

先行基礎工学分野に関する  
平成9年度研究協力概要報告

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
T	N1430 98-001	1998.8.13

この資料は技術管理室保存資料です  
閲覧には技術資料閲覧票が必要です  
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1998年7月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

☎107-8445 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 ( Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation ) 1998

## 先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告

報告者課室 リスト参照  
編集 技術協力部技術協力業務課

### 要 旨

事業団は、大学との研究協力の推進を図るため、平成7年度から先行基礎工学研究協力制度を発足させた。同制度は、平成9年度で3年目を迎え、研究協力テーマが増加し順調に推移している。

同制度は、事業団の施設を主に利用し、原子力工学分野のプロジェクトに先行した基礎・基盤的研究を大学との研究協力により推進することを目的とする。同制度は、事業団が設定した研究協力テーマに対して、大学側からの研究協力課題及び研究協力者の応募をもとに、研究協力課題及び研究協力者を選考し、大学との共同研究の実施、客員研究員あるいは研究生の受け入れ、もしくはこれらの組み合わせにより研究協力を実施している。

本報告書は、平成9年度に実施した高速増殖炉関係及び環境技術関係の先行基礎工学分野に関する25件の研究協力課題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、25件の研究協力課題のうち、高速増殖炉関係の2件については、平成9年度で終了した。

目次

1. 先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力課題	i
2. 先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力概要	
(1) 高速増殖炉関係	
① ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界	1
② 中性子ガガレイによる高密度比気液二相流の可視化と計測	7
③ 高解像度陽子線シフト法による液体金属-ガス二相流及び気泡挙動の研究	36
④ 損傷組織の定量化技術の研究	40
⑤ 溶接部の高温クリープ損傷の定量化技術	44
⑥ 中性子ビームカブに関する研究 -中性子ビーム制御法の研究-	49
⑦ 中性子ビームカブに関する研究 -収束中性子の研究-	55
⑧ 中性子計測データの計算機直接入力に関する研究	59
⑨ 高燃焼度燃料内の固体F Pの挙動評価	64
⑩ レーザ共鳴分光を用いたFPガモレタの基礎研究	68
⑪ 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究 -液面下の流れによる不安定現象	73
⑫ 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究 -流れ込みに対する液面応答	77
⑬ 非等温場における噴流の流速分布計測	81
⑭ 相変化を伴う融体移行挙動に関する基礎研究	87
⑮ 高純度鉄合金開発に関する研究	92
⑯ 金属燃料の過渡時挙動に関する基礎的研究	95
⑰ き裂進展のモニタリング技術開発に係る基礎研究	99
⑱ ODSフェライト鋼の照射特性の電子線による評価	102
⑲ 光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定法に関する研究	106
(2) 環境技術関係	
① 不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究	110
② 地下水流動の総合調査・解析システムの開発	115
③ 計算機を用いた連続電磁波のシミュレーション及び解析手法の研究	119
④ 水理試験と地球物理学的手法を組み合わせた地下水の調査・解析手法の研究	124
⑤ 緑泥石温度計についての加温・加圧試験研究	129
⑥ 放射性物質のシロイヌナズナへの移行と影響に関する研究	133

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力課題一覧(1/3)

【高速動向関係】

《-----平成9年度で終了》

研究協力テーマ 研究協力課題	事業計画 受入箇所	事業計画 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
1. 液本金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究 ナトリウムの沸騰昇温熱度と限界熱流束	大洗 基盤部 熱流本室	堺 公明	共同研究	塩津 正博 教授 京都大学大学院エネルギー科学研究科 他	平成7年度より
2-(1) 高密度比気液二相流に関する基礎研究 中性子放射線による高密度比気液二相流の可視化と計測	大洗 安工部 炉安室	飛田吉春	共同研究	三島 嘉一郎 教授 京都大学原子炉実験所 他	平成7年度より
2-(2) 高密度比気液二相流に関する基礎研究 高解像度陽子線放射線法による液本金属-ガス二相流及び気泡挙動の研究	〃	〃	共同研究	芹澤 昭示 教授 京都大学大学院工学研究科 原子核工学専攻 他	平成9年度より
3-(1) 損傷組織の定量化技術の研究 同上	大洗 安工部 機安室	青砥 己身 永江 勇二	客員研究員 研究生	丸山 公一 教授 東北大学工学研究科 材料物性学専攻 他	平成7年度より
3-(2) 損傷組織の定量化技術の研究 溶接部の高温カーガ損傷の定量化技術	〃	青砥 己身 木村 拱隆	客員研究員	門馬 義雄 教授 高知工科大学工学部 他	平成8年度より
4-(1) 中性子モニタリングに関する研究 同上 -中性子ビーム制御法の研究-	大洗 基盤部 炉心室	若林 男	共同研究	鬼柳 善明 教授 北海道大学工学研究科 量子放射工学専攻 他	平成7年度より
4-(2) 中性子モニタリングに関する研究 同上 -収束中性子の研究-	〃	〃	共同研究	古田島 久哉 教授 東北大学工学研究科 量子放射工学専攻 他	平成7年度より実施し 平成9年度で終了
5. 中性子計測データの計算機直接入力に関する研究 同上	大洗 実験部 DCA	大谷 暢夫 羽塚 平	共同研究	的場 優 教授 九州大学工学部 応用原子核工学科 他	平成7年度より実施し 平成9年度で終了
6. 高燃焼度燃料の刈刈評価 高燃焼度燃料内の固体F/Pの挙動評価	大洗 燃焼部 AGS	山本一也 今野 廣一	共同研究 研究生	古屋 廣高 教授 九州大学工学部 応用原子核工学科 他	平成7年度より
7. レーザを用いた高速炉の燃焼耐熱合金出法に関する研究 レーザー共鳴分光を用いたF/Pモニタリングの基礎研究	大洗 実験部 技術課	青山 卓史 伊藤 主税	客員研究員	井口 哲夫 教授 名古屋大学工学研究科 原子核工学専攻 他	平成8年度より

