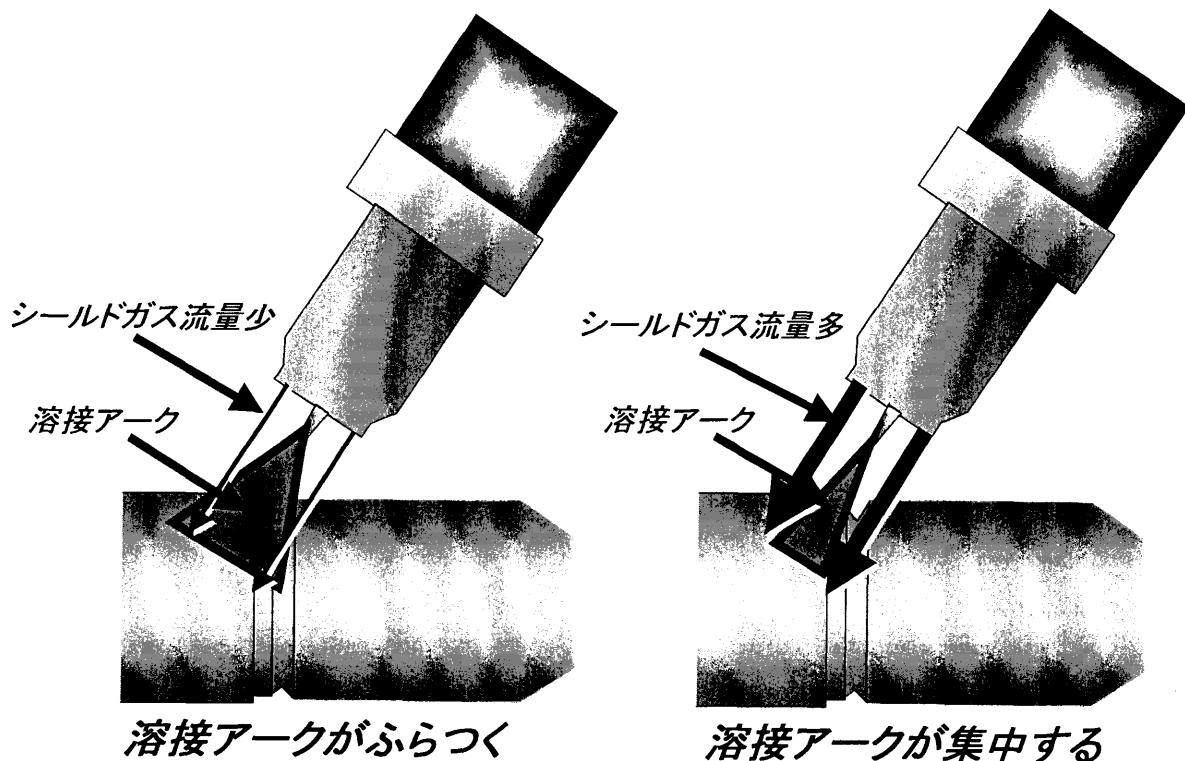


被覆管:PNC1520鋼

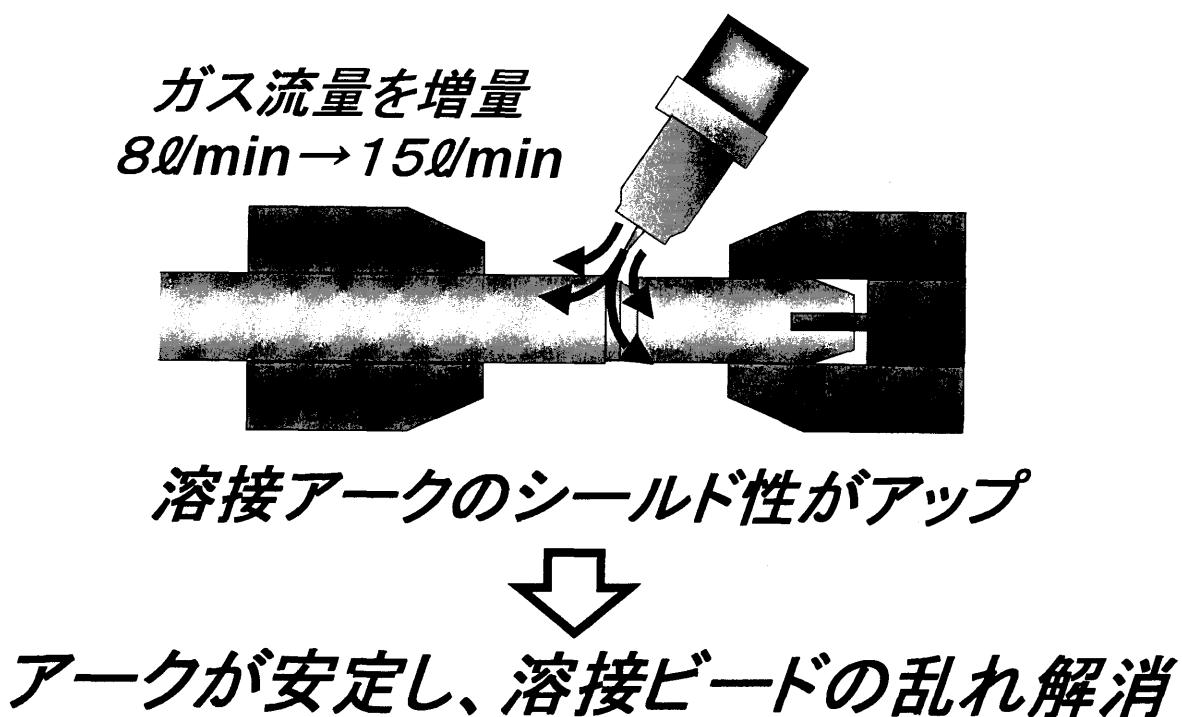
上部端栓:PNC1520鋼



## 上部端栓溶接ビード乱れ対策の検討

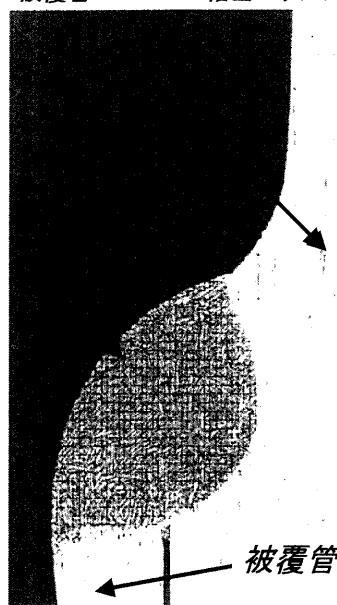


## 上部端栓溶接ビード乱れの対策



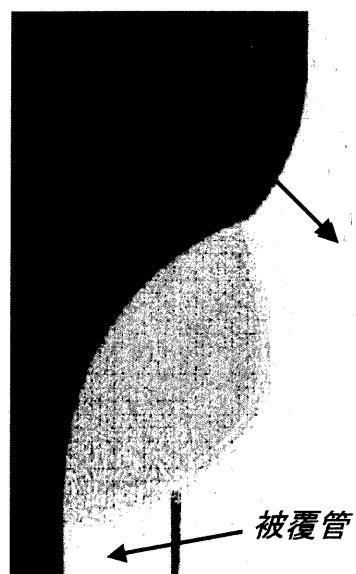
# 上部端栓溶接部断面金相の比較

上部端栓: SUS316相当ステンレス鋼  
被覆管: SUS316相当ステンレス鋼



MK-II 6次取替溶接施行試験結果

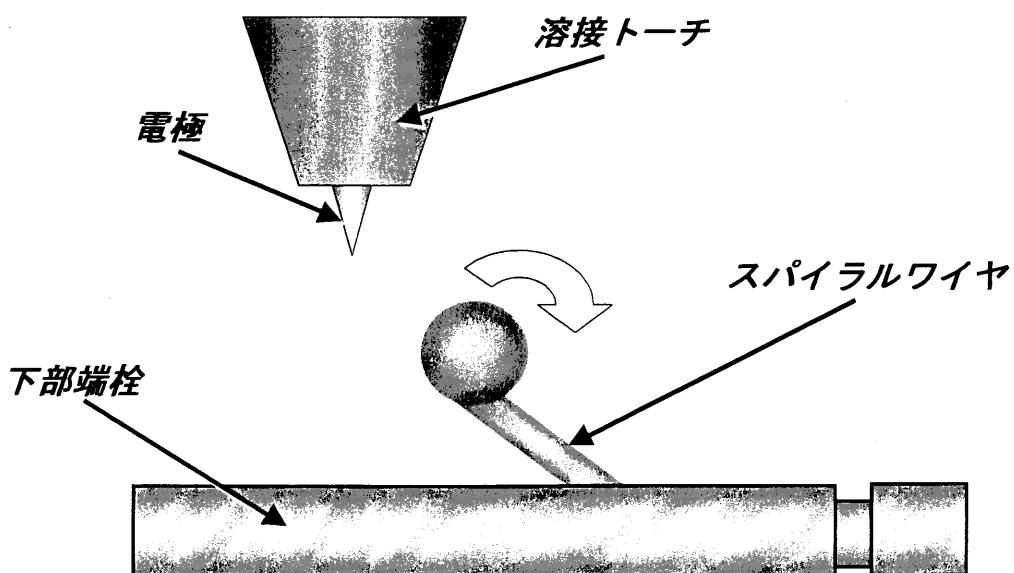
上部端栓: PNC 1520鋼  
被覆管: PNC 1520鋼



MK-III 初装荷溶接施行試験結果

## ワイヤ玉止め溶接

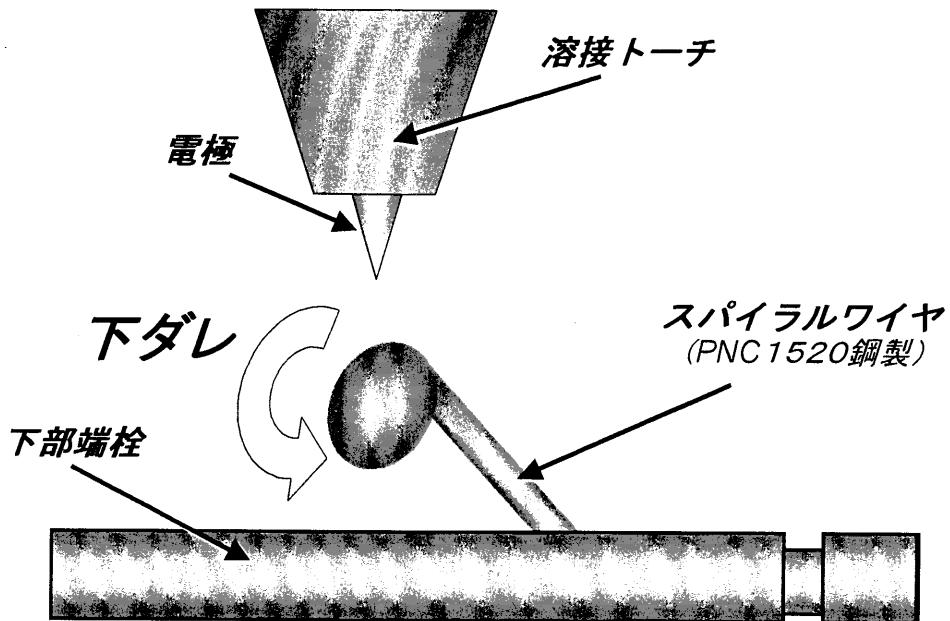
(下部側玉止め正常時)



# ワイヤ玉止め溶接の問題点

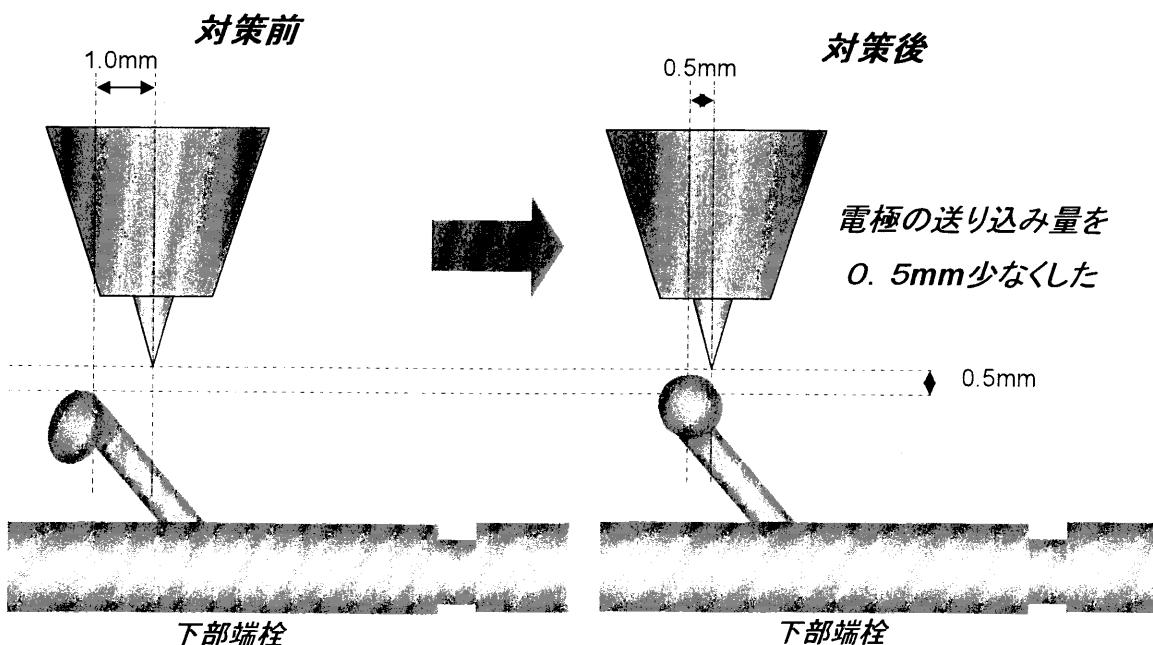
(下部側玉止めの下ダレ現象)

