

大学等との共同研究に関する  
平成12年度研究概要報告

(核燃料サイクル公募型研究及び先行基礎工学研究を除く)

2001年8月

核燃料サイクル開発機構

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大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

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)  
2001

JNC TN1400 2001-013  
2001年8月

大学等との共同研究に関する平成12年度研究概要報告  
(核燃料サイクル公募型研究及び先行基礎工学研究を除く)

報告者課Gr テーマ一覧参照  
編 集 技術展開部 技術協力課

要 旨

機構は、機構が取り組む研究開発プロジェクトに関する基礎・基盤的研究を大学及び研究機関（以下「大学等」という。）と研究協力を図り進めている。

本報告書は、平成12年度に実施した大学等との共同研究14件の実施結果についてその概要をまとめたものである。

なお、本報告書には、核燃料サイクル公募型研究及び先行基礎工学研究により進めている大学等との共同研究については除いている。

## 一 目 次

1. 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究テーマ一覧	i
2. 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告	
(1) イオン交換による廃液処理に関する研究	1
(2) 核燃料リサイクルシステム内の核種移行率に関する評価	17
(3) イオン照射によるポイド形成挙動の解析	23
(4) 配管外からの温度推定に関する研究	26
(5) ナトリウム液滴の燃焼挙動に関する研究	32
(6) 核拡散抵抗性評価基準と核燃料サイクル意思決定分析手法の開発	37
(7) 電子線照射による照射誘起偏析挙動の解析	40
(8) 超臨海流体による難分解性物質等の処理に関する研究	43
(9) 極低酸素雰囲気での水と含鉄珪酸塩鉱物の反応に関する研究	46
(10) 配管変位、変形、振動モニタリングシステム	48
(11) 蒸発器ヘリカルコイル内気液二相流の多次元解析	54
(12) 高出力ミリ波セラミック焼結法による制御棒材の改良と長寿命化	58
(13) FBR プラントにおけるき裂進展評価手法の高度化に関する研究	61
(14) 電磁流体の流動解析に関する研究	64

## 1. 大学等との共同研究に関する平成12年度研究テーマ一覧

## 大学等との共同研究に関する平成12年度研究テーマ一覧 (1/2)

### 平成12年度終了した研究テーマ

No.	研究テーマ	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	大学側 研究者名	研究期間
1	イオン交換による廃液処理に関する研究	人形峠 施設管理部 保守課	安念外典 片岡 忍	東京工業大学 原子炉工学研究所 藤井靖彦 所長 他	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
2	核燃料リサイクルシステム内の核種移行率に関する評価	大洗 システム部 再処理 Gr	渡部雅之	京都大学 原子炉実験所 バッケン工学研究部門 山名 元 助教授 他	平成12年度 ～ 平成15年度
3	イオン照射によるポイド形成挙動の解析	大洗 照射センタ- 燃材部 MMS	堂野前貴子 赤坂尚昭	京都大学 工学部第一類(機械系) 香山 晃 教授 他	平成11年度 ～ 平成14年度
4	配管外からの温度推定に関する研究	大洗 技開部 原子炉工学 Gr	上出英樹	広島大学 工学部第一類(機械系) 菊地義弘 教授	平成10年度 ～ 平成13年度 終了
5	ナトリウム液滴の燃焼挙動に関する研究	大洗 技開部 安全工学 Gr	大野修司 中桐俊男 宮原信哉	東邦大学 理学部 物理学科 佐藤研二 教授	平成12年度 ～ 平成14年度
6	核拡散抵抗性評価基準と核燃料サイクル意思決定分析手法の開発	国際核管部 不拡散 Gr	堀啓一郎 花井 祐	東京大学大学院 工学研究科 システム量子工学専攻 鈴木篤之 教授 他	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
7	電子線照射による照射誘起偏析挙動の解析	大洗 照射センタ- 燃材部 MMS	赤坂尚昭 山県一郎	北海道大学 エレキテクノ先端工学研究 センタ- 高橋平七郎 教授 他	平成11年度 ～ 平成14年度
8	超臨海流体による難分解性物質等の処理に関する研究	人形峠 施設管理部 品質管理課	山崎 齊	東京工業大学 原子炉工学研究所 藤井靖彦 教授	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
		人形峠 施設管理部 転換課	大林 弘 後藤浩二 長安孝明	他	
9	極低酸素雰囲気での水と含鉄珪酸塩鉱物の反応に関する研究	東海 環境センタ- 処分研究部 処分ガリヤ Gr	油井三和 亀井玄人	東京大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻 村上 隆 教授 他	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
		東海 環境センタ- 処分研究部 処分材料 Gr	川村和広 柏崎 博	他	

## 大学等との共同研究に関する平成12年度研究テーマ一覧 (2/2)

### ・・・平成12年度終了した研究テーマ

No.	研究テーマ	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	大学側 研究者名	研究期間
10	配管変位、変形、振動モニタリングシステム	敦賀 国際センタ- プラント制御 工学Gr	上山清志	福井大学 教育地域科学部 生活科学科 上田正汎 教授 他	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
11	蒸発器ヘリカルコイル内気液二相 流の多次元解析	敦賀 国際センタ-	戸田信一 遠藤 昭	福井大学 工学部 機械工学科 村井祐一 助教授	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
12	高出力ミリ波セラミック焼結法に よる制御棒材の改良と長寿命化	敦賀 国際センタ-	柴原 格	福井大学 遠赤外領域開発研究 センタ-	平成12年度 ～
		敦賀 国際センタ- 炉心開発Gr	西 裕士 北野彰洋	出原敏孝 教授 他	平成15年度
13	FBRプラントにおけるき裂進展評 価手法の高度化に関する研究	敦賀 国際センタ- 機器開発Gr	渡士克己 土井基尾 橋本貴司	福井大学 工学部 機械工学科 飯井俊行 助教授	平成12年度 ～ 平成13年度 終了
14	電磁流体の流動解析に関する研究	大洗 システム部 熱流体 Gr	山口 彰 大島宏之	慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 棚橋隆彦 教授	平成13年度 ～ 平成13年度 終了

## 2. 大学等との共同研究に関する平成12年度研究概要報告

大学等との共同研究に関する平成12年度研究概要報告書

研究テーマ	イオン交換による廃液処理に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	東京工業大学 原子炉工学研究所 所長 藤井 靖彦, 専門官 相田 昌男, 池田 篤史, 宮松 徳久		
機構側	人形峠環境技術センター 施設管理部 保守課 課長 安念 外典, TL 片岡 忍		
研究実施場所	東京工業大学 原子炉工学研究所		
通算研究期間 (予定)	平成12年1月～ 平成13年3月	当該年度 研究期間	平成12年8月～ 平成13年3月
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>人形峠環境技術センターでは、使用済の遠心機について遠心機処理設備を用いた化学分離処理を行い放射性廃棄物の低減を目指している。しかし、化学分離処理を行う際に使用する酸性廃液が大量であるため処理後のスラッジも多く発生する問題があった。</p> <p>今年度は昨年度に引き続き、遠心機処理設備から発生する廃液について、イオン交換樹脂を用いた研究を行い、処理廃液量の低減を検討する。</p>			
<p><b>【研究内容(概要)】</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>クロムの吸着試験 昨年度実施した吸着試験の中で、吸着しなかったクロムについて吸着試験を実施する。</li> <li>フッ素の吸着試験 廃液中に含まれるフッ素について、吸着試験を実施する。</li> <li>溶離液の選定試験 イオン交換樹脂に吸着したウラン及び各種金属イオンの回収を行う溶離液の試験を実施し、最適な溶離液を決定する。</li> <li>トータル試験 模擬溶液による一連のフロー試験を行い、各種金属イオンの吸着状態及び硫酸溶液中の各種金属元素濃度を確認する。また、溶離液による処理後の溶離液中の金属元素濃度を確認し、マスバランスを検認する。</li> <li>プラントシステムの検討 上記の試験結果を参考に、経済性又は二次廃棄物の発生量を考慮し、プラントシステムを検討する。</li> </ol>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>東京工業大学 原子炉工学研究所 研究室</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成12年度は、昨年度の吸着試験で吸着できなかったクロム(Cr)についての吸着試験を実施し、様々な検討の結果、吸着できるようにした。フッ素については、吸着できなかった。

ウラン及び各種金属イオンの吸着及び脱離によるトータル試験においては、吸着段階における各種イオンの流出は見られず、吸着は完全に実施できた。さらに、溶離液による脱離試験では、2M以上の硫酸を使用することにより速やかに脱離されることが確認できた。また、マスバランスの検認においても良好な結果が得られた。

上記の試験結果をもとに、トータル的なプラントシステムの検討を実施した。

### 【研究成果】

#### 1. 試験結果

##### (1) クロムの吸着試験

###### a. 試験条件

- ・樹脂：陽イオン交換樹脂 (DIAION PK216) (三菱化学製：#25～50)
- ・カラム： $\Phi 1\text{ cm} \times 30\text{cm}$  及び  $\Phi 1\text{ cm} \times 60\text{cm}$
- ・流速：50m l/h (線流速：1cm/min)
- ・硫酸濃度：0.1M
- ・混合溶液 (下記の金属元素を上記の硫酸濃度にそれぞれ溶解)

Fe (III)	1.6 mM/L (900mg/L)
Al (III)	4.4 mM/L (120mg/L)
Cr (III)	0.38 mM/L (20mg/L)
Ni (II)	0.31 mM/L (18mg/L)
Cu (III)	0.31 mM/L (20mg/L)

###### b. 試験方法

- ・室温10°Cにおいて、 $\Phi 1\text{ cm} \times 30\text{cm}$  カラムに混合溶液を通す。
- ・カラムを出た溶液をフラクションコレクターで 10m l ずつ採取する。
- ・採取した溶液から各種金属元素濃度を測定して、グラフ化する。
- ・イオン交換樹脂を80°Cにした $\Phi 1\text{ cm} \times 30\text{cm}$  カラムに混合溶液を通す。
- ・カラムを出た溶液をフラクションコレクターで 10m l ずつ採取する。
- ・採取した溶液から各種金属イオン濃度を測定して、グラフ化する。
- ・イオン交換樹脂を80°Cにした $\Phi 1\text{ cm} \times 60\text{cm}$  カラムに混合溶液を通す。
- ・カラムを出た溶液をフラクションコレクターで 10m l ずつ採取する。
- ・採取した溶液から各種金属元素濃度を測定して、グラフ化する。

###### C. 試験結果

グラフにまとめた試験結果を図-1、図-2及び図-3に示す。イオン交換カラムを室温状態で吸着させた場合、クロムは吸着しなかった(図-1参照)。しかし、80°Cでの吸着試験では、150m lまで吸着していることが確認できた(図-2参照)。これらの結果から、カラムの温度を上げることでクロム(III)イオンの吸着は可能であることが分かった。

次に、イオン交換カラムの長さを30cmから60cmに変え、温度を80°Cにして試験を実施した。結果は、30cmでは150m lまでしか吸着しなかったものが、60cmでは700m lまで吸着できた(図-3参照)。

以上の試験結果より、クロム(III)イオンは、イオン交換樹脂の温度を上げることにより吸着可能であり、イオン交換樹脂の長さを長くすることにより、その吸着量は多くなることが分かった。

##### (2) フッ素の吸着試験

###### a. 試験条件

- ・樹脂：陰イオン交換樹脂 PA316( $590\mu\text{m}$ )  
陽イオン交換樹脂 PK216( $500\sim 700\mu\text{m}$ )
- ・カラム：陰イオン交換樹脂カラム  $\Phi 1\text{ cm} \times 10\text{cm}$   
陽イオン交換樹脂カラム  $\Phi 1\text{ cm} \times 60\text{cm}$
- ・平衡温度：陰イオン交換樹脂カラム 20°C  
陽イオン交換樹脂カラム 80°C

- ・硫酸濃度: 0.1M
- ・混合溶液(下記の金属元素を上記の硫酸濃度にそれぞれ溶解)

F e (III)	1.6 mM/L	(900mg/L)
A l (III)	4.4 mM/L	(120mg/L)
C r (III)	0.38 mM/L	(20mg/L)
N i (II)	0.31 mM/L	(18mg/L)
C u (III)	0.31 mM/L	(20mg/L)
F	3.7 mM/L	(70mg/L)

#### b. 試験方法

- ・混合溶液を室温(20°C)の陰イオン交換樹脂カラムに通す。
- ・上記のカラムからの流出液を続けて陽イオン交換樹脂カラム(80°C)に通す。
- ・陽イオン交換樹脂カラムからの流出液を20mLずつ採取する。
- ・混合溶液を1600mL程導入したのち、1M硫酸を上記の手順で導入する。
- ・1M硫酸での脱離液を20mLずつ採取する。
- ・流出液及び脱離液中の金属イオンとフッ化物イオン濃度を測定し、グラフ化する。

#### C. 試験結果

試験結果を図-4に示す。各金属イオンは陽イオン交換樹脂に良好に吸着された。一方、フッ化物イオンは試料導入直後から流出が始まっており、1M硫酸による脱離操作においても、速やかな濃度減少が観察された。これらの吸着挙動から、フッ化物イオンは陰イオン交換樹脂及び陽イオン交換樹脂のどちらにも吸着されていない事が推測される。

※今回の試験において、フッ化物イオンの測定には「フッ化物イオン選択性電極」を用いたが、測定値は安定したものではなかった。よって、今回の試験で得られた値から、大まかなフッ化物イオンの吸着挙動は得られたが、より正確な挙動の確認が今後必要である。

### (3) 溶離液の選定試験結果

#### a. 試験条件

- ・樹脂: 陰イオン交換樹脂 PA316(590 μm)  
陽イオン交換樹脂 PK216(500~700 μm)
  - ・カラム: 陰イオン交換樹脂カラム φ1cm×10cm  
陽イオン交換樹脂カラム φ1cm×60cm
  - ・平衡温度: 陰イオン交換樹脂カラム 20°C  
陽イオン交換樹脂カラム 80°C
  - ・硫酸濃度: 0.1M
  - ・混合溶液(下記の金属元素を上記の硫酸濃度にそれぞれ溶解)
- |           |   |  |
|-----------|---|--|
| F e (III) | 1.6 mM/L                                | (900mg/L)                                |
| A l (III) | 4.4 mM/L                                | (120mg/L)                                |
| C r (III) | 0.38 mM/L                               | (20mg/L)                                 |
| N i (II)  | 0.31 mM/L                               | (18mg/L)                                 |
| C u (III) | 0.31 mM/L                               | (20mg/L)                                 |
| U (VI)    | 0.5 mM·UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> /L | (120mg·UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> /L) |

#### b. 試験方法

- ・陽イオン交換樹脂カラムに金属混合溶液を導入する。
- ・樹脂に吸着された金属イオンをカラム温度80°Cで、1M硫酸で脱離させる。
- ・脱離液を20mLずつ採取し、金属イオン濃度を測定したのちグラフ化する。
- ・同様の脱離実験を2M硫酸でも行い、グラフ化する。
- ・陰イオン交換樹脂カラムにウラニルイオン溶液を導入する。
- ・樹脂に吸着されたウラニルイオンを室温(20°C)で、1M硫酸で脱離させる。
- ・同様の脱離実験を2M硫酸でも行い、グラフ化する。

### C. 試験結果

#### ・金属イオンの脱離試験

1M硫酸での脱離曲線を図-5に示す。Fe(III), Ni(II), Cu(II)は速やかに脱離されている事が確認されたが、Al(III), Cr(III)は速やかに脱離は行われておらず、1M硫酸では完全に脱離させるのにかなりの硫酸の量が必要になる事が推測された。しかし、2M硫酸の脱離においては、Cr(III)は速やかに脱離され(図-6参照)、Al(III)も同様の脱離挙動を示した。

#### ・ウラニルイオンの脱離試験

ウラニルイオンの脱離に関しては、1M硫酸では速やかには脱離されず、2M硫酸によって室温で速やかに脱離される(図-7参照)事が確認された。

以上の結果から、金属イオンはカラム温度80°Cにおいて、ウラニルイオンは室温(20°C)において、2M以上の硫酸で速やかに脱離される事が確認された。

### (4) トータル試験

#### a. 試験条件

- ・樹脂：陰イオン交換樹脂 PA316(590μm)  
陽イオン交換樹脂 PK216(500~700μm)
- ・カラム：陰イオン交換樹脂カラム φ1cm×45cm  
陽イオン交換樹脂カラム φ1cm×60cm
- ・平衡温度：陰イオン交換樹脂カラム 20°C  
陽イオン交換樹脂カラム 80°C
- ・硫酸濃度：0.1M
- ・模擬廃液(下記の金属元素を上記の硫酸濃度にそれぞれ溶解)

F e (III)	1.6 mM/L (900mg/L)
A l (III)	4.4 mM/L (120mg/L)
C r (III)	0.38 mM/L (20mg/L)
N i (II)	0.31 mM/L (18mg/L)
C u (III)	0.31 mM/L (20mg/L)
U (VI)	0.5 mM-UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> /L (120mg·UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> /L)

#### b. 試験方法

- ・陰イオン交換樹脂カラムと陽イオン交換樹脂カラムを直列に繋ぐ。
- ・模擬廃液1Lを上記の直列に繋いだ陰イオン交換樹脂カラムの方から導入し、続いて陽イオン交換樹脂カラムに導入する。
- ・陽イオン交換樹脂カラムからの流出液を20mlずつ採取し、流出液中の金属イオンとウラニルイオン濃度を測定する。
- ・ポンプ及びカラム内に残留している模擬廃液を全部流し出すために、0.1M硫酸200mlを上記と同様の操作でカラム内に導入し、流出液を採取したのち濃度を測定する。
- ・2M硫酸を陰イオン交換樹脂カラムに導入し、流出液を20mlずつ採取したのちウラニルイオン濃度を測定する。
- ・2M硫酸を陽イオン交換樹脂カラムに導入し、流出液を20mlずつ採取したのち金属イオン濃度を測定する。
- ・測定した金属イオンとウラニルイオン濃度の変化をグラフ化する。

### C. 試験結果

ウラニルイオンの吸着脱離曲線と金属イオンの吸着脱離曲線を図-8に示す。どちらの曲線においても、吸着段階ではウラニルイオン及び金属イオンの流出は見られず、脱離段階では2M硫酸によって速やかに脱離されている事が確認された。吸着・脱離試験における物質収支を計算したところ、全ての金属イオン(ウラニルイオンを含む)も吸着量と脱離量がほぼ等しい事から、今回のトータル試験において、ウラニルイオンと金属イオンは吸着・分離されたと言える。

### (5) プラントシステムの検討

イオン交換による廃液処理をプラントに適用した場合、どのようなフローが考えられるか検討した。いろいろなシステムが考えられる中で、大きく分けて2通りの検討結果を示す。

1つの考え方としては、イオン交換樹脂に吸着した各種金属イオン（ウラニルイオンを含む）を溶離液で脱離させる方式である。基本的なシステムフローシートを図-9に示す。

陰イオン交換樹脂に吸着させたウランは、2～4Nの硫酸溶液で脱離処理する。脱離した溶液は、水酸化アンモニウムを用いて重ウラン酸アンモニウムの沈澱を作り、ウランを最終的にイエローケーキとして回収する。一方、陽イオン交換樹脂に吸着した金属イオンも、2～4Nの硫酸溶液で溶離し、各種金属を回収する。

この方式の特徴としては、イオン交換樹脂が長く使用できる点にある。また、回収したウランを再使用することにより、資源が有効活用できるという点では大きな意味がある。しかし、重ウラン酸アンモニウムを作ると同時にできる硫酸アンモニウムと金属イオンを溶離した溶液の処理をどうするかという課題も残されている。

もう1つ的方式としては、吸着したイオン交換樹脂を分解処理する方法である。システムフローシートを図-10に示す。

陰イオン及び陽イオン交換樹脂に吸着させた金属元素は、脱離処理せずに破壊した時点で交換する。一定量溜まったイオン交換樹脂は、スチームリフォーマ装置（図-11参照）で分解処理する。この処理を行うことにより、イオン交換樹脂は1/10～1/20に減容されることになる。また、イオン交換樹脂に吸着したウラン及び各種金属元素は、残滓（酸化物）として回収される。これらをドラム缶に詰めてコンクリートで固化することにより容易に処分できる。

この方式の特徴としては、脱離後の溶離液の処理が不要で経費（溶離液処理に要する人件費）が安い点にある。しかし、イオン交換樹脂が消耗品となるため、樹脂の購入費が多くかかるという課題も残っている。両案に対する利点と欠点を表-1にまとめた。

二次廃棄物の低減という観点では、遠心機処理設備で発生する年間のドラム缶発生量40本（設計による）が、両案とも1～2本の発生量に抑えられ、かなりの効果が得られるものと予想される。さらに、陰イオン交換樹脂を用いてウランのみを施設内で回収し、他のイオンは施設外で非放射性一般廃棄物として廃棄するプロセスも技術的には成り立ち、さらなる二次廃棄物の低減に繋がるものと考えられる。

さらに年間のランニングコストを表-2にまとめた。溶離液処理によるランニングコストでは、溶離液の処理に掛かる費用が、全体の8割強を占めていることが分かる。一方、スチームリフォーマ処理では、イオン交換樹脂の購入費が、全体の8割弱を占めていることが分かる。トータル金額では、スチームリフォーマ処理が130万円程度安い結果になった。

## 2. 考 察

### (1) クロムの吸着試験

平成12年度の試験において、予想に反し、陽イオン交換樹脂にクロムが吸着しない現象が見られた。今年度はこれに対し、温度を高くすることやイオン交換樹脂高を長くすることで、吸着する条件が見出せた。このように吸着条件を変えることによって、クロムが陽イオン交換樹脂に吸着しなかった原因として、平衡選択性の問題ではなく、吸着速度の問題であることが分かった。

### (2) フッ素の吸着試験

フッ素は陰イオン交換樹脂にも陽イオン交換樹脂にも吸着しないので、蒸留や吸着剤など他の分離法を考える必要がある。

### (3) 溶離液の選定試験

陰イオン交換樹脂に吸着されたウラニルイオンは2M以上の硫酸によって速やかに脱離され、陽イオン交換樹脂に吸着した金属イオンも2M以上の硫酸で脱離が速やかに行えることが明らかになった。

#### (4) トータル試験

陰イオン交換カラムと陽イオン交換カラムを直列に連結し、模擬溶液 1 L を流した結果、流出液中には模擬溶液に含まれている金属イオンは検出されなかった。すなわち、ウラニルイオンは陰イオン交換樹脂に吸着され、他の金属イオンは陽イオン交換樹脂に吸着されたことが分かった。その後、両カラムを切り離し、それぞれ 2 M 硫酸で脱離し、流出液中の金属濃度を測定したところ、陰イオン交換樹脂の脱離液中にはウラニルイオン以外の金属イオンは検出されず、陽イオン交換樹脂の脱離液中にはウラニルイオンは全く検出されなかった。また、それぞれの金属イオンの物質収支を計算したところ、いずれも吸着量と脱離量が等しかったことから、ウラニルイオンと他の金属イオンは完全に分離されていることが明らかとなつた。

#### (5) プラントシステムの検討

プラントシステムについては、ウラニルイオンと他の金属イオンを吸着・分離する基本的なシステムは構築できた。しかし、イオン交換樹脂をリサイクルして使用するか、或いはスチームリフローマ装置を用いて分解処理するか等の検討や陽イオン交換樹脂から脱離した金属硫酸塩をどのように処理すべきか等の検討課題もあり、最適なシステムの決定には至らなかつた。

### 3. 今後の取り組み

平成 12 年度は、数通りのプラントシステムの中から大きく分けて 2 通りを検討した。それぞれに長所と短所があり、今回の共同研究の中では、最適システムの決定には至らなかつた。しかし、いずれの案にしても、今回の共同研究のテーマである遠心機処理設備から発生する二次廃棄物量を低減するという本来の目的は、充分実用可能であることが実証されたといえる。

今後は、実処理廃液を用いた試験等を通して精度を上げたコスト試算を行い、最終的にどのシステムが良いのかを決定し、実用化していくべきであると考える。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

共同研究としては平成 12 年度にて完了する。但し、平成 11 年度及び平成 12 年度の試験結果を基に、今後は実廃液を用いた試験を機構内部で実施し、最適なプラントシステムの実現に向けて更なる検討を行う計画である。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