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力課題一覧(2/3)

【高速音速関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	事業団側 受入箇所	事業団側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
8-(1) 液面の非線形不安定現象に関する 基礎研究 同上 -液面下の流れによる不安定現象-	大洗 基盤部 熱流本室	飯田将雄	共同研究	岡本 孝司 助教授 東京大学工学部附属 原子力工学研究施設 他	平成8年度 より
8-(2) 液面の非線形不安定現象に関する 基礎研究 同上 -流れ込みに対する液面応答-	”	”	共同研究	神永 文人 教授 茨城大学工学部 機械工学科 他	平成8年度 より
9. 炉心槽内流速分布測定への超音波 流速計の適用性評価 非等温場における噴流の流速分布計測	大洗 安工部 炉工室	上出英樹 他	客員研究員	菱田 公一 教授 慶応大学理工学部 流体力学工学科 他	平成8年度 より
10. 相変化を伴う融材挙動に関する 基礎研究 同上	大洗 安工部 炉安室	小西賢介 神山健司 今堀真司	共同研究	齊藤 正樹 助教授 東京工業大学 原子炉工学研究所 他	平成8年度 より
11. 高純度鉄合金開発に関する研究 同上	大洗 安工部 機安室	榊原安英	客員研究員	安彦 兼次 助教授 東北大学 金属材料研究所 他	平成8年度 より
12. 金属燃料の過渡挙動に関する基礎的 研究 同上	大洗 基盤部 リスク評価室	丹羽 元 川田賢一	共同研究 研究生	平川 直弘 教授 東北大学 工学研究科 量子材料 工学専攻 他	平成9年度 より
13. き裂進展のモニタリング技術開発に係 る基礎研究 同上	大洗 安工部 機安室	榊原安英 川崎弘嗣	共同研究	岸 輝雄 教授 東京大学 先端学技術研究 センター 他	平成9年度 より
14. ODSフェライト鋼の照射特性に関す る研究 ODSフェライト鋼の照射特性の電子 線による評価	大洗 燃焼部 MMS	赤坂尚昭	共同研究 研究生	大貫 惣明 教授 北海道大学 工学研究科 物質工学専攻 他	平成9年度 より
15. 光ファイバを用いた高速炉プラントの 温度分布測定法に関する研究 同上	大洗 実験部 技術課	前田幸基	共同研究 研究生	中澤 正治 教授 東京大学 大学院工学系研究科 応用量子工学専攻 他	平成9年度 より

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力課題一覧(3/3)

【環境技術関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	事業団側 受入箇所	事業団側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
1. 不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究 同上	東海 環境部 IAS	井尻谷二 巨真吾 畑中耕一郎	共同研究	神野 健二 教授 九州大学工学部 建設都市工学科 他	平成8年度 より
2. 地下水流動調査研究 地下水流動の総合調査・解析システムの開発	東農 環境研究室	尾方伸久 三枝博光	客員研究員	渡辺 邦夫 教授 埼玉大学 工学部附属地盤水理実 験施設	平成8年度 より
3. 精密周波数帯域連続電磁波調査法の研究 計算機を用いた連続電磁波のシミュレーション 及び解析手法の研究	東農 技術課	藪内 聡 小出 馨	客員研究員 研究生	渡辺 俊樹 助手 京都大学大学院 工学研究科 資源工学専攻 他	平成8年度 より
4. 水理試験と地球物理学的手法を組み合わせた地下水の調査・解析手法の研究 同上	東農 技術課	中野勝志 竹内竜史	共同研究 研究生	西垣 誠 教授 岡山大学 環境理工学部 環境工学工学科 他	平成8年度 より
5. 岩石及び凝結物と地下水との反応試験 緑泥石温度計についての加温・加圧 試験研究	人研事業所 環境部 環境課	時澤孝之 鶴留浩二	客員研究員	滝江靖弘 助教授 兵庫教育大学 学校教育学部 地学	平成9年度 より
6. 放射性物質の植物への移行と影響に関する研究 放射性物質のシロイヌナズナへの移行 と影響に関する研究	人研事業所 環境部 環境課	時澤孝之 鶴留浩二	客員研究員	山田哲台 教授 岡山大学農学部 総合農薬科学科	平成9年度 より

## 2. 先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力概要報告

### (1) 高速増殖炉関係



先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究														
研究協力課題	ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束														
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>京都大学エネルギー科学研究科</td> <td colspan="2">塩津正博教授、白井康之助教授</td> </tr> <tr> <td></td> <td>京都大学エネルギー理工学研究所</td> <td colspan="2">畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td>大洗工学センター基盤技術開発部</td> <td>熱流体技術開発室</td> <td>堺 公明</td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学エネルギー科学研究科	塩津正博教授、白井康之助教授			京都大学エネルギー理工学研究所	畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官		動 燃 側	大洗工学センター基盤技術開発部	熱流体技術開発室	堺 公明
大 学 側	京都大学エネルギー科学研究科	塩津正博教授、白井康之助教授													
	京都大学エネルギー理工学研究所	畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官													
動 燃 側	大洗工学センター基盤技術開発部	熱流体技術開発室	堺 公明												
研究協力実施場所	京都大学エネルギー科学研究科 京都府宇治市五ヶ庄														
通算研究期間 (予定)	平成7年4月 ~ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年11月10日~ 平成10年3月31日												
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究														
<p>【研究目的】</p> <p>高速炉の冷却材であるナトリウムは、通常、十分な保守性を確保した条件にて、液単相流の状態で使用される。しかし、安全裕度をより精度よく評価するため、伝熱特性が大きく変化する沸騰開始条件及び膜沸騰への遷移条件について、温度、圧力、熱流束、発熱部条件等のより詳細な把握を行う。</p>															
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>ナトリウムの沸騰開始条件及び膜沸騰への遷移条件について、特に、沸騰開始過熱度（飽和温度と実際に沸騰が開始する温度の差）に関しては、使用条件によって実験結果にばらつきが大きいとの報告があり、その物理的メカニズムを解明するための基礎的研究が重要となっている。</p> <p>本研究では、ナトリウム中の試験発熱体の沸騰開始温度と限界熱流束を体系的に求め、試験体の履歴発熱率上昇速度、液サブクール度等の沸騰開始過熱度及び限界熱流束への影響を明らかにし、その物理的メカニズムを解明する。</p>															
<p>【使用主要施設】</p> <p>京都大学エネルギー科学研究科 高温ナトリウム熱伝達実験装置 〔最高ナトリウム温度900℃（沸騰条件）、カバーガス：Ar、プール容積41ℓ〕</p>															