※MK-II 6次取替製造キャンペーン前の溶接試験で発生  
(溶接条件はSUS316相当ステンレス鋼溶接時と同様)



## 下部側ワイヤ玉止めの下ダレ対策

スパイラルワイヤ:PNC1520鋼

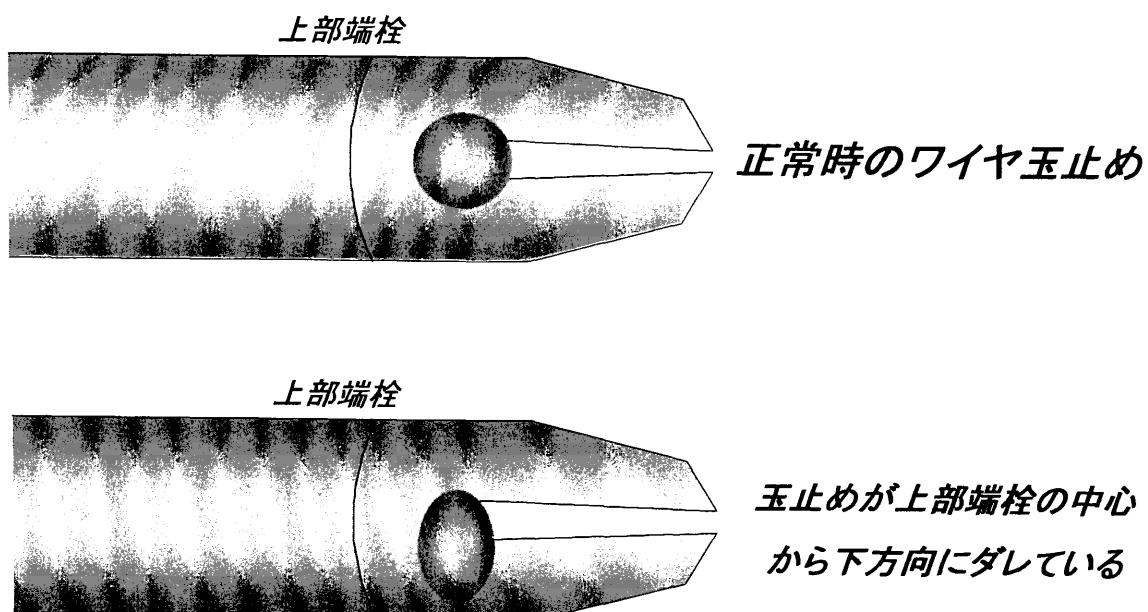


※溶接電流:5A 溶接時間:0.7秒 トーチガス流量:17ℓ/min

# ワイヤ玉止め溶接の問題点

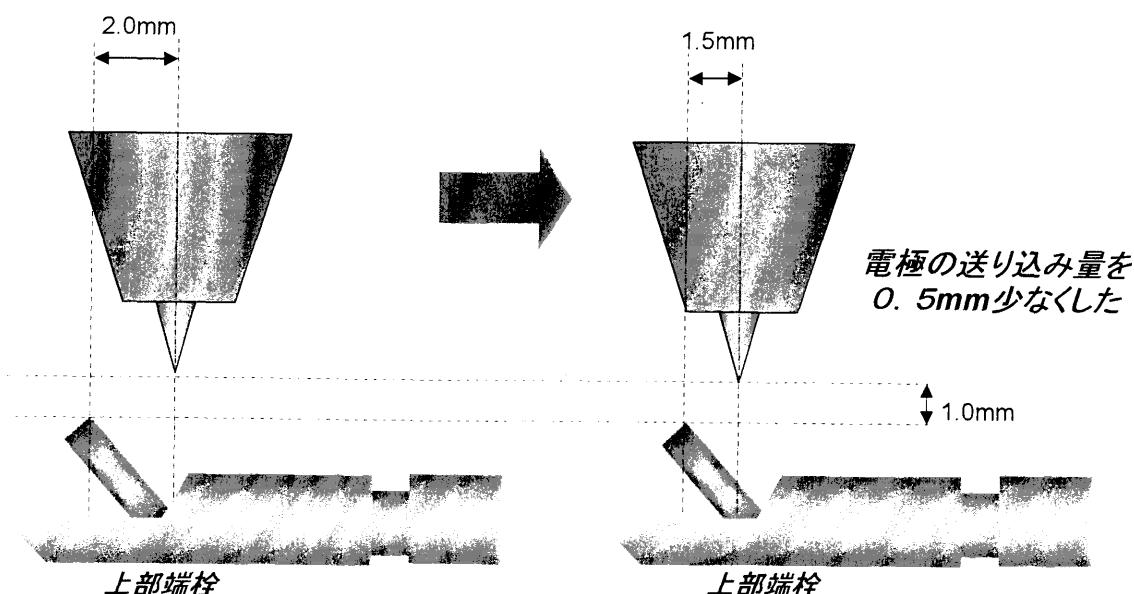
(上部側玉止めの下ダレ現象)

※MK-II 6次取替製造キャンペーン前の溶接試験で発生



## 上部側ワイヤ玉止めの下ダレ対策

スパイラルワイヤ:PNC1520鋼

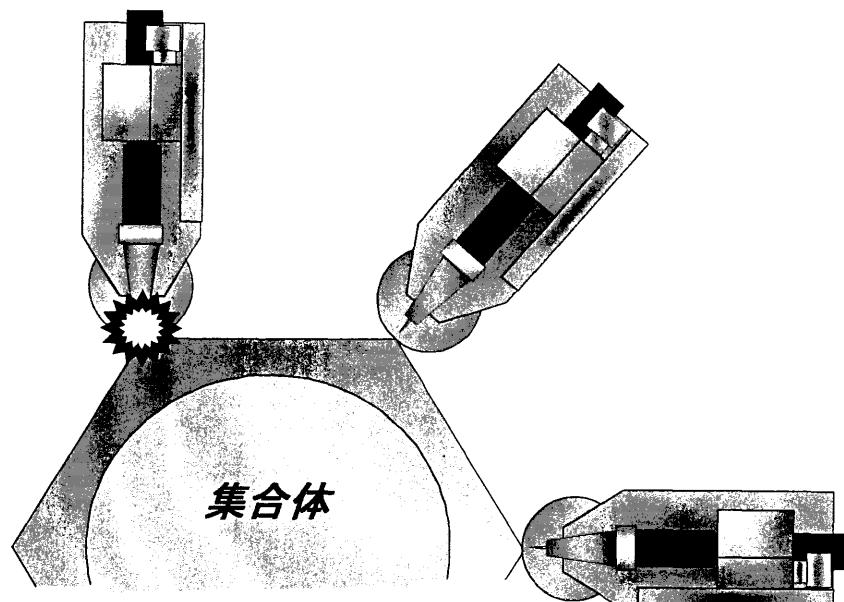


※溶接電流:8A 溶接時間:1.5秒 トーチガス流量:12ℓ/min

# 集合体溶接の方法

(1パス溶接)

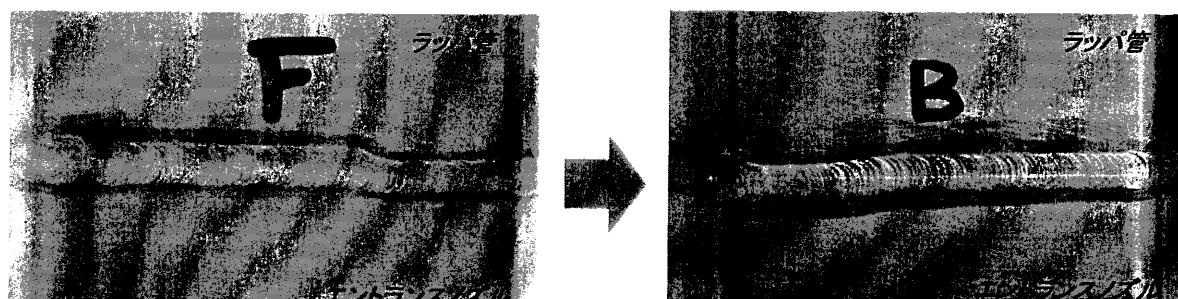
ラッパ管、エントランスノズル:SUS316相当ステンレス鋼



## 集合体溶接の問題点

※MK-III初装荷製造キャンペーン前の溶接試験で発生

ラッパ管:PNC 1520鋼 エントランスノズル:SUS316相当ステンレス鋼



1パスで溶接した2面目

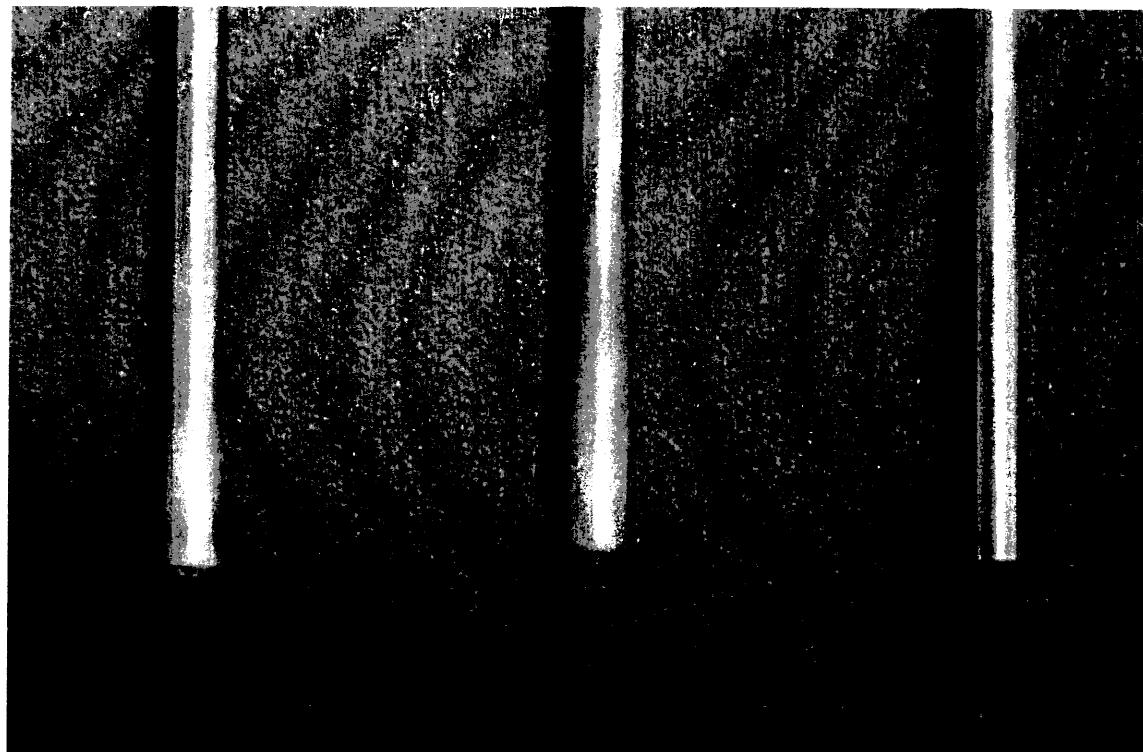
1面溶接後冷却を実施した2面目

(溶接面を約20°Cまで冷却)

※溶接電流55A 溶接速度0.8mm/sec トーチガス流量 Ar1.5ℓ/min He12 ℓ/min

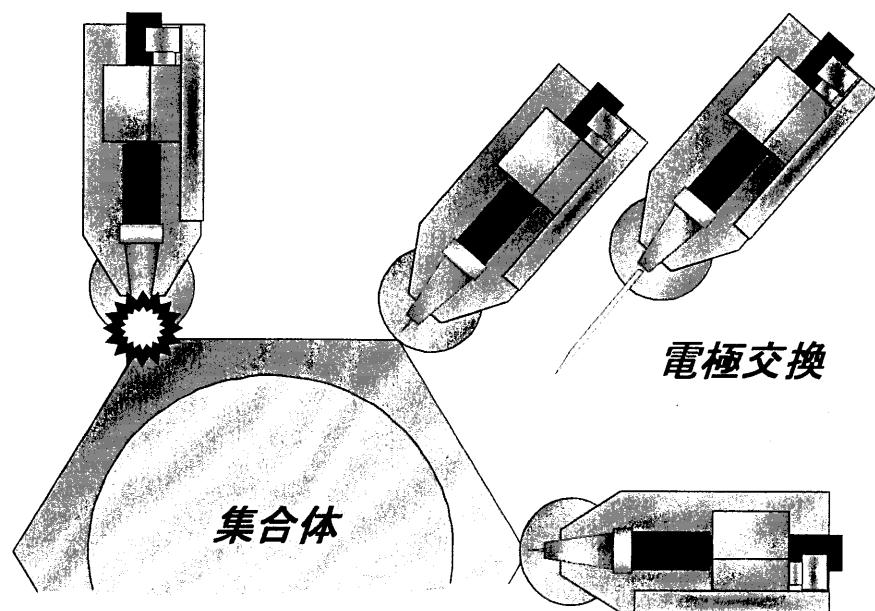
## 電極先端部比較(集合体溶接用)