標題：イオン交換による廃液処理に関する研究

副標題：東京工業大学との共同研究－2

上記の標題で資料管理登録を行つた。また、人形峠環境技術センター内の「平成 12 年度共同研究報告会」にて発表した。

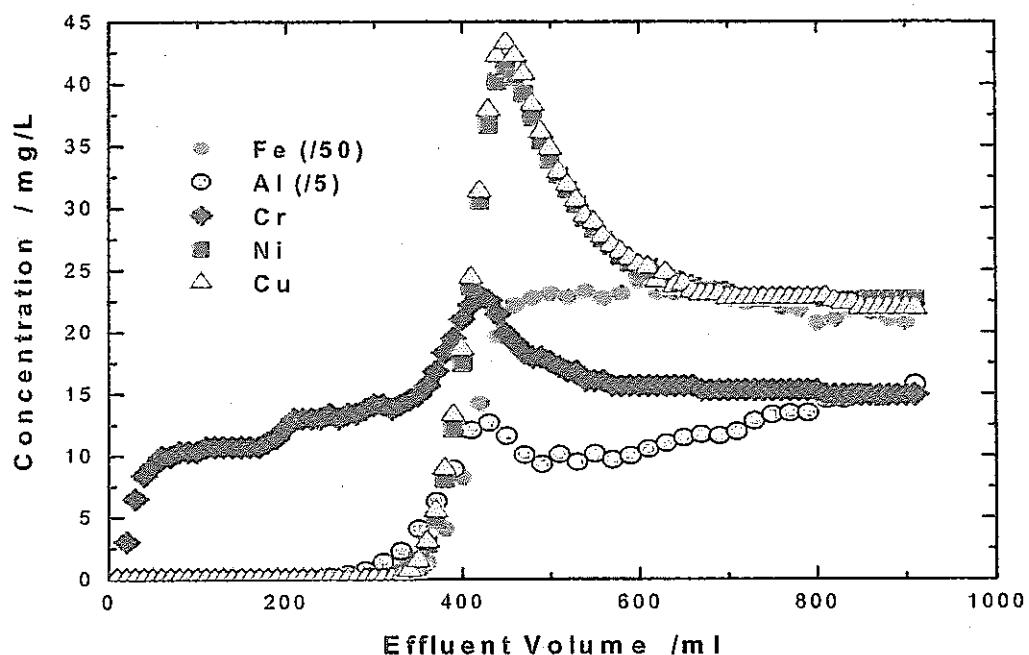


図-1 室温（10℃）での吸着実験\*の結果

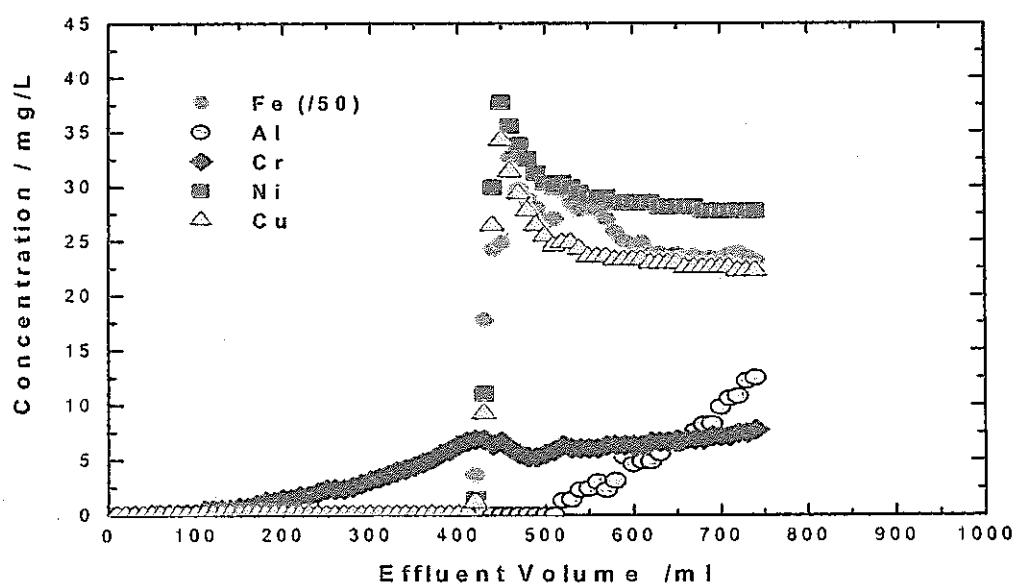


図-2 80℃での吸着実験\*の結果

\* 両実験とも使用樹脂量は約 14ml

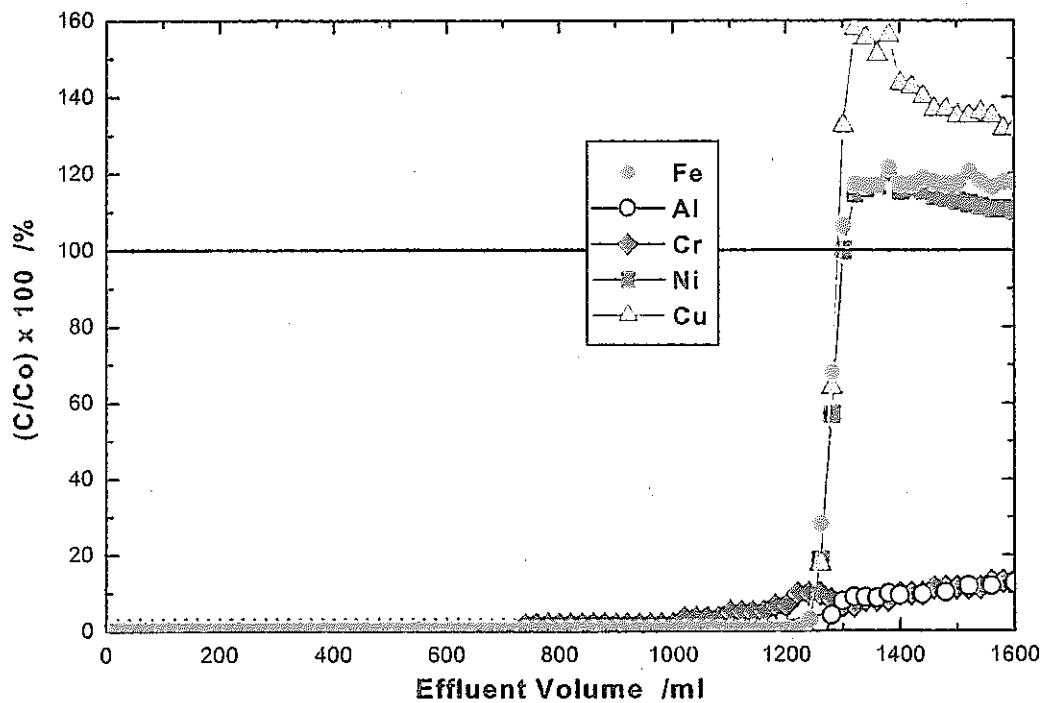


図-3 樹脂高 60 cm、カラム温度 80 °Cでの吸着実験の結果  
(Co : Feed 溶液濃度、C : Effluent 溶液濃度)

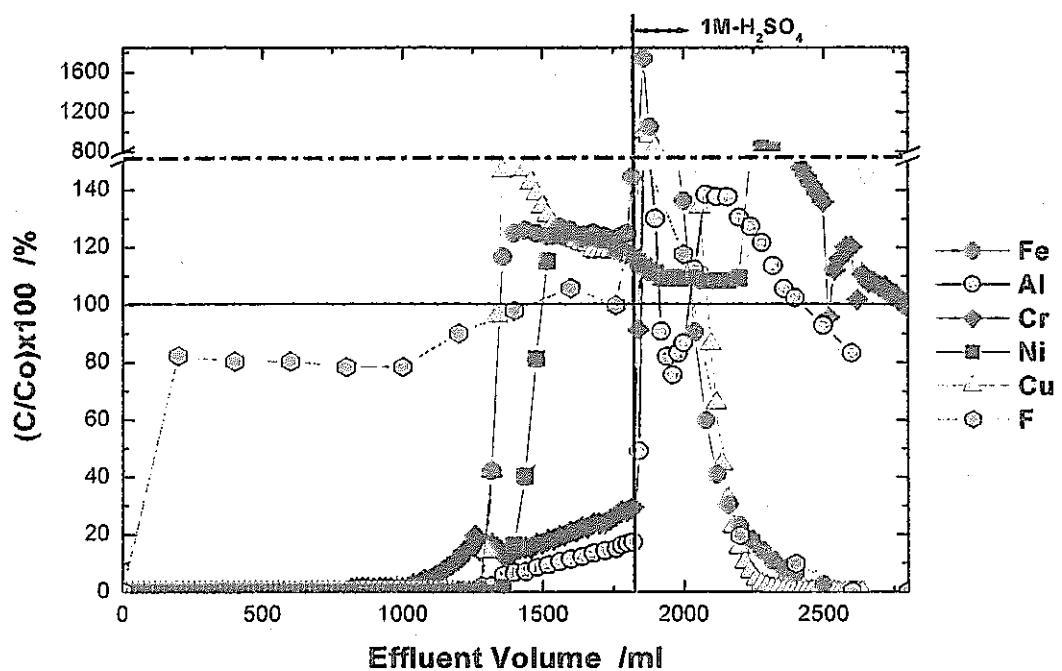


図-4 0.1 M硫酸系におけるフッ化物イオンの吸着・脱離挙動

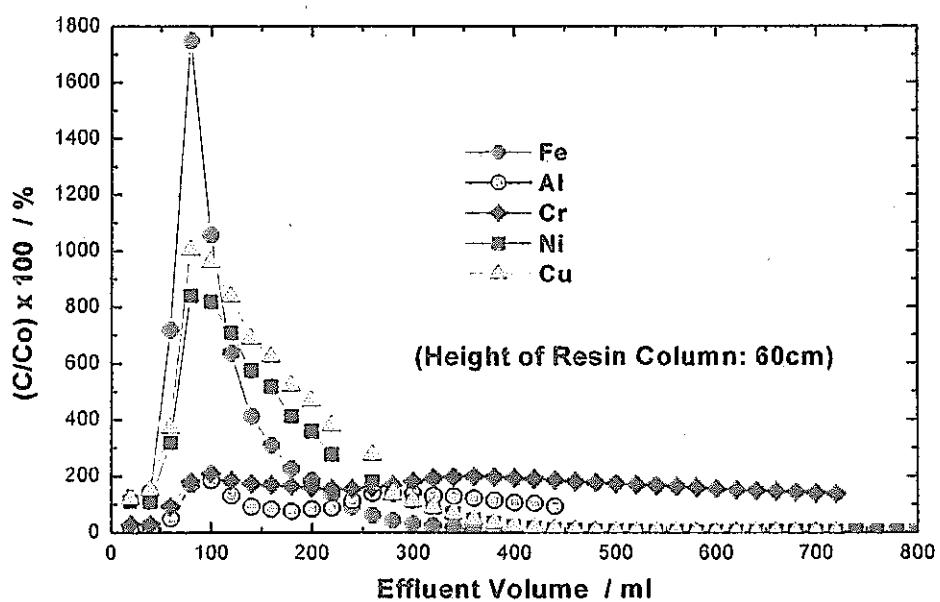


図-5 1M硫酸による金属イオンの脱離曲線

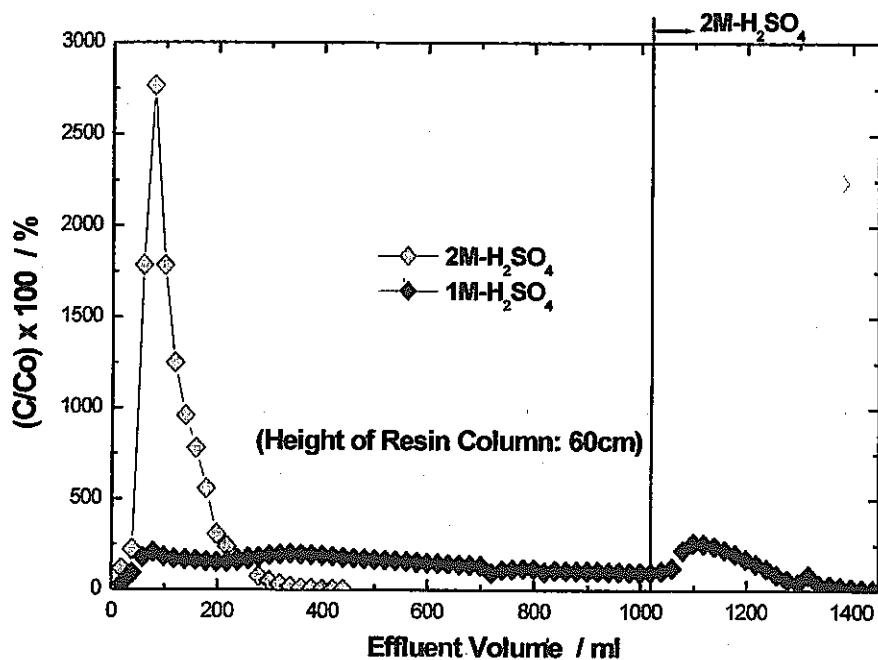


図-6 硫酸濃度の変化による Cr(III)の脱離曲線の変化

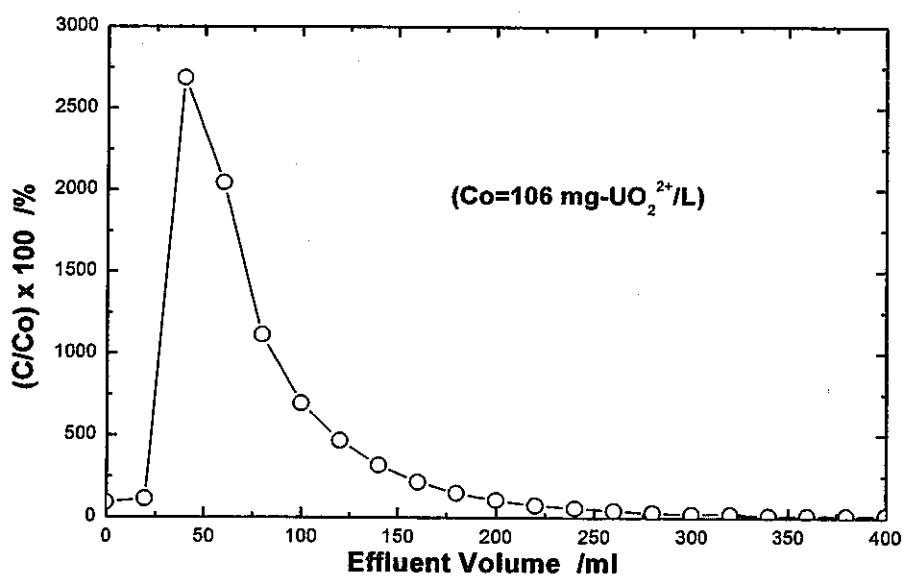


図-7 ウラニルイオンの2M硫酸による脱離曲線

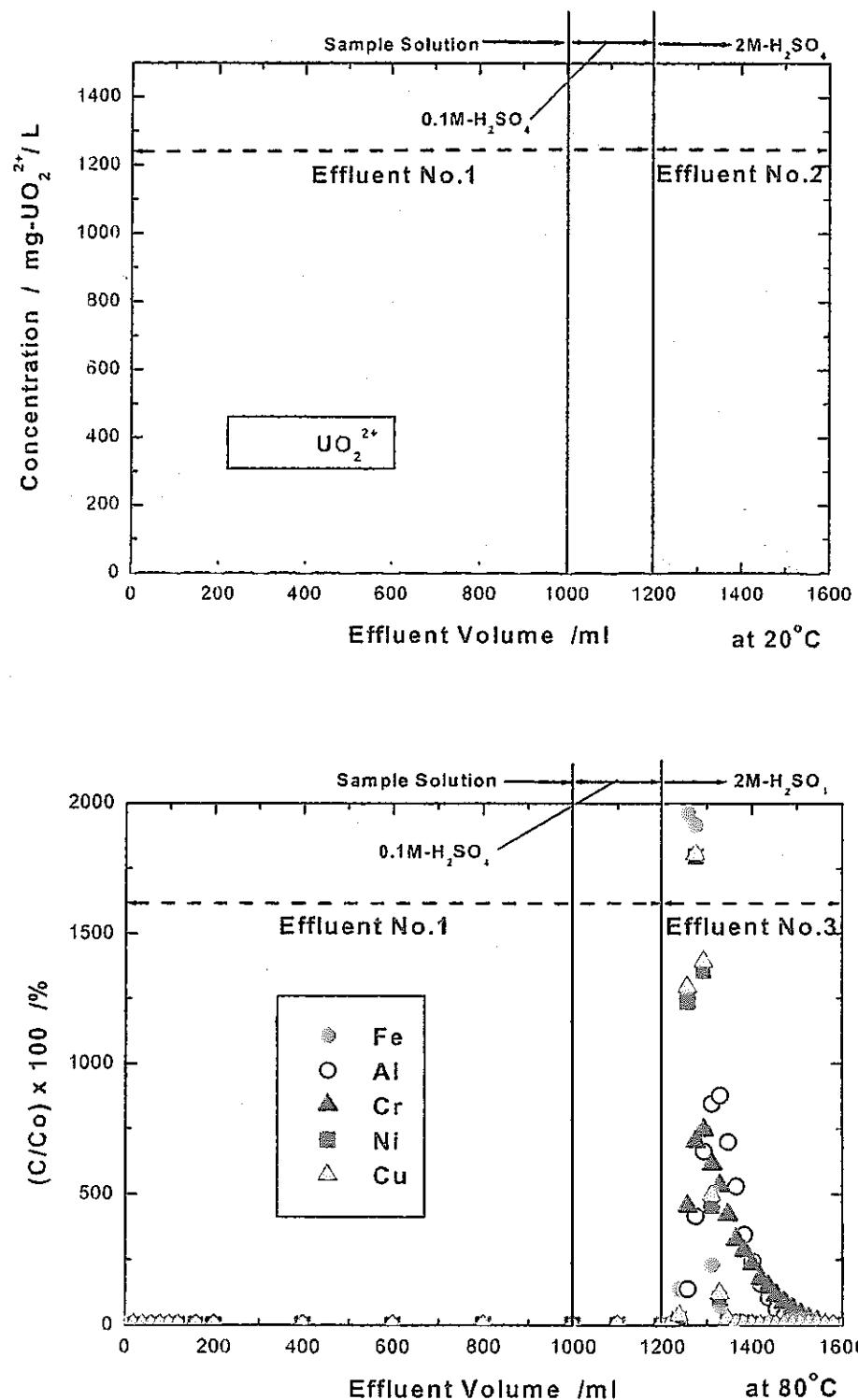


図-8 ウラニルイオンと金属イオンの吸着・脱離曲線

図-9 イオン交換樹脂廃液処理システム(溶離液処理)

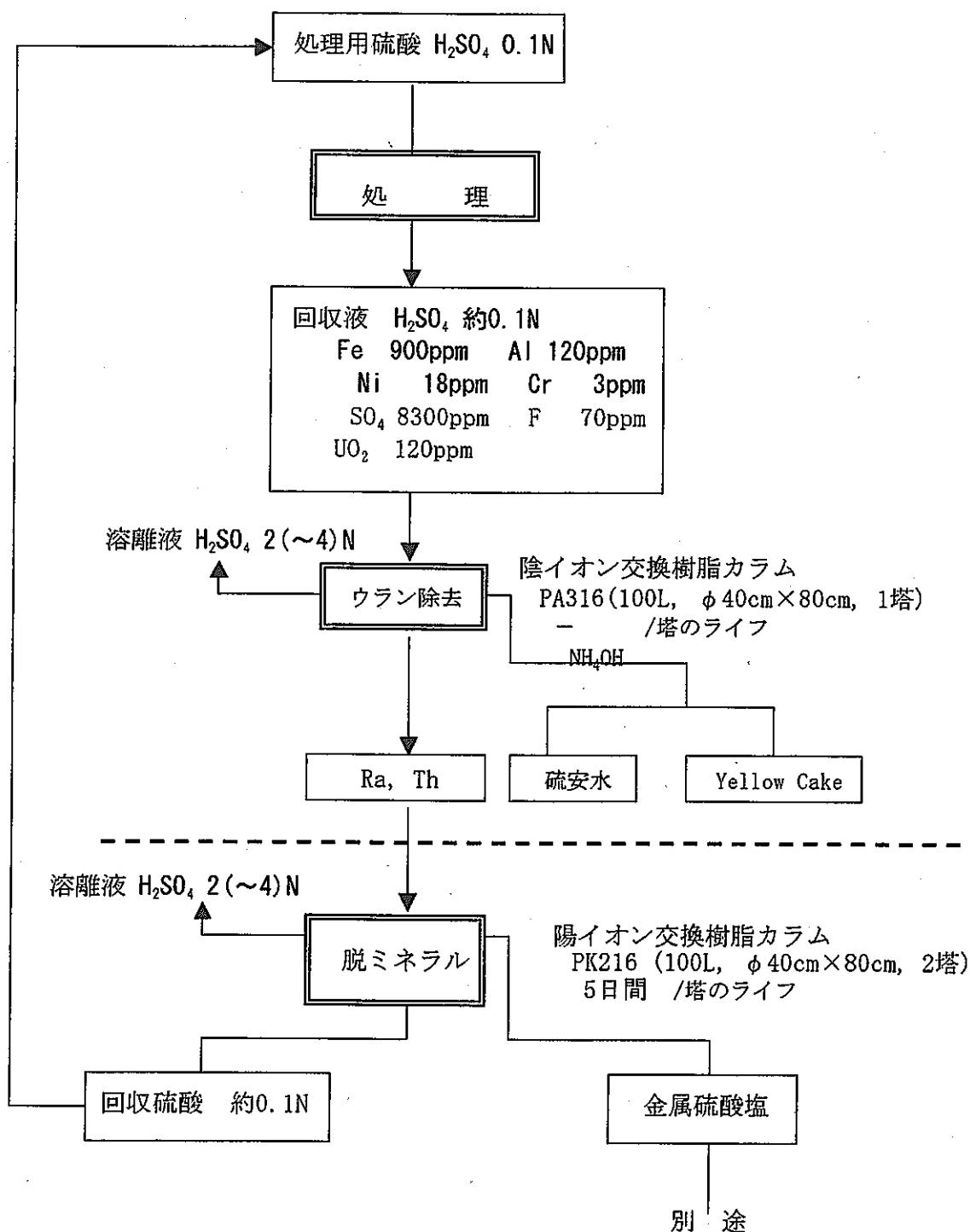
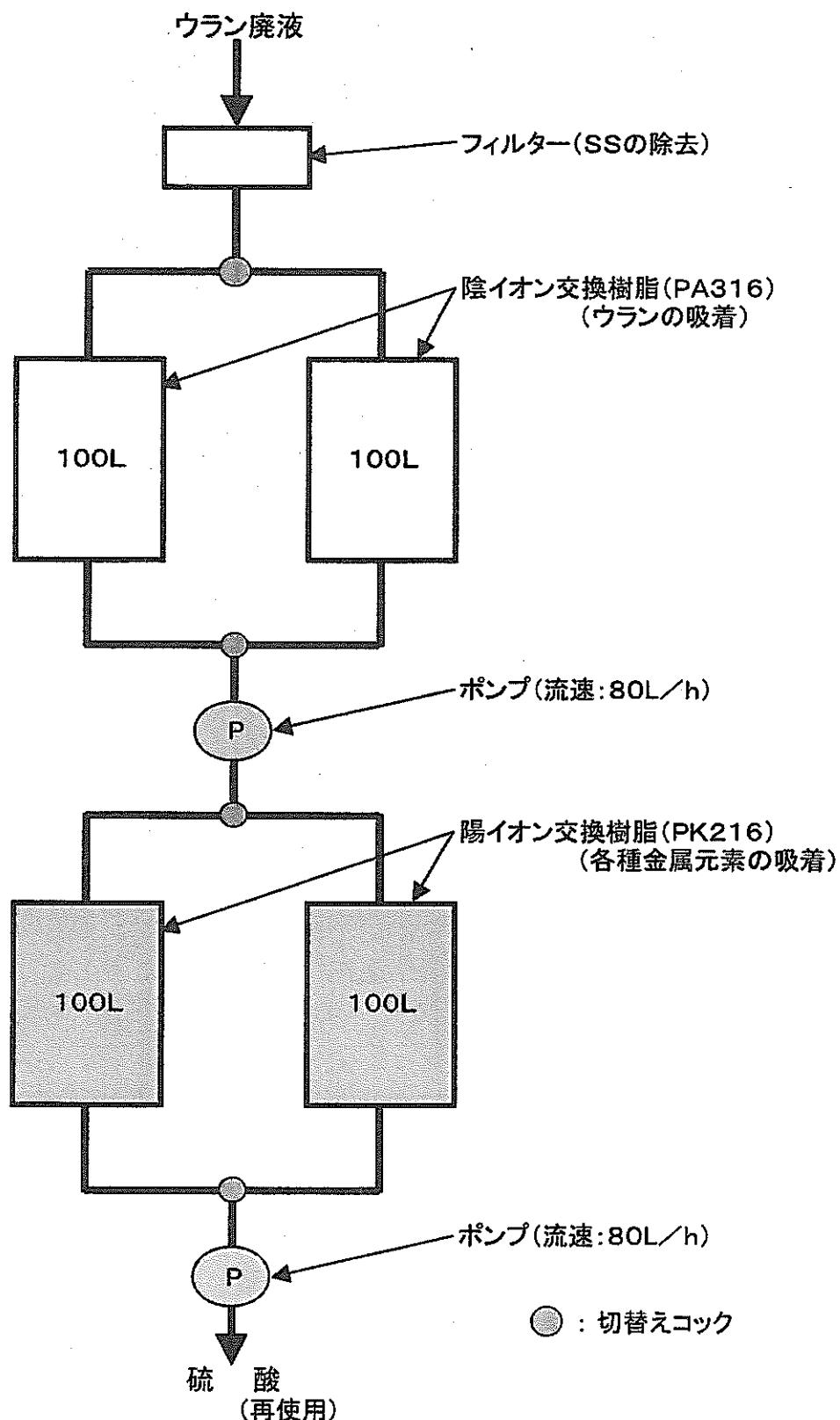


図-10 イオン交換樹脂廃液処理システム  
(スチームリフォーマ処理)



○ : 切替えコック

## 図-11 スチームリフォーマ装置の概要

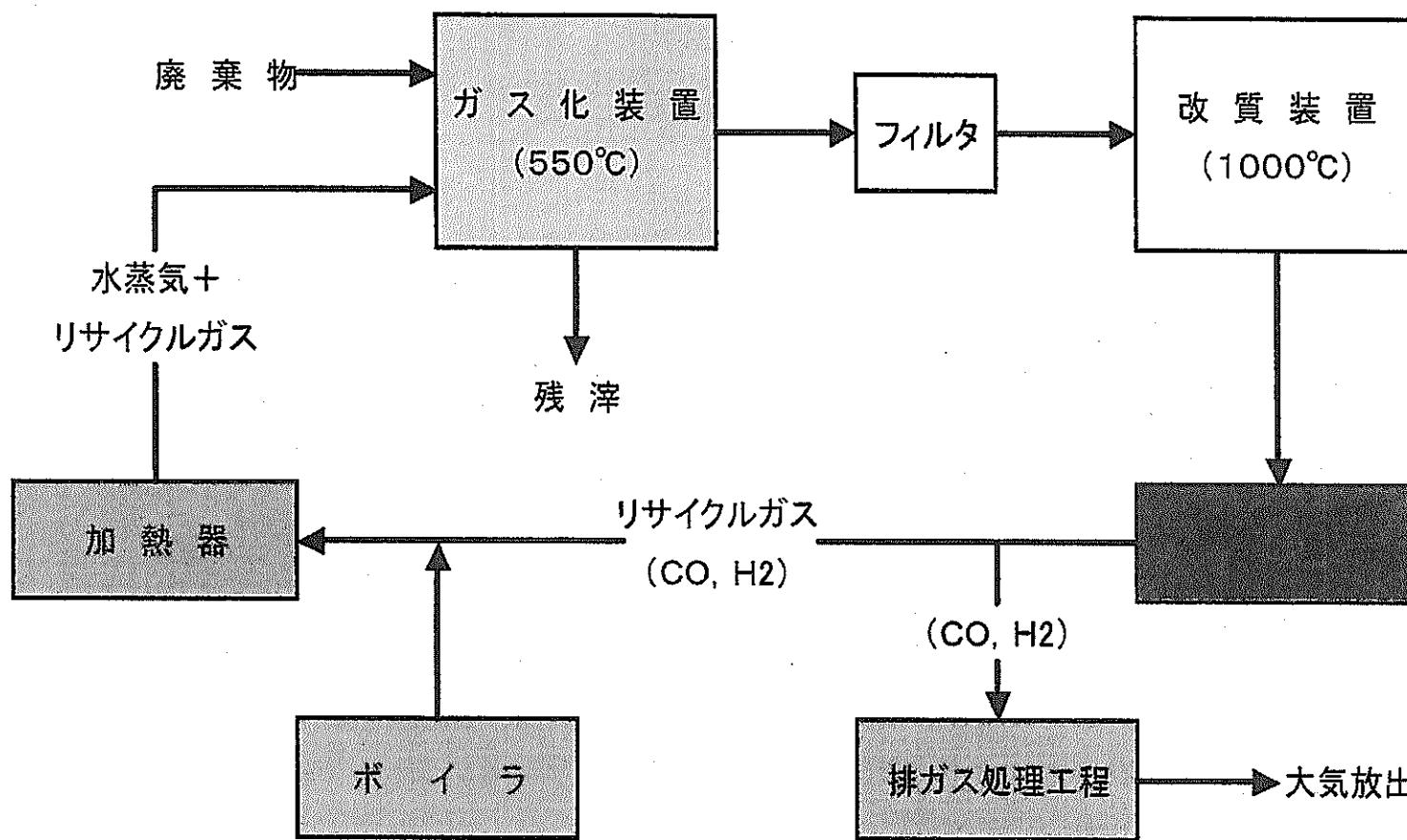


表-1 溶離液処理とスチームリフォーマ処理の比較

処理方式	利点	欠点
溶離液処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・二次廃棄物量が低減可能 (ドラム缶40本／年 → 1本／年)</li> <li>・イオン交換樹脂が長期使用可能</li> <li>・回収したウランの使用が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・後処理操作が必要</li> <li>・後処理操作に係る人件費が高い</li> <li>・イオン交換処理設備が複雑</li> </ul>
スチームリフォーマ処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・二次廃棄物量が低減可能 (ドラム缶40本／年 → 2本／年)</li> <li>・後処理操作が不要</li> <li>・イオン交換処理設備が単純</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スチームリフォーマ処理装置が高額</li> <li>・イオン交換樹脂の購入費が高い</li> </ul>