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

- 平成7年度： 予備実験の実施（発熱リボン電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法の確立）
- 平成8年度： 沸騰開始以前の履歴が沸騰開始過熱度及び限界熱流束に及ぼす影響の解明（発熱リボン電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法による実験と評価）
- 平成9年度： 圧力条件が沸騰開始過熱度及び限界熱流束に及ぼす影響の解明（系圧力及び試験体予圧条件、並びに、コールドトラップ温度の影響）

## 【研究成果】

### 1. 緒言

本研究は、ナトリウムプール中の試験発熱体における初期沸騰温度と限界熱流束を系統的に求め、実験開始以前の履歴、発熱率上昇速度、液サブクール度等の沸騰開始過熱度及び限界熱流束への影響を明らかにし、膜沸騰への遷移機構を解明することを目的とする。

平成8年度は、平成7年度に開発した試験発熱体の発熱線の温度から発熱体表面温度を算出する温度測定方式によって、沸騰開始過熱度及び限界熱流束の測定をおこなう実験を実施した。実験開始以前の履歴（非沸騰過熱時間、沸騰経験時間等）の影響について調べるとともに、コールドトラップ温度の初期沸騰温度に対する影響検討を実施した。

平成9年度は、圧力条件（系圧力、試験体予圧条件）の影響について、沸騰開始過熱度及び限界熱流束の測定実験を実施する。

### 2. 従来の研究

京都大学では、飽和沸騰限界熱流束に関して幅広い実験を行い、図1に示すように系圧力の低い領域においては、飽和沸騰限界熱流束は従来理論値より大きい値になることを示した。その理由として、蒸発の寄与以外に対流の寄与を含むことを実験的に明らかにするとともに、発熱体近傍の二相境界層からの上昇蒸気に伴う過熱液流出による顕熱輸送考慮した新しい理論モデルを提案した。

一連の実験の際に、沸騰開始過熱度が次第に大きくなり、過熱度が100Kを越えても沸騰が開始しないような現象が観察された。沸騰開始過熱度が大きくなった原因として、液体金属ナトリウムは、カバーストックの溶解度が水とは逆に温度が高いほど大きく、燃料体表面の沸騰核となるキャビティ（くぼみ）内に初期に補足されたガスが時間の経過とともに次第に少なくなって液で満たされるようなメカニズムが考察されたが、実験的検証は行われていない。

### 3. 実験装置及び試験体

図2に本実験で用いた高温液体ナトリウム熱伝達実験装置のブロック図を示す。本装置は、ナトリウム冷却高速増殖炉における安全性評価に関連した基礎データを集積することを目的としたものであり、最高液体ナトリウム温度900℃（ナトリウム沸点は大気圧下で883℃）で自然対流及び強制対流下の非沸騰及び沸騰熱伝達実験が可能である。

図3に平成9年度に作成した試験体の構造図を示す。発熱部は外径7.6mm、発熱長50mmの円柱状であり、シース及び発熱リボンともタンタル金属を用いている。平成7年度に開発した手法によって、発熱体表面温度は、発熱リボンの電気抵抗と温度の関係から求めることが可能であり、限界熱流束到達時の急激な温度変化に対しても耐久性が高い。本試験体を用いて、系圧力及び試験体予圧（試験体を予め試験圧力よりも高い圧力条件環境として活性キャビティを不活性化する手法）をパラメータとして、沸騰開始から限界熱流束にいたるまでの実験を実施した。

#### 4. 沸騰開始過熱度及び限界熱流束の試験結果

図4～7に系圧力が異なる条件で測定した沸騰開始過熱度のコールドトラップ温度依存性を示す。系圧力が3 kPa と7 kPa の条件では、沸騰開始過熱度はコールドトラップ温度の低下とともに高くなり、コールドトラップ温度の影響が明確に認められるが、系圧力が14kPa と25.9Pa条件では、コールドトラップ温度の系統的影響は認められなかった。

試験体予圧の影響について、図4及び図6に示すように、コールドトラップ温度を変化させた条件においても余圧を行わない条件との差は殆ど現れていない。この事実から、沸騰は予め気体を捕捉した活性なキャビティから開始するのではなく、予圧に依存しない別の機構で開始するものと予想される。

図8～11に限界熱流束と試験体の位置の圧力に対するサブクール度の測定結果を示す。図中に△で示した熱流束は沸騰開始と同時に膜沸騰へ遷移する直接遷移(Direct Transition)を示している。熱流束約 $2 \times 10^6$  (W/m<sup>2</sup>)以上まで核沸騰が開始しない場合には直接遷移が発生する傾向にあり、その熱流束は核沸騰の限界熱流束( $q_{cr}$ )より大きくなる場合が多いことが明らかになった。