2%トリウムタンクステン  $\phi 1.6\text{mm}$  先端角120°



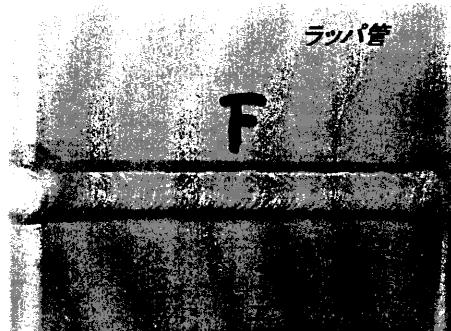
## 集合体溶接ビード外観不良の対策

ラッパ管:PNC1520鋼 エントランスノズル:SUS316相当ステンレス鋼



## 集合体溶接ビード外観 (対策実施後)

ラッパ管:PNC1520鋼 エントランスノズル:SUS316相当ステンレス鋼



2面目溶接ビード

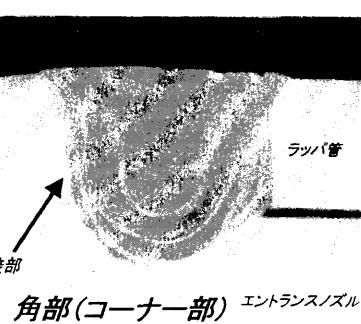
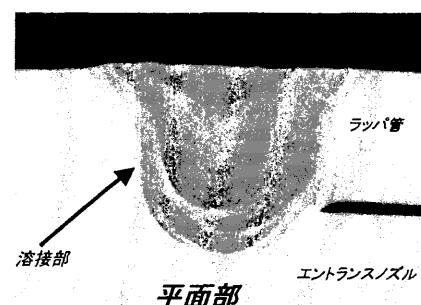


1面目溶接ビード

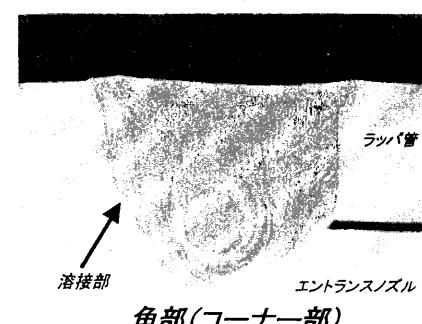
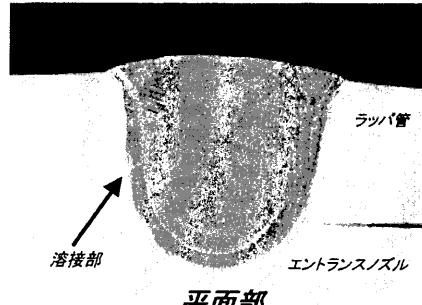
※溶接電流55A 溶接速度0.8mm/sec トーチガス流量 Ar1.5ℓ/min He12 ℓ/min

## 集合体溶接部断面金相の比較

**MK-II 6次取替**  
ラッパ管:SUS316相当ステンレス鋼  
エントランスノズル:SUS316相当ステンレス鋼



**MK-III 初装荷**  
ラッパ管:PNC1520鋼  
エントランスノズル:SUS316相当ステンレス鋼



## まとめ

1.1520鋼製部材を使用した上部端栓溶接、ワイヤ玉止め及び集合体溶接において問題が発生したが、溶接条件の見直し等によって問題点を解決することができた。

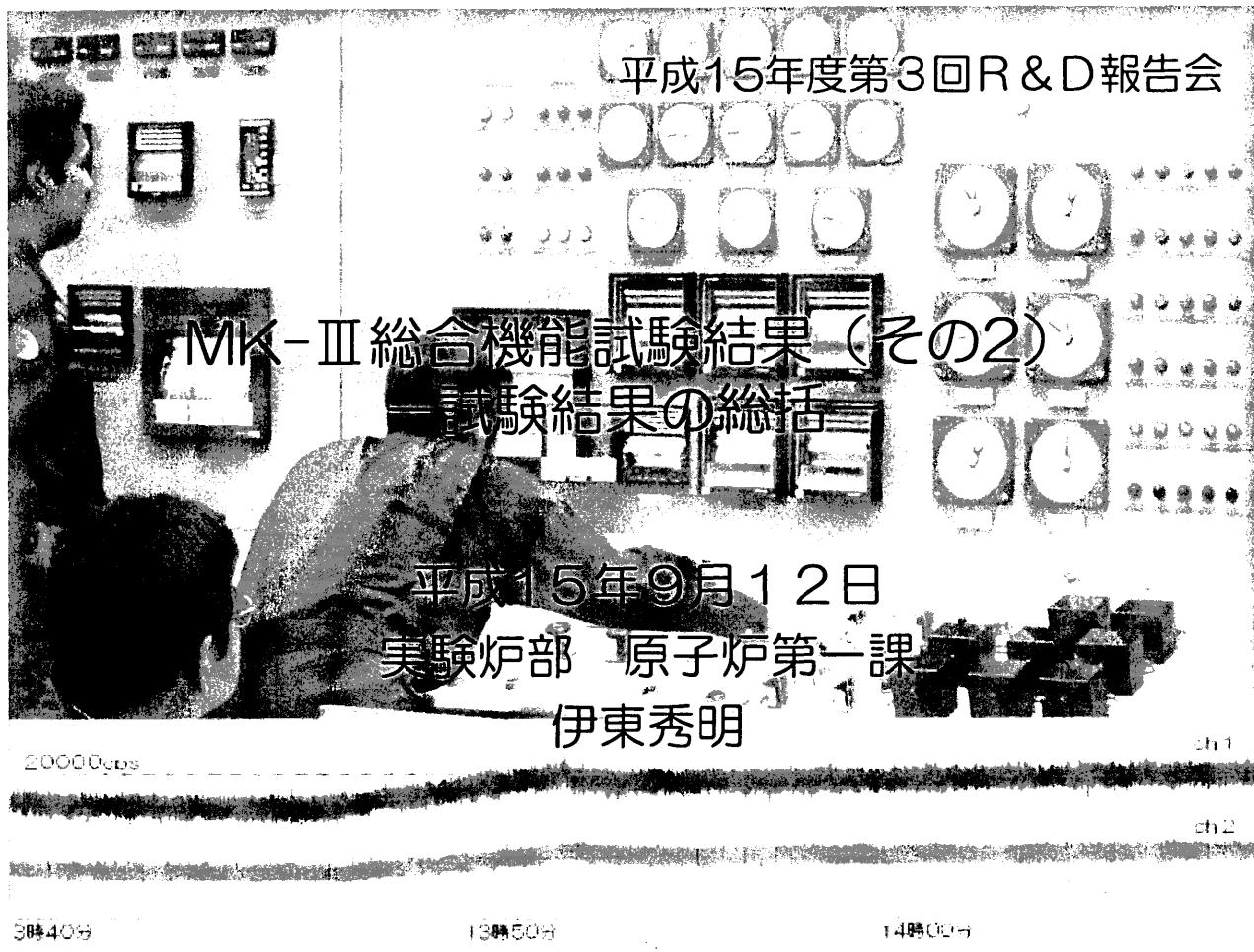
工 程	発生した問題点	解決策
上部端栓溶接	MK-II 6次取替製造中に溶接ビードが乱れる事象が2本発生した。	溶接条件の見直し
ワイヤ玉止め溶接	キャンペーン前の溶接試験で玉止めの下ダレが発生した。	電極セッティング位置の変更
集合体溶接	キャンペーン前の溶接試験でビード外観の乱れが発生した。	新たな溶接方法の採用

2.上記の問題点解決により、これまでの1520鋼製部材を使用した燃料製造(燃料要素14971本、集合体88体)において、溶接工程に関するトラブル発生はなく、SUS316相当ステンレス鋼部材使用時と比較しても同等の品質を持つ溶接を行うことができた。

3.集合体溶接において新たな溶接方法を採用したことにより30分程度、溶接に要する時間が長くなったが、同時進行が可能な作業を前倒しすることで集合体組立作業の生産性について問題は生じなかった。

## 御静聴ありがとうございました

元



## 機能試験の目的

- 単体機能試験(TKS)

機器単体の作動、特性試験を行い機器単体の健全性、機能、性能を確認する。

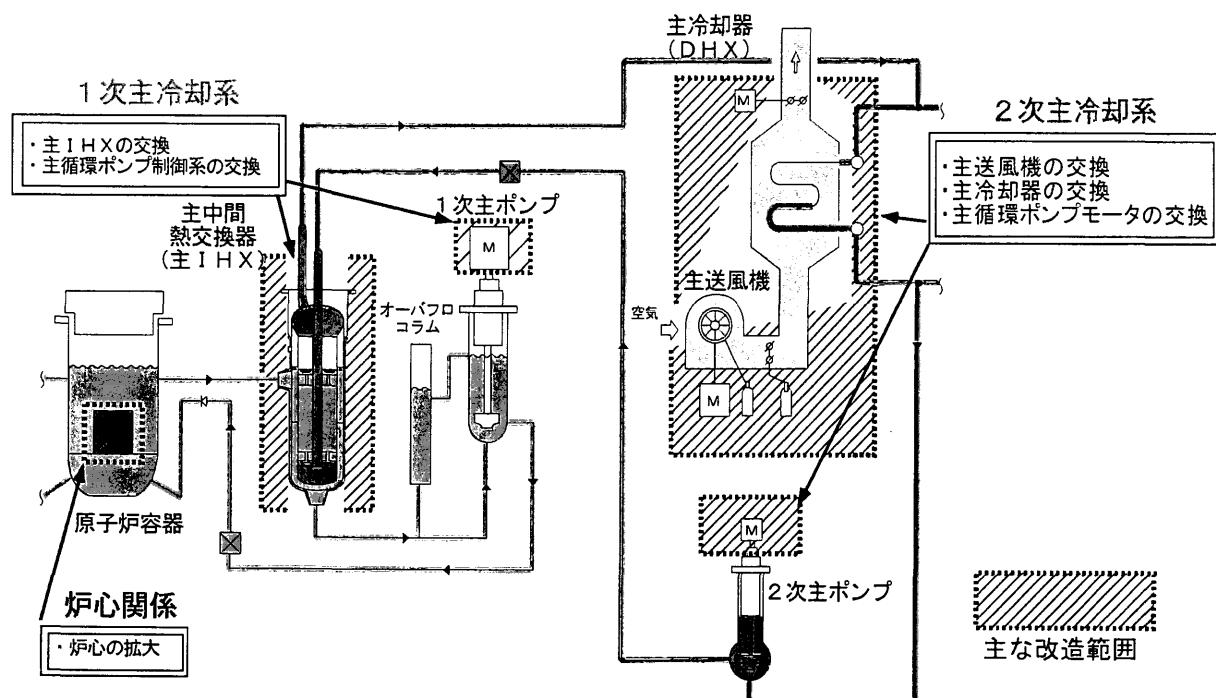
- 総合機能試験(SKS)

機器、設備を総合的に組み合わせて作動させ、系統としての機能、特性、性能を確認する。

- 性能試験

原子炉を運転して低出力から定格出力までのプラント全体の性能を確認する。

## 総合機能試験の主要な対象機器



## MK-III 総合機能試験の目的

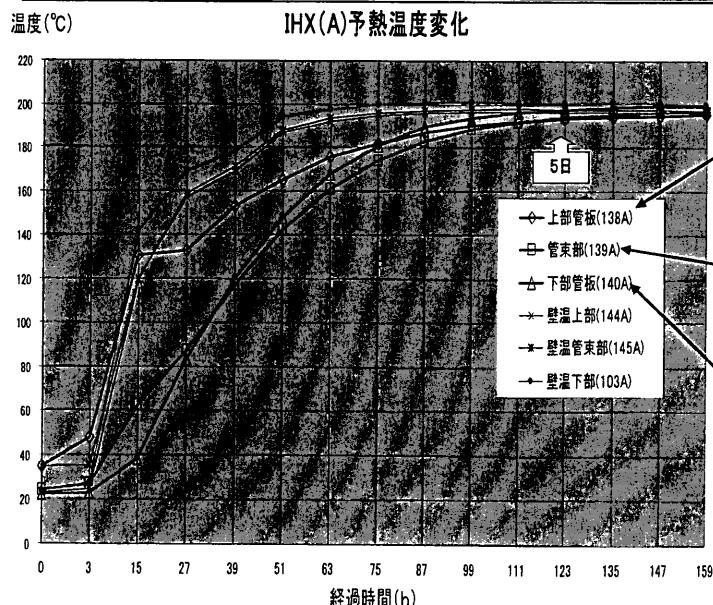
主要改造事項	主要試験項目
<b>【炉心】</b> - 炉心の拡大	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1次系圧力損失測定</li> <li>・炉心内流量分布測定</li> </ul>
<b>【1次冷却系】</b> - IHX交換 - 冷却材流量増大 - 流量制御系更新	<ul style="list-style-type: none"> <li>・予熱性の確認</li> <li>・流動特性、系統圧力損失測定</li> <li>・制御性の確認</li> </ul>
<b>【2次冷却系】</b> - 主送風機、DHX交換 - 冷却材流量増大 - 主ポンプモータ交換	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風量特性試験等</li> <li>・流動特性、系統圧力損失測定</li> <li>・流動特性、制御性の確認</li> </ul>