表-2 年間のランニングコスト検討結果

No	装置及び作業項目	溶離液処理		スチームリフォーマ処理	
		要否	金額	要否	金額
1	アニオン樹脂(PA-316)	○(100L使用)	240,000	○(110L使用)	264,000
2	カチオン樹脂(PK-216)	○(100L使用)	126,000	○(3390L使用)	4,271,400
3	薬品購入	○(硫酸、アンモニア水等)	1,000,000	—	0
4	人件費(内訳は下記)	年間必要人数は、158人日程度 35本×1／2日+35日×4人)	—	年間必要人数は、37人日程度 (35本×1／2日)+19日	—
	①イオン交換樹脂の交換作業	—	0	○(18回)	675,000
	②スチームリフォーマ処理作業	—	0	○(19日)	712,500
	③薬品の調整作業	○(18日)	675,000	—	0
	④溶離作業	○(35日)	1,312,500	—	0
	⑤再生作業	○(35日)	1,312,500	—	0
	⑥溶離液の処理作業	○(70日)	2,625,000	—	0
		トータルコスト	7,291,000	トータルコスト	5,922,900

※ 人件費は3.75万円／日として計算した。

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	核燃料リサイクルシステム内の核種移行率に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	京都大学 原子炉実験所 バックエンド工学研究部門 助教授 山名 元, 助手 藤井 俊行		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 再処理システム Gr 副主任研究員 渡部 雅之		
研究実施場所	京都大学 原子炉実験所		
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 7 月～ 平成 15 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 12 年 7 月～ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
核燃料のリサイクルシステム内における核種の移行に関し、特にこれまでデータが少なかった放射能は低いが収率の大きい核種について、その移行率のデータを収集することにより、より根拠のはっきりした精度の高い設計に資することを目的に、本件を実施する。			
【研究内容（概要）】			
本件では、放射能は低いが収率の大きい核種（Pd、Mo、Te 等）に関し、原子炉による放射化分析が可能であるという利点を活かし、リサイクルプロセス内におけるそれら核種の移行率を評価するための試験を実施し、移行率の代表値となるデータ集の作成を行う。また、これらの試験に際しては、オフガス系への移行率や廃棄物への移行率に関しても、併せて測定、評価を行う。			
【使用主要施設】			
京都大学研究用原子炉（KUR） 圧気輸送管ステーション Pn-2（京大炉・ホットラボラトリ）			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 12 年度は、天然ウランを中性子照射して得られた FP をトレーサとして有効に利用し、PUREX、PUREX 条件下における FP の抽出実験を実施した。またステンレス等の再処理機器構造材を用いて、FP を含む硝酸溶液への浸漬実験を実施した。

### 【研究成果（当該年度）】

#### FP 抽出実験

京都大学原子炉実験所研究用原子炉の圧気輸送システム Pn-2 を用いて天然ウランを照射し、得られた FP をマルチトレーサとして有効に利用し、PUREX、TRUEX プロセス条件を模擬した FP の抽出に関して以下のパラメータ依存性を調べた。

- PUREX、TRUEX 溶媒を用いた抽出系における分配特性の硝酸濃度依存性。
- U(VI)共存下での PUREX 系における分配特性の硝酸濃度依存性。
- 上記 PUREX 残液を水相とし、TRUEX 系における分配特性の硝酸濃度依存性。
- TRUEX 系において、シュウ酸を添加し、逆抽出プロセス条件を模擬した際の分配特性の変化。

本研究に利用できる FP は  $^{93}\text{Y}$ 、 $^{97}\text{Zr}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{132}\text{Te}$ 、 $^{133}\text{I}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^{143}\text{Ce}$  の 7 核種であった。また  $^{238}\text{U}$  の  $(\text{n}, \gamma)$  反応により製造された  $^{239}\text{Np}$  に関する移行挙動も研究した。高線量 FP のひとつである  $^{125}\text{Sb}$  の挙動は興味深い。しかしながら、アンチモンに関しては上記 FP としては充分量得ることができないため、アンチモン金属を中性子照射して放射性トレーサを  $^{122}\text{Sb}$  を調製した。

核種の抽出挙動の硝酸濃度依存性を調べるために、FP、U、Np、Sb を含む、0.5、1、3、5、7M の  $\text{HNO}_3$  溶液を調製した。硝酸濃度が 1、3、5M の抽出実験については、ウラン共存系の実験を行った。その際用いた水相は、天然ウランの硝酸ウラニル溶液を加えて  $[\text{U}] = 0.3\text{M}$  になるように調製した。硝酸濃度が 3 M の TRUEX 実験については、シュウ酸共存系の実験を行った。その際用いた水相は、シュウ酸を加えて、 $[\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4] = 0.02\text{M}$  になるように調製した。

Tri-n-butyl phosphate (TBP) を 1M (30vol%) に希釀した溶液 (PUREX 溶媒) を調製し、PUREX プロセス条件を模擬する実験に用いた。Octyl(phenyl)-N,N-diisobutylcarbamoylmethylphosphin oxide (CMPO) と TBP を、各々 0.2 M、1 M の濃度に希釀した溶液 (TRUEX 溶媒) を調製し、TRUEX プロセス条件を模擬した実験に用いた。希釀溶媒には n-dodecane を用いた。抽出実験は室温にて行った。

実験結果（別添 1、2 を参照）より得られた知見は以下の通りである。

$^{239}\text{Np}$  • • PUREX、TRUEX 系共に、硝酸濃度の上昇と共に分配比が増していく、酸濃度依存性は高酸性領域で顕著であった。また、シュウ酸による洗浄効果は見られなかった。本研究では、Np(V)と Np(VI)の平衡反応、 $(2\text{NpO}_2^+ + \text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ \leftrightarrow 2\text{NpO}_2^{2+} + \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O})$  を考慮しなければならない。Np(VI)の分配比は Np(V)より 100 倍程度大きいため、この平衡反応式を用いて高い硝酸濃度条件下において Np の分配比が大きな値を示すことを説明することができる。

$^{133}\text{I}$  • • PUREX 系、TRUEX 系、及び U、シュウ酸共存系の実験間で、顕著な分配比の違いは見られなかった。また、分配比の変化は酸濃度に依存しており、酸濃度の上昇と共に減少していく傾向が見られた。I の抽出は、抽出剤の種類の影響を受けず、かつ U の抽出による抽出剤の消費の影響を受けていない。このことから I の抽出はドデカンによる  $\text{I}_2$  の抽出であると考えられる。水相中での次の反応 ( $\text{I}_2 + 5\text{H}^+ + 5\text{NO}_3^- \leftrightarrow 2\text{HIO}_3 + 5\text{HNO}_2$ ) より、酸濃度の上昇と共に分配比が減少するのは、 $\text{HIO}_3$  が生成し、 $\text{I}_2$  濃度が減少することに起因すると考えられる。

$^{97}\text{Zr}$  • • 加水分解、重合反応の影響はなく、TRUEX 溶媒は高い抽出性を示した。シュウ酸による高い洗浄効果が確認され、シュウ酸共存系の分配比は非共存系の 1/1000 未満であった。

<sup>99</sup>Mo の水相中のモリブデン化学種間の平衡反応が複雑ではあるが、分配比の酸濃度に対する依存性の傾向は過去の実験[1]を再現できた。

<sup>122</sup>Sb の分配比は他の核種に比べて低く、酸濃度依存性は PUREX 系と TRUEX 系でかなり異なっている。シュウ酸の洗浄効果について、共存系の分配比は非共存系の 1/4 程度であった。アンチモン(V)は硝酸溶液中で、 $\text{SbO}_2^+$  と  $\text{SbO}_3^-$  が混在しており、抽出に関する詳細な実験を行う必要がある。

<sup>143</sup>Ce の 3 値の希土類元素について (<sup>93</sup>Y についても)、PUREX 系では分配比が低いこと、TRUEX 溶媒は高い抽出特性を有すること、シュウ酸の影響がほとんどないことが確認できた。

<sup>132</sup>Te の <sup>239</sup>Np 派生の  $\gamma$  線の干渉を除いて、<sup>132</sup>Te の計数を得、分配比を評価した。分配比は酸濃度が増すにつれ増加する傾向を示した。

[1] Toshiyuki FUJII, Hajimu YAMANA, Masayuki WATANABE and Hirotake MORIYAMA,  
“Extraction of Molybdenum from Nitric Acid by  
Octyl(phenyl)-N,N-Diisobutylcarbamoylmethylphosphine Oxide”,  
*Solvent Extr. Ion Exch.*, 19(1) (2001), 127-141.

### ステンレス浸漬実験

本研究では 3 種類のステンレス SUS304L、SUS316、310Nb、ジルコニウム、チタン、チタン合金、Ti-5Ta を用いた。FP を含む 3 M  $\text{HNO}_3$  に、金属試験片を、40°C の温度条件下にて 1 週間浸漬した。浸漬後、金属片を迅速に取り出し純水で洗浄し、ゲルマニウム半導体検出器により  $\gamma$  線測定を行った。

次に以下の実験条件の除染実験を室温にて行った。

- ① 0.1 M の希硝酸に 6 時間浸漬
- ② 10 M の濃硝酸に 6 時間浸漬
- ③ 0.1 M の塩酸ヒドラジン  $\text{N}_2\text{H}_5\text{Cl}$  に 6 時間浸漬
- ④ 100 ppm  $\text{H}_2\text{O}_2$  を  $\text{NaOH}$  にて pH=8~9 に調製した洗浄液に 3 時間浸漬 (チタン片のみ試行)

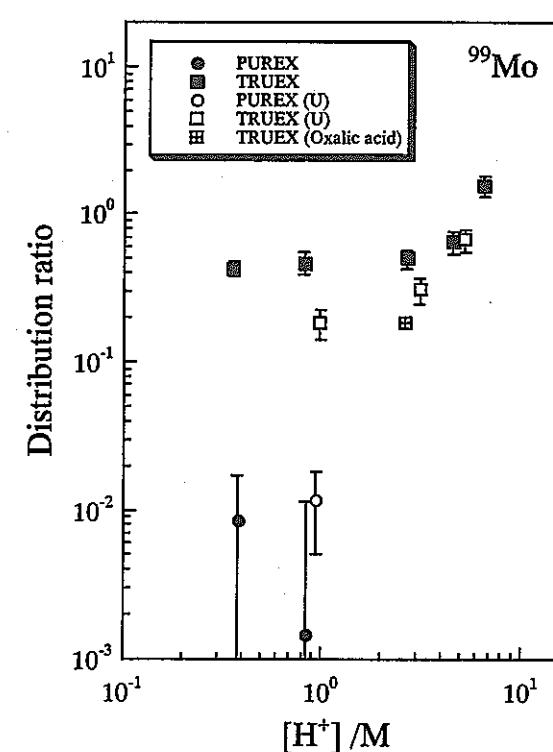
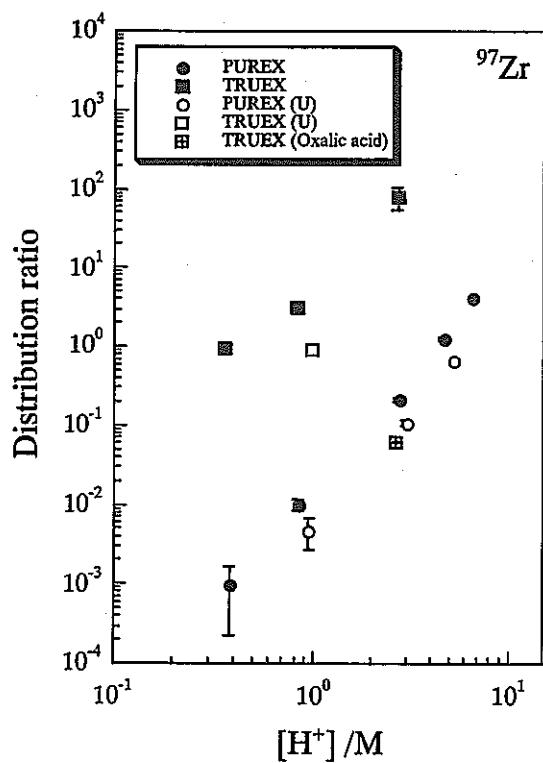
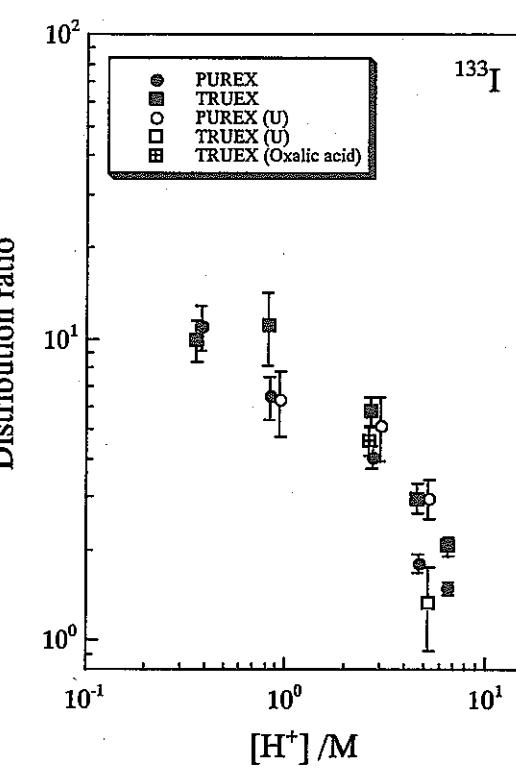
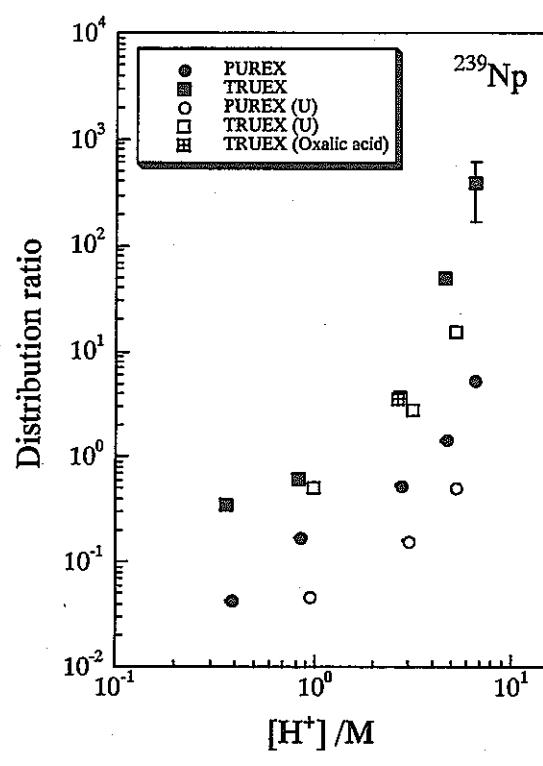
本研究に利用できる核種は <sup>99</sup>Mo、<sup>132</sup>Te、<sup>131</sup>I、<sup>140</sup>La、<sup>143</sup>Ce、<sup>239</sup>Np であった。すべての金属片に関して <sup>140</sup>La、<sup>143</sup>Ce、<sup>239</sup>Np の金属片への吸着は観測されなかった。一方、<sup>131</sup>I、<sup>132</sup>Te の著しい吸着が観測された (浸漬後の液相と SUS304L に関して一例を挙げる。別添 3 の図を参照)。Ti、Ti-5Ta、310Nb に関しては <sup>99</sup>Mo の吸着が観測された。浸漬後の金属表面の酸化物層は含水酸化物になっている可能性があり、酸性度の高い溶液内で、陰イオン交換体として挙動している可能性がある。Te、I、Mo はそのアニオン種の存在が広く知られており、 $\text{HTeO}_3^-$ 、 $\text{IO}_3^-$ 、 $\text{HMnO}_4^-$ などの吸着現象が観測された可能性がある。また洗浄実験の結果からも、陰イオン種が吸着に関与している可能性が示唆された。

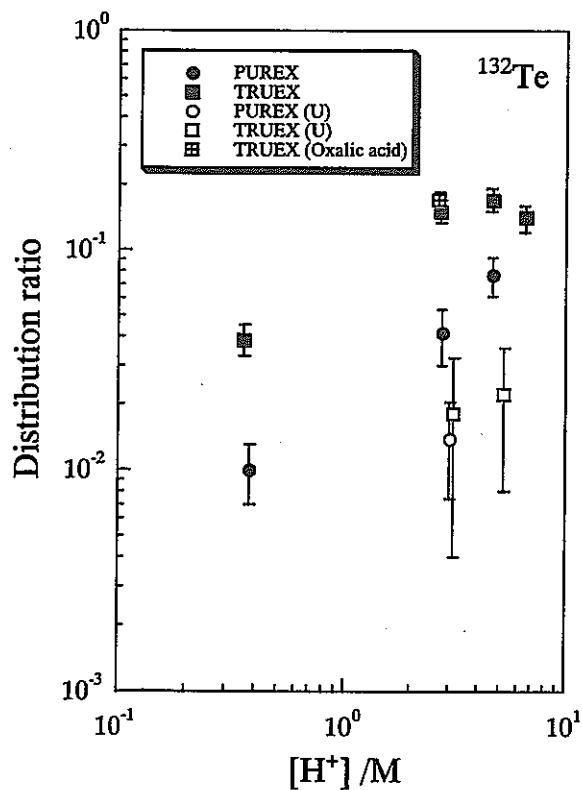
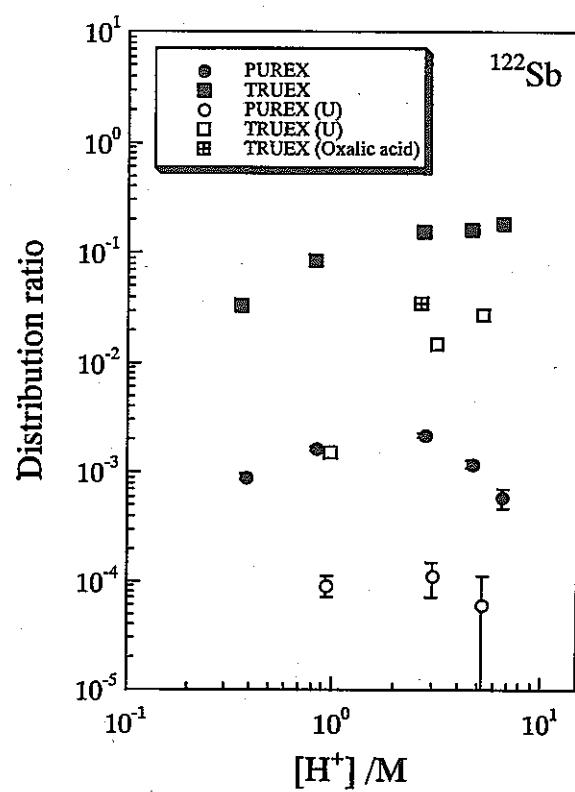
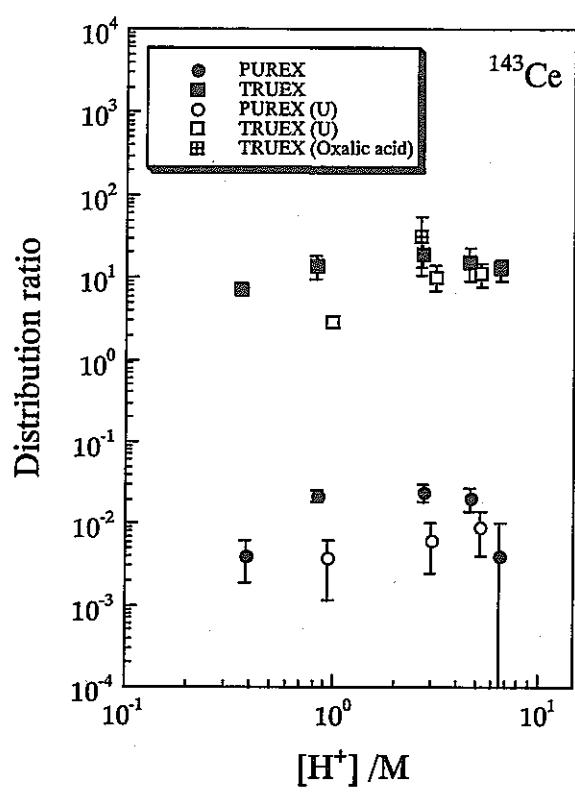
### 【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

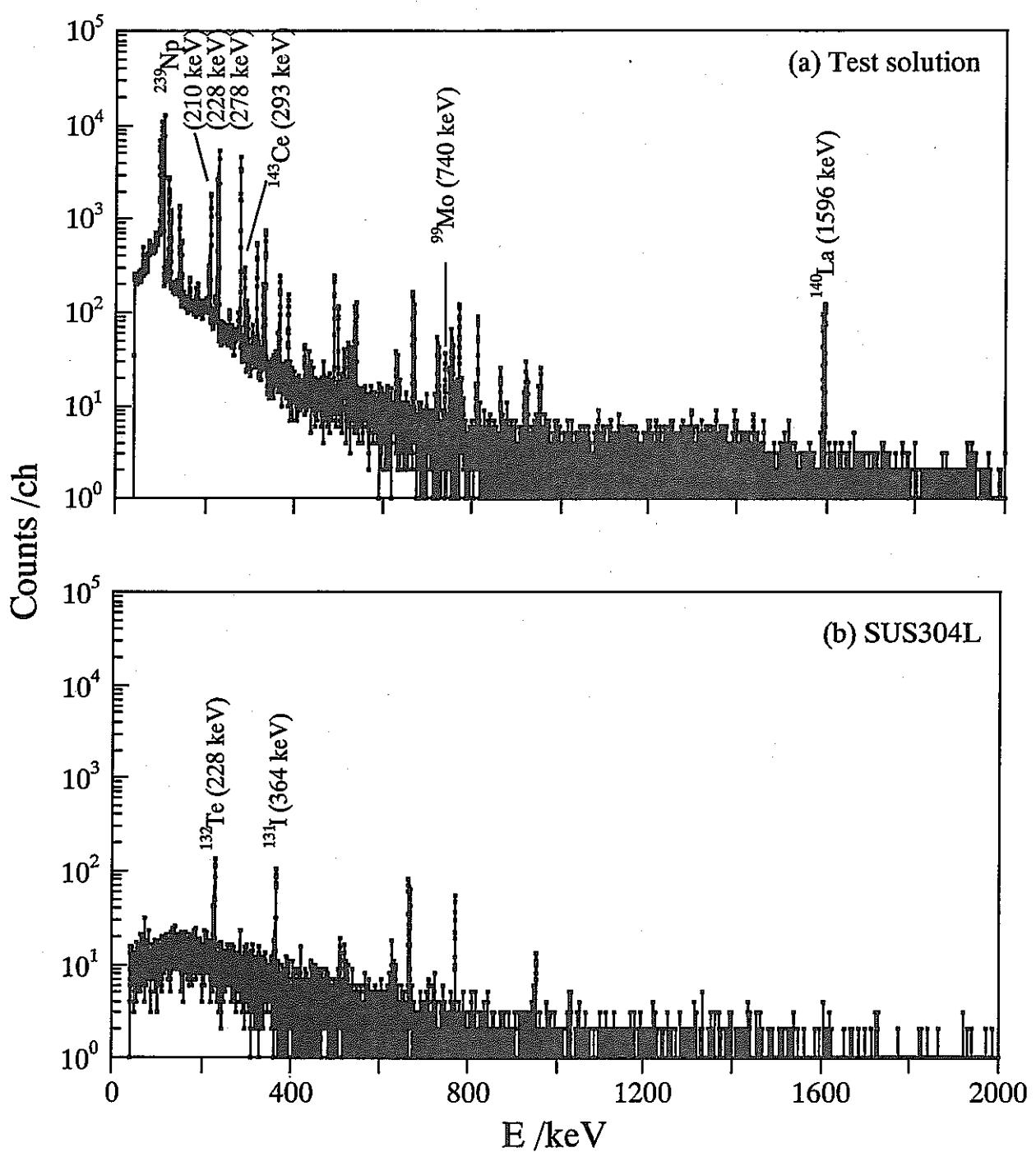
平成 13 年度は溶解工程 (90°C 程度) における各核種の挙動評価を実施する予定である。  
平成 14 年度は溶解工程 (40°C 程度) における各核種の挙動評価を実施する予定である。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

Toshiyuki FUJII, Hajimu YAMANA, Koichi TAKAMIYA, Masayuki WATANABE  
and Hirotake MORIYAMA  
“Adsorption of Fission Products on a Metal Surface in Nitric Acid Solutions.  
Radiochemical Study Using a Multitracer.”  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.*, submitted.