#### 【今後の予定(翌年度以降の概要)】

平成10年度： 強制循環条件が沸騰開始過熱度に与える影響の解明

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 「先行基礎工学分野に関する平成7年度研究協力概要報告」, PNC TN1430 97-001(1997)
- (2) 「先行基礎工学分野に関する平成8年度研究協力概要報告」, PNC TN1430 97-004(1997)
- (3) 塩津正博, 畑幸一, 竹内右人, 濱勝彦, 堺公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束」, 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究成果報告書, (1997.5)
- (4) 塩津正博, 白井康之, 畑幸一, 濱勝彦, 堺公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束に関する研究」, PNC TY9604 97-003(1997)
- (5) 塩津正博, 畑幸一, 竹内右人, 白井康之, 濱勝彦, 堺公明, 「液体ナトリウム中の水平円柱における沸騰開始過熱度」, 第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集Vol. 1, 197-198(1998.5)
- (6) M. Shiotsu, K. Hata, Y. Takeuchi, K. Hama and T. Sakai, "INCIPIENT BOILING SUPERHEAT IN LIQUID SODIUM", to be published at the 11th-International Heat Transfer Conference, Kyongju, KOREA, (1998)

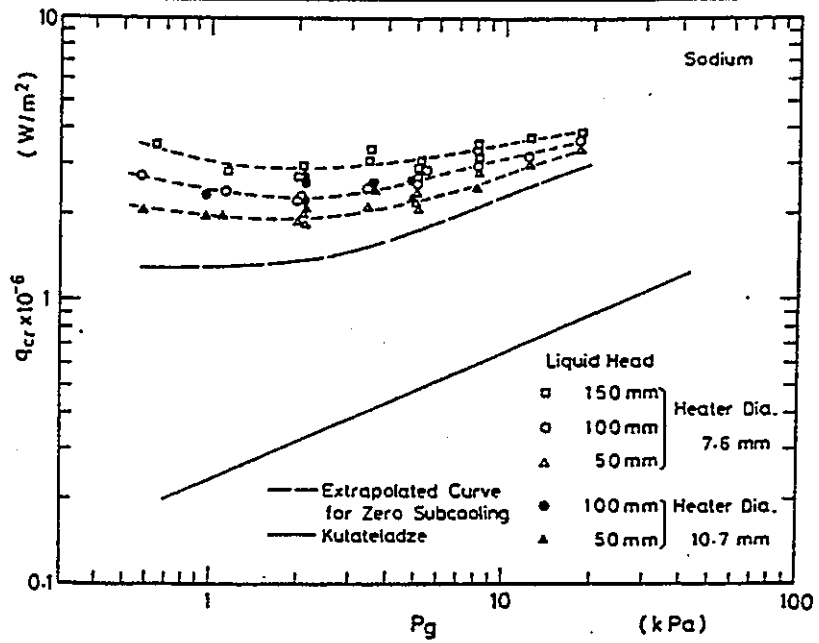


図1 従来研究

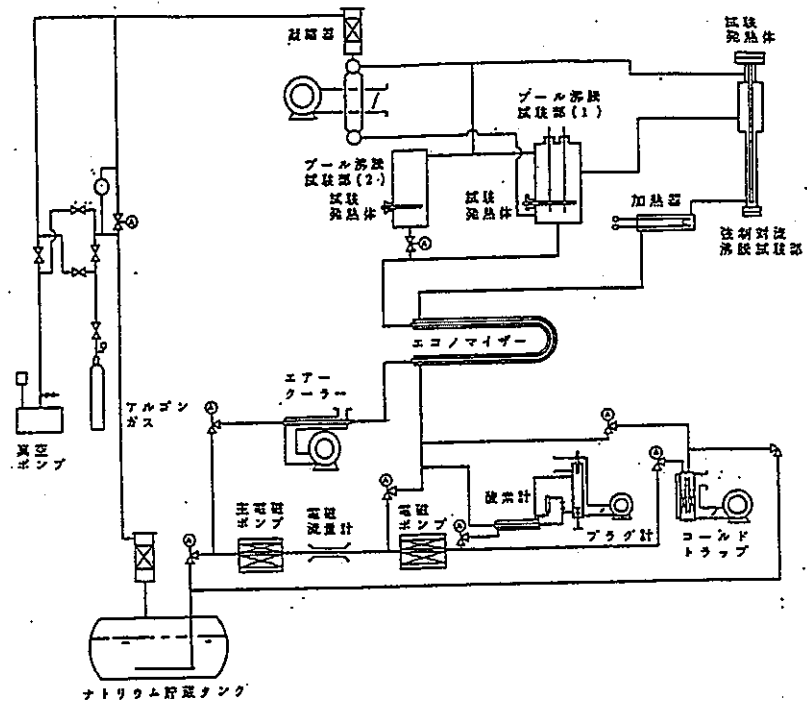


図2 試験装置

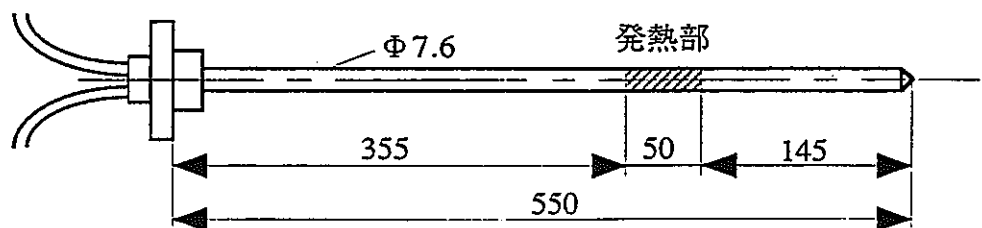


図3 発熱体構造図

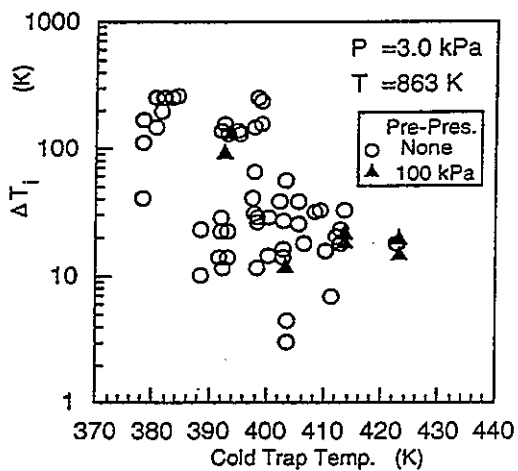


図4 沸騰開始度とコールドトラップ温度の関係(3kPa)