# MK-III 総合機能試験概略工程

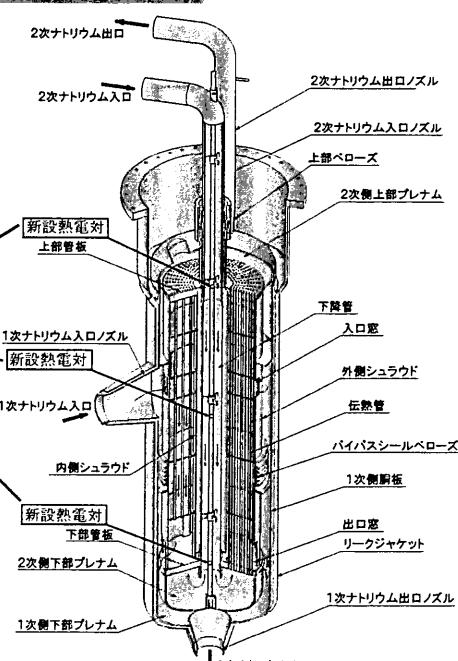
H13年	8月	9月		10月				H14年4月	
冷却系 状態	常温	系系統昇温	200°C				250°C	200°C	250°C
	1次系	ドレン	充填▼	ドレン	充填▼	ポンプ起動	252m³/h	ドレン	充填▼
	2次系	ドレン	充填▼	ドレン	充填▼	ポンプ起動		ドレン	充填▼
「その1」 試験項目 概要	主送風機 試験		主冷却器 風量測定 試験		系統、IHX 昇温試験		Na純度測定試験		1次、2次 冷却系 機能試験
	配管熱変位試験				2次冷 却系機 能試験				燃取設 備機能 試験
H14年6月 ～ H15年1月 燃料交換作業	H15年 1月	2月		3月		4月			
冷却系 状態		200°C	250°C						
		252m³/h		75%			100%		
		100%					100%		
「その2」 試験項目 概要	補助冷 却系特 性試験		1次主循環ポンブ 速度制御試験		保護 作動 試験 等		炉心内 流量分 布測定		↑ 3/10 SKS 完了

## 主中間熱交換器予熱試験

【目的】IHX内部に新設した温度計の実測値を用いて昇温率の調整を行い、昇温時間の短縮効果を確認する。



【結果】新設した温度計により昇温率が調整でき、予熱時間は従来の14日から5日に短縮できた。

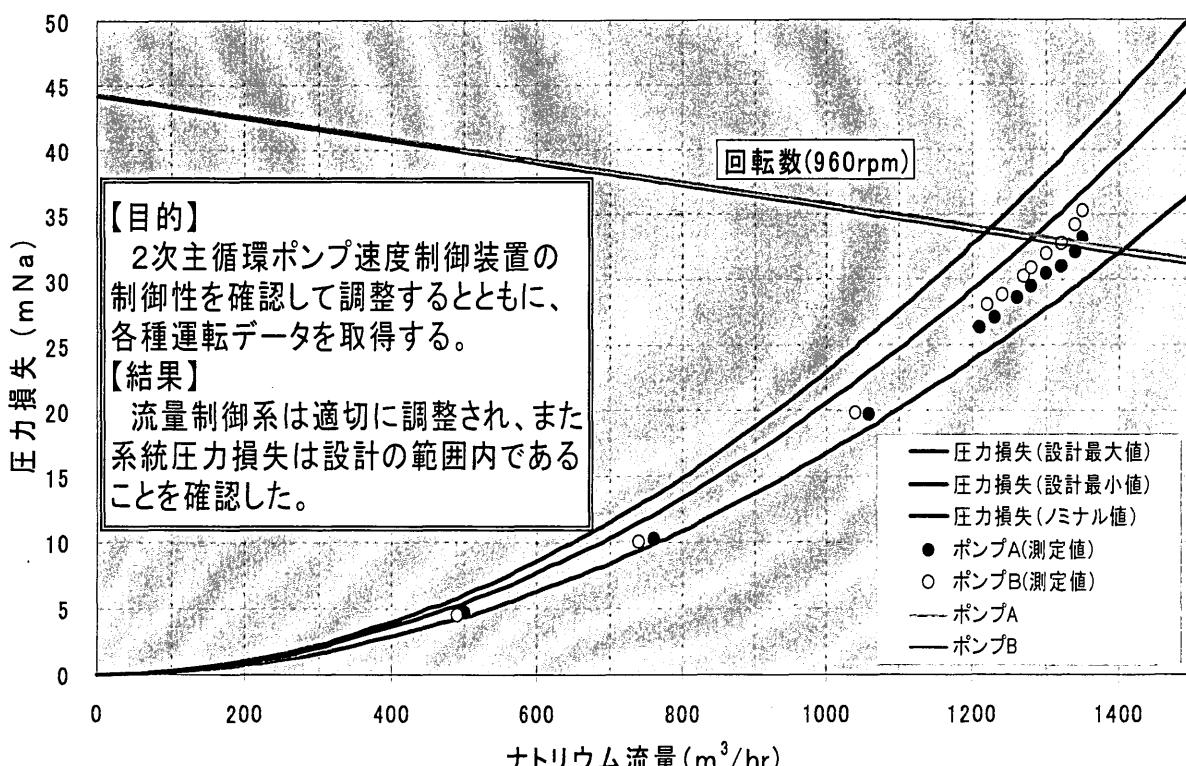


主中間熱交換器構造図

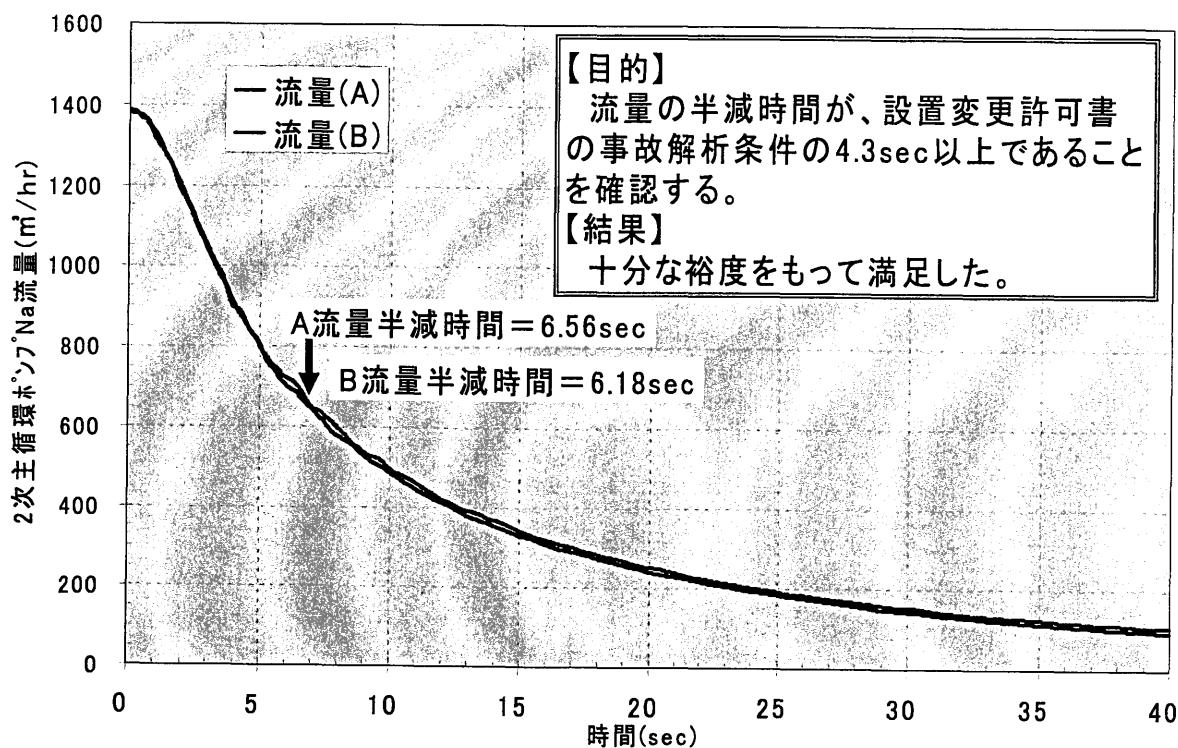
## ナトリウム純度測定試験



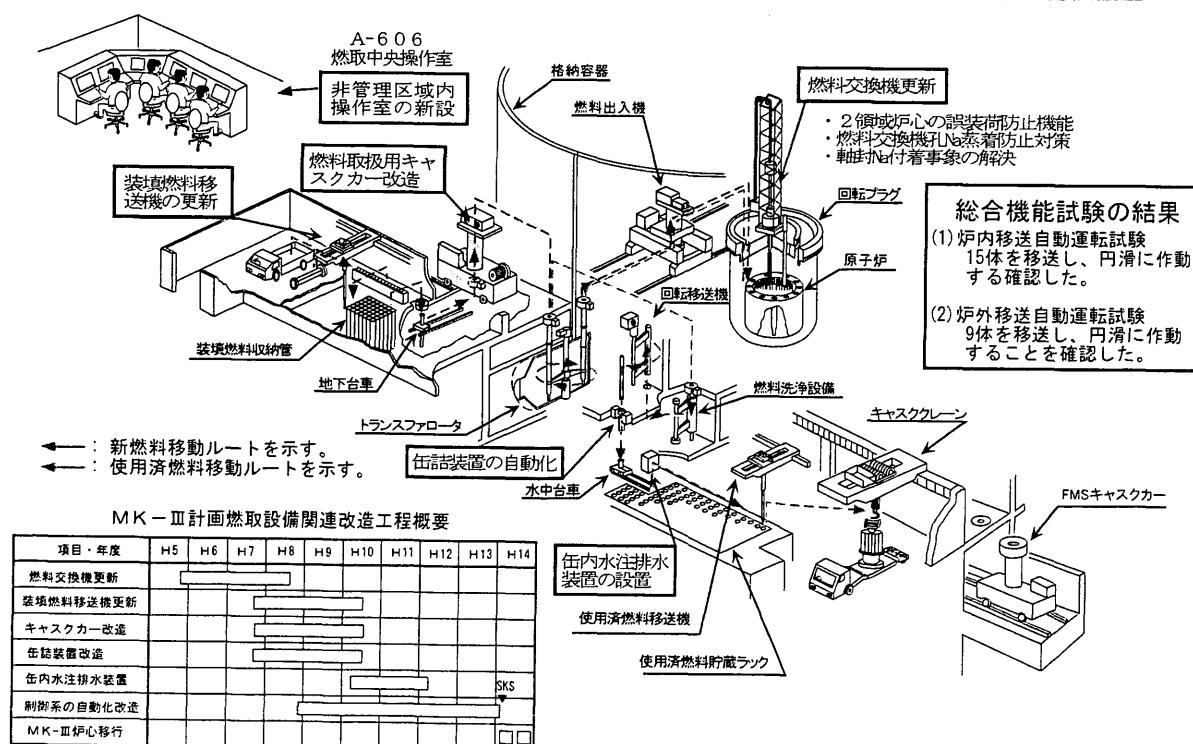
## 2次主循環ポンプ流量制御試験



## 2次主循環ポンプフローコーストダウン試験

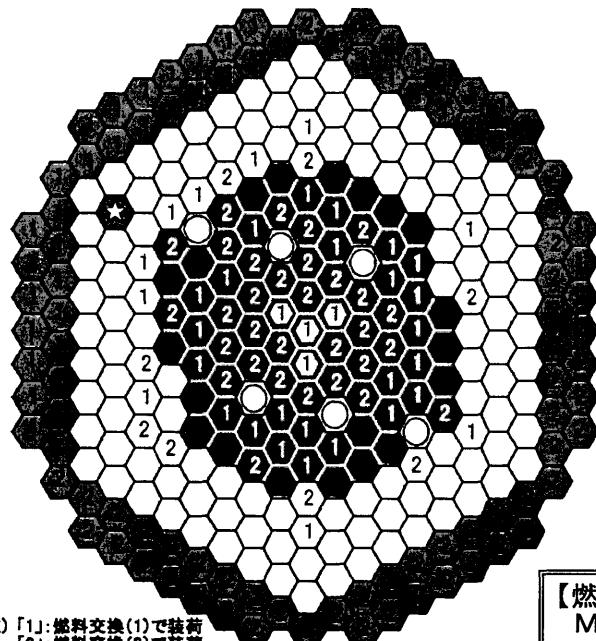


## 燃料取扱設備自動化改造後の機能試験



## 性能試験用炉心の構成

燃料取扱設備の自動化後の機能試験を実施後、性能試験用炉心構成を実施



主)「1」:燃料交換(1)で装荷  
「2」:燃料交換(2)で装荷

MK-III性能試験用炉心を構成する集合体数の推移

	炉心燃料	燃料交換(1) 開始前	燃料交換(1) で装荷	燃料交換(2) で装荷	合計
反射体	113	10	8	131	
遮へい集合体	0	47	49	96	
制御棒	6	0	0	6	
中性子源	1	0	0	1	
材料照射用反射体	0	4	0	4	
合計	140	85	88	313	

交換体数: 173体

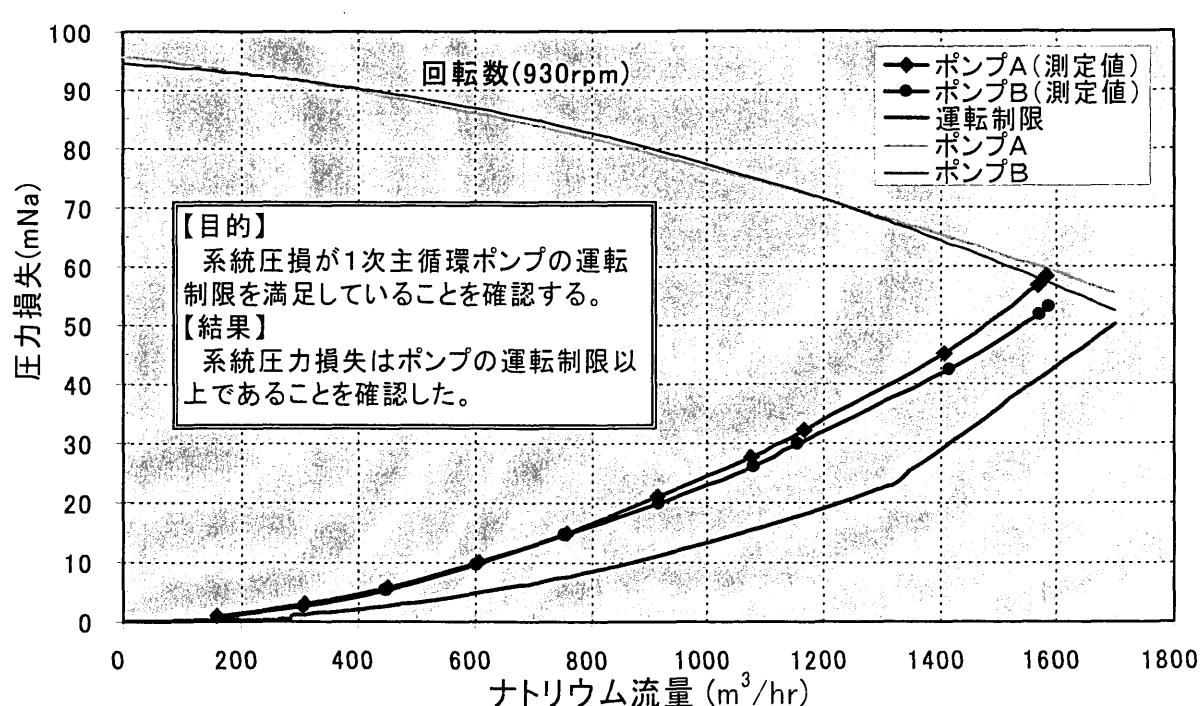
### 【燃料取扱設備自動化の効果】

MK-II炉心移行 14.6人/体 (28人/日)