別添3

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	イオン照射によるボイド形成挙動の解析		
研究者所属、氏名			
大学側	京都大学 エネルギー理工学研究所 教授 香山 晃, 助教授 加藤 雄大		
機構側	大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 副主任研究員 堂野前 貴子, 副主任研究員 赤坂 尚昭		
研究実施場所	京都大学 エネルギー理工学研究所 機構 大洗工学研究センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室	当該年度 研究期間	平成 12 年 8 月 ~ 平成 13 年 3 月
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 12 月 ~ 平成 14 年 3 月		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>高速炉炉心用オーステナイト鋼のスエリングが材料照射に比べ燃料集合体照射の場合に大きくなる現象が明かとなり、照射期間中における照射条件の変動がスエリング挙動に及ぼす影響を的確に評価することが、近年の炉心材料スエリング挙動評価において最重要課題となっている。本共同研究は、変動する照射条件の内、特に照射温度と応力に着目し、イオン照射とスエリング機構論に立脚したシミュレーション解析により実験・理論両面からこれらの影響を影響を評価することを目的としている。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>京都大学では、高速炉炉心用オーステナイト鋼について、重イオンによるシングルイオン照射試験若しくは重イオン/ヘリウムイオンデュアルビーム照射試験を行い、改良オーステナイト鋼におけるボイド形成挙動について実験的な検討と機構論モデルによる理論的検証を行う。また機構では、京都大学と共同で実験結果に基づく機構論的な検討を行うとともに、機構が有している改良オーステナイト鋼の中性子照射下での組織変化挙動データに対する上記検討結果の妥当性を検討する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 重イオン照射試験(京都大学実施分)             <p>改良オーステナイト鋼について照射条件を変動させた重イオン照射を行い、照射後試料の詳細観察を行う。</p> </li> <li>2) 組織変化挙動の機構論的検討(京都大学・機構実施分)             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) の照射試験で得られた結果を基に、照射条件の変動がボイド形成挙動に及ぼす影響について機構論的検討を行う。</li> </ol> </li> <li>3) 中性子照射後試験結果に対する検証(機構実施分)             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 及び 2) で得られた結果を機構が有している中性子照射による組織変化挙動データと比較・検討し、中性子照射下における改良オーステナイト鋼の組織発達機構への適用妥当性を検討する。</li> </ol> </li> </ol>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>デュアルビーム材料照射設備(DuET 設備) (京都大学) 200kV 透過電子顕微鏡 (京都大学) 収束イオンビーム材料加工分析システム (京都大学) 400kV 透過電子顕微鏡 (機構)</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、PNC316 鋼の 20% 冷間圧延加工材（板材）および被覆管（内表面近傍、肉厚中心および外表面近傍）に対してデュアルビーム照射を行い、組織発達挙動について検討した。その結果、圧延材および被覆管各部は、初期加工組織及びそれに伴う残留応力状態が大きく異なるために、転位組織の回復挙動に差異を生じる結果、顕著な偏析およびキャビティー形成サイトを提供する照射誘起析出までに要する照射線量に有意な違いが及ぼされることにあると結論づけられた。

平成 12 年度は、オーステナイト系ステンレス鋼のモデル合金を対象としたイオン照射実験により、非定常照射履歴の効果を調べ、得られた実験結果から、温度変動照射効果の機構をミクロ組織の包括的モデルによる計算結果と併せて考察し、非定常照射効果を数値計算により予測するための基礎的検討を行った。

### 【研究成果（当該年度）】

温度変動照射と定常照射とでミクロ組織発達の差異を調べた結果、本実験の条件では、初期において設定温度より低い温度で照射が行われた場合にはキャビティーの数密度を増大させ、中途において一時的に照射温度が低下した場合にはキャビティーの成長を促進するとの結果を得た。本結果より、高速炉炉心において通常想定される燃焼出力の緩やかな低下と燃料再配置に起因する公称照射温度領域近傍における温度変動サイクルと比較して、原子炉の立ち上げ時や運転の中止時に一時的に材料が経験する比較的低温での照射が顕著なスエリングへの影響を及ぼす可能性が高いことが示唆された。なお照射施設の運転スケジュール及び整備上の都合から PNC316 鋼のスエリング挙動評価に必要とされる高いエネルギーの主イオンにより超高線量照射は実施されなかった。しかしながら、これらのオーステナイト系ステンレス鋼モデル合金について得られた実験結果から、温度変動照射効果の機構をミクロ組織の包括的モデルによる計算結果と併せて考察し、非定常照射効果を数値計算により予測するための基礎的検討を行った。

#### 初期低温照射の効果

照射開始温度を 473K または 673K、定常照射温度を 873K とした場合、マトリクス中に成長したポイドは観察されず、微小なヘリウムバブルが多数形成されていた。照射開始温度が 473K の場合と 673K の場合とではキャビティー数密度、平均半径とともに有意な違いが見られなかつたが、873K 定常照射の場合とは両者とも明らかに異なっていた。すなわち、照射初期に低い温度でビームが当たっている試料においては、キャビティーの数密度が約 50 倍に、平均半径が約 1/2 になっている。また、他の実験における 873K 定常照射における飽和キャビティー数密度は  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  のオーダーであり、かつ本実験においては弾出し損傷速度が 1/2 であることから、初期低温照射はキャビティー数密度を 1 衍以上増大させたと考えてよい。

照射開始温度 473K と 673K でキャビティー数密度の違いが生じないことは、キャビティーの核生成は 673K において本実験での他の温度条件よりも格段に大きい速度で起こっているか、もしくは 473K において多数のキャビティー核が形成されているが 673K においてある程度成長して 873K においても成長可能なサイズに達するものの数密度が 673K において核生成するキャビティーの数密度と同様であるかのいずれかである。ミクロ組織発達の包括的モデルによる計算の結果、473K において 0.3 dpa ではキャビティー核生成はきわめて僅かであり、673~773K において核生成が最大となることが明らかにされた。キャビティーのサイズが初期低温照射した試料で小さいことは、キャビティー数密度の違いによりヘリウムが微細に分配されたことが最大の原因である。

## 中途低温照射の効果

773K 照射において、5 dpa ごとに 573K での 0.3 dpa の中途低温照射を行う効果を調べた。キャビティー組織発達に対する中途低温照射の影響は顕著であり、キャビティーの数密度は変化させないがその平均径をおおきくすることにより、スエリング量が約 3 倍に及ぶ結果となった。

温度変動照射の結果得られているキャビティー組織は、微細なヘリウムバブルと成長したポイドからなる典型的な bimodal なサイズ分布を示した。定量化の結果、バブルとポイドを含めた全キャビティー数密度は、中途における低温照射によって変化していないことがわかった。他方、成長してファセットを持つようになったポイドについて比較すると、その数密度において中途低温照射した試料が数倍大きくなっていることがわかる。以上の結果は、中途における低温照射がキャビティーのバブルからポイドへの変換を促進したことと示すものである。

573K における 0.3 dpa の照射のみの実験を実施したところ、数密度約  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ 、平均半径約 5nm の微細かつ高密度なフランクループ組織を形成することが示された。このフランクループの転位線密度は約  $4 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  であり、773K 定常照射における典型的なネットワーク転位の平衡密度に相当する。773K における照射は拡張欠陥組織を発達させるため、これに続いて 573K 照射した場合に形成されるフランクループ組織は 573K における定常照射が形成するものと比較して発達が遅れるものと考えられる。しかしながら、一般にフランクループはネットワーク転位と比較して大きいバイアス効果を持つとされており、中途低温照射は系のバイアスを倍増する程度の効果を有するものと考えられる。

このような系のバイアスの変化はバブル-ポイド変換の臨界パラメータに対して本実験の条件では顕著な影響を及ぼさないが、臨界条件に非常に近い状態にあるキャビティーの挙動に対しては決定的な影響を与える。また、773K 照射により発達した拡張欠陥組織がフランクループの発達を遅らせて 0.3 dpa 照射終了時におけるそのサイズを小さくした場合、773K における原子空孔過飽和度を劇的に大きくすることが、計算により示された。したがって、中途低温照射によるスエリング促進の機構のひとつは、573K における照射によって形成された微細なフランクループの成長に伴うものである。

また、バブル-ポイド変換の臨界パラメータの温度依存性を計算してみると、照射温度が低くなるほど臨界半径が小さくなり、ある温度以下ではキャビティーの成長速度が常に正になることが示される。この条件では、673K 以上においては臨界条件が存在するが、573K ではキャビティーが無条件に成長する。573K における半径方向のキャビティー成長速度は、773K の平衡バブル半径において約  $10^{-13} \text{ m/s}$  であるので、573K での 0.3 dpa 照射する時間の半径の変化は  $10^{-10} \text{ m}$  以下であるが、キャビティーのサイズやヘリウム分配のばらつき及びゆらぎを考えれば、この間にある割合のバブルが 773K における臨界条件に達する可能性は無視できない。すなわち、中途低温照射がバブルのポイドへの変換を促進するもうひとつの機構は、あるサイズ範囲におけるキャビティー成長速度が低温照射中にのみ成長可能であることであると結論付けられた。

## 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 13 年度の予算が確保できなかったため、本共同研究は平成 12 年度で中断する。

## 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	配管外からの温度推定に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	広島大学 工学部第一類（機械系） 教授 菊地 義弘		
機構側	大洗工学センター 要素技術開発部 原子炉工学グループ SL 上出 英樹		
研究実施場所	広島大学 工学部 機構 大洗工学センター ナトリウム流動伝熱試験室	当該年度	平成 12 年 8 月～ 平成 13 年 3 月
通算研究期間 (予定)	平成 10 年 12 月～ 平成 13 年 3 月	研究期間	平成 12 年 8 月～ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
<p>本研究では、ナトリウム配管の外壁に熱電対を設置して配管外表面温度を計測し、コンピュータを援用して、熱伝導逆算法（逆熱伝導解法）により配管外表面温度から配管内部のナトリウム温度を推定する手法を開発する。</p> <p>これにより、配管壁を貫通することなく内部ナトリウム温度を測定することができる。</p>			
【研究内容（概要）】			
<p>配管あるいは矩形流路の壁外面温度より、熱伝導逆算法により壁内面の温度と熱流束を推定し、これから流体温度を評定する手法を開発する。これと平行して層流を仮定した数値解析を行い、流体温度と壁の温度の過渡変化に関する数値実験を行う。また、矩形流路での水試験ならびに配管体系でのナトリウム試験を行う。</p> <p>数値実験ならびに試験で得られる壁外表面温度データから本手法により内部流体温度を求め、これを実験等で得られた内部流体温度と比較する。これにより計測手法の開発・検証を行い、適用可能範囲、課題点等を明らかにする。</p>			
【使用主要施設】			
広島大学工学部第一類、菊地研究室内、水流動試験装置 機構、大洗工学センター、ナトリウム流動伝熱試験室内 炉心・機器熱流動試験施設（ナトリウム試験装置）			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成10年度は、配管外壁面温度から流体温度を評定する計算手法を構築した。また、矩形流路体系での水を作動流体とした数値実験ならびにステンレス板をその片側表面のみ温水に浸して加熱する実験を実施した。これにより、本手法の有効性を明らかにするとともにその適用範囲として、評定に必要な計測遅れ時間などを明らかにした。

平成11年度は、配管を模擬した厚さ10mmの2枚のステンレス鋼板の間に高温の水を流下させ、過渡温度変化を与える平行平板体系にて水試験を行った。同様な2次元体系について2次元非定常解析を層流条件で実施した。壁外面温度の測定値ならびに数値実験による解析値から熱伝導逆計算法を用いて壁内面温度を標定した。この結果、評定における熱伝達係数の設定の重要性が指摘された。

## 【研究成果（当該年度）】

### 1. はじめに

12年度は、配管を模擬した厚さ10mmの2枚のステンレス鋼板の間にナトリウムを流下させ、過渡温度変化を与える体系にて2次元非定常解析を層流条件で実施し、水を作動流体に用いた場合と比較した。また、配管体系でのナトリウム試験を実施し、配管内部に貫通した「さや管」内熱電対と配管の外表面に設置した熱電対の過渡温度変化を比較した。以上の結果をもとに、本計測手法のナトリウム体系への適用性を検討した。

### 2. 壁外面温度から流体温度を求める手法

まず、壁外面温度から流体温度を求める手法について示す。本手法では、壁外面の温度変化を測定し、これから逆熱伝導計算（逆計算法）により壁内面（流体側）の温度ならびに熱流束の過渡変化を求める。さらに流体と壁内面との熱伝達率を流速や流動形態を既知として既存の相関式から得ることで流体のバルク温度を評定するものである。図1に壁外面温度から内面温度を求める逆計算法の考え方を示す。壁の熱伝導を1次元問題として解く。境界条件として壁の外側を断熱とする。時刻kにおける壁内面温度を評定するとき、初期条件として時刻k-1における壁内の温度分布及び壁内面での熱流束を既知とする。mをサンプル個数としてkからk+mまで壁外面温度を $\Delta t$ 間隔で測定する。ここで時刻kからk+mまでの壁内面の熱流束を時刻k-1での値と仮定して1次元の熱伝導計算を行い時刻kからk+mの壁外面の温度を求める。これを実際の測定値と比較し、その差異の二乗和が最小となるように時刻kの熱流束を補正する。これを補正值が十分に小さくなるまで繰り返すことで壁内面の熱流束を求める。補正の方法など詳細は文献(1)を参照のこと。壁内面の温度及び熱流束を求めるには $m \times \Delta t$ だけの時間遅れ（評定時間 $\Delta t_d$ ）が必要となる。実際の計測ではさらに熱伝導計算を繰り返すための計算時間が必要となるが、これは $\Delta t$ （0.1～1秒程度）に比べて十分に短い。

### 3. ナトリウム体系での数値実験

ここでは2次元非定常計算により、図2に示す平行平板間の流れについて流体の入口温度を変化させたときの壁を含む温度変化を求めた。この結果に先の逆計算法による流体温度の評定手法を適用した。計算にはPuns-Spaldingによって開発された差分法に基づく定常計算コードを非定常2次元流コードに改良したコードを用いた。対流項には5次の風上差分を用いている。流体は水およびナトリウムとし、両者を比較することとした。レイノルズ数を1000とし層流条件で計算を行った。流体の入口温度は断面内一様温度として過渡変化させた。予備解析として、両側加熱条件での壁内面のNu数分布を理論解（Shah, London）と本解析手法による結果とで比較し、両者がよく一致することを確認した。

図3、図4にそれぞれナトリウム体系、水体系にて、板厚10mmとし、入口より0.01mならびに0.25m下流での温度変化を数値実験と逆計算による評定結果とで比較した結果を示す。評定に用いるサンプル個数を2、評定時間を2sとした。壁の内面温度についてはナトリウム、水ともに数値実験の結果と評定結果はよく一致している。流体のバルク温度については水の場合に比べナトリウムではよく一致している。理由の一つには、ナトリウムは熱伝導率が高く流体温度と壁内面温度の差が小さく、評定において仮定している時間的に一定の熱伝達率が実際と異なることの影響が小さいことが挙げられる。

#### 4. 配管体系でのナトリウム試験

機構において内径0.1mの配管体系を用いたナトリウム試験を実施した。配管の外表面に設置した直径0.6mmの熱電対と配管内の中心まで貫通した「さや管」内に挿入した直径3.2mmの熱電対の測定結果を比較した。配管壁の厚みは4mm、「さや管」の先端部の厚みは1.3mmである。配管内流速0.49m/sにて250°Cからナトリウム温度を約40°C上昇させた。実験結果を図5に示す。さや管を用いた熱電対の結果と配管外表面の熱電対の結果はほぼ一致していることがわかる。これは、さや管の厚み、挿入した熱電対のシース厚み、さや管と熱電対の接触抵抗を加えた熱抵抗が配管壁とほぼ等しいものであったためと考えられる。ナトリウム試験に用いるような直径0.1m程度の配管であれば、外表面温度を測定することで通常のさや管内熱電対と同程度の計測が行えることが示された。図6にこの試験データを用いて評定を行った結果を示す。評定に用いるサンプル数を2個、評定時間を0.2s(数値実験の体系に比べ壁の厚みが薄いため)とした。実際のナトリウム装置で測定されたノイズを含む計測結果を用いても数値的に不安定な挙動を示すことなく安定して評定ができることがわかる。

#### 5.まとめ

ナトリウム体系では、流体の熱伝導率が高いことから配管壁内面と流体との温度差が小さいため、熱伝導逆計算法に基づいて配管の外表面温度の測定結果から内部ナトリウム温度の過渡変化を評定することは有効である。評定に必要な時間はステンレス壁の厚みが10mmのとき2秒であり、実時間より2秒遅れで流体温度を評定できる。また、ナトリウム試験装置での電気的なノイズを含む計測データに対しても本手法により安定して評定ができることが確認した。

本手法の課題としては、熱伝達率を相関式により求める必要があることから、流速が一定であり流れの形態が予測できる発達した流れ場であることが必要である。従って本手法を適用する場合には適用する箇所をよく考慮する必要がある。また、大口径の配管体系に対する適用性については検討すべき点が残っており、数値実験等を用いて確認することが重要である。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

共同研究としては12年度にて完了する。但し、大学にて配管体系での適用性について数値実験を含め検討を継続する。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 菊地義弘、佐藤純哉、吉田敦司、「コンピュータ援用計測法による配管外から管内流体温度の実時間標定」、第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集 p.249 (1999)
- (2) 藤村智史、桑原幸治、菊地義弘、「管外表面から管内流体温度の評定に関する数値実験」、日本原子力学会「2000年春の年会」予稿集 (II) p.716 (2000)
- (3) 菊地義弘、桑原幸治、「計算機援用計測法による配管外からナトリウム温度の実時間評定」、日本原子力学会「2001年春の年会」予稿集 (II) p.418 (2001)

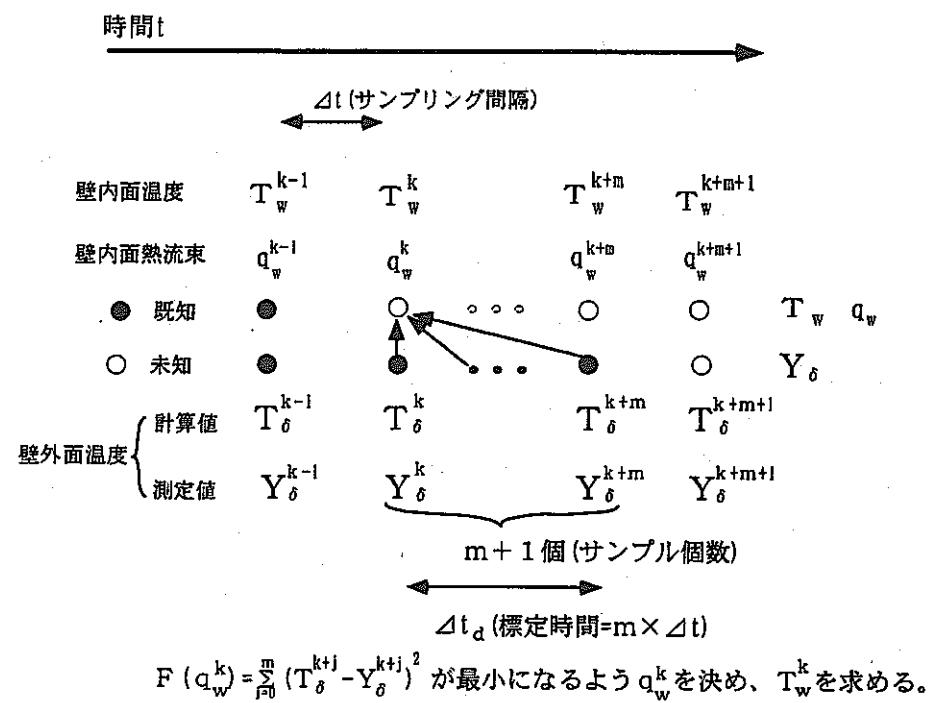


図 1 逆計算法

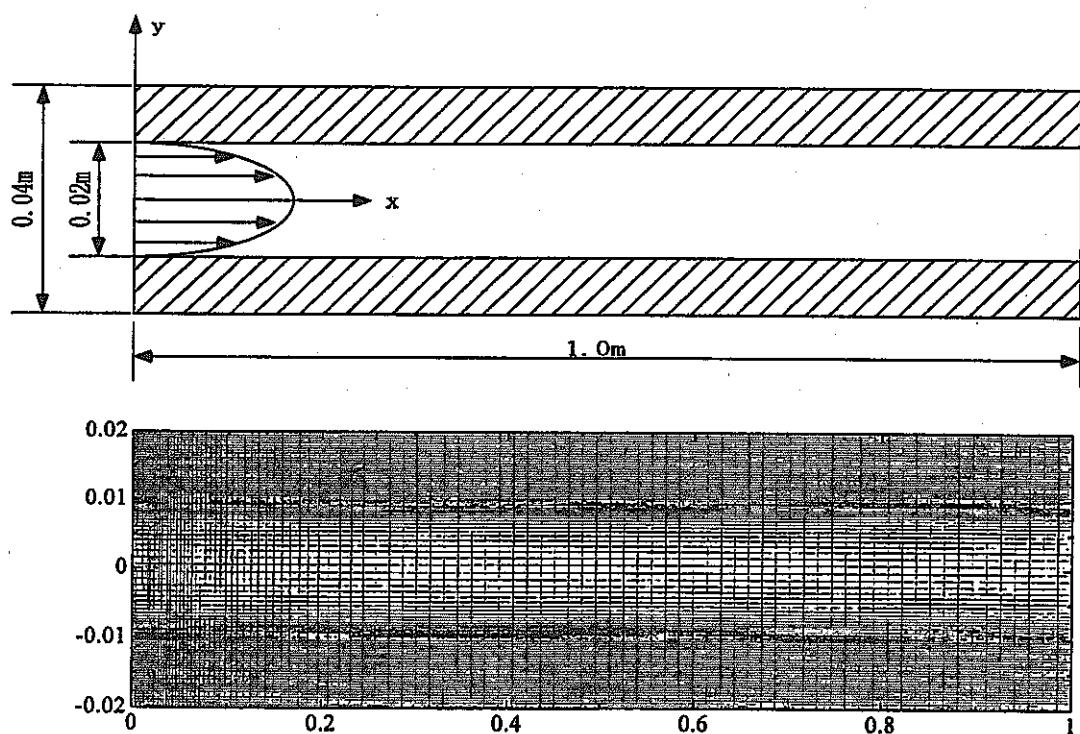


図 2 計算領域と計算格子

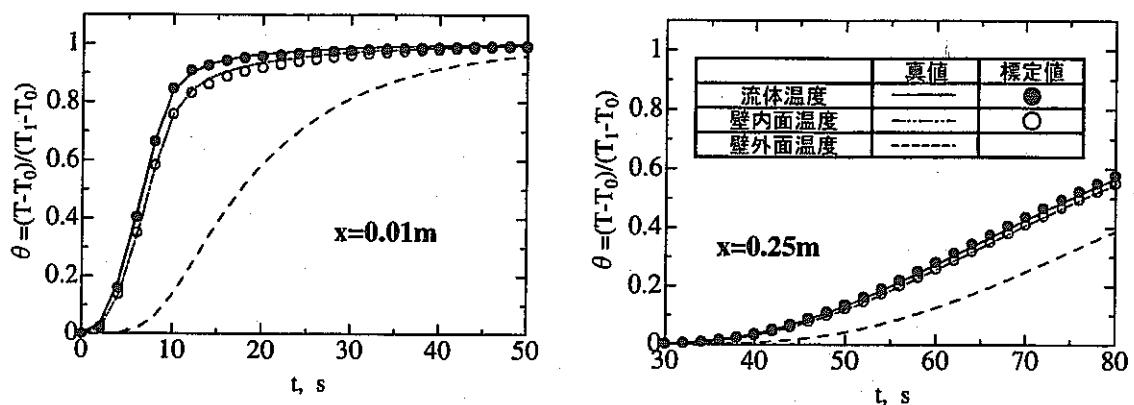


図3 数値実験による過渡変化の評定結果：ナトリウム体系

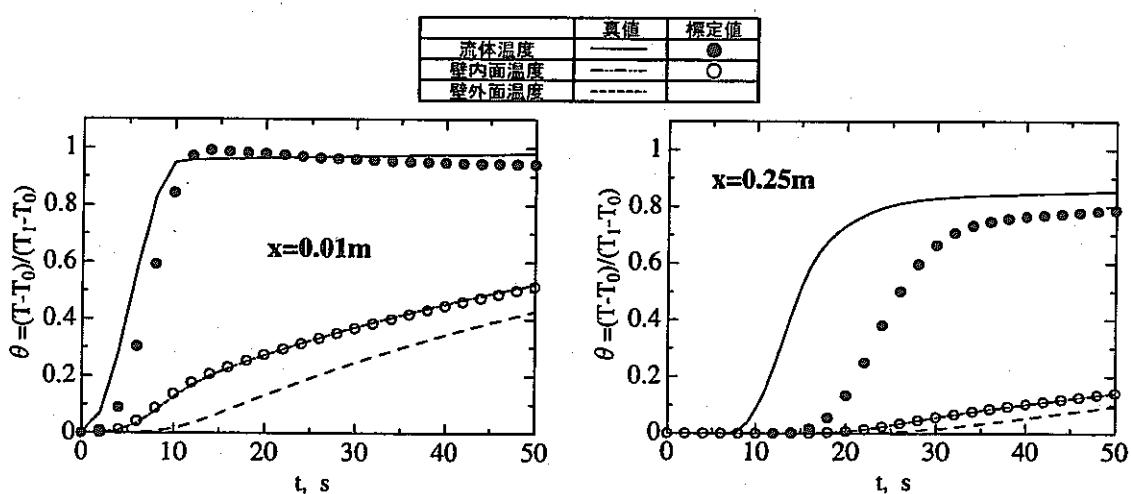


図4 数値実験による過渡変化の評定：水体系

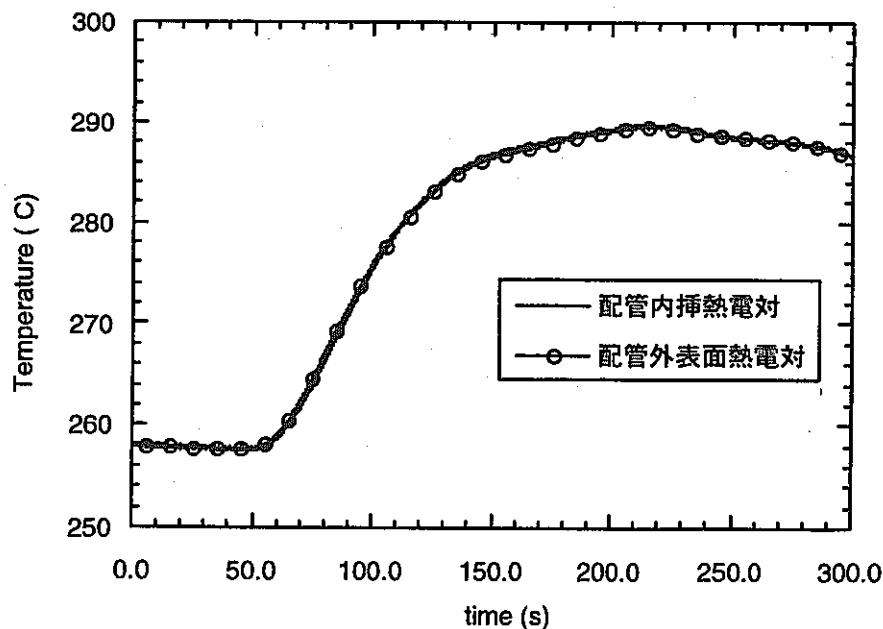


図5 ナトリウム試験による配管部温度変化

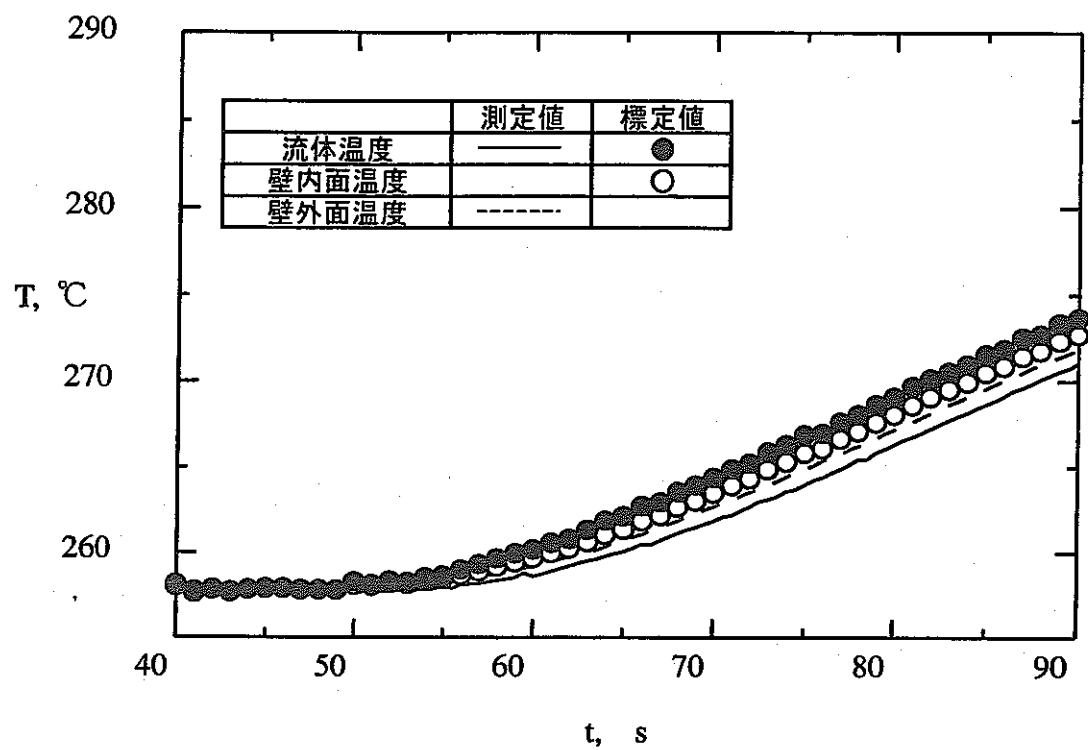


図6 ナトリウム実験データを用いた評定結果

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	ナトリウム液滴の燃焼挙動に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	東邦大学 理学部 物理学科 教授 佐藤 研二		
機構側	大洗工学センター 要素技術開発部 プラント安全工学グループ 副主任研究員 大野 修司, 副主任研究員 中桐 俊男, SL 宮原 信哉		
研究実施場所	東邦大学 理学部 物理学科 機構 大洗工学センター 高速炉安全性第3試験室	当該年度 研究期間	平成 12 年 6 月 ~ 平成 13 年 3 月
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 6 月 ~ 平成 14 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 12 年 6 月 ~ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
ナトリウム液滴燃焼挙動の現象論解明に向けて、液滴の着火挙動、着火後の燃焼挙動、落下挙動および燃焼に伴う落下挙動の変化を把握することとする。			
【研究内容（概要）】			
<p>(1) 静止ナトリウム液滴燃焼実験（東邦大学実施分）          ナトリウムの静止液滴を対象に、気流速度や液滴初期温度を変えた条件で燃焼させる実験を実施し、液滴の着火挙動および着火後の燃焼挙動を調べる。</p> <p>(2) ナトリウム液滴落下燃焼実験（機構実施分）          落下距離、液滴直径、液滴初期温度等を変えた条件で単一液滴を落下燃焼させる実験を実施し、燃焼速度や燃焼によって生じる落下速度などの挙動を調べる。</p>			
【使用主要施設】			
静止液滴燃焼基礎実験装置（東邦大学に設置） 落下液滴燃焼実験装置（機構大洗工学センター高速炉安全性第3試験室）			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