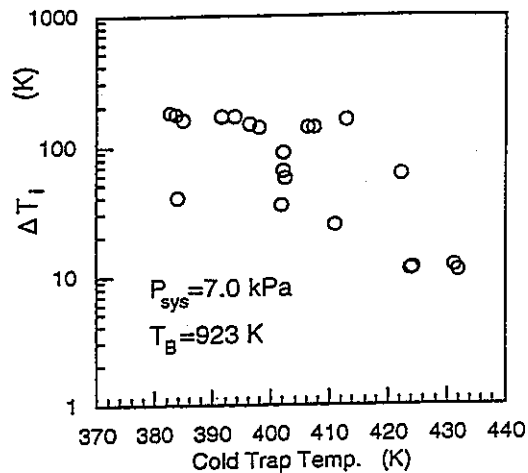


図5 沸騰開始度とコールドトラップ温度の関係(7kPa)

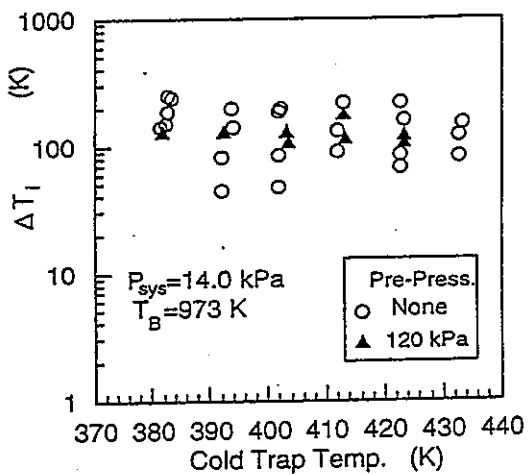


図6 沸騰開始度とコールドトラップ温度の関係(14kPa)

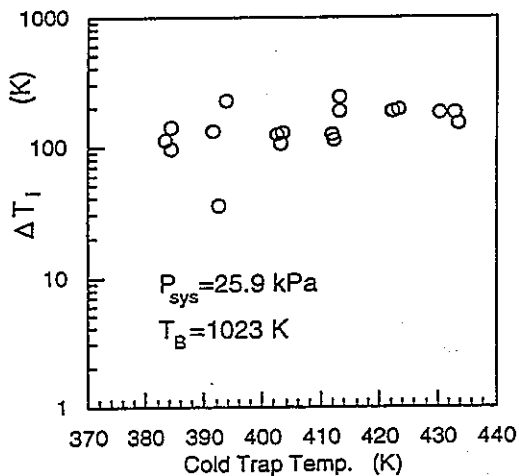


図7 沸騰開始度とコールドトラップ温度の関係(25.9kPa)

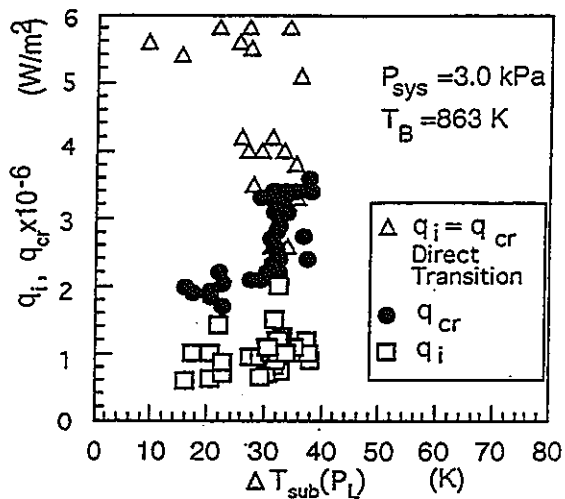


図8 限界熱流束とサブクール度の関係(3kPa)

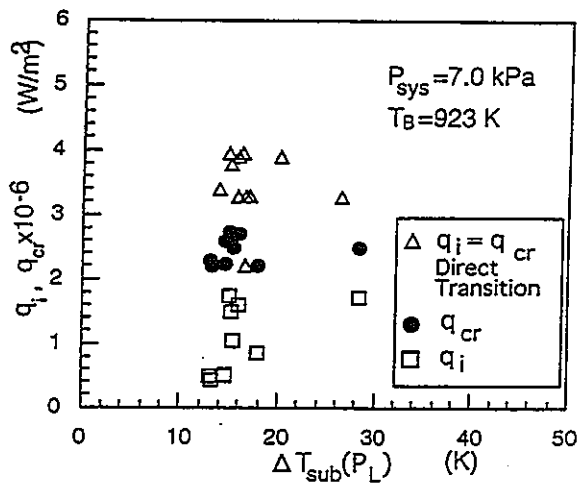


図9 限界熱流束とサブクール度の関係(7kPa)

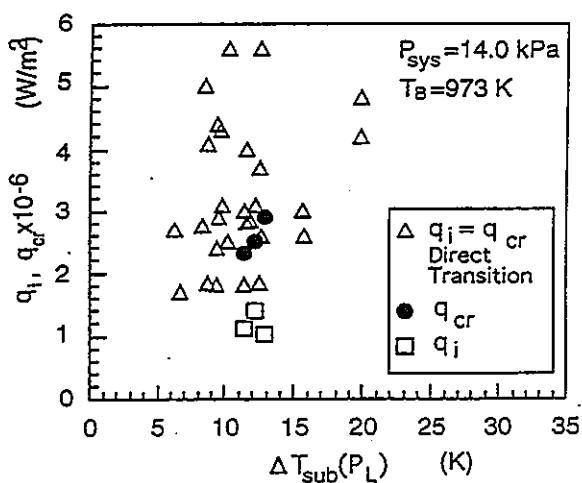


図10 限界熱流束とサブクール度の関係(14kPa)