MK-III炉心移行 6.1人/体 (13人/日)

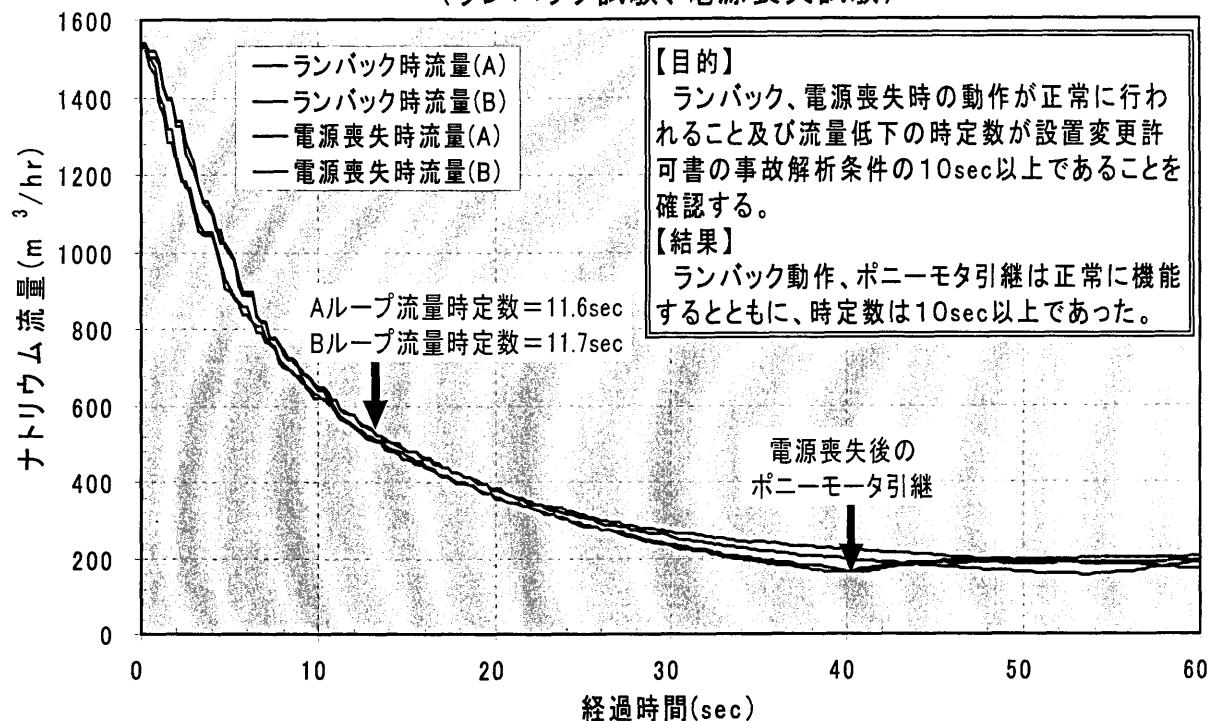
集合体1体交換の人工を42%に低減

## 1次主冷却系系統圧損測定試験



## 1次主循環ポンプフローコーストダウン試験

(ランバック試験、電源喪失試験)



## 【目的】

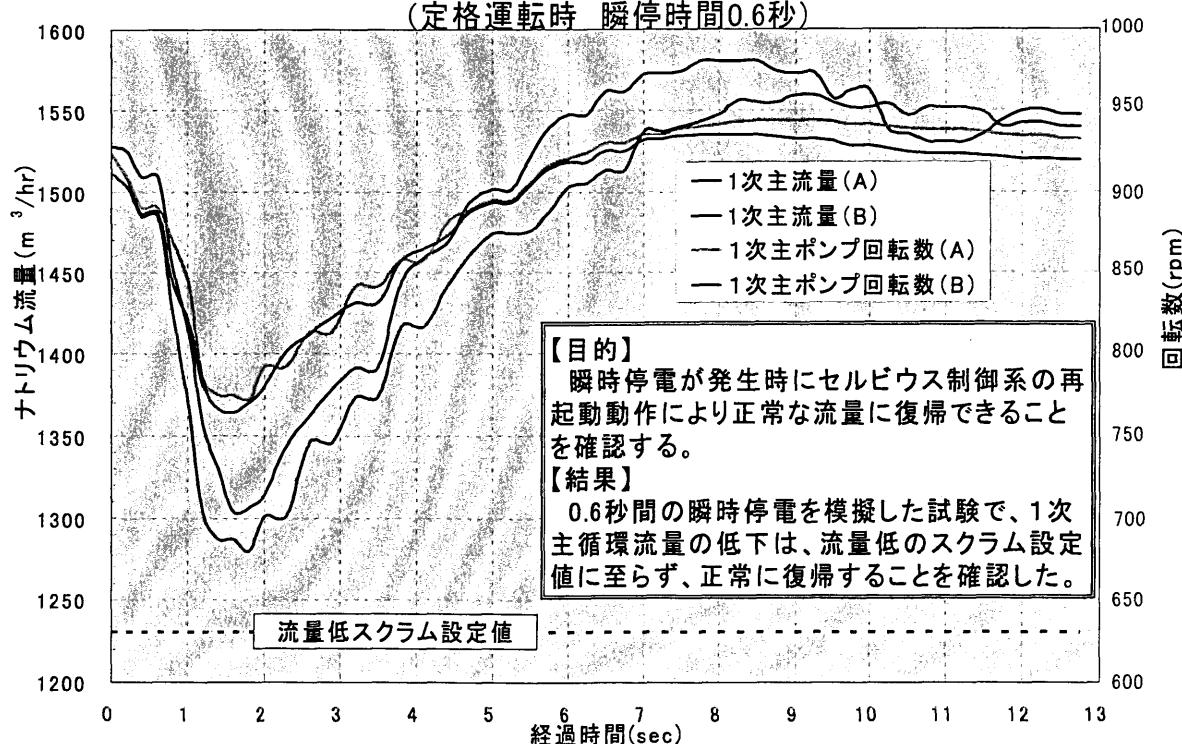
ランバック、電源喪失時の動作が正常に行われること及び流量低下の時定数が設置変更許可書の事故解析条件の10sec以上であることを確認する。

## 【結果】

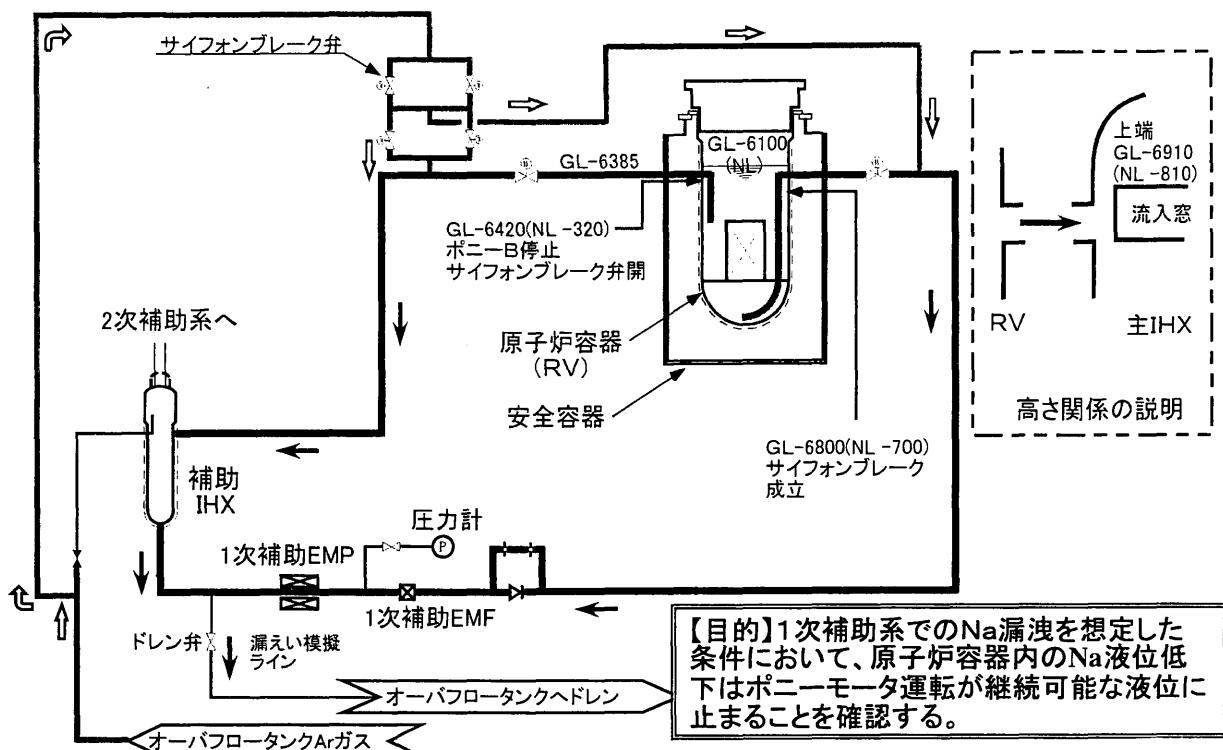
ランバック動作、ポニーモタ引継は正常に機能するとともに、時定数は10sec以上であった。

## 1次主循環ポンプ瞬停再起動試験

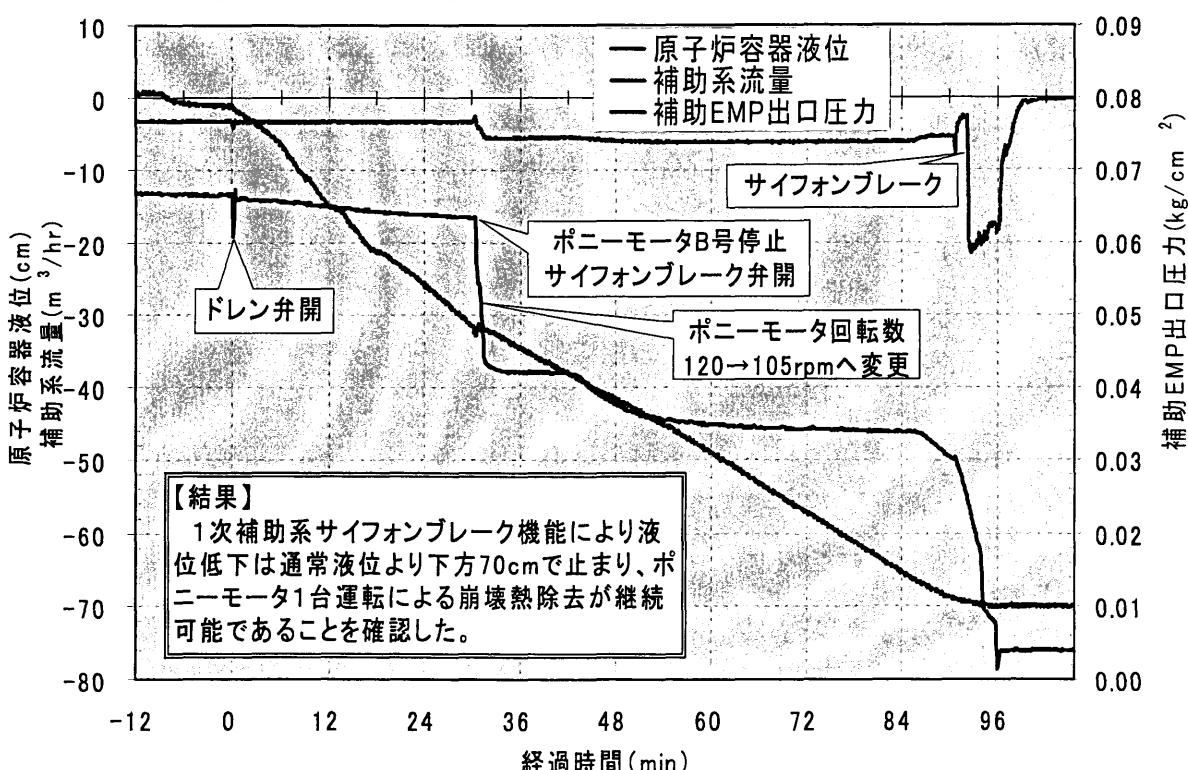
(定格運転時 瞬停時間0.6秒)