#### (1) 静止ナトリウム液滴燃焼実験（東邦大学実施分）

静止ナトリウム液滴の着火時および燃焼過程での液滴温度や火炎温度を計測する方法を検討し、計測システムの考案・製作および機能確認試験を実施した。

#### (2) ナトリウム液滴落下燃焼実験（機構実施分）

最大落下距離約 8m の大型試験装置の準備および効率的なナトリウム供給方法の改善を行った後に、落下高さを変えた実験を 2 回実施した。

### 【研究成果（当該年度）】

#### (1) 静止ナトリウム液滴燃焼実験（東邦大学実施分）

不活性雰囲気中で細管先端に懸垂させたナトリウム液滴を瞬時に空気雰囲気にさらして着火燃焼させた時の液滴温度と火炎温度の変化を測定するための方法を検討し、これを実現するための計測システムの考案・製作を行った後、ライター火炎及び半田を使用して機能確認試験を実施した。計測方法・装置の概要と成果を以下に示す。

- ・ 温度測定には、直径 25 ミクロンの R 型熱電対素線にシリカコーティングしたものを使用することとした。
- ・ 温度測定のための熱電対駆動装置のモータ制御と温度収録・処理を行うための Basic プログラムを新たに開発した。
- ・ 热電対駆動装置は、約 4cm の距離について熱電対を一定速度（例：2cm/s）で水平に移動させることができた。
- ・ ライター火炎及び半田を使用した機能確認試験から、1ms 間隔で収録した熱電対出力信号を 10ms 毎に平均化処理すればノイズによる変動の影響を小さくして温度を評価できることを確認した。
- ・ 上記熱電対は 20 サイクルのガス温度変動に追従できるとの既往知見を考慮すると上記速度で移動させれば直径 3~5mm 程度のナトリウム液滴および周囲火炎部の温度分布を 1mm 程度の分解能で測定することが可能と考えられる。
- ・ また、同一条件で熱電対移動開始時刻だけを変えた測定を複数回実施することによって、温度分布のほかに特定部位の温度時間変化も測定可能と考えられる。

#### (2) ナトリウム液滴落下燃焼実験（機構実施分）

落下液滴燃焼実験装置を使用して、落下高さ（液滴採取位置）を変えた実験を 2 回実施した。実験は、空気雰囲気（酸素濃度 21%、湿分濃度 0.6% 以下）、液滴初期温度約 500°C、液滴直径約 5mm（ナトリウム量約 50mg）の条件で、最大落下高さを 8m、(1 回目)、8.7m (2 回目) として单一液滴を繰り返し落下燃焼させたものである。実験装置概要を図 1 に、パラフィン中に回収した燃焼後液滴のナトリウム量分析結果を図 2 に示す。

実験から得られた成果は以下のとおりである。

- ① 本実験装置を使用することで、最大の落下高さ条件においても燃焼後液滴を容器に回収できること、回収液滴のナトリウム量のばらつきは 95% 信頼幅で 4.4% 以下と小さく今回の実験方法でナトリウム液滴の燃焼量を適切な精度で測定できること、等が確認された。
- ② 落下させる液滴の形状を球に近いものとするためには、実験で使用するナトリウムの純度管理が必要であることが示唆された。
- ③ 今回の条件において单一液滴の燃焼量（図 2 参照）と着火位置に関するデータを得た。ビデオ映像から確認した着火位置は、落下後約 50cm（部分着火）および落下後 70~80cm（完全着火）であった。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

(1) 静止ナトリウム液滴燃焼実験（東邦大学実施分）

平成 13 年度は、平成 12 年度に検討・考案・製作した液滴・火炎温度計測法を用いて静止液滴の着火・燃焼時温度を測定する。

(2) ナトリウム液滴落下燃焼実験（機構実施分）

平成 13 年度は、落下高さに加えて液滴初期温度を変えた条件で、空気雰囲気落下液滴の燃焼量と着火位置に関するデータを取得する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

平成 11 年度

- (1) 佐藤、静止ナトリウム液滴燃焼基礎実験(II)、JNC TJ9400 99-011、1999 年 10 月
- (2) 大野他、ナトリウム液滴落下燃焼実験(2) -ASSCOPS の液滴燃焼モデルの評価-、JNC TN9400 99-079、1999 年 10 月
- (3) 佐藤他、静止ナトリウム液滴の自発着火過程の観察、第 37 回燃焼シンポジウム D332、1999 年 12 月
- (4) 大野他、ナトリウム液滴の落下燃焼挙動に関する実験研究（第 2 報）、第 37 回燃焼シンポジウム D333、1999 年 12 月

平成 12 年度

なし

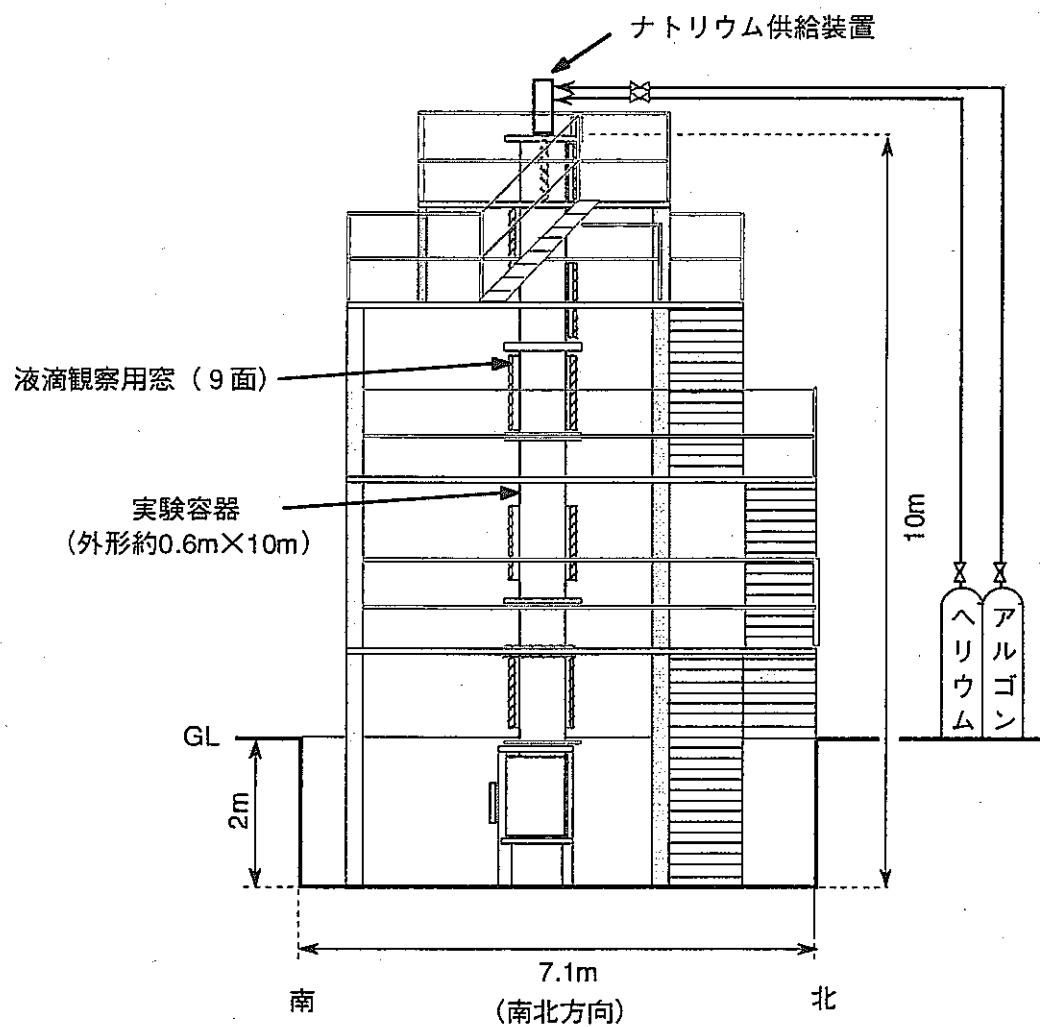


図1 落下液滴燃焼実験装置

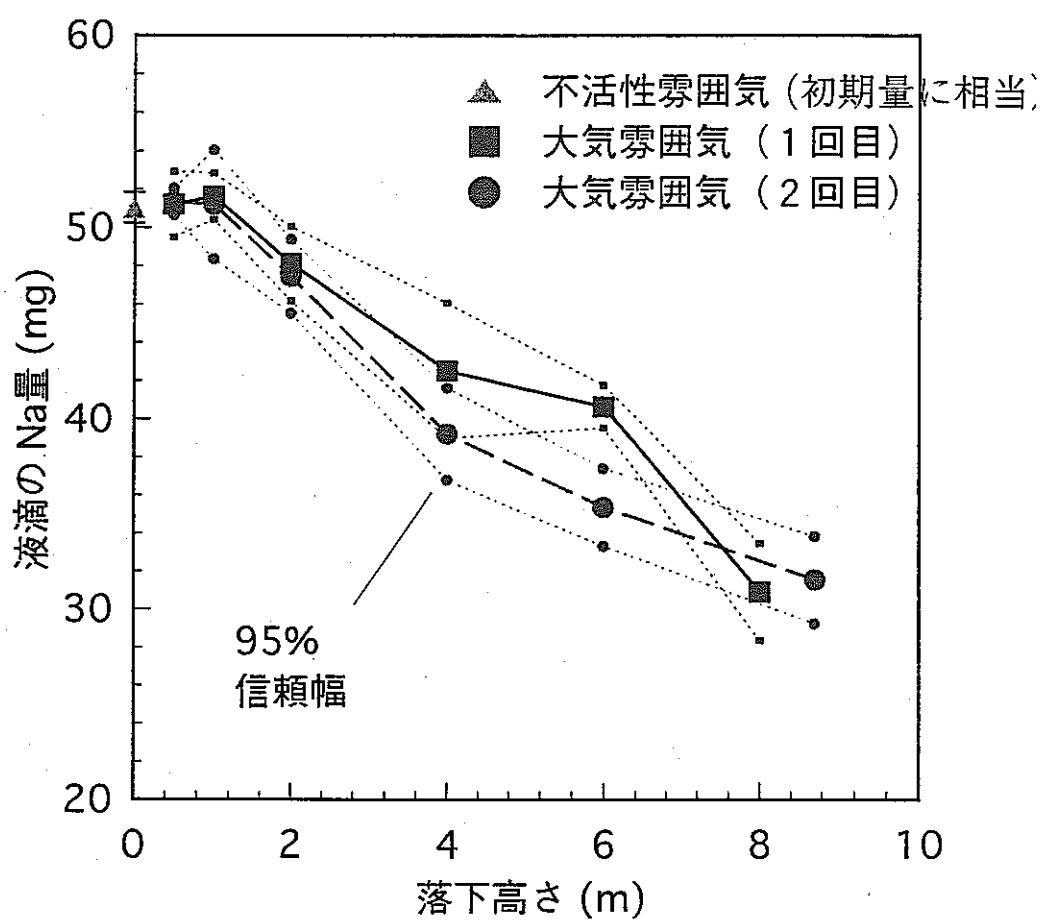


図2 落下高さと液滴のナトリウム量の関係

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	核拡散抵抗性評価基準と燃料サイクル意志決定分析手法の開発		
研究者所属、氏名			
大学側	東京大学 大学院 工学研究科 システム量子工学専攻 教授 鈴木 篤之, 客員助教授 鈴木 達治郎, 大学院生 桐山 恵理子		
機構側	国際・核物質管理部 核不拡散対策グループ GL 堀啓一郎, 研究主幹 花井 祐		
研究実施場所	東京大学 大学院 工学系研究科 機構 国際・核物質管理部	当該年度	平成 12 年 6 月 ~ 平成 13 年 3 月
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 6 月 ~ 平成 13 年 3 月	研究期間	平成 12 年 6 月 ~ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
<p>本研究では、過去から最近にいたるまで、核拡散抵抗性を開発目標としているあらたな核燃料サイクル・新型炉の概念をレビューし、その共通する概念や評価基準をあきらかにするとともに、多様な評価基準を組み入れた多属性効用関数法を適用した意志決定分析手法を開発し、その適用可能性を探ることを目的とする。</p>			
【研究内容（概要）】			
<p>原子力には核拡散のリスクが潜在的に存在している。核軍縮の促進は平和利用核燃料サイクル技術の利用に依存しており、核拡散リスクと平和利用技術の関係は依然として存在している。この問題は国際的な議論の焦点となってきた。核拡散リスクは原子力のエネルギーセキュリティに対する貢献度を低下させるリスクであるといえる。そのセキュリティを高めるために、最近再び提唱されているのが核拡散抵抗性の概念である。</p> <p>過去から最近にいたるまでの核拡散抵抗性の概念をレビュー (The Spent Fuel Standard (1994) National Academy of Science, Department of Energy, etc)、関連ワークショップへの参加、その議論に基づく資料の分析、専門家へのインタビューおよび、Eriko Kiriyama and Susan Pickett (2000)、Eriko Kiriyama et al(2000) (P3.に記載の論文)における核拡散抵抗性のある革新型燃料サイクルに関する研究に基づいて、5つのクライテリアが核燃料サイクルの核拡散抵抗性の定量的評価基準として得られた。</p> <p>その評価基準に基づき、Analytic Hierarchy Process を適用した意志決定分析をおこなった。専門家集団の判断をベースとして、意思決定者の判断相違の原因など、研究開発の目標の決定等に専門家の知見を包含する貴重な情報を得ることができた。評価基準の重要性(ウェイト)の決定ツールとしてAHP法を用いて、各意思決定者の感度分析を行うことにより、基準相互の優位性や相關関係が明らかになった。</p>			
【使用主要施設】			
(特になし)			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成12年度は、核拡散抵抗性の概念レビュー、関連ワークショップへの参加、その議論に基づく資料の分析、専門家へのインタビューを通じ、Eriko Kiriyma et al(2000) (P.3に記載の論文)における核拡散抵抗性のある革新型燃料サイクルに関する研究に基づき、核燃料サイクルの核拡散抵抗性の定量的評価基準として5つのクライテリアの設定を実施した。

## 【研究成果（当該年度）】

### 1. はじめに

過去から最近にいたるまでの核拡散抵抗性の概念をレビュー(The Spent Fuel Standard (1994) National Academy of Science, Department of Energy, etc)、関連ワークショップへの参加、その議論に基づく資料の分析、専門家へのインタビューおよび、Eriko Kiriyma et al(2000) (P.3に記載の論文)における核拡散抵抗性のある革新型燃料サイクルに関する研究に基づいて5つのクライテリアが核燃料サイクルの核拡散抵抗性の定量的評価基準として得られた。

### 2. 核拡散抵抗性の定量化

#### 核拡散抵抗性の基準

以下の5つのクライテリアを、核燃料サイクルの核拡散抵抗性の定量的評価基準とする。

WUMの組成比(Pu239の比率が少ない事)

SFにおけるPuインベントリーの絶対量の最小化

(燃料サイクルにおけるWUMの総体積および、質量)

サイクルの工程でWUMが分離されて存在する事を最低限にとどめる事(化学的組成)WUMの盗取を困難にするための放射線のバリアー

#### 保障措置性

この5つのクライテリアは、TOPS TASK FORCE OF THE NUCLEAR ENERGY RESEARCH ADVISORY COMMITTEE (NERAC) final Draft October 2000 の核物質バリアーに分類される核拡散抵抗性のクライテリアとほぼ一致した。WUM (Weapon Usable Material)とは、PuとU233、HEUのことを示す。

### (2)Analytic Hierarchy Process (AHP 法)によるエキスパートジャッジメント

1999年から2001年2月までの期間に、合計7回核拡散抵抗性について検討会議を行った専門家13名および、インタビューを繰り返し3回以上行ったエネルギー・原子力政策の研究者1名、保障措置の専門家1名合計15名の専門家を母集団として、図1の核拡散抵抗性評価階層図に基づき、核拡散抵抗性のエキスパートジャッジメントによる定量的評価を行った。比較的に専門家が評価しやすい、図1の①から⑦までの燃料サイクル(1GWe/year)を評価対象とした。

AHP法による分析では、各評価項目からみた各代替案の一対比較を行う形で重要度を算出し、それぞれの代替案について各評価基準の重要度とその評価基準からみた代替案の重要度の積を合計することによって総合的な評価得点を求める形となる。

結果として、核拡散抵抗性の評価基準のウェイトが得られた(図1)。核拡散抵抗性に関して7つの燃料サイクルの優位性が示された(図2)。

### 3. 結論

図1より、核拡散抵抗性のクライテリアで、AHP 法によるウェイト付けから技術目標として、保障措置性がほかの基準の2倍から3倍の値を示し、最も重要であるとの評価結果となった。保障措置性は、放射線バリアーなどその他のクライテリアにおける核拡散抵抗性の向上とトレード・オフの関係にあるため、この結果は非常に重要である。燃料サイクルの核拡散抵抗性は、ワанс・スルー低濃縮ウランを燃料とする LWR のワанс・スルーサイクルが、最も核拡散抵抗性が高く、次に天然ウランを燃料とする CANDU のワンスルーサイクルが、核拡散抵抗性が高いという評価結果が得られた。

図2より、評価値に大きく影響するポイントが、燃料サイクルに再処理施設が存在するかどうかであることがわかった。さらに、乾式再処理において Pu が Miner Actinides と混合されて分離される場合は、核物質としての兵器転用魅力度が下がると同時に処理が困難になるため、湿式よりも核拡散抵抗性が高いことがわかった。

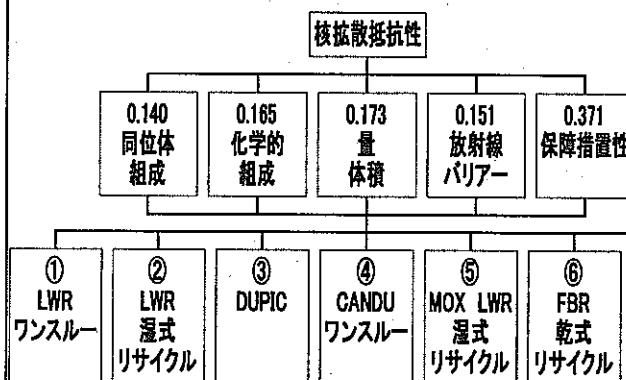


図1:核拡散抵抗性評価階層図

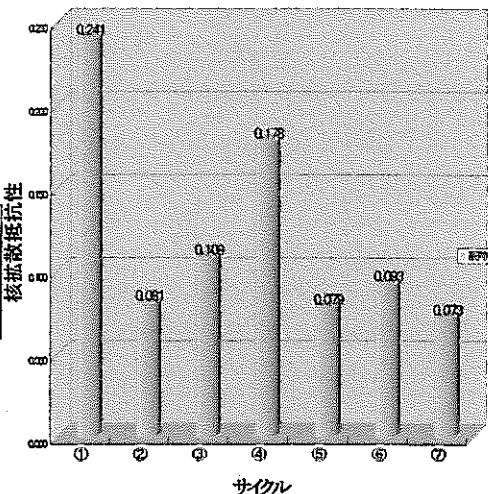


図2:燃料サイクルに対する評価の平均結果

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

単年度契約のため、平成12年度で終了。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

Eriko Kiriyama, Susan Pickett and Tatsujiro Suzuki  
 "Criteria for Proliferation Resistance of Nuclear Fuel Cycle Options"  
 International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management.  
 OSAKA, JAPAN, November 2000

Eriko Kiriyama, Susan Pickett and Tatsujiro Suzuki  
 "Criteria for Proliferation Resistance of Nuclear Fuel Cycle Options",  
 Frontiers Science Series (2000)  
 No.34, Vol. 1, pp. 501-507

## 大学等との共同研究に関する平成12年度研究概要報告書

研究テーマ	電子線照射による照射誘起偏析挙動の解析		
研究者所属、氏名			
大学側	北海道大学 エネルギ先端工学研究センター 教授 高橋 平七郎, 助手 木下 博嗣, 助手 柴山 環樹, 坂口 紀史		
機構側	大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 副主任研究員 赤坂 尚昭, 研究員 山県 一郎		
研究実施場所	北海道大学 エネルギ先端工学研究センター 機構 大洗工学研究センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室	当該年度 研究期間	平成12年9月～ 平成13年3月
通算研究期間 (予定)	平成11年10月～ 平成14年3月		
【研究目的】			
高速炉炉心材料用オーステナイト鋼のスエーリングが材料照射に比較し照射条件が変動する燃料集合体照射の場合に大きくなる現象の主要原因と推定している照射中の温度変動による照射誘起粒内偏析挙動の相違について、実験及び機構論の両面から検討し、照射誘起粒内偏析挙動を明らかにすることを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
本共同研究は、平成11年度から3年計画で実施するものである。オーステナイト系ステンレス鋼について、炉内中性子照射で生じるカスケード損傷を模擬した照射試験による実験的な検討を行うと共に、実験結果に基づく機構論的な検討を行う。また中性子照射下での組織変化挙動データに対する上記検討結果の妥当性を検討する。			
1)重イオン照射試験（北海道大学実施） 超高压電子顕微鏡に組み込んだ重イオン照射装置を用いて重イオン/電子線照射を行い、照射組織発達の連続観察を行う。また、元素分析装置を装備した高性能電子顕微鏡を用いて、照射後試料の詳細観察および極微小領域のEDS分析を行う。			
2)粒内偏析現象の機構論的検討（北海道大学、機構実施） 照射試験で得られた結果に基づきカスケード損傷が粒内照射誘起偏析、及び照射誘起析出に及ぼす影響に関して機構論的検討を行う。			
3)照射試験後試験結果に対する検証（機構実施） 機構が有している中性子照射による組織変化挙動のデータと比較・検討し、中性子照射下におけるオーステナイト系実用鋼の組織発達機構への適用妥当性を検討する。			
【使用主要施設】			
超高压電子顕微鏡、分析電顕、イオン加速器（北海道大学） 分析電顕（機構）			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成11年度は、Fe-15Cr-20Ni系オーステナイト系ステンレス鋼について、Feイオンと電子線により300°Cから400°Cの温度で照射し、形成される照射欠陥の高分解能電子顕微鏡観察、更にその照射領域の極微小領域をEDS分析した。Feイオン照射したFe-15Cr-20Ni合金には、300°C、400°C、及び450°Cいずれの温度でもカスケード損傷組織の形成が認められた。照射温度が高い場合その損傷組織の密度は減少し、高分解能電子顕微鏡観察の結果、一部が微小転位ループであることが同定された。このカスケード損傷領域をEDSにより組成分析を行った結果、有意性のある合金元素の偏析は確認できなかった。この様に明瞭な偏析が認められなかった理由として、照射量が十分でなかったこと、偏析があったとしてもEDS分析装置の検出限界等が考えられる。偏析を検出するためには分析領域の膜厚を薄くする必要があることが示唆された。

### 【研究成果（当該年度）】

平成12年度は、Fe-15Cr-20Ni合金について、Ti及びFeイオン/電子照射実験を450°Cで行い、電子線のみの照射、イオン照射のみの場合、及びイオン/電子線同時照射した場合の損傷組織、カスケード損傷組織形成、並びに偏析について検討した。

TiイオンおよびFeイオン単独照射、及びイオン/電子線同時照射実験を行った結果、450°Cでイオン照射のみの場合、膜厚の薄い領域で高密度の転位が導入され、局部的に組織が再結晶し、結晶が微細化した。この理由として、薄膜照射のため格子間原子が優先的に表面から消滅し、一方、拡散の遅い原子空孔濃度が増大し、その結果、この過剰の原子空孔による拡散促進により再結晶が低温度でも容易となったものと推定された。また、結晶粒界近傍を照射すると粒界の移動が誘起され、その移動領域を組成分析した結果、Niの濃化とCrの枯渇が明瞭に同定された。この照射下における偏析を伴う粒界移動現象を、合金元素のサイズ効果による偏析機構に基づく点欠陥と合金元素の相互作用からモデルを構築し理論計算した結果、実験で得られた偏析濃度分布と計算シミュレーションの結果とは良い一致を示した。この結果から、結晶粒界や試料表面などの点欠陥の消滅場所で偏析が誘起され、この偏析元素、ステンレスの場合にはNiの優先的な偏析（濃化）により、粒界面で偏析元素の再配列が生じ、これが結晶粒界の移動と関連していることが明らかにされた。この様に偏析が点欠陥の消滅場所に誘起されることを背景に、結晶粒内部に形成されるカスケード損傷も点欠陥の消滅場所となりうるとの想定から、カスケード損傷領域を同様に組成分析した結果、合金元素の明瞭な偏析は確認できなかった。

一方、重イオン/電子線による同時照射を行った場合も、カスケード損傷組織は形成された。またFeまたはTiイオン照射で形成されたカスケード損傷組織は、電子線で導入された点欠陥、特に原子空孔がカスケードの周辺の格子原子と再結合する事により、電子線のみの照射と比較して、生き残る点欠陥の濃度を減少させると考えられる。従って、偏析の原因となる点欠陥のカスケード損傷への流入が抑制されることになり、その結果、偏析も抑制される可能性が示唆される。

また、高速炉で476°C、 $3.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ まで照射したFe-15-Cr-20Ni系合金の照射後組織の観察及び解析の結果、結晶粒界において照射誘起粒界偏析として、Ni濃度の増大とCr濃度の減少が認められた。これは電子線照射による偏析現象と同様の傾向である。この様な類似した偏析挙動は粒内に形成したボイド周辺に於いても認められた。即ち、ボイドが点欠陥の消滅場所として作用し、この消滅過程で偏析が誘起されたと考えられる。また、粒内には炭化物 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ の析出が認められ、この析出物の周辺ではボイドは形成されておらず、これは析出物が点欠陥の消滅場所として作用していることを示している。さらに、この析出物の近傍をEDS分析した結果、析出物中のFe濃度は減少し、Cr濃度は54%、Ni濃度は25%、またSiは12%と高い濃度を示した。特に、Ni濃度の増大は析出物の欠陥消滅場所としての作用によって、Niの優先的な偏析が引き起こされたと考えられる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