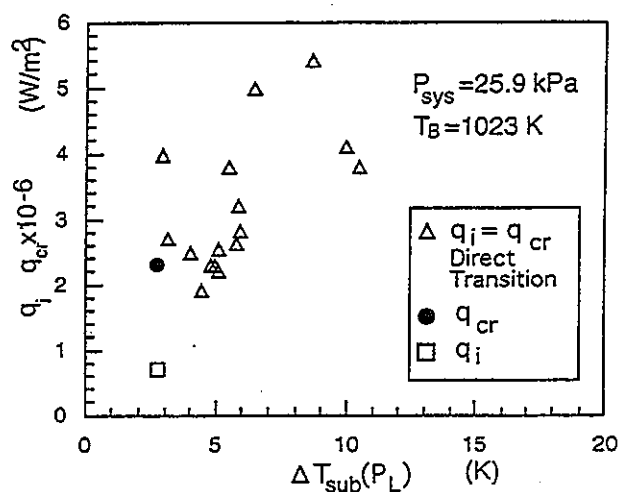


図11 限界熱流束とサブクール度の関係(25.9kPa)

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高密度比気液二相流に関する基礎研究		
研究協力課題	中性子ラジオグラフィーによる高密度比気液二相流の可視化と計測		
研究者所属、氏名			
大 学 側	京都大学 原子炉実験所 教授 三島 嘉一郎 助教授 日引 俊 助手 齊藤 泰司 (*客員研究員 **研究生)		
動 燃 側	動燃 大洗工学センター 高速炉安全工学室 飛田 吉春		
研究協力実施場所	京都大学 原子炉実験所 日本原子力研究所 東海研究所		
通算研究期間 (予定)	平成7年4月 ~ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年11月28日~ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>本研究は、高速炉の炉心損傷事故時に炉心に形成される燃料とスチールの混合プールの沸騰挙動の解明に関する基礎研究であり、炉心プールを模擬した高密度流体（熔融金属）の二相流を可視化測定することで、その流動性を解明することを目的とする。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>熔融低融点金属に気泡注入を行う模擬試験装置に対して中性子ラジオグラフィー手法を用いた可視化測定を行って、高密度比気液二相流の気泡形状、動態及びボイド率などの基礎データを取得するとともに、同データを用いて動燃のSIMMER-IIIコードのモデル検証・改良等を行うものである。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>日本原子力研究所 東海研究所 JRR-3</p>			
<p>【進捗状況（当該年度までの概要）】</p> <p>平成7年度には、低融点合金内の気泡形状を模擬した空間を有する固体試料（鉛）を用いて、中性子ラジオグラフィによる可視化実験を行い、計測性能を確認した。なお、中性子ラジオグラフィ実験は、日本原子力研究所JRR-3M熱中性子ラジオグラフィ設備（TNRF-2）を利用して実施した。</p>			

平成8年度は、溶融低融点合金（鉛-ビスマス）プール内に気泡を発生させ、これを中性子ラジオグラフィ高速撮像法により可視化し、流動様式を観察した。また、得られた画像を処理することにより、気泡速度、ボイド率などの流動特性の予備計測を行った。さらに、管内高密度比気液二相流の特性を調べるため、炉外において窒素ガス-鉛ビスマス二相流による予備実験を行った。

## 【研究成果】

平成10年3月までの研究成果の概要をまとめる。

### 1. 概要

高速炉シビアアクシデント時の高密度比二相プール流動特性に関する基礎研究として、中性子ラジオグラフィを用いた窒素ガス-鉛/ビスマス溶融金属二相流の可視化・計測実験を行い以下の結果を得た。

- (1) 供給気相流速が2cm/s以下では球形気泡、楕円体気泡が、それ以上の気相流速では変形したキャップバブルが観察された。高密度比気液二相流の気泡形状・寸法と上昇速度の関係は通常密度比の気液二相流とほぼ同じであった。
- (2) プール内に液相の循環流れが生じていることがわかった。この流れに沿って気泡は運動し、気泡の合一、再分散を生じることがわかった。
- (3) 見かけの気相速度とボイド率の関係は、プール内気泡の形状を考慮することによって既存のドリフトフラックス式で表すことが可能であることがわかった。見かけの気相速度とボイド率の関係に及ぼす初期液高の影響は本実験範囲内では顕著ではなかった。

### 2. 実験

図1に実験装置の概略を示した。試験部は溶融炉心/スチールプールを模擬したチタン製矩形容器（高さ530mm、幅100mm、奥行き20mm、試験部肉厚5mm）であり（詳細は図2参照）、試験部底部にはステンレス製ノズル（内径0.5mm）7本からなるガス噴出部が設けられている（詳細は図3参照）。矩形容器両側には加熱用電気ヒータ（ステンレス箔ヒータ：出力500W）が取り付けられており、試験部全体は絶縁材および断熱材で覆われている。作動流体としては、プール内沸騰高密度比二相流現象を模擬するため、作動流体として窒素ガス、液体鉛ビスマス（融点124℃）を用いた。溶融金属の温度計測は、アルメル・クロメル熱電対により試験部底部から2.5cm、7.5cm、15cmの3個所の位置で行った。ガス温度はガス流量計入口とガス噴出ノズルのプレナム内の2個所で計測した。また、流量計入口圧力はブルドン管式圧力計にて計測した。

実験は大気圧下で容器内温度を200℃に保ち、溶融金属プールの初期液高( $H_0$ ) = 9cm, 14cm, 29cm)をパラメータとして窒素ガス流速を0cm/s~30cm/sに変化させて行った。流動様式の観察は中性子ラジオグラフィ高速撮像法により行い、プール内ボイド率計測は撮像速度30fpsの中性子ラジオグラフィ動画法により行った。また、ガス噴出法の影響を見るため、単一ノズルからの窒素ガス噴出実験も行った。



### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 流動様式

中性子ラジオグラフィ高速撮像法（撮像速度：500fps）による初期液高  $H_0$  が 14cm、見かけの気相流速  $j_g$  が  $2.3 \times 10^{-2} \text{m/s}$  における気泡挙動の可視化例を図 4 に示した。本撮像条件においては、1 フレーム当たりの中性子フルエンスは良質な画像を得るためには十分ではなく、中性子数の統計的揺らぎ等のノイズにより気泡界面を同定することは困難であった。しかし、連続画像として見た場合には、流動様式を判別するには十分な画像が得られた。図より気泡は概ね 10mm 程度以下であり、形状は球形に近いものや楕円体の気泡などが観察された（気泡流）。図 5 に初期液高  $H_0$  が 14cm、見かけの気相流速  $j_g$  が  $1.15 \times 10^{-2} \text{m/s}$  における高速撮像例を示した。図より気泡は概ね 20～30mm 程度であり、形状は球形からかなり変形したキャップバブル（笠状気泡）であり、ジグザグに上昇していることが観察された（キャップバブル流）。

このように実験で観察された流動様式は、管内流としてみればすべて気泡流であるが、気泡形状としては球形気泡や楕円体気泡（気泡流）が主に観察された。表 1, 図 6, 7 に本実験における流動様式判別結果を示したが、気相流速が 2cm/s 以上になると流動様式は気泡流からキャップバブル流に遷移することが確認された。

Clift らによれば静止液中の単一気泡形状は図 8 に示したように、それぞれ次式で定義される Eötvös 数、Morton 数および Reynolds 数に依存する[1]。

$$Eo = \frac{g \Delta \rho l_e^2}{\sigma} \quad (1)$$

$$M = \frac{g \mu_f^4 \Delta \rho}{\rho_f^2 \sigma^3} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho_f d_e v_g}{\mu_f} \quad (3)$$

図中の白丸は単一ノズルを用いた実験による計測データであり、この流動条件は Clift 線図による wobbling 気泡とキャップバブルの境界領域に対応している。ただし、本実験条件で  $\log M = -13$  である。本実験により観察された気泡形状は変形したキャップバブルであり、高密度比気液二相流の気泡形状・寸法と上昇速度の関係は通常密度比の気液二相流とほぼ同じであることがわかった。

#### 3. 2 プール内ボイド率分布

図 9 にプール内二次元ボイド率分布の一例として初期液高が 29cm の場合の

計測結果を示した。気相流量が比較的低い場合には、幅方向 (x 方向) ボイド率分布は流れ方向 (z 方向) に対してほぼ一様であるが、気相流量が増加するに従って、ボイド率分布は z 方向に沿って変化し、x 方向中心にピークを有するようになる。これは気相流量の増加によりプール内に液相の循環流れが発生し、その流れに沿って x 方向の中心近傍で気泡同士が衝突して大気泡となるもののその気泡径が安定限界を越えているため、すぐに分裂、再分散されて管壁方向に移動することによると考えられる。なお、中性子ラジオグラフィにより計測したプール内平均ボイド率から式 (4) により得られたプール内液面高さ  $H$  と可視化により得られるプール内液面高さは ± 5 % 以内で一致した。

$$H = \frac{H_0}{1 - \alpha} \quad (4)$$

### 3. 3 ドリフトフラックス相関

計測された見かけの気相速度  $j_g$  とボイド率  $\alpha$  は式(5)で表されるドリフトフラックス式(8)により相関した。

$$v_g = \frac{j_g}{\alpha} = C_0(j_g + j_f) + V_{gj}, \quad \alpha = \frac{j_g}{C_0 j_g + V_{gj}} \quad (\because j_f = 0) \quad (5)$$

ここで  $v_g$ ,  $C_0$ ,  $j_f$ ,  $V_{gj}$  は、それぞれ、気相速度、分布パラメータ、見かけの液相速度、ボイド率荷重ドリフト速度である。分布パラメータ、ボイド率荷重ドリフト速度は次式で与えられる[3]。

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\rho_g / \rho_f} \quad \text{for rectangular duct} \quad (6)$$

$$V_{gj} = \sqrt{2} \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4} (1 - \alpha)^{1.75} \quad \text{for bubbly flow}$$

$$V_{gj} = \sqrt{2} \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4} \quad \text{for churn - turbulent flow} \quad (7)$$

$$V_{gj} = 0.35 \left( \frac{g \Delta \rho l_e}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad \text{for slug flow}$$

Kataoka-Ishii はプール中のドリフト速度として次式を与えている[2]。

$$V_{gj}^+ = V_{gj} / \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4} = 0.0019 D_H^* 0.809 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \quad \text{for } D_H^* \leq 30 \text{ and } N_{\mu f} \leq 2.2 \times 10^{-3}$$

$$V_{gj}^+ = 0.030 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \quad \text{for } D_H^* \geq 30 \text{ and } N_{\mu f} \leq 2.2 \times 10^{-3}$$

$$D_H^* = D_H / \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}, \quad N_{\mu f} \equiv \frac{\mu_f}{\left( \rho_f \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \right)^{1/2}}$$

(8)

図10～12に初期液高9, 14, 29cmの場合の見かけの気相速度のポイド率依存性をガス噴出ノズルからのz方向の位置をパラメータとして示した。図中には式(5)～(8)からの推算値も併せて示した。図よりポイド率が5%以上の領域ではノズル近傍を除いてz方向位置によらず見かけの気相速度の推算値はキャップバブルに対するドリフトフラックス式からの推算値と良好な一致を示している。ポイド率が5%以下の領域では見かけの気相速度の推算値はキャップバブルに対するドリフトフラックス式からの推算値よりも低くなり、気泡流に対するドリフトフラックス式の方が良い推算結果を与えていることがわかる。これは、5.4.1でも述べたように供給ガス流速の増加に伴って気泡形状は球形気泡から楕円体気泡、そして、 $j_g > 2 \text{ cm/s}$ で変形したキャップバブルへと遷移することから、この気泡形状の変化が気泡に働く抗力係数を減少させ、結果としてドリフト速度の増加をもたらしたことによると考えられる。図13に無次元ドリフト速度の無次元相当直径の依存性を示した。図中の白丸は高ポイド率域のデータから得られたドリフト速度データであり、空気-水系、蒸気-水系とほぼ同じ値となっている。同様の結果が分布パラメータに対しても得られたことから、気泡形状の遷移を考慮するとドリフトフラックス式は高密度比気液二相流にも適応可能であることがわかる。なお、初期液高9cm, 29cmの場合にもほぼ同様の結果が得られ、初期液高の流動特性に及ぼす影響は本実験範囲内では顕著ではなかった。