## 1次補助系サイフォンブレーク試験概要

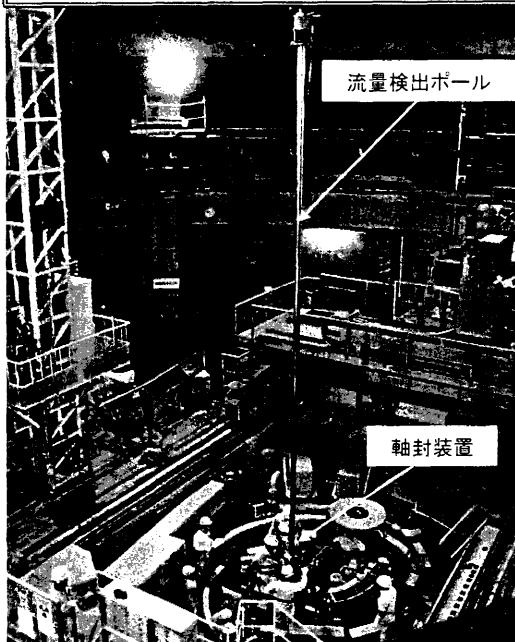


## 1次補助系サイフォンブレーク試験結果

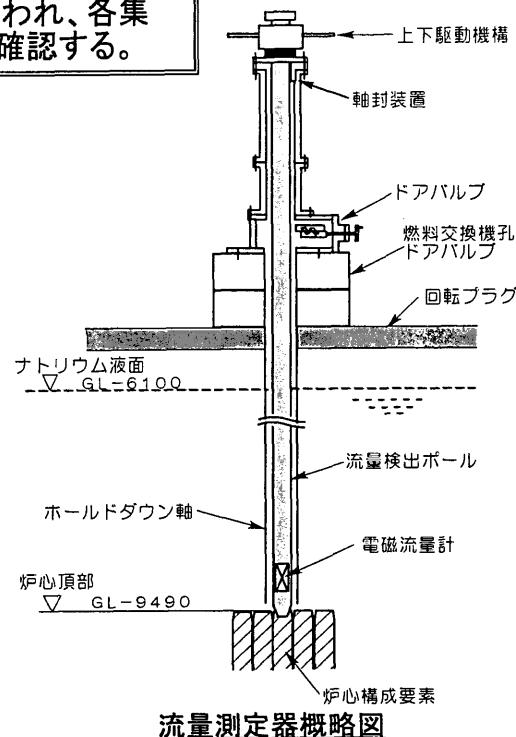


## 炉心内流量分布測定試験の概要

【目的】炉心内冷却材流量配分が適切に行われ、各集合体に必要な流量が確保されていることを確認する。

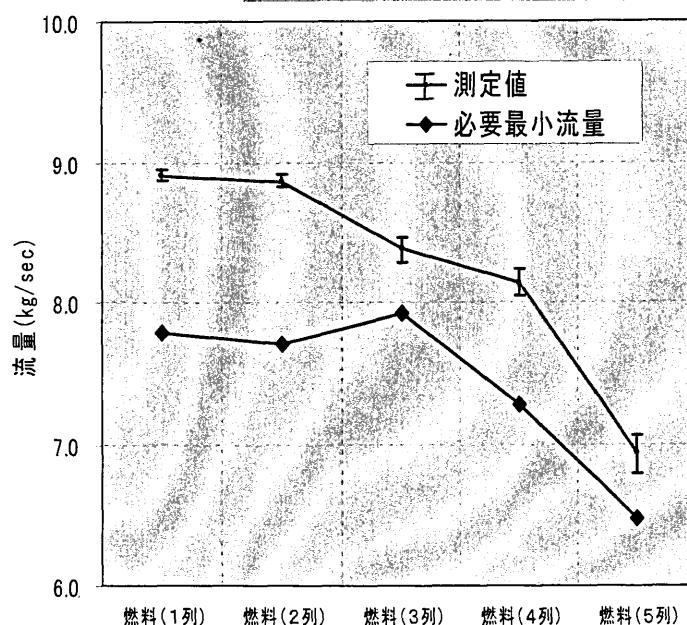


流量検出ポール据付状況

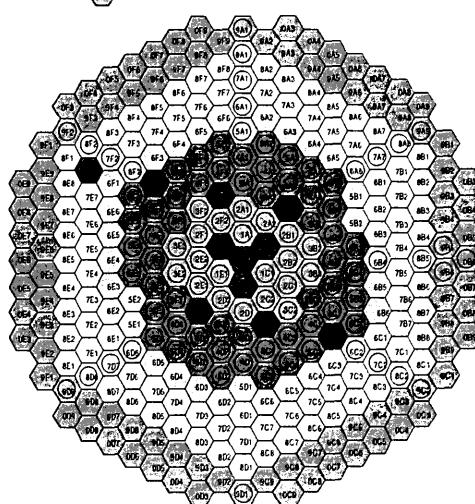


流量測定器概略図

## 炉心内流量分布測定試験結果 1

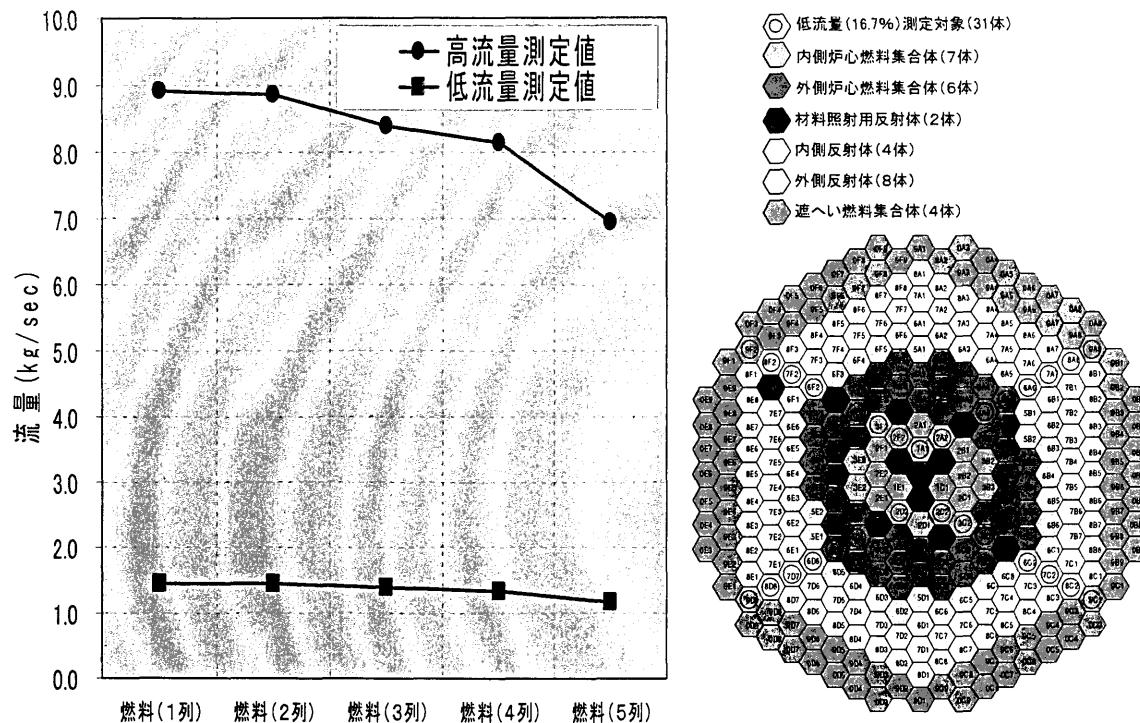


- 高流量(75%)測定対象(106体)
- 内側炉心燃料集合体(全数)
- 外側炉心燃料集合体(全数)
- 材料照射用反射体(4体)
- 内側反射体(6体)
- 外側反射体(12体)
- 進へい燃料集合体(9体)



【結果】  
燃料被覆管最高温度が熱的制限値(675°C)となる必要最小流量を上回ることを確認した。

## 炉心内流量分布測定試験結果2



## 総合機能試験の主要な結果

- 1次主冷却系の昇温期間は、これまで2週間確保していたものが、5日程度に短縮できることを確認した。
- 改造工事によって混入したナトリウム中の不純物は、純化目標値を十分満足する範囲まで純化できた。
- 1次系及び2次系の主循環ポンプ運転特性及びインターロック動作等、ナトリウムループとしての総合機能を確認した。
- MK-III性能試験用炉心の炉心内流量分布は設計の範囲内であることを確認した。

総合機能試験を完了し、性能試験前の系統としての総合機能、特性、性能を確認した。

## 総合機能試験結果の反映

- 冷却系試験で得られた、1次主循環ポンプ起動・流量調整操作、1次補助系サイフォンブレーク時ボニーモータ回転数調整等の主な結果を、運転マニュアル23編に反映した。
- 流動特性試験等で得られた流量低下の時定数、系統圧損等の結果によりプラント動特性解析コード”Mimir-N2”的妥当性を確認した上で、性能試験の手動スクラム、外部電源喪失試験の予測解析を実施した。
- ナトリウム中への不純物の総持込量は、性能試験結果と合わせて評価する。

## 平成15年度第3回R & D報告会

### MK-III性能試験結果（その1） —低出力時の核特性を中心に—

平成15年9月12日

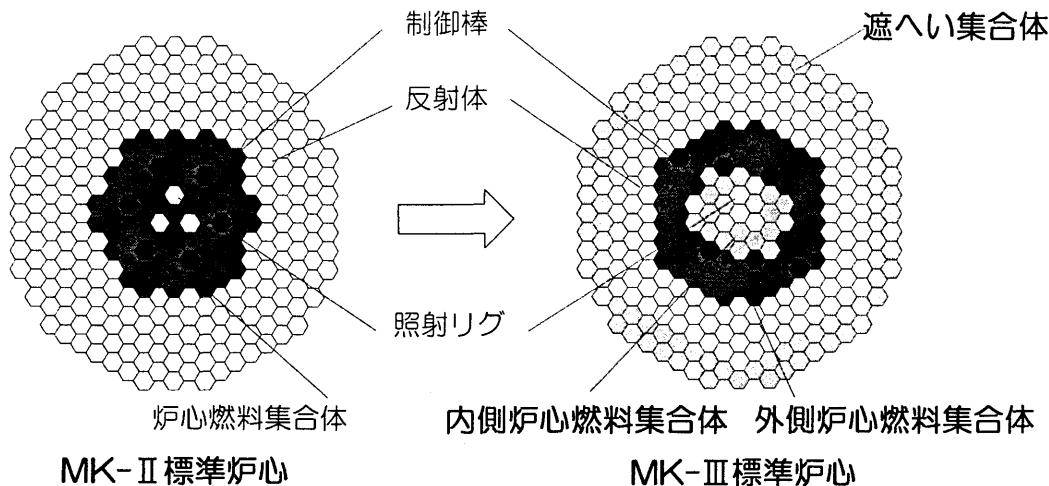
実験炉部 技術課

前田茂貴

#### ■ 性能試験の目的

- 炉心特性等の把握及び核的制限値等を満足していることの確認
- MK-III炉心設計計算の妥当性の検証
- MK-III炉心管理コードシステムの検証
- JUPITER標準解析手法等の精度検証

## MK-II から MK-III へ（炉心の変更）



主な変更点	原子炉熱出力	100MW	→ 140MW
	燃料集合体の最大装荷数	67体（1領域）	→ 85体（2領域）
	制御棒の配置	第3列 6体	→ 第3列 4体、第5列 2体
	炉心高さ	55cm	→ 50cm
	第9、10列の反射体（96体）	を遮へい集合体 ( $B_4C$ ) に置換	
	照射燃料集合体の最大装荷数	計 9体	→ 計 21体

## 性能試験項目一覧

### 炉心特性試験項目

- 臨界、過剰反応度
- 核出力校正
- 制御棒校正
- 等温温度係数
- 出力係数
- 燃焼係数
- 燃料集合体出口温度分布
- 炉雜音

8項目

### プラント特性試験項目

- 出力上昇
- 定格出力連続運転
- 熱出力校正
- 定常伝熱特性
- 制御棒微小引抜・挿入応答
- 主冷却器出口温度変化応答
- M系列
- 手動スクラム
- 外部電源喪失
- 主冷却系による崩壊熱除去
- 運転温度圧力確認
- ナトリウム・ガーニル・アルゴン分析
- 廃ガス濃度
- コールドトラップ運転確認
- 主送風機起動条件の検討