今年度までに得られた成果をふまえ、次年度より先行基礎工学協力研究における共同研究にて、更に詳細な実験及び解析を進めていく。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

## 大学等との共同研究に関する平成12年度研究概要報告書

研究テーマ	超臨界流体による難分解性物質等の処理に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	東京工業大学 原子炉工学研究所 教授 藤井 靖彦, 助教授 池田 泰久		
機構側	人形峠環境技術センター 施設管理部 品質管理課 副主任研究員 山崎 齊 人形峠環境技術センター 施設管理部 転換施設処理課 研究員 大林 弘, 研究員 後藤 浩二, 係員 長安 孝明		
研究実施場所	東京工業大学 原子炉工学研究所		
通算研究期間 (予定)	平成12年10月～ 平成13年3月	当該年度 研究期間	平成12年10月～ 平成13年3月
【研究目的】			
<p>人形峠環境技術センターでは、管理区域で発生したテフロン(PTFE)、塩化ビニル(PVC)等の難分解性物質を放射性廃棄物としてドラム缶で保管しているが、今後、センターの縮小計画に伴い早急に処理方法を確立する必要がある。近年、ダイオキシン発生等の環境問題を機に焼却法に替る処理技術として注目されている超臨界流体は、これらの物質の処理について可能性があり、また二次廃棄物を減らせると考えられる。本研究では、超臨界流体を用いてこれら難分解性物質等の分解・無害化・抽出分離の適用性を確認することを目的とする。</p>			
【研究内容(概要)】			
<p>以下の超臨界流体を用いて分解・無害化・抽出等の適用性を確認した。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 超臨界水を用いた難分解性物質等の分解 テフロン(PTFE)、塩化ビニル(PVC)、ポリプロピレン(PP)、アクリル、FRP、PFA、CFRPについて、処理条件である温度・圧力・時間・酸化剤及び酸化剤の量等をパラメータとして、分解状況及び副生成物の組成の確認を行った。</li> <li>2. 超臨界二酸化炭素を用いたウランの抽出 フッ化ナトリウム(NaF)及びフッ化カルシウム(CaF2)に吸着しているウランを選択的に抽出するための、添加剤に係る研究をおこなった。</li> </ol>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

#### 1. 超臨界水を用いた難分解性物質等の分解

テフロン(PTFE), 塩化ビニル(PVC), ポリエチレン(PE), ポリプロピレン(PP), アクリル, FRP, PFA, CFRP の8種類の難分解性物質について分解条件の確認を行った。その結果、温度・酸化剤等の処理パラメータを変えることにより、それぞれの難分解性物質を分解できる条件を設定することができた。

#### 2. 超臨界二酸化炭素を用いたウランの抽出

超臨界二酸化炭素中でのウラン錯体生成状況の確認を行った。

使用した溶媒は、一般的に用いられるリン酸トリプチル(TBP)以外の溶媒で、TBPに比べ安定な錯体生成を確認した。

### 【研究成果（当該年度）】

温度・圧力・酸化剤をパラメータとした分解状況の確認結果及び考察を以下に記す。

#### 1. 試験結果

物質名	380°C		380°C		380°C		430°C		480°C		530°C		430°C		480°C		530°C	
	H <sub>2</sub> Oのみ	H <sub>2</sub> O+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	NaOH	H <sub>2</sub> Oのみ														
FRP	○	○	○															
PVC	○	○	-	○	○													
PE	○	○	-	○	◎													
PP	○	○	-	◎														
アクリル	◎	◎	-															
PTFE	×	×	-	×	○	◎												
PFA	○	○	-	◎														
CFRP	△	△	-	△	△	△	△	△	○	◎	◎							

◎ 目視にて原形をとどめない形状となった。

△ 一部分解が確認された。

○ 目視にて色、形状に変化が確認された。

× 目視にて色、形状に変化が確認されなかった。

#### 2. 考察

- FRPのプラスチック成分は、超臨界領域で簡単に分解に至り、残留するガラス繊維はアルカリ溶液中で分解した。
- 塩化ビニルは、表面で灰化が起こり固形化する傾向が確認された。
- ポリエチレンは、茶褐色に変色・固形化後し、最終的には有機物に分解された。
- ポリプロピレンは、茶褐色に変色後粉体化し浮遊するまで分解した。
- アクリルは、原形を留めることなく有機物に分解された。
- FRPのプラスチック成分は、超臨界領域で簡単に分解に至り、残留するガラス繊維はアルカリ溶液中で分解した。
- テフロンは最も分解しにくく、分解するには480度以上とする必要がある。
- PFAは、比較的簡単に炭化されるが、分解時に生成するHFにより液性は酸性を示した。
- CFRPは、容易に分解され炭素繊維のみとなる。温度と酸化剤により完全に水とCO<sub>2</sub>に分解できた。

#### 3. まとめ

PP, PE等の単純な構造の物質についても、分解に至るには一定の温度が必要であり、530°C以上の超臨界領域にすることですべての物質を分解できる。

超臨界水処理法は、難分解性物質の処理技術として適用可能であることが分かった。

#### 4. 超臨界二酸化炭素によるウラン抽出のための錯体生成確認

コーヒーからの脱カフェイン等で既に実用化されている超臨界二酸化炭素抽出は、分離後の処理を容易にし、効率良く分離するための配位子を選定する必要がある。

ウランを抽出する際に常温・大気圧環境下から超臨界領域において安定な錯体を生成するための基礎試験を行った。

##### 1) ペンタフルオロフェノール (PFP) による錯体生成

三酸化ウランに、PFP 20%を加え超臨界二酸化炭素でウラニル錯体の生成状況を確認した。黄色のウラニル錯体が沈殿し、上澄み液は透明であった。

なお、反応式は、次のとおりと予想される。



##### 2) NCP によるウラン錯体生成

硝酸ウラニル溶液をベースにNCPを加え超臨界二酸化炭素でウラニル錯体の生成状況を確認した。黄色のウラニル錯体が沈殿し、上澄み液は透明であった。

なお、反応式は、次のとおりと予想される。



#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

超臨界流体技術に関する研究は、先行基礎工学研究として平成13年より実施する予定である。

件名：超臨界流体によるウラン化合物の乾式回収技術に関する研究

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	極低酸素雰囲気での水と含鉄珪酸塩鉱物の反応に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	東京大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻 教授 村上 隆, 修士課程 2 年 伊藤 順一		
機構側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ GL 油井 三和, CL 亀井 玄人 処分材料研究グループ GL 河村 和広, CL 柏崎 博		
研究実施場所	東京大学 理学部 5 号館 機構 東海事業所 地層処分基盤研究施設	当該年度 研究期間	平成 12 年 9 月 ~ 平成 13 年 3 月
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 9 月 ~ 平成 13 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 12 年 9 月 ~ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
処分環境は極低酸素雰囲気あるいは還元雰囲気と考えられている。鉱物 水 大気相互作用は核種の移行の長期予測に重大な影響を及ぼすが、極低酸素雰囲気での反応過程、機構、速度に関する基礎データは十分ではない。酸素濃度 0.1 ppm 以下のグローブボックスを用いて、地表近傍の代表的鉄含有鉱物である Biotite の溶解実験を行い、極低酸素環境下での反応過程を明らかにすることを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
異なる酸素濃度条件下（酸素分圧、0.0005 気圧（極低酸素環境下）と 0.2 気圧（大気圧下））で Biotite の溶解実験（100 度、7-120 日）を行い、極低酸素環境下と大気圧下での反応過程を比較した。溶液組成は ICP-AES、固体試料は、XRD、ラマン分光法、XPS、走査電子顕微鏡で分析・観察した。			
Biotite から放出される Fe(2+) は、極低酸素環境下ではその一部は溶液中に溶け出しが、大気圧下では溶液中にはほぼ存在せず、酸化鉄鉱物をして沈殿した。大気圧下では、Vermiculite は形成しなかったが、極低酸素環境下では Vermiculite が形成していた。この Vermiculite はケイ酸塩の層間に Fe(2+) を含むものであることがわかった。これは極低酸素環境下では、層間に Fe(2+) を取り込むことで、Vermiculite が形成したためだと考えられる。鉄含有鉱物中の Fe(2+) は、大気圧下では、溶液中にほぼ放出されることなく、酸化鉄鉱物として沈殿するが、極低酸素環境下では、一部は Fe-vermiculite として、再固定されるものの、一部は溶液中に流れ出て行き、酸化鉄鉱物はほとんど形成しない。			
【使用主要施設】			
東京大学 理学部 5 号館 : ICP-AES、XRD、走査電子顕微鏡 地層処分基盤研究施設 : 極低酸素雰囲気グローブボックス、ラマン分光、XPS			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

異なる酸素濃度条件下で Biotite の溶解実験（100 度、7-120 日）を行った。溶液組成は ICP-AES、固体試料は、XRD、ラマン分光法、XPS、走査電子顕微鏡で分析・観察した。極低酸素環境下と大気圧下での反応過程の差異を比較・検討した。

### 【研究成果（当該年度）】

異なる酸素濃度条件下（酸素分圧、0.0005 気圧（極低酸素環境下）と 0.2 気圧（大気圧下））で Biotite の溶解実験（100 度、7-120 日）を行い、極低酸素環境下と大気圧下での反応過程を比較した。溶液組成は ICP-AES、固体試料は、XRD、ラマン分光法、XPS、走査電子顕微鏡で分析・観察した。極低酸素環境は、酸素濃度 0.1 ppm 以下に制御できるグローブボックスを用い実現した。なお、実験中の酸素濃度はモニターして、極低酸素濃度を確認した。

Biotite から放出される Fe(2+) は、極低酸素環境下ではその一部は溶液中に溶け出しが、大気圧下では溶液中にはほぼ存在せず、酸化鉄鉱物をして沈殿した。これは極低酸素環境下では、Fe(2+) は溶液中でも 2 価で存在するが、酸素が多い環境下では Fe(2+) は容易に酸化し、Fe(3+) となり酸化鉄鉱物を形成するためである。今回用いた Biotite は Fe-rich な試料で、予備実験から Mg-rich な Biotite では容易に形成する Vermiculite が形成しにくいことがわかつていった。今回も大気圧下の実験では、XRD の結果、Vermiculite は形成していないことがわかつた。一方、極低酸素環境下では Vermiculite が形成していた。この Vermiculite をラマン分光法で、Mg-vermiculite、Primary biotite と比較した結果、この Vermiculite はケイ酸塩の層間に Fe(2+) を含むものであることがわかつた。これは、大気圧下では、Biotite (Mg-rich な場合) から放出された Mg を層間に取り込むことで、Vermiculite を形成するのに対し、極低酸素環境下では、Mg が不足しても、層間に Fe(2+) を取り込むことで、Vermiculite が形成したためだと考えられる。まとめると、大気圧下では、鉄含有鉱物中の Fe(2+) は、溶液中にはほぼ放出されることなく、酸化鉄鉱物として沈殿する、この酸化鉄鉱物は吸着能が高く、様々な陽イオン、陰イオンを吸着することができる。一方、極低酸素環境下では、鉄含有鉱物中の Fe(2+) は、一部は Fe-vermiculite として、再固定されるものの、一部は溶液中に流れ出て行き、酸化鉄鉱物はほとんど形成しない。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

当初の計画通り、平成 12 年度で終了する。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

伊藤順一・香西直文・大貫敏彦・村上隆：低酸素濃度下での黒雲母溶解における Fe の挙動、地球惑星科学関連学会、東京（2000）。

伊藤順一・香西直文・大貫敏彦・村上隆：Biotite weathering under an anoxic condition、2000 Annual Meeting of the Geological Society of America, Reno, Nevada (2000) .

伊藤順一・香西直文・大貫敏彦・村上隆：Precambrian の風化における鉄の挙動、日本鉱物学会、徳島（2000）。

伊藤順一：The mobility of iron in the Precambrian、東京大学 修士論文

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	配管の変位、変形、振動モニタリングシステム		
研究者所属、氏名			
大 学 側	福井大学 教育地域科学部 生活科学科 教授 上田 正紘 福井大学 工学研究科 博士後期課程 2 年 石川 和彦		
機 構 側	敦賀本部 国際技術センター プラント制御工学グループ GL 玉山 清志		
研究実施場所	福井大学 教育地域科学部 高周波実験室、超音波実験室		
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 12 月 ~ 平成 13 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 12 年 12 月 ~ 平成 13 年 3 月
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>本研究は CCD カメラによる配管上の再帰反射体の結像光学系とその画像処理システムを開発し、遠隔から配管の変位・変形・振動状態をリアルタイムでモニタリングすることによって、変位や異常振動を早期に検知し、配管事故を未然に防ぎ、プラントの安全性向上を目的とするものである。</p> <p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>本測定法の特長は測定対象配管の全画像情報を記録、処理するのではなく、配管上の代表的な位置に取り付けた再帰反射体からの情報のみを用い、記録、処理すべき情報量を極度に減らすことによって配管全体の変位、変形、振動をリアルタイムにモニタリングすることである。</p> <p>別添資料の図 1 に光学系の概説図を示す。配管の代表的な部位(<math>r_i</math>, <math>i=1 \sim n</math>)に再帰反射体を取り付け、それらを適当に離れた位置(数m程度)から投光器で照射し、その反射体からの反射光を CCD カメラ上に結像する。カメラの焦点距離を <math>f</math>、反射体からカメラまでの距離を <math>L</math> とすれば、結像公式より</p> $\frac{1}{L} + \frac{1}{L'} = \frac{1}{f} \quad (1)$ <p>となる。</p> <p>実際には <math>L' \ll L</math> であるから <math>f \approx L'</math>、すなわち結像距離は焦点距離となる。さて、各々の再帰反射体は配管各部に固定されているから、変形・振動等により位置の変位 <math>D_i</math> があれば直ちに結像位置の変位 <math>d_i</math> として CCD センサー上に検出される。結像面上での変位 <math>d_i</math> は倍率の公式より</p> $d_i = (L'/L)D_i \quad (2)$ <p>と表される。例えば <math>L=5m</math>、<math>f=0.05m</math> とすれば、配管上の 1mm の変位は CCD センサー上で <math>10\mu m</math> の変位となる。通常 CCD センサー(エリアセンサー)の 1 画素は各辺が <math>5 \sim 10\mu m</math> 程度の大きさなので、<math>10\mu m</math> の変位は検出可能である。また、逆に変位が極端に大きくなつた場合でも、再帰反射体を用いているため反射光は必ず CCD カメラの方向へ帰つてくるためピンポイントの結像が可能である。</p> <p>別添資料の図 2 にシステムブロック図を示す。配管上に取り付けた再帰反射体からの光を、CCD カメラ(CCD エリアセンサー)で撮像し、画像キャプチャーユニットによって PC(コンピュータ)上のメモリに取り込む。それらの画像情報を PC 上のソフトウェアで処理し、得られたセンサー上の画素位置情報により配管の振動・変位の検出を行う。</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

本年度は、実験システムを設計・試作し、動作確認実験・評価実験を行った。

## 【研究成果（当該年度）】

本研究では、計測システム構築の基礎と、測定原理を現場に適用した際の問題点を把握するため実験システムを設計、試作した。この実験システムを利用し、研究室内での動作確認実験、評価実験を行った。

### (1) 実験システム構築

本研究には、CCD カメラやコンピュータ等のハードウェアと画像処理を行うソフトウェアの両システムが必要であり、かつ短期間の研究開発が要求されたので、下記(a)～(f)の構成とし、実験システムの構築を行った。別添資料の図 3 に実験システム写真を示す。

- (a) CCD カメラは入手性とシステムの簡易性を考慮し VGA(W640×H480) サイズ使用
- (b) 画像キャプチャボードは PCI ベースの高速型使用
- (c) 画像処理のホスト PC は Windows ベースの PC/AT 互換機使用
- (d) 画像処理はソフトウェアライブラリ使用
- (e) ソフトウェア開発は Windows 上の C 言語(Visual-C) 使用
- (f) 再帰反射体は PVC 材質のマイクロプリズム型利用

### (2) 実験用計測プログラム

本研究では実験システムの有効性を確認するため、画像処理ソフトウェアライブラリを用い、C 言語にて実験用計測プログラムを作成した。

### (3) 評価実験

理論検討通りにシステムが動作することを確認するため、実験光学系を組み立て、評価実験を行った。実験光学系の配置図を別添資料の図 4 に示す。この光学系において、下記(a)の条件において、(b)の方法にて実験を行った。

#### (a) 配置条件等と実験機材仕様

- ・ CCD1 画素 :  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$
- ・ CCD サイズ :  $4.88\text{mm} \times 3.66\text{mm}$  (W×H)
- ・ CCD 画素数 : 35 万画素 (W640 画素 × H480 画素)
- ・ レンズ焦点距離 :  $f = 50.0\text{mm}$
- ・ レンズ～反射体距離 :  $L = 1430\text{mm}$
- ・ 反射体はマイクロステージ( $10 \mu\text{m}$  分解能)で上下左右に移動 (D)

#### (b) 実験方法

- ・ レンズを取り付けた CCD カメラをマーカーとなる再帰反射体から適当な距離に配置し固定。
- ・ 反射体を規定量移動させる。
- ・ CCD 上の画素移動量を測定する。

### (4) 結果検討

評価実験の結果、別添資料の表 1 の結果が得られた。

表 1 の結果より、実験光学系における CCD 側を基準とした倍率は、再帰反射体とその像の移動量の比、すなわち  $D/d$  で求めることができる。

$$D/d = 10.0 / 0.363 = 27.5 \quad (3)$$

となる。また光学系の配置から決まる倍率の理論値は  $L/L'$  で求められ、また式(1)より、 $L' = 51.8\text{mm}$  であるので、

$$L/L' = 1430 / 51.8 = 27.6 \quad (4)$$

となる。式(3)、式(4)の値はよく一致している。これらのこととは再帰反射体の動きが、光学系の配置寸法にしたがって CCD 上に投影され、またその移動量を本実験システムが正しく読み取っていることを意味しており、本測定手法がプラント配管の変位を十分検出し得ることを示している。

#### (5) まとめ

本研究では、再帰反射体を用いて、プラント等における配管の振動や変位をリアルタイムで遠隔モニタリングする技術の基礎研究開発を行い、実験測定システムを構築することによって以下の結果を得た。

- (1) 再帰反射体を用いることによって、簡単な画像処理により配管位置の検出が可能である。
- (2) 実験システムにおいて物体距離 1.4m で、測定分解能は約 0.2mm であった。また、カメラの選択（とくに望遠レンズの利用）やシステムの構成の変更することによって、この分解能を数十 $\mu$ mオーダー程度まで向上することが可能である。
- (3) 既存の CCD カメラや PC、ソフトウェアの組み合わせで安価に広範囲をモニタリングするシステム構築が可能である。
- (4) 本計測技術は、配管の振動・変位に対する非接触および遠隔測定手段として有効である。

したがって、本計測手法を用いれば、安価に多数の配管の遠隔リアルタイムモニタリングが可能となり、原子力発電の安全性の向上とコスト低減に大いに寄与できると思われる。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

単年度研究のため、平成 12 年度で終了する。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

英国 OLE (Optics and Lasers in Engineering)へ学術論文として投稿予定

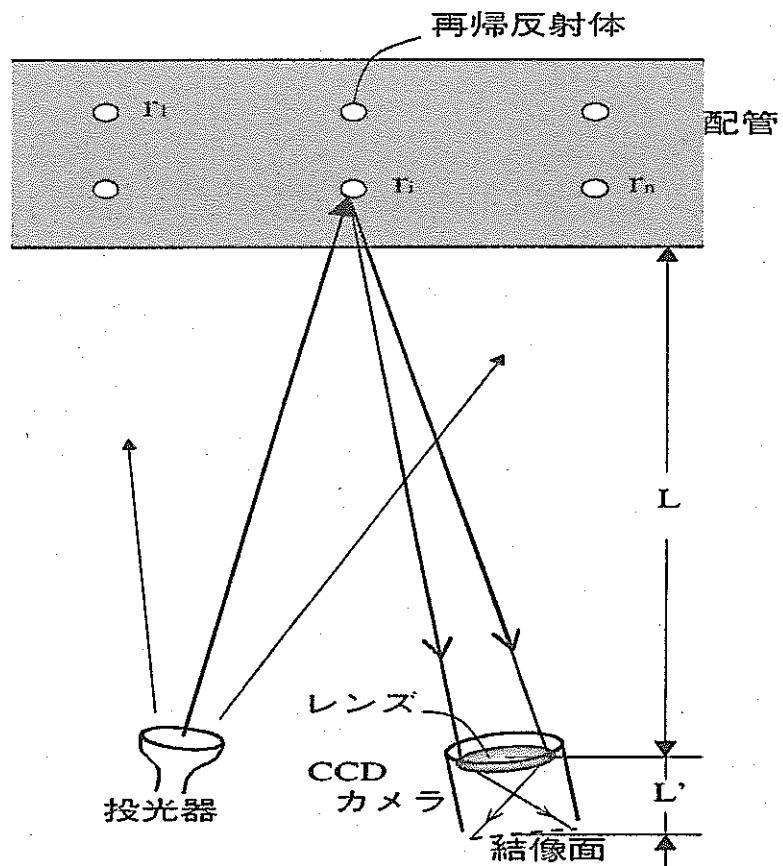


図 1 光学系概説

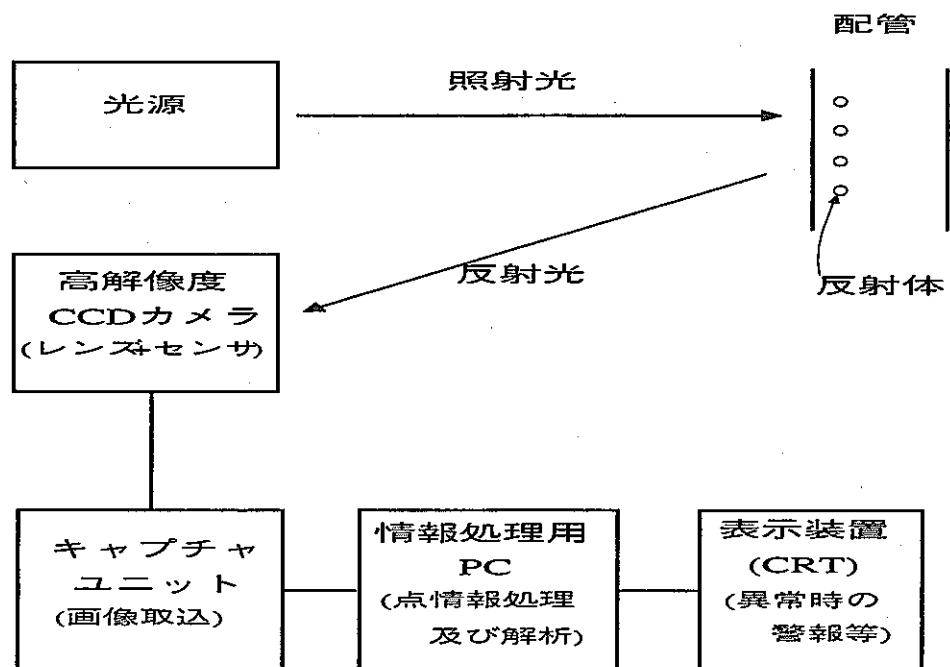


図 2 システムブロックダイヤグラム

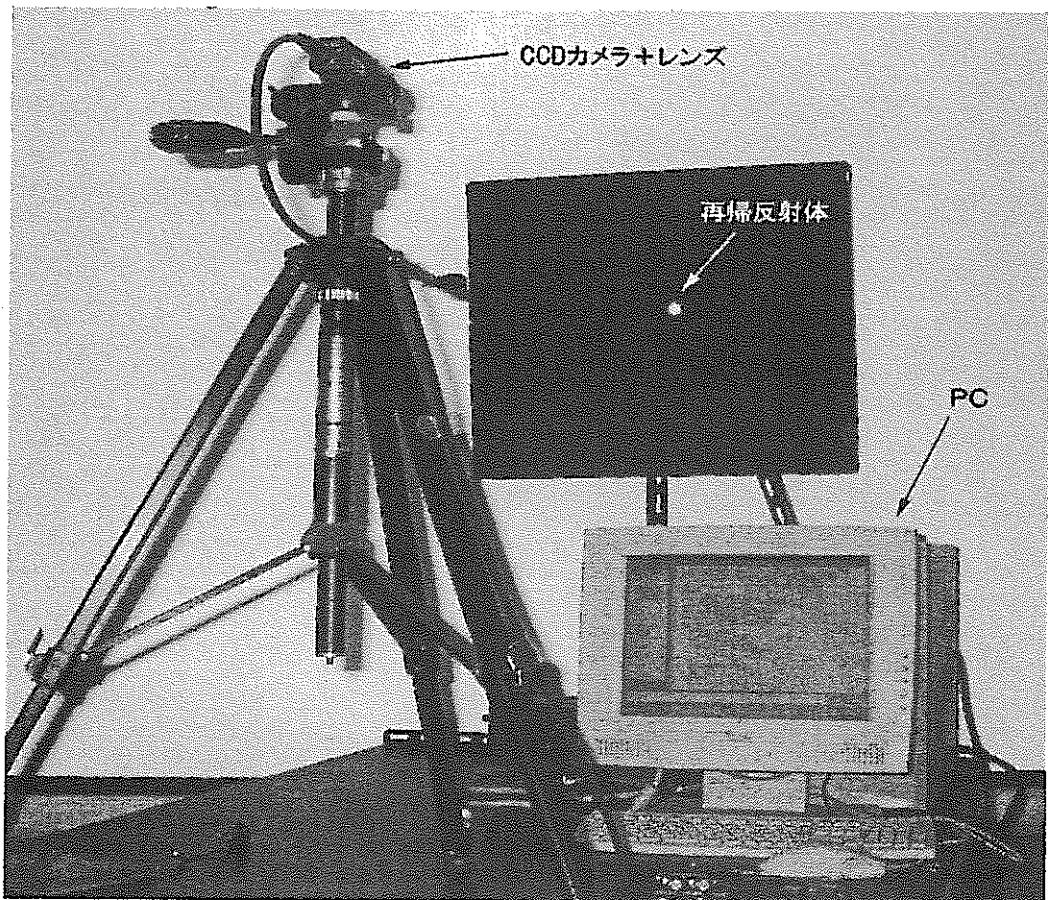


図3 実験システム写真

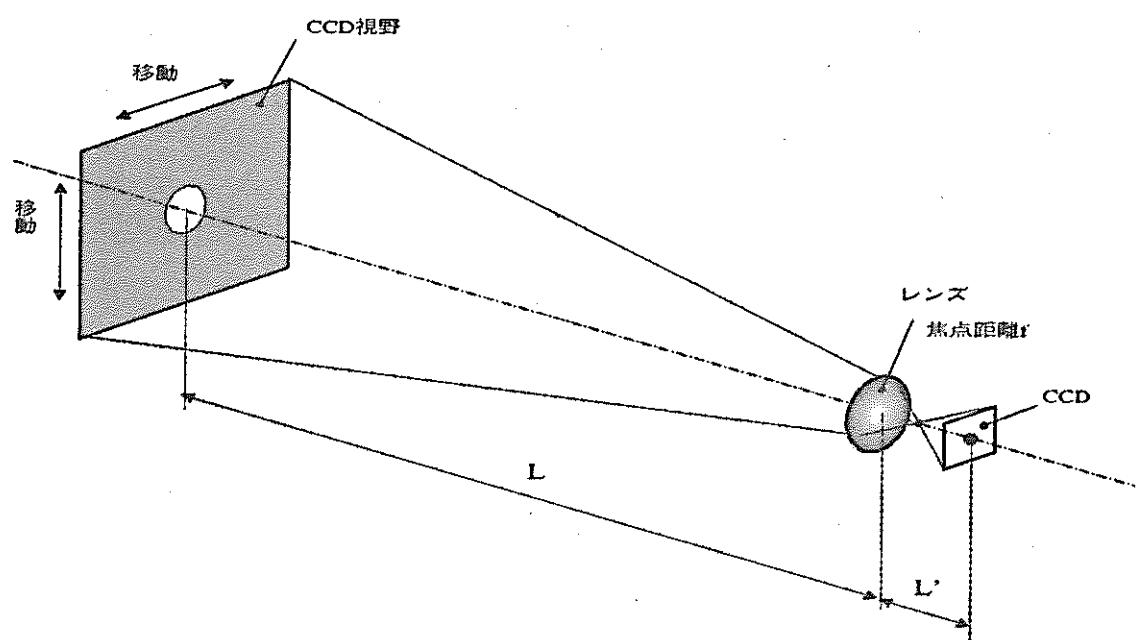


図4 実験光学系配置

表 1

再帰反射体の移動量(D)	CCD 画素移動量( d )
10.0mm	49.0 画素 (=363 $\mu$ m)

## 大学等との共同研究に関する平成12年度研究概要報告書

研究テーマ	蒸発器ヘリカルコイル内気液二相流の多次元解析		
研究者所属、氏名			
大学側	福井大学 工学部 機械工学科 助教授 村井 祐一, 教授 山本 富士夫, 博士研究員 石川 正明, 大学院博士前期課程学生 漁野 嘉昭		
機構側	敦賀本部 國際技術センター 研究員 戸田信一, 次長 遠藤 昭		
研究実施場所	福井大学 工学部 機械工学科 環境エネルギー学実験室	等 該 年 度	平成12年10月～
通算研究期間 (予定)	平成12年11月～ 平成15年3月	研究期間	平成13年3月
<b>【研究目的】</b> 高速増殖原型炉「もんじゅ」では、蒸発器と加熱器においてヘリカルコイル形伝熱管が利用される。ヘリカルコイル形伝熱管は、U形伝熱管に比べ構造的にコンパクトで、かつ、流動の急曲折部をもたないため流力振動の発生要因が少ないという利点を持つ。一方、ヘリカルコイル形では、その経路によって内部二相流に対する定常的な遠心力の大きさに分布がある。また、複数の伝熱ループが曲率半径と距離の異なる経路を通り、それらが同じ圧力差で駆動される点で、並列流路管での動特性に位相差を生じる。これらの現象については、伝熱および圧力損失の多次元的特性を考慮した詳細な解析を進め、より高い性能安定性を保証するよう検討しなければならない。本研究では、ヘリカルコイル内二相流の可視化・画像解析システムを構築し、これらの問題を解決することを目的とする。			
<b>【研究内容（概要）】</b> 平成12年10月から平成15年3月までを本課題の研究期間とし、平成12年度は可視化モデル製作と実験データの取得、計測手法の検討および数値解析の予備的研究をすすめた。平成13年度は、さらに実験データの分析および数値解析をすすめる。また、平成14年度に、蒸発を含む流動試験を追加する。 <b>平成12年度</b> ①ヘリカルコイル可視化モデルの製作と流動可視化実験 ②3次元カラーグラデーション PTV（粒子追跡型画像処理流速計）の開発 ③ステレオ画像処理による流路内3次元ボイド率分布の計測手法の開発 <b>平成13年度</b> ①ヘリカルコイル内部ボイド率分布構造の3次元画像計測 ②回転半径の異なる複数のヘリカル流路における流動安定性の試験（当初予定より前倒し） ③遠心力作用環境における気泡流動構造の3次元高精細数値シミュレーション <b>平成14年度</b> ①蒸発過程を含むヘリカルコイル内二相流の可視化モデルの製作（当初予定に対して追加） ②蒸発を含むヘリカルコイル内二相流の3次元高精細数値シミュレーション <b>使用主要施設】</b> 透明アクリルヘリカルコイル内部二相流可視化モデル（自作）（福井大学） 気液二相流可視化画像解析システム一式（福井大学）			

### 【進捗状況（等該年度までの概要）】

平成12年度は、透明アクリル材によるヘリカルコイル流路を製作し、水-空気系における気液二相流の流动可視化実験を実施した。また、平成13年に、本装置によって画像計測を行うために、準備研究として、3次元カラーグラデーション PTV（粒子追跡型画像処理流速計）の開発、ならびに、ステレオ画像処理による流路内3次元ボイド率分布の計測手法の開発を行った。

### 【研究成果（当該年度）】

平成12年度は、以下の3つの項目について研究を実施した。①は主要な研究、②および③は、平成13年度に実施する画像計測のための予備開発研究である。

- ①ヘリカルコイル可視化モデルの製作と流动可視化実験
- ②3次元カラーグラデーション PTV（粒子追跡型画像処理流速計）の開発
- ③ステレオ画像処理による流路内3次元ボイド率分布の計測手法の開発

#### 具体的方法および成果

##### ① ヘリカルコイル可視化モデルの製作と流动可視化実験

透明アクリル樹脂を利用してヘリカルコイルパイプを製作し、室温・大気圧環境で水と空気による二相流を通す可視化実験を実施した。ヘリカルコイルパイプの内径は20mm、外径は26mmで、1巻の1/4要素(90度)の長さのものを連結して組み立てた。曲率半径は270mm、水平線に対するヘリカルコイルの勾配は0.059である。透明アクリル樹脂を曲げ加工するに当たっては、砂を内部に充填させ、加熱塑性加工を施す方法を採用した。これによるアクリル内壁の傷や白濁化は、水を注入した時点で十分に軽減され、可視化に重大な影響を及ぼさないことが確認された。1/4要素のヘリカルコイルパイプの連結には、真鍮によるコネクターを自作しシリコンゴムにより密封したが、50箇所以上の連結部のうち複数箇所で漏れが残り、改善の余地がある。本実験条件は以下のとおりである（表1）。液体流量 $Q_l$ は1.0～2.0m<sup>3</sup>/h、気体流量 $Q_g$ は1.0～2.0m<sup>3</sup>/h、温度5～15°C、圧力100.0～102.0kPa（静水圧及び圧力損失により最大で50kPa程度の圧力の増加があると推定される）、ボイド率 $\alpha$ は0.33～0.67、液体の管内平均流速 $u_l$ は0.88～1.77m/s、気体の管内平均流速 $u_g$ は0.88～1.77m/s、ゲーリー数（Garry Number: 重力加速度に対する遠心加速度の比）は0.29～1.18である。

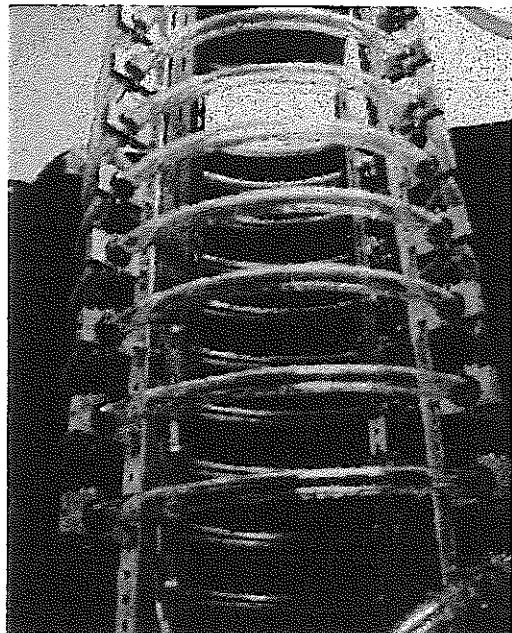


図1. 可視化実験装置本体

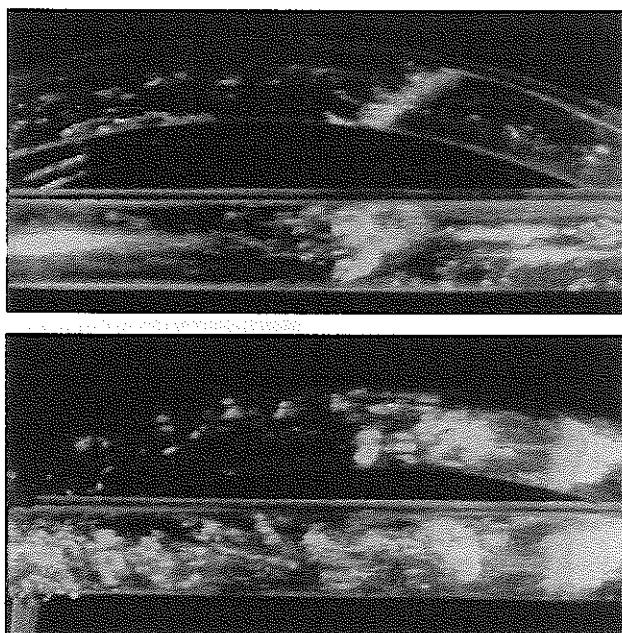


図2. 可視化写真の例（白は気液界面）

撮影にハイスピードカメラを用いシャッタースピードは 1/500(s), フレーム速度は 500(FPS)である。ヘリカルコイルパイプの巻数が増大するほど、気泡発生装置直後に形成された気泡流は、徐々にプラグ流と化し、通常の鉛直管内二相流と同じ傾向をもった。液体流量を増加させると、遠心加速度の寄与が増大するため、気泡がヘリカルコイル内側に偏った。プラグ流の場合にも気液界面が管垂直断面に対して平行ではなくなり、遠心加速度の影響が観測された。このほか詳細には、遠心加速度による次のような現象の混在が推定される。(1)気泡サイズの断面内での偏り、(2)気泡の合体プロセスに対する遠心力の影響が気泡流からスラグ流・プラグ流への遷移を遅延させる、(3)液体プラグ内の二次流れによる気泡の捕獲現象。

これらは系全体の圧力損失、熱伝達率の変動に深く関わっており、今後、トレーサ粒子注入などの可視化、照明、撮影方法をさらに検討し明らかにする予定である。

表1. 実験条件

$Q_l(\text{m}^3/\text{h})$	$Q_g(\text{m}^3/\text{h})$	$\alpha(-)$	$u_l(\text{m}/\text{s})$	$u_g(\text{m}/\text{s})$	Ga 数(-)	液相 Re 数(-)	気相 Re 数(-)
1.0	1.0	0.50	0.88	0.88	0.29	$1.77 \cdot 10^4$	$1.17 \cdot 10^3$
1.0	1.5	0.60	0.88	1.33	0.29	1.77	1.76
1.0	2.0	0.67	0.88	1.77	0.29	1.77	2.34
1.5	1.0	0.40	1.33	0.88	0.67	$2.65 \cdot 10^4$	$1.17 \cdot 10^3$
1.5	1.5	0.50	1.33	1.33	0.67	2.65	1.76
1.5	2.0	0.57	1.33	1.77	0.67	2.65	2.34
2.0	1.0	0.33	1.77	0.88	1.18	$3.54 \cdot 10^4$	$1.17 \cdot 10^3$
2.0	1.5	0.43	1.77	1.33	1.18	3.54	1.76
2.0	2.0	0.50	1.77	1.77	1.18	3.54	2.34

## ② 3 次元カラーグラデーション PTV (粒子追跡型画像処理流速計) の開発

ヘリカルコイルパイプは構造上、複数のカメラの設置による 3 次元 PTV(Particle Tracking Velocimetry)システムの適用が難しい。そこで液晶プロジェクタを光源とした 1 台のカメラによる 3 次元 PTV システムを開発した。原理は、計測空間において照明光の色相角が線形的に単調増加するよう制御し、粒子散乱光の色相角をカラー画像処理によって計測して粒子の 3 次元座標を決定するものである。図 3 は、直方体容器内部の流入・流出流れに対する試験的な応用結果である。現状では、1 枚の静止画像から 50 個程度の 3 次元速度ベクトルが取得され、これは 2 台のカメラを利用する場合と同程度であった。このような技術は従来になく、密閉空間での 3 次元流動を平易に計測することができるという点で実用性が高い。なお、撮像面内の流速成分に比べ、視線方向の流速成分の計測精度が 1/10 程度しかない。この改善のためには、カラー画像解析アルゴリズムの改良のほか、液晶光源の特性や粒子光散乱特性を考慮した最適化が必要である。

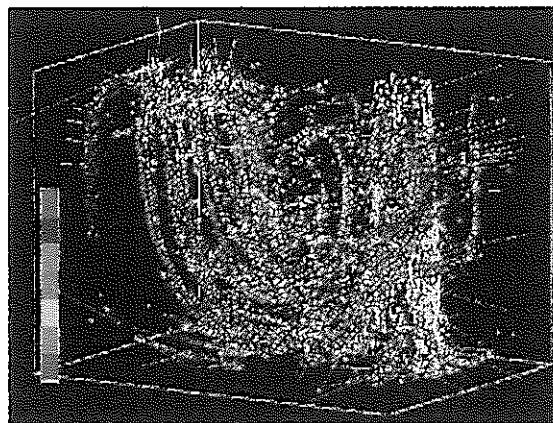


図 3. 3 次元 PTV の試験応用例

### ③ ステレオ画像処理による流路内3次元ボイド率分布の計測手法の開発

ヘリカルコイルパイプの可視化画像から、ボイド率分布を3次元的に計測するための画像処理手法を開発した。ただし、複雑な散乱光を放つ気液界面ではなく、固体粒子を利用してそのアルゴリズム性能を試験した。基本原理は、直交するバックライト可視化画像を二値化し、ステレオマッチングに球の重なり確率を考慮した論理積を採用することにある。CT(Computer Tomography)との差異は、界面の可視化に基づいているため、気泡や粒子などの分散体の3次元構造の検知に優れていることである。図4は、その処理例である。粒子どうしが重なって映るような高濃度混相流を局所体積率にして5%以下の精度で3次元的に復元できることが確認された。気泡の場合でも、バックライト法の適用により界面が明確となるため、本手法が十分に機能すると期待される。

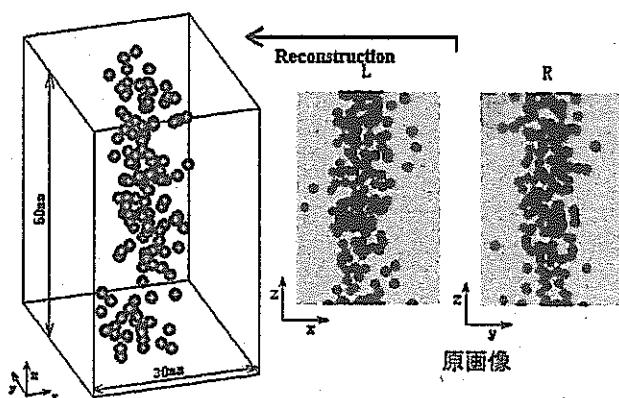


図4. ステレオ画像処理による3次元復元例

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成13年度は、①ヘリカルコイル内部ボイド率分布構造の3次元画像計測、②回転半径の異なる複数のヘリカル流路における流動安定性の試験、③遠心力作用環境における気泡流動構造の3次元高精細数値シミュレーションを行う予定である。

平成14年度は、①蒸発過程を含むヘリカルコイル内二相流の可視化モデルの製作、②蒸発を含むヘリカルコイル内二相流の3次元高精細数値シミュレーション、を行う予定である。なお、必要に応じて気泡発生装置の改善、液相流動の可視化などを実施する。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) Y.Murai, Y.Matsumoto, F.Yamamoto, Three-Dimensional Measurement of Void Fraction in a Bubble Plume using Statistic Stereoscopic Image Processing, Experiments in Fluids, Vol.30, No.1, pp.11-21 (2001.1)

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	高出力ミリ波セラミック焼結法による制御棒材の改良と長寿命化		
研究者所属、氏名			
大学側	福井大学 遠赤外領域開発研究センター 教授 出原 敏孝, 助教授 光藤 誠太郎, 大学院生 星月 久昇 福井大学 工学部 助教授 小川 勇		
機構側	敦賀本部 国際技術開発センター 技術主席 柴原 格 敦賀本部 国際技術開発センター 炉心技術開発グループ GL 西 裕士, 研究員 北野 彰洋		
研究実施場所	福井大学 遠赤外領域開発研究センター ジャイロトロン開発実験室 機構 敦賀本部 国際技術センター		
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 11 月 ~ 平成 15 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 12 年 11 月 ~ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
<p>制御棒材を形成する <math>B_4C</math> ペレットは、高温、中性子照射等過酷な条件下におかれため、損傷、変形が生じ、これが制御棒の寿命を短くしている。制御棒の長寿命化のために、現在、シュラウド管による固定の方法により成果をあげている。しかし、別の観点から、<math>B_4C</math> ペレット自体の改良による長寿命化の方策をさぐることも重要であり、本研究では、新たな高出力ミリ波セラミック焼結法の技術を応用して、<math>B_4C</math> ペレットの高密度化・高強度化を達成することにより、制御棒の長寿命化を図る。</p>			
【研究内容（概要）】			
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 「もんじゅ」の制御棒に用いられている現状の <math>B_4C</math> ペレットに高出力ミリ波照射を行い、ペレット表面の改質を促して高強度化することにより、ペレットの高温、中性子照射による損傷、変形を抑制する。</li> <li>2) <math>B_4C</math> 粉末を高出力ミリ波によって焼結することにより、高密度・高強度・緻密構造をもつ <math>B_4C</math> ペレットを焼結する。焼結の諸条件(ミリ波パワー、焼結速度、加圧条件、等)の最適化を図り、制御棒の長寿命化に資する。</li> </ol>			
【使用主要施設】			
ジャイロトロンセラミック焼結装置 (ロシア科学アカデミー応用物理学研究所) 仕様：ジャイロトロン周波数 30 GHz, 最高出力 5.7 kW			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 12 年度は、以下の研究及び実験準備を実施した。

- 1) シュツットガルト大学(ドイツ)及びロシア科学アカデミー・応用物理学研究所へ研究者を派遣し、現状の  $B_4C$  ペレットに高出力ミリ波ジャイロトロンの出力を照射して表面の改質試験を行った。
- 2) ミリ波による表面改質を完了したペレットの顕微鏡によるグレイン形状測定、による評価を行った。
- 3) 福井大学に最新の高出力ミリ波ジャイロトロンを導入すべく準備を完了した。

### 【研究成果（当該年度）】

本研究では、まず電気炉で焼結した現有の  $B_4C$  ペレットに、ジャイロトロンセラミック焼結装置を用いてミリ波照射を行い、ペレット表面の改質を試みた。使用した焼結装置は、ロシア科学アカデミー応用物理学研究所(IAP-RAS)の装置で、動作パラメータは、ジャイロトロン周波数 30 GHz、最高出力 5.7 kW、最高到達温度  $1400^{\circ}\text{C}$  である。図 1 に、ミリ波照射時のジャイロトロン出力(power)、サンプル温度の初期設定( $T_{\text{preset}}$ )、実際のサンプル温度( $T_{\text{sample}}$ )及び断熱材の温度( $T_{\text{thermoinsulation}}$ )の時間変化を示す。時間に比例してサンプル温度を  $2200^{\circ}\text{C}$  まで上昇させるように、初期設定を行った。実際には、約  $1400^{\circ}\text{C}$  まで、ほぼ時間に比例してサンプル温度の上昇が観測されている。その間、ジャイロトロン出力は、自動的にコントロールされ、最高 5.7 kW を記録している。この時点まで、約 110 分の短時間での温度上昇が達成されている。初期設定のとおりに、このままの割合で温度上昇を続けるためには、ジャイロトロン出力を高めなければならないが、使用しているジャイロトロンの能力を超えるため、インターロックが働いて、装置の動作が停止した。そのため、初期設定の  $2200^{\circ}\text{C}$  までの上昇には、至らなかった。ジャイロトロンの能力の範囲内で初期の温度上昇を達成するためには、温度上昇率を下げる必要がある。

電子顕微鏡による観測の結果、ペレット表面のスムース化が認められた。図 2、3 はミリ波照射を行ったサンプル(サンプル N0. 2)と照射を行う前のサンプル(サンプル N0. 3)の表面の電子顕微鏡写真である。照射を行う前のサンプル表面に観られる縦横に走る凹凸が、照射後は消えて表面がスムースになっているのがわかる。また、粒界が一様化されているように見える。今後、照射条件を変えて、様々な条件下で照射を行うこと、到達温度を  $2200^{\circ}\text{C}$  から  $2300^{\circ}\text{C}$ (電気炉による  $B_4C$  の焼結温度)にまで高めることにより、 $B_4C$  ペレット表面の改質を行う計画としている。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 13 年度には、

- 1) 福井大学遠赤外領域開発研究センターで新たに導入した最新のジャイロトロン・セラミック焼結装置(ミリ波ジャイロトロン出力周波数 30 GHz、最高出力 3 kW)を用いて現有の  $B_4C$  ペレットの表面改質を、様々な焼結条件のもとで行う。
- 2) 再焼結したペレットの密度測定、強度測定、顕微鏡によるグレイン形状測定、等による評価を行う。

平成 14 年度には、

- 1) 高出力ミリ波照射による  $B_4C$  粉末からのペレット焼結を行う。
- 2) 焼結したペレットの評価を行い、中性子照射の模擬試験計画につき検討する。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) Int. Conf. on Infrared and Millimeter Wave にて、論文発表の予定。

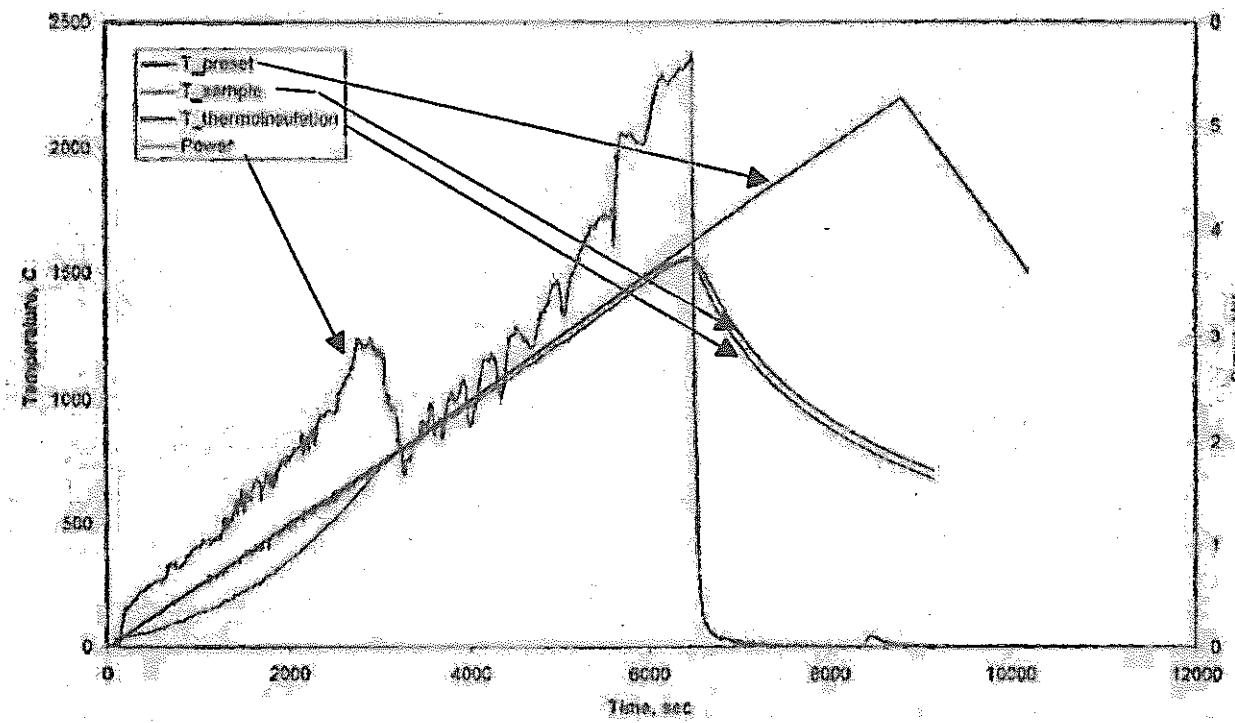


図1 ミリ波照射時のジャイロトロン出力と温度上昇

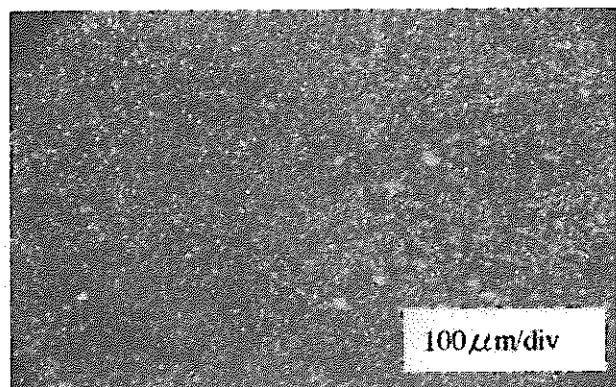


図2 電子顕微鏡写真（サンプルNO.2：照射後）

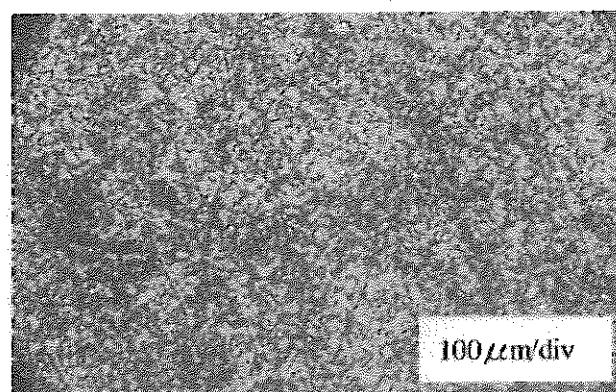


図3 電子顕微鏡写真（サンプルNO.3：照射前）

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	FBR プラントにおけるき裂進展評価手法の高度化に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	福井大学 工学部 機械工学科 助教授 飯井 俊行		
機構側	敦賀本部 国際技術センター プラント機器技術開発Gr GL 渡士 克己, 土井 基尾, 橋本 貴司		
研究実施場所	福井大学 工学部 機械工学科 材料工学実験室 機構 敦賀本部 国際技術センター 研究棟		
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 11 月 ~ 平成 13 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 12 年 11 月 ~ 平成 13 年 3 月
【研究目的】			
FBR プラント維持基準のための基盤技術整備として各種三次元き裂の健全性評価方法の調査研究及び熱応力下疲労き裂進展挙動の評価を実施し、き裂進展評価手法の高度化を進めること。			
【研究内容（概要）】			
今日、原子力機器は、き裂の発生を防止することを目的とした技術基準により、設計・維持されている。しかしながら、現実には機器設計荷重と実働荷重、特に熱応力の違いによりき裂が発生し破損にいたったケースが何處となく存在する。また、最近の動向として、軽水炉において負荷形態として考慮されていないクリープ疲労を加味したき裂進展挙動の基礎データが不可欠である。以上の背景から、本共同研究では、FBR プラント維持基準のための基盤技術整備として各種三次元き裂の健全性評価方法の調査研究及び熱応力下疲労き裂進展挙動の評価を実施し、き裂進展評価手法の高度化を進める。			
【使用主要施設】			
福井大学 疲労き裂進展試験システム			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