15項目

### 遮へい特性試験項目

- 空間線量率分布

1項目

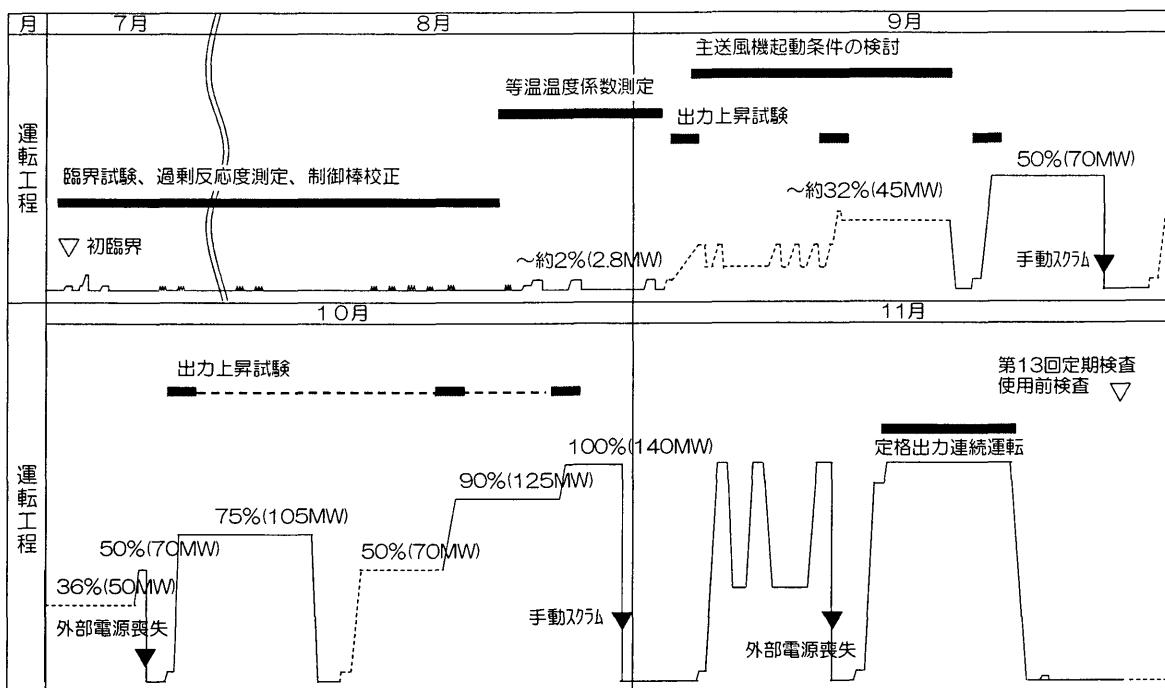
#### 運転監視

- 放射線管理
- 燃料破損検出系
- 機器振動監視

3項目

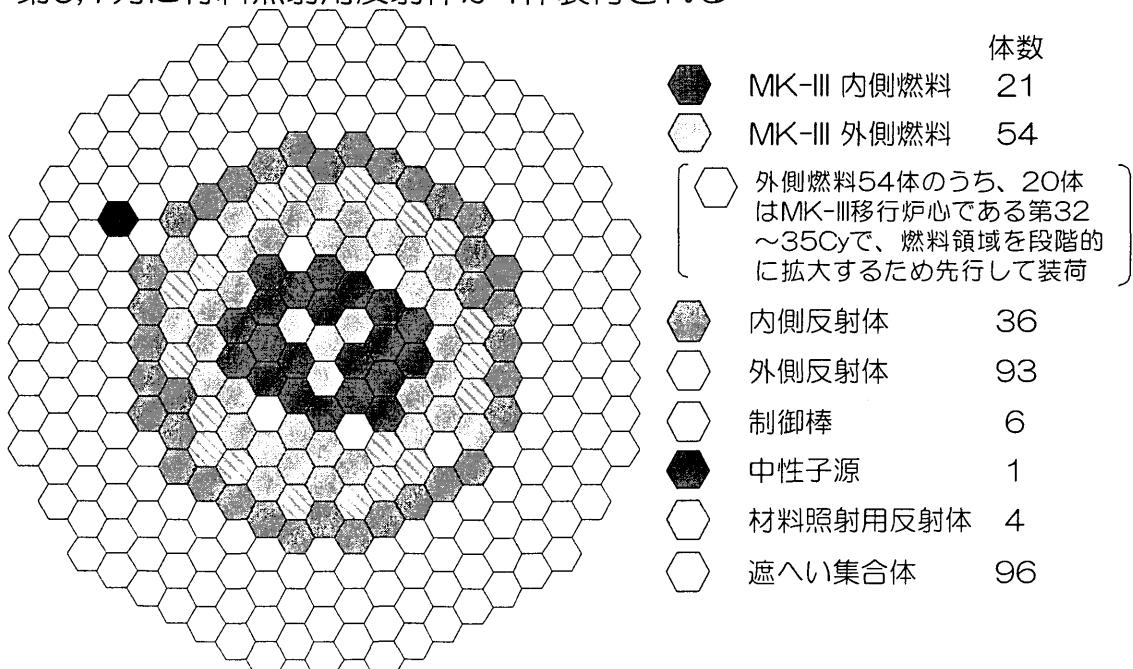
計27項目

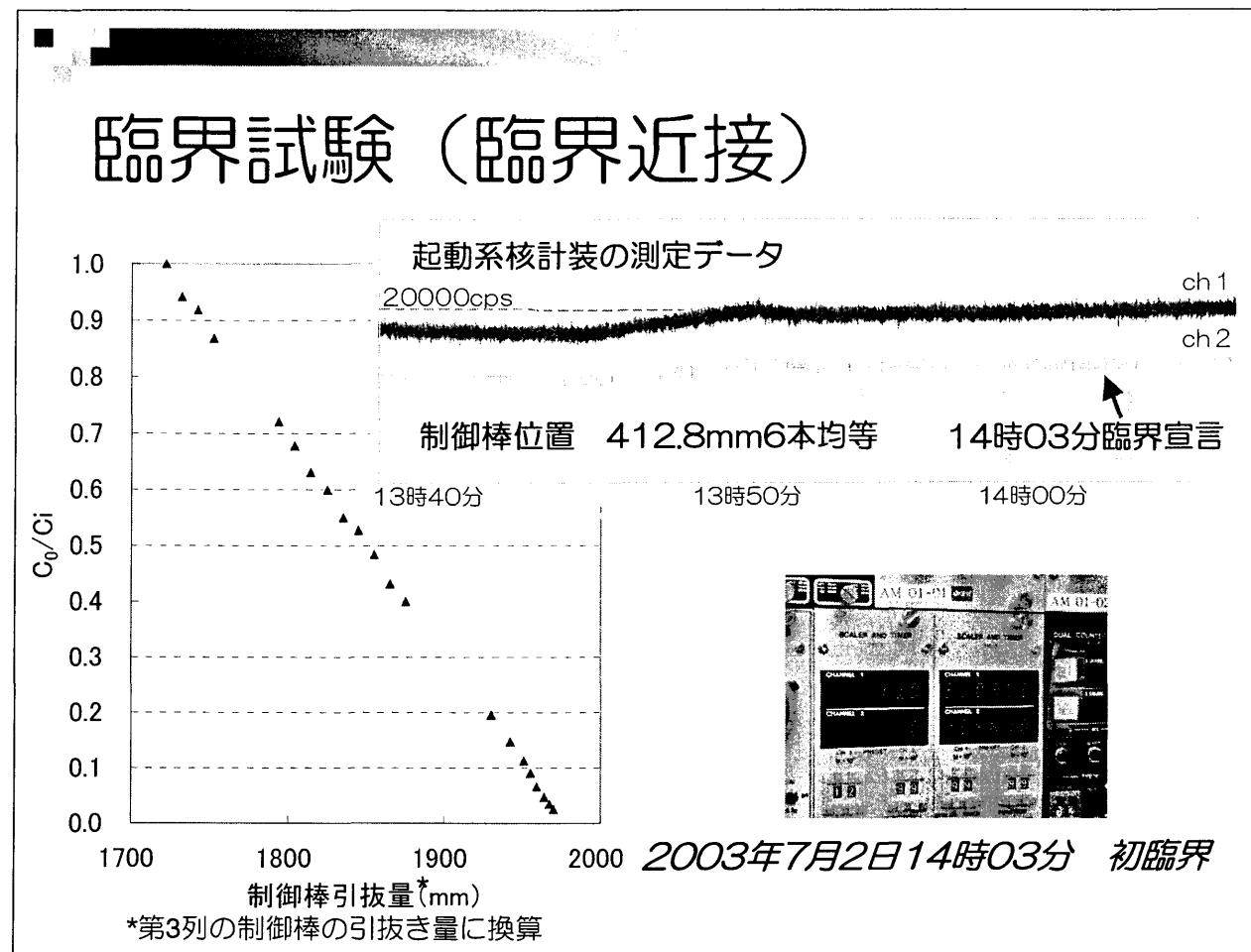
## 性能試験工程



## MK-III 性能試験炉心構成

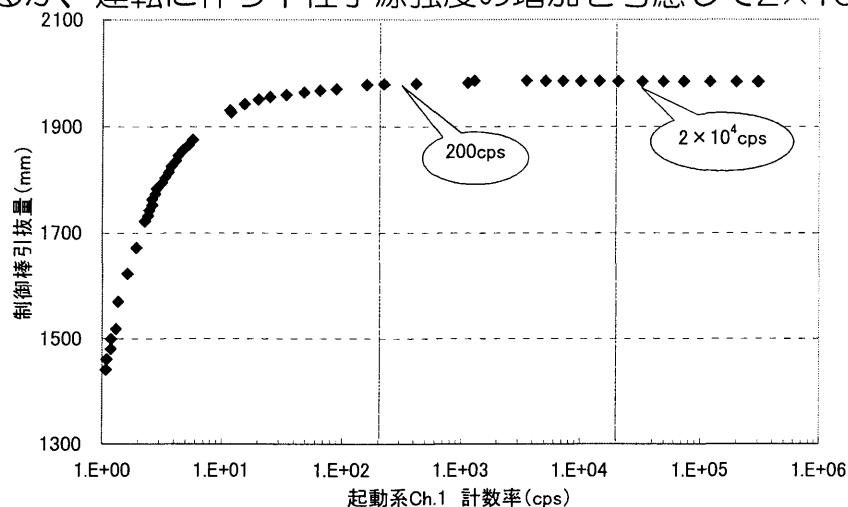
- 燃料領域が2領域化される等、MK-II炉心とは炉心構成が異なる
- 第0,1列に材料照射用反射体が4体装荷される





## ■ 臨界試験（臨界到達を判断する計数率を確認）

- MK-II炉心では臨界到達を判断する計数率を $5 \times 10^4$ cpsとしていた。MK-III炉心では遮へい集合体の効果（約1/3）により、 $2 \times 10^4$ cpsとなる。
- 起動系Ch.1の計数率が $2 \times 10^2$ cps以上ならば中性子源の効果は無視できるが、運転に伴う中性子源強度の増加を考慮して $2 \times 10^4$ cpsとする。



## ■ 過剰反応度予測

従来は、MK-II炉心管理コードシステムによる過剰反応度の計算値を

- 直近のサイクルにおける計算値と実測値の差
  - 照射試験用集合体の装荷に伴う置換反応度の計算値と実測値の差
- で補正することにより当該サイクルの過剰反応度を予測。

→MK-II炉心における過剰反応度予測精度：0.2%  $\Delta k/kk'$ 以内

### MK-III性能試験炉心

- 燃料領域の2領域化、制御棒の移設、遮へい集合体の装荷により、MK-II炉心とは構成が異なる
- 第O、1列に材料照射用反射体が4体装荷される



### MK-III炉心管理コードシステム “HESTIA” で予測

- MK-II炉心管理コードシステム “MAGI”
  - JUPITER解析で確立した標準解析手法 (JFS、ADJ)
  - モンテカルロ法 (MCNP-4B)
- による解析でHESTIAによる予測結果の妥当性の確認

# 過剰反応度予測と測定結果

ゼロ出力250°C

1. MK-Ⅲ炉心管理コードシステム “HESTIA” +バイアス補正  
:  $3.31 \pm 0.18 \text{ \%}\Delta k/k k'$
2. MK-Ⅱ炉心管理コードシステム “MAGI” +バイアス補正  
:  $3.15 \pm 0.15 \text{ \%}\Delta k/k k'$
3. JUPITER標準解析手法 (JFS-3-J3.2R) +バイアス補正  
:  $3.53 \pm 0.18 \text{ \%}\Delta k/k k'$
4. JUPITER標準解析手法+統合炉定数 (ADJ2000R)  
:  $2.96 \pm 0.34 \text{ \%}\Delta k/k k'$
5. モンテカルロ法 (MCNP、FSXLIB-J3.2) +バイアス補正  
:  $3.16 \pm 0.13 \text{ \%}\Delta k/k k'$

誤差1σ

測定は臨界法で、制御棒挿入分の反応度価値の和より算出

測定値 :  $2.99 \pm 0.09 \text{ \%}\Delta k/k k' (250^\circ\text{C})$ 

計算誤差の補正が過大の可能性がある。

## 炉心特性等が核的制限値等を満足していることの確認

測定された250°C体系での過剰反応度 ( $2.99\%\Delta k/k k'$ ) から等温温度係数 ( $-3.86 \times 10^{-3} \text{ \%}\Delta k/k k'/^\circ\text{C}$ ) により100°C体系での過剰反応度を算出

- 過剰反応度(100°C) (核的制限値4.5%Δk/k k'以下) :  
 $3.57\%\Delta k/k k'$

## 炉心設計計算の妥当性の確認

計算手法	: 2次元RZ/XY三角メッシュ拡散計算
炉定数	: JFS-3-J2
エネルギー群数	: 7群
バイアス補正	: MK-Ⅱ性能試験

計算値 :  $3.21 \text{ \%}\Delta k/k k' (250^\circ\text{C})$ 

→ 測定値に対して0.22%Δk/k k' の差

## 制御棒反応度価値予測

従来は、Hex-Z体系7群CITATIONにより反応度価値と校正曲線を求め、反応度価値を直近のサイクルにおける計算値と実測値の差（E/C）で補正することにより当該サイクルの過剰反応度を予測  
→MK-II炉心における制御棒価値予測精度：約5%以内で一致

### MK-II性能試験炉心

- ・ 燃料領域の2領域化、短尺化、制御棒の移設



以下の詳細解析に基づいて、制御棒価値を予測

#### ・ 解析方法

基準解析手法：XYZ体系輸送計算（TRITAC）

エネルギー群：7群

炉定数：JENDL-3.2に基づくJFS-3-J3.2R

実効断面積：1次元リングモデル

バイアス補正：MK-II第35サイクル測定値

- ・ ペリオド法の制御棒パターンを模擬

## 制御棒校正

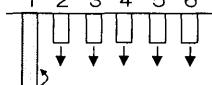
- ペリオド法により、6本の制御棒の全挿入から全引抜までの微分反応度価値を測定し、制御棒校正曲線を作成する
- 第3列に装荷されている4本の制御棒については、通常の運転特性試験で実施する4本同時差換法による測定も実施し、ペリオド法との差を確認する
- 異なる制御棒パターンにおいてペリオド法による測定を行い、干渉効果補正の計算精度を確認する