FBR プラント維持基準立案の一環として、き裂進展評価技術の抽出・情報収集及び大容量高疲労き裂進展試験システムの開発・データ取得を行った。

### 【研究成果（当該年度）】

FBR プラント維持基準立案の一環として、(a) JSME 規格を FBR プラントに適用した場合に今後必要となるき裂進展評価技術の抽出・情報収集 (b) 熱応力下疲労き裂進展挙動の把握に資するべく大容量高速疲労き裂進展試験システムを開発、その後データ取得、を行った。その結果、今後 FBR プラントの維持規格立案に向け具体的展開を図るべく、以下の項目に関する研究が必要であるとの結果を得た。

#### (1) 亀甲状欠陥の強度評価手法の開発

クリープ域にて想定される亀甲状欠陥は複数の欠陥が近接して亀の子状に発生する状況を総称したものである。非クリープ域においては一般に欠陥が単独で発生することを想定すればよく、これに対応した従来の欠陥評価手法では亀甲状欠陥に対しどのような検査データを取得するべきかについても必ずしも明らかではない。また従来の欠陥評価手法では検査の結果得られた欠陥を単独き裂としてモデル化することになるので亀甲状欠陥に対し適切な評価ができるかという点についての知見が不足している。そこで亀甲状欠陥をき裂としてモデル化する手法、およびモデル化後の健全性評価手法を開発する必要がある。

#### (2) 低荷重域疲労き裂進展挙動の評価

熱応力対策が十分に施された FBR プラントを念頭に置いた熱応力下疲労き裂進展挙動を精度よく推定するためには、特に低荷重域の疲労き裂進展特性（材料特性）を明らかにする必要がある。ところが疲労き裂停留に対応すると言われている材料抵抗  $\Delta K_{th}$ （下限界応力拡大係数範囲）近くの低荷重域の疲労き裂進展データを取得するには一般に長時間を要する（例：荷重速度 5 Hz, 荷重漸減率 C の ASTM 標準 = -0.08 mm<sup>-1</sup> にて約 200 日）。そこで平成 12 年度に大容量高速疲労き裂進展試験機（図 1 参照）を自作し、また材料の疲労き裂進展抵抗に影響を及ぼさない C について検討した結果試験時間を約 3 日間 ( $C = -0.7 \text{ mm}^{-1}$ , 50 Hz) に短縮することが可能となった。

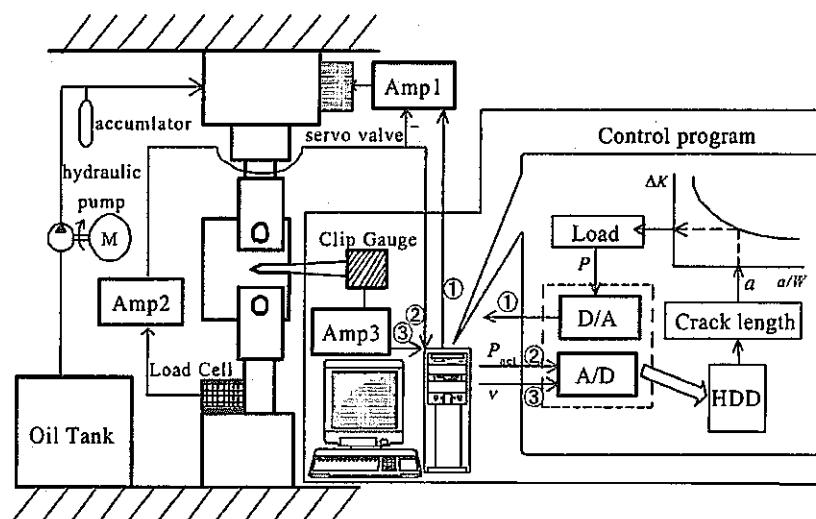


図 1 大容量高速疲労き裂試験機

今後、この設備を活用し、低荷重域において疲労き裂進展抵抗に影響を及ぼすと言われている最大応力拡大係数  $K_{max}$  の影響評価を中心として、各種材料に対する低荷重域疲労き裂進展データを取得し、データベースを構築する。これにより維持規格における評価不要欠陥選定の基礎データを提供することが可能となる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本年度の成果を踏まえ、平成13年度以降本研究のPhaseⅡとして、次の内容について研究を実施する予定である。

- (1) 亀甲状欠陥の強度評価手法の開発
- (2) 低荷重域疲労き裂進展挙動の評価

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

JNC TY4400 2001-001

「FBRプラントにおけるき裂進展評価手法の高度化に関する研究」

## 大学等との共同研究に関する平成 12 年度研究概要報告書

研究テーマ	電磁流体の流動解析に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授 棚橋 隆彦, 佐藤 俊彦		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 热流体技術開発グループ GL 山口 彰, 研究主幹 大島 宏之		
研究実施場所	慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 棚橋研究室 機構 大洗工学センター 流動伝熱試験室	当該年度 研究期間	平成 13 年 1 月 ~ 平成 13 年 3 月
通算研究期間 (予定)	平成 13 年 1 月 ~ 平成 13 年 3 月		
【研究目的】			
<p>液体金属冷却高速炉の実用研究においては、経済性や信頼性を向上させるため、電磁ポンプの採用の検討や、地球磁場の影響で発生する可能性のある流動不安定について検討が必要となる。本件は、液体金属が有する電磁流体としての特性の評価を可能とすべく、数値解析手法の開発を行うことを目的とする。</p>			
【研究内容（概要）】			
<p>1) 電磁流体数値解析手法の調査</p> <p>電磁場解析に適用される手法および流動解析に適用される手法の現状を調査し、それぞれの得失を把握するとともに、汎用性・精度・経済性の観点から 3 次元解析に最適と考えられる手法の組み合わせを検討する。</p> <p>2) 電磁場解析プログラムの構築</p> <p>1) の調査結果を元に、支配方程式の導出、離散化、プログラミングを行う。</p> <p>3) 流動解析プログラムの構築および電磁場解析プログラムとのカップリング</p> <p>1) の調査結果を元に、流動解析プログラムを構築する。また、2) で構築した電磁場解析プログラムとのカップリングを行い、電磁流体解析手法を構築する。</p> <p>4) 適用解析の実施</p> <p>3) で構築した電磁流体解析手法の妥当性を確認するため、例題による解析を実施する。</p>			
【使用主要施設】			
慶應義塾大学所有の大型計算機およびサイクル機構所有のワークステーション			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 12 年度は、電磁場解析に適用される手法及び流動解析に適用される手法の現状を調査・検討した結果を踏まえ、3 次元解析に最適と考えられる電磁流体解析手法を構築し、同手法の妥当性を確認した。

## 【研究成果（当該年度）】

### (1) 電磁流体解析手法の調査

開発する解析プログラムに関して、適切な手法を適用するため調査を実施した。

まず離散化法として、差分法、有限要素法および境界要素法の適用性を比較検討した。差分法と他の 2 法の大きな差異は複雑形状取り扱い易さであり、解析対象の汎用性を考慮すると後者が有利となる。有限要素法は複雑形状の取り扱いに長けているが、相対的に大きな記憶容量を使用するというデメリットがある。一方、境界要素法は差分法や有限要素法などのいわゆる領域型解法に比べて、入力データ数や計算時間を短縮できるメリットを有するが、反面非線形問題になるとその拡張性で劣ってくる。電磁場の解析という観点からすれば、本来無限遠まで影響が及ぶため領域型では何らかの近似が必要となるが、境界要素法ならばその取り扱いが容易となる。但し、材質の複雑な領域の処理には有限要素法が有利となる。これらより、多次元流体解析には有限要素法を、電磁場解析にはそれぞれの長所を活かした有限要素法と境界要素法を併用した手法を適用することが最適と判断される。

流体の数値解析に関しては、陽解法に基づく簡潔さや非定常問題への適用の容易さという点で有利となる MAC 法を有限要素法に適用した GSMAC (Generalized SMAC) 有限要素法<sup>[1]</sup>を採用することとした。これは、全体マトリックスを解くために多くの記憶容量を必要とする通常の有限要素法と比較して、全体マトリックスを作成する必要が無い方法であるため、記憶容量の節約・計算効率の向上が図れるというメリットを有する。

電磁場解析に対しては、電場、電束密度、磁場、磁束密度といった直接変数（いずれもベクトル量）を用いることは有限要素法に対して記憶容量の点で不利となること、また交流磁場への適用性も考慮して、磁気ベクトルポテンシャルを用いた方法 (A 法) と電気スカラーポテンシャルを用いた方法 ( $\phi$  法) を組み合わせた A- $\phi$  法<sup>[2]</sup>を適用することとした。

以上の調査より、構築する解析手法として、流動場の解析には  $k-\epsilon$  乱流モデルを適用した 3 次元の GSMAC 有限要素法を、電磁場の解析には A- $\phi$  法を適用した 3 次元有限要素・境界要素ハイブリッド法を用いることとした。

### (2) 電磁場解析プログラムの構築

上記調査に基づいて、3 次元有限要素・境界要素ハイブリッド法によるプログラムを作成するとともに、平行平板コンデンサー問題および渦電流問題を例としてその妥当性を確認した。

まず、Maxwell 方程式から磁気ベクトルポテンシャル  $A$  と電気スカラーポテンシャル  $\phi$  を用いた A- $\phi$  法の支配方程式として以下の 2 式を導出した。

$$\nabla \cdot \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 A = \mu \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (2)$$

この2式を、ガラーキン有限要素法を用いて離散化すると同時に、境界要素法による離散化も行い、これらを組み合わせることによって最終的に解くべきマトリクス方程式を導出した。このマトリクス方程式を解くアルゴリズムを構築しプログラムを作成した。

次に作成したプログラムの妥当性および有効性を確認するために、平行平板コンデンサー問題の解析を行った。ここでは無限空間内に置かれた平行平板コンデンサーに  $\phi = +1$ 、 $\phi = -1$  の電位をそれぞれ与えた条件を想定しその中の電位を求めることとした。これに対して有限要素法のみを適用した場合と、有限要素・境界要素ハイブリッド法を適用した場合を比較した。有限要素法、有限要素・境界要素ハイブリッド法それぞれに用いた要素分割図を図1に、また解析結果の等電位線図を図2に示す。コンデンサー領域のみではその境界での流束が不明で条件を与えられないため、いずれの場合もある程度の空間領域をまわりに確保し、その境界での流束を0とする工夫が必要となる。有限要素法の場合は、無限領域を考慮するために経験あるいは試行錯誤に基づくある程度の空間領域（境界で流束0と見なせる程度）を設定し、それに対する多くの要素分割を行わない限り精度の高い解を得ることは困難である。一方、ハイブリッド法では無限遠において電位、流束ともに0と置くことが可能となり、少ない計算資源・時間で正しい解を得ることが可能となる。

さらに、渦電流問題として非破壊検査に利用される渦電流探傷試験解析に適用した。解析モデルを図3に示す。中央に貫通したスリット（長さ10mm）を持つ正方形板の上方0.5mmの位置にパンケーキ型励磁コイル（図4）を設置し、300kHzの交流磁場を印加しながらスリット長さ方向に移動させた場合の渦電流密度分布およびインピーダンスの変化を求めた。図5に解析で得られた渦電流分布を示す。スリットとコイルの相対位置が変化することによって渦電流分布が大きく変化する様子が再現できている。また、図6にはスリット方向のインピーダンス変化について解析と実験<sup>[3]</sup>との比較を示す。渦電流変化の良好な再現により、得られたインピーダンス変化も実験と良好に一致することが確認された。

### (3) 流動解析プログラムの構築および電磁場解析プログラムとのカップリング

$k-\epsilon$  乱流モデルを採用した3次元GSMAC有限要素法による流動解析プログラムを構築するとともに、(2)で作成・検証した電磁場解析プログラムとのカップリングを行い、電磁流体解析手法を整備した。

用いた支配方程式は次のとおりである。

〈流動場〉

質量保存式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

運動量保存式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \mathbf{g} \quad (4)$$

〈電磁場〉

導体領域（有限要素法領域）

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \sigma (j\omega \mathbf{A} + \nabla \phi) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \sigma (j\omega \mathbf{A} + \nabla \phi) = 0 \quad (6)$$

空気領域（境界要素法領域）

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_f \quad (7)$$

これらは、1)非圧縮ニュートン流体、2)外力としてLorentz力および重力のみ考慮、3)物性値温度依存性無視、4)変位電流無視、5)交流磁場、を仮定することにより成立する。プログラムではまず(5)、(6)、(7)より磁気ベクトルポテンシャルと電気スカラーポテンシャルを求め、次にMaxwell方程式を利用することにより渦電流密度と磁束密度を求める。これらより  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  のLorentz力を算出し、運動量保存式の外力項として組み込む。乱流については、 $k$  および  $\epsilon$  の保存式を解くことにより乱流粘性を求め、これを運動量保存式に反映する。流体の質量保存および運動量保存はGSMAC法のアルゴリズムにより解かれる。

#### (4) 適用解析

(3) で作成した電磁流体解析手法の妥当性を確認するため、J. L. Meyer らが行った実験<sup>[4]</sup>を対象とした適用解析を実施した。解析体系を図 7 に示す。中央の円筒容器の中に液体金属（水銀）が満たされ、その円筒容器の周りに設置されたコイルに交流電流が流れた時の液体金属の流況を解析するものである。また中央の円筒容器を四角柱容器に置き換えた解析も実施した。解析条件として、コイルには周波数 50Hz で 9850A の電流が流れていることを仮定した。

図 8 に円筒容器に関して得られた Lorentz 力分布を、図 9 に流速ベクトル図を示す。Lorentz 力は軸対称な分布となっており、その方向は全て中心軸方向に向いている。また容器の 1/2 高さ付近で最大となることがわかる。これにより流れも軸対称になるとともに上下に 2 つの渦が発生する。Meyer の実験結果を図 10 に示す。解析同様に上下に 2 つの渦が発生することが確認されている。一方、四角柱容器の場合の解析結果を図 11 に示す。円筒容器同様 Lorentz 力は中心軸方向に向くとともにその最大値は側面中心付近に現れる。流況についても上下に渦が発生することは同様であるが、水平断面内流速ベクトル図に見られるように、4 つのコーナーに対して対称となるような 3 次元的流れが再現できている。

以上の結果から、開発した 3 次元電磁流体解析手法の妥当性を確認した。

#### 参考文献

- (1) 棚橋 隆彦、「GSMAC-FEM 数値流体力学の基礎とその応用」、アイピーシー、1991.
- (2) 三次元電磁界数値計算実用化技術調査専門委員会、「三次元電磁界数値計算実用化技術」、電気学会技術報告 No.480、1994.
- (3) 高木、他、「渦電流探傷試験におけるベンチマーク問題とその実験及び解析結果」、電気学会静止器回転機合同研究会資料、SA-93-21, RM-93-59.
- J.L.Meyer, et.al., "A Comprehensive Study of the Induced Current, the Electromagnetic Force Field, and the Velocity Field in a Complex Electromagnetically Driven Flow System," Metal. Trans. B, Vol.18B, pp529-538, 1987.

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

今年度で終了する。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- Chung-Hyo, Tetsuro Minowa and Takahiko Tanahashi, "Numerical Analysis on Molten Metal under Magnetic Field Using GSMAC-FEM Method," Proc. of 4<sup>th</sup> JAME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol.1, pp529-536, Kobe, 2000.

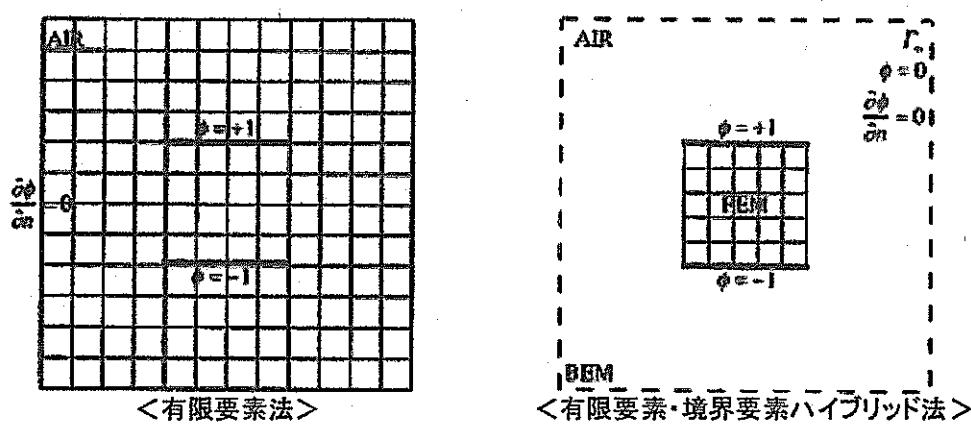


図1 計算メッシュ分割

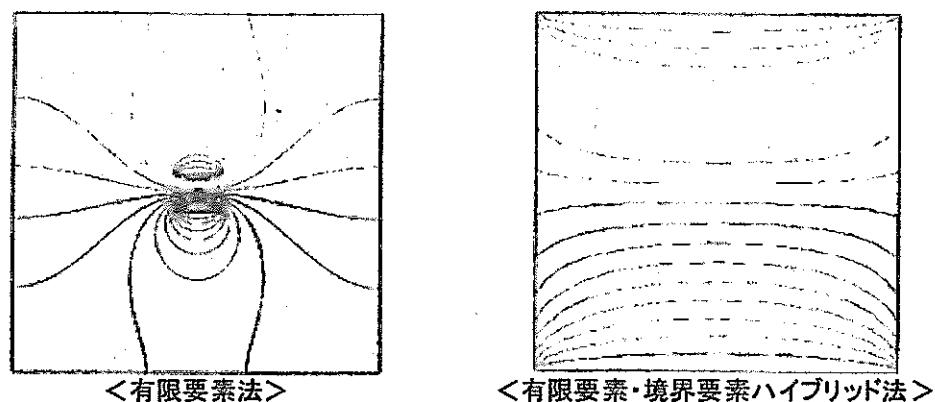


図2 解析結果(等電位線)

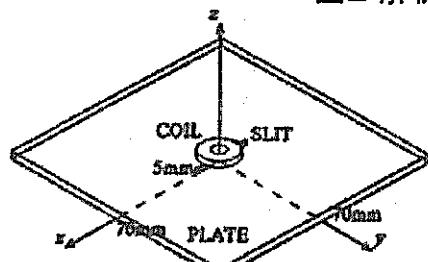


図3 解析モデル

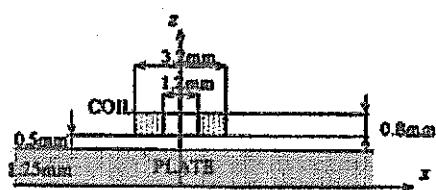


図4 パンケー型励磁コイル

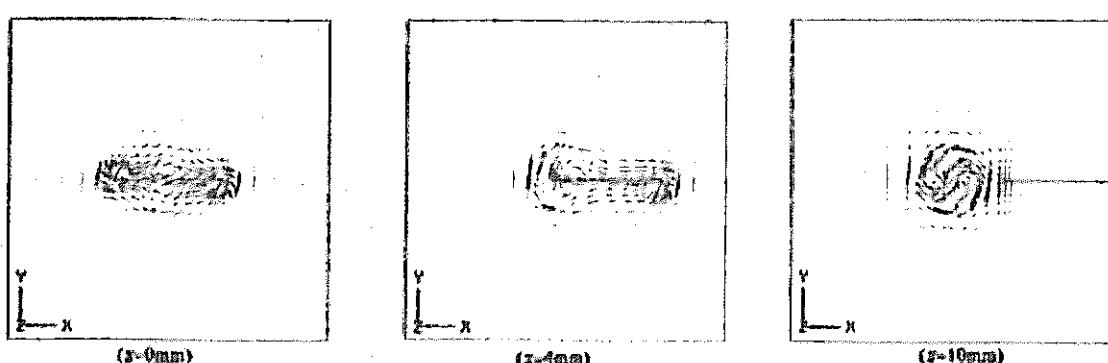


図5 解析結果(渦電流密度分布)

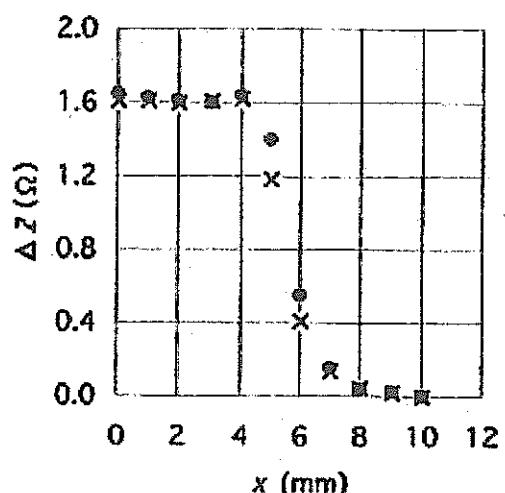


図6 インピーダンス変化の比較

● Present  
× Experiment<sup>(a)</sup>

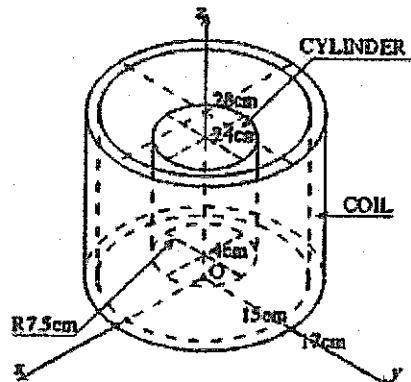


図7 解析体系(円筒容器)

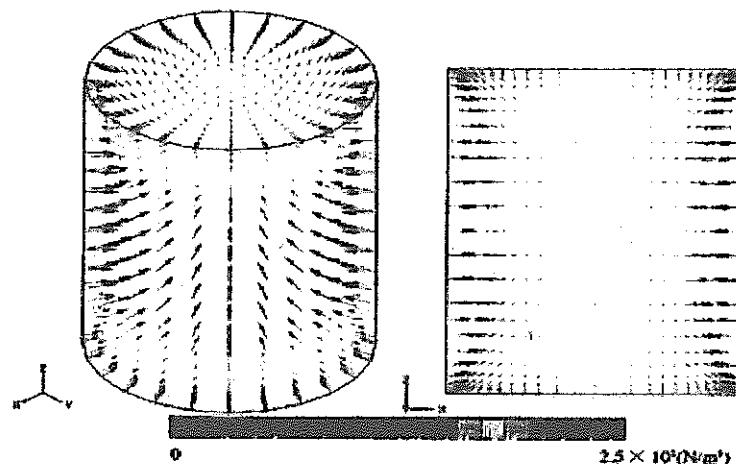


図8 円筒体系解析結果( Lorentz力分布図)

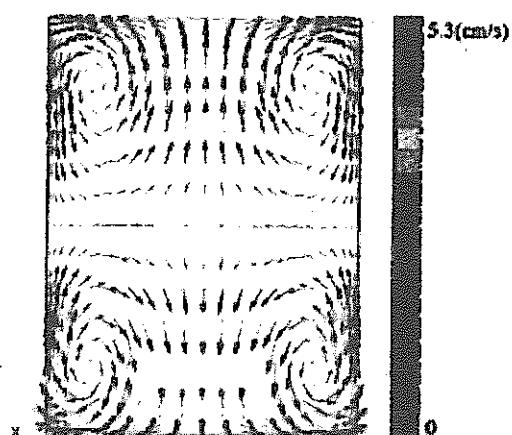


図9 解析結果( 流速ベクトル図)

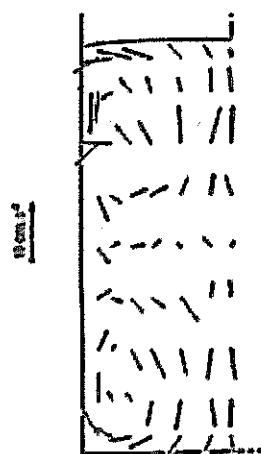


図10 Meyerらの実験結果(速度分布)

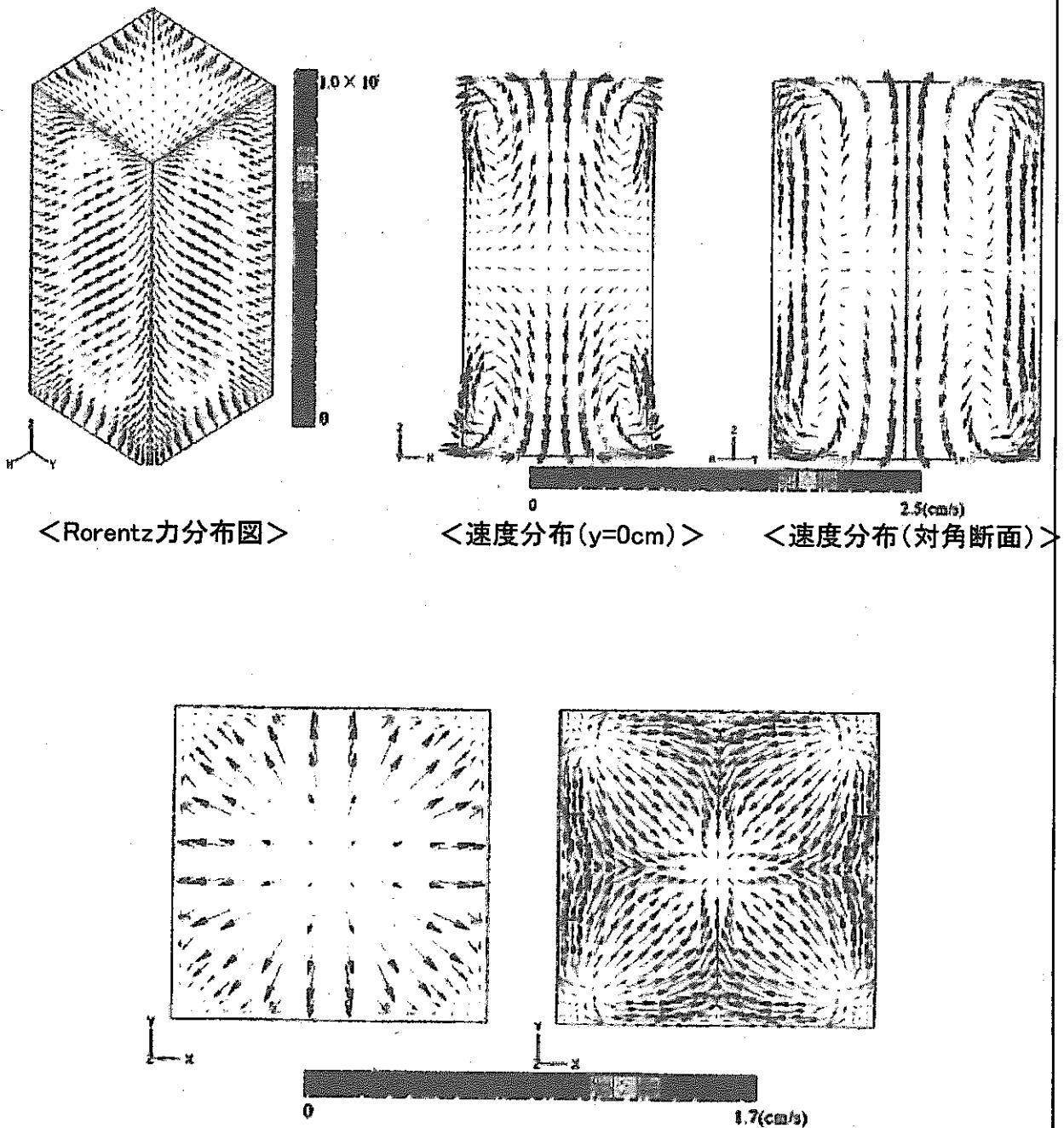


図11 四角柱体系解析結果