## 試験風景 2



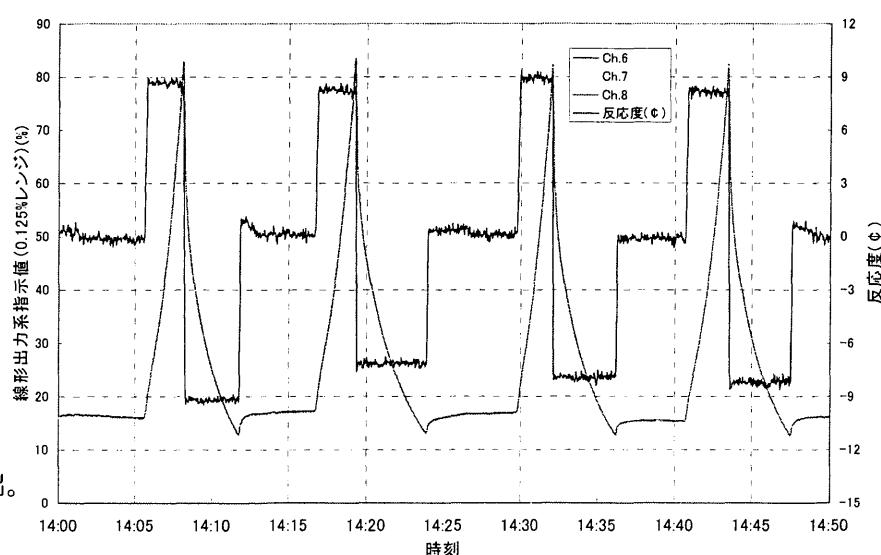
## 制御棒校正（ペリオド法）

- ペリオド法により、全挿入から全引抜までの微分反応度価値を測定
- 3列の制御棒で約50ステップ、5列の制御棒で約20ステップ



引抜き分の反応度補償は  
他の制御棒が均等位置に  
なるように順次挿入操作

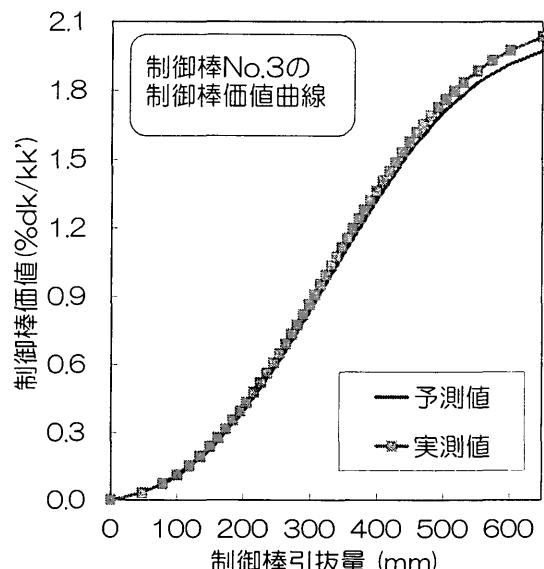
$\beta_{\text{eff}} = 4.41 \times 10^{-3}$   
MK-III炉心管理コードシ  
ステムHESTIAにより算出。



制御棒校正中の原子炉出力と反応度の推移 (7/7 : CR2)

# 制御棒反応度価値結果

制御棒 No.	反応度価値 (%Δk/kk')					C/E
	解析値	バ'イス 補正値	予測値	実測値	誤差 (1σ)	
1	2.07	0.97	2.01	2.09	0.07	0.96
2	0.83	0.95	0.79	0.80	0.03	0.99
3	2.03	0.97	1.97	2.03	0.07	0.97
4	2.07	0.97	2.01	2.08	0.07	0.97
5	0.83	0.95	0.79	0.78	0.03	1.01
6	2.03	0.97	1.97	2.06	0.07	0.96



## 炉心特性等が核的制限値等を満足していることの確認

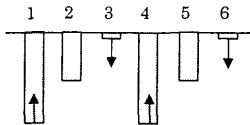
- 反応度制御能力（核的制限値7.6%Δk/kk'以上）：  
9.84%Δk/kk'
- 反応度付加率最大（核的制限値0.019%Δk/kk'/s以下）：  
0.011%Δk/kk'/s
- 原子炉停止余裕（核的制限値1.1%Δk/k以上：100°C）：  
4.18%Δk/k (100°C)

〔最大反応度価値の制御棒1本を除いた5本の制御棒価値  
：7.75%Δk/kk'〕

〔過剰反応度（100°C）  
：3.57%Δk/kk'〕

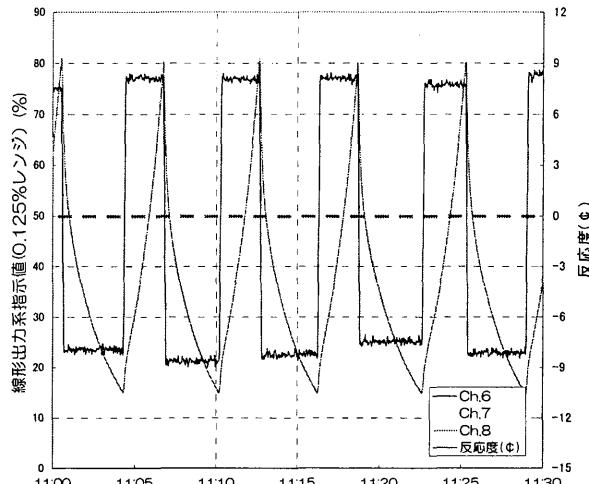
## ■ 4本同時差換法

- ・第3列の4本の制御棒について295mmから上端(650mm)まで差換法(イバース・カイネイクス法)により測定
- ・差換法で測定した反応度価値をペリオド法での測定値と比較した結果、2%以内で一致し、差換法による制御棒反応度価値測定の妥当性を確認した



制御棒No.1又は4を制御棒位置295~650mmまで段階的に引抜き、反応度補償として制御棒No.3又は6を挿入する。

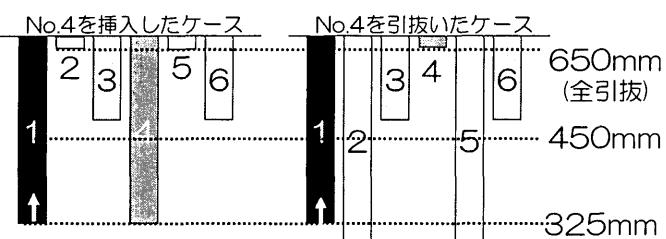
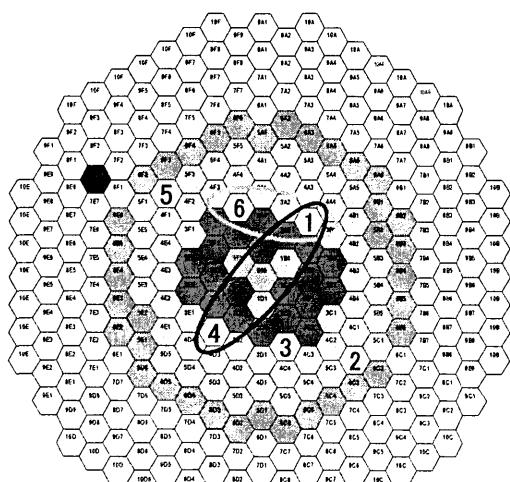
制御棒 No.	反応度価値(295→650mm) (%△k/kk')	
	ペリオド法	差換法
1	1.13	1.14
3	1.11	1.12
4	1.13	1.14
6	1.14	1.15



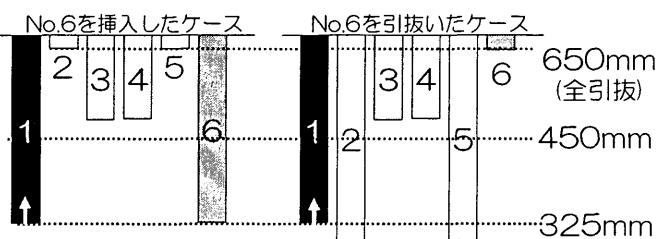
制御棒校正中の原子炉出力と反応度の推移

## ■ 制御棒校正(干渉効果測定)

- ・異なる制御棒パターンにおいてペリオド法による測定を行い、干渉効果補正の計算精度を評価



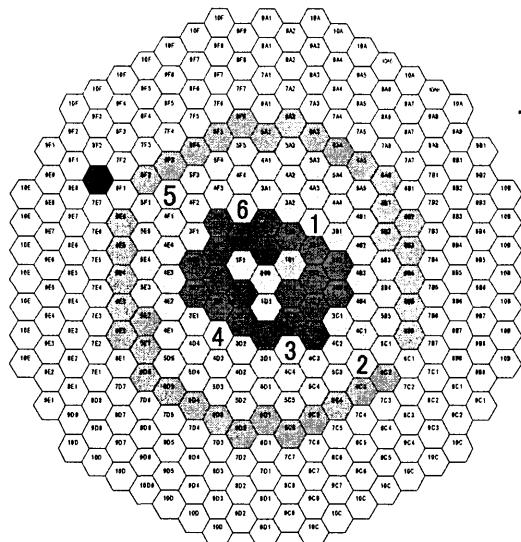
制御棒No.1,4の干渉効果を評価する場合  
制御棒No.4の挿入位置を変えて、制御棒No.1の微分反応度を測定する。この際、干渉効果が大きい第3列のNo.3,6の位置は変えず、第5列の制御棒の位置で調整



制御棒No.1,6の干渉効果を評価する場合

## 干渉効果の評価

- 干渉効果の計算値と測定値はよい一致を示した
- 非均等挿入から均等挿入状態への補正は精度よく評価できることを確認した



干渉効果の定義

着目制御棒価値（干渉用制御棒325mm挿入）  
着目制御棒価値（干渉用制御棒全引抜）

着目 制御棒	干渉用 制御棒	干渉効果	
		計算値	測定値
No. 1	No. 4	1.04	1.06
No. 1	No. 6	0.93	0.93
No. 5	No. 3	1.06	1.06
No. 5	No. 6	0.86	0.86

## 等温温度係数(1) 予測解析

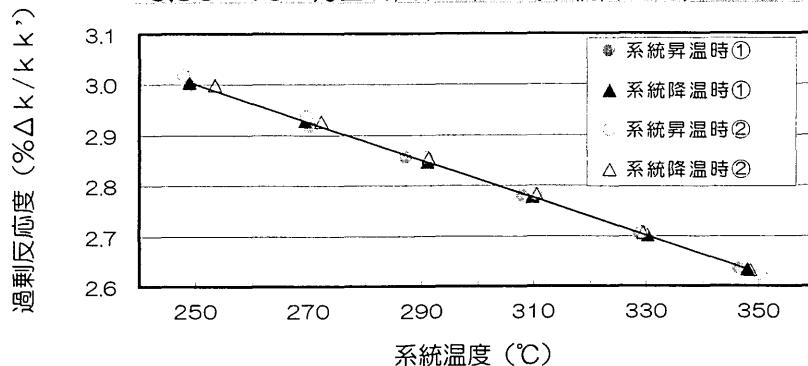
- 予測解析：以下の2つの反応度効果に分けて解析
  - ・温度上昇による核反応断面積の変化（ドップラ反応度）
  - ・熱膨張による炉心体系寸法及び原子数密度の変化（膨張反応度）
- 解析手法：JUPITER標準解析手法
  - ・炉定数：JFS-3-J3.2R
  - ・基準計算：ドップラ反応度：3D Tri-Z 70群厳密摂動計算 (PERKY)  
(250°C→350°C)
  - ・膨張反応度 : 3D Tri-Z 70群直接計算 (CITATION)  
(250°C→350°C)
- 解析結果：ドップラ反応度： $-5.34 \times 10^{-4} \% \Delta k / kk' / ^\circ C$   
膨張反応度： $-3.15 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ C$ 

↓

予測結果： $-3.68 \times 10^{-3} \% \Delta k / kk' / ^\circ C$

## ■ 等温温度係数(2) 測定結果

等温温度係数 :  $-3.75 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$  (系統昇温時) : C/E=0.98  
 $-3.86 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$  (系統降温時) : C/E=0.95



### ■ MK-II炉心との比較

- MK-II平衡炉心(67体炉心) : 約 $-4.0 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$
- 移行炉心第4サイクル(74体炉心) : 約 $-3.5 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$
- 移行炉心: 径方向に炉心拡大→径方向の熱膨張の効果が減少→等温温度係数小
- 性能試験: 燃料スタック長減少→軸方向の熱膨張の効果が増加→等温温度係数大

設計値(標準平衡炉心) :  $-3.9 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$

## ■ 低出力試験のまとめ

### ■ 炉心特性等の把握及び核的制限値等を満足していることの確認

- 過剰反応度 →  $2.99 \% \Delta k / k k'$  ( $250^\circ C$ )
- 等温温度係数測定 →  $-3.86 \times 10^{-3} \% \Delta k / k k' / ^\circ C$ であり、予測と5%以内で一致
- 制御棒校正 → 全制御棒価値9.84%  $\Delta k / k k'$ であり予測と4%以内で一致
- 4本同時差換法 → ペリオド法と2%内で一致することを確認
- 干渉効果 → 予測と一致し、計算で補正できることを確認
- 過剰反応度等について制限値を満足していることを確認した

### ■ MK-III炉心設計計算の妥当性の検証

- 過剰反応度及び等温温度係数についてMK-III炉心設計計算の妥当性を確認した

### ■ MK-III炉心管理コードシステムの検証

- 予測 $3.31 \% \Delta k / k k'$ と実測値との差は $0.32 \% \Delta k / k k'$ であった

### ■ JUPITER標準解析手法等の精度検証

- 予測値と実測値との差は $-0.03 \sim +0.54 \% \Delta k / k k'$ であった。