#### 4. SIMMER-IIIによる実験解析

##### 4.1 解析条件及び解析方法

SIMMER-IIIを用いて本実験の解析を行った。今年度での解析の対象とした試験は初期液高さ9cmの条件で見かけの気相速度を変化させた試験である。解析体系は幅10cm、高さ30cmの矩形の試験容器を想定し、2次元直交座標径で縦横1cmの計算メッシュを用いた。計算体系の上部境界は大気圧一定とし、下部はガス注入ノズルの存在する中心部8cmの領域のみ、所定の見かけの気相流速

で窒素が流入するように設定した。窒素の吹き込み時の温度は実験における測定値から鉛-ビスマスと等しい 200℃とした。下部境界の圧力条件は鉛-ビスマスの水頭圧に等しく設定した。計算の初期状態は単相の鉛-ビスマスのプールであるが、計算開始後ほぼ数秒で定常状態に達するため、計算は 10s まで継続した後、プール全体の平均ボイド率を 5s から 10s までの時間平均として求めた。

また、体系全体で平均した場合のボイド率と見かけの気相流速の関係に対するプール内の 2 次元流動の影響を検討するため、水平方向を 1 メッシュとした 1 次元体系における解析も実施した。

#### 4. 2 気液間抵抗モデル

現在の SIMMER-III は気液間運動量交換を、Ishii [4]による抵抗係数モデルを用いて求めている。このモデルでは、本実験で形成した鉛-ビスマスの二相流は“distorted particle” flow に相当し、楕円状に変形した気泡が左右に揺れ動きながら上昇する流動状況であると見なされ、以下の抵抗係数が用いられる。

$$C_D = \frac{4}{3}r_d \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\sigma}} \left\{ \frac{1 + 17.67[f(\alpha_d)]^{6/7}}{18.67f(\alpha_d)} \right\}^2, \quad f(\alpha_d) = \sqrt{1 - \alpha_d} \left( \frac{\mu_c}{\mu_m} \right) \quad (9)$$

この式は本質的には式(7)の bubbly flow のドリフトフラックス関係式を二相の無限媒体中の抵抗係数に書き換えた式であり、両式ともほぼ同じ気液間の抵抗を与える。

一方、本研究での中性子ラジオグラフィによる観察から、見かけの気相流量が 2.0cm/s 以上では、気泡形状は sheprical cap 形状となることが見いだされている。Ishii-Kocamustafaogullari は spherical cap 気泡に対するドリフト速度として次式を与えている[5]。

$$V_{js} = 0.54 \sqrt{g D_h \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \right)} \quad \text{for } D_h^* \leq 30 \quad (10)$$

また、プール体系または大口径管における 2 次元的な流動の影響を考慮したドリフト速度は Kataoka-Ishii によって(8)式が与えられている。

本解析ではこれらの関係式を用いた解析結果を実験結果と比較することにより、プール体系における高密度比気液二相流に適用すべき関係式を決定することを目的とする。

#### 4. 3 解析ケース

解析ケースとしては気液間の運動量交換関数として(9)式を用いた S3-B ケース、(10)式を用いた S3-C ケース、及び(8)式を用いた S3-P ケースを実施した。また、前述したように 1 次元体系での解析も実施しており、これらはそれぞれ、S3-1D-B、S3-1D-C、及び S3-1D-P ケースとした。

### 4. 3 解析結果

図14に2次元体系における典型的なボイド分布の発達挙動を示す。このケースの見かけの気相流量は  $0.33\text{cm/s}$  である。解析開始直後は中心軸に対して左右対称の流動状況となるが、数秒で左右に蛇行するような流動状況となり、ボイド率分布は軸方向に対しても不均一となって時間的にも変動するようになる。これは実験で中性子ラジオグラフィによって観測された流動状況と定性的に一致する挙動である。これらの時間的な変動が実験結果と定量的に一致するかどうかを今後検討していく必要がある。なお、プール内の2次元的な液体の流動はボイド率の高い中心部分において上向きに流れるため、いわば“channeling”の様な効果によって系全体で平均した場合にみかけの気液間抵抗を減少される方向に働くと予想される。

プール内の平均ボイド率と見かけの気相速度の関係をプロットした結果を図15に示す。実験結果との比較からまず、実験で spherical cap 気泡が観察された条件では、やはり (10)式を用いた S3-C ケースが実験結果に近い結果を与えることがわかる。2次元体系による解析では2次元的な循環流の影響を含んだ形で系全体の平均ボイド率が求められるため、2次元的な流動の影響を定式化の中に含んだ(8)式による S3-P ケースは2次元的な流動の影響を二重に考慮することになる。従って、S3-P ケースでは同じ見かけの気相流速に対してボイド率が小さめになることが解析結果に示されている。ただし、その違いは実験のデータ点のばらつきの範囲内であると言える。

一方、distorted particle に相当する(9)式を用いた S3-B ケースでは気液間の抵抗を過大に評価するため、少なくとも実験で spherical cap 気泡となっている見かけの気相流速が  $2.0\text{cm/s}$  以上の領域ではボイド率を過大に評価することがわかる。一方、ボイド率が5%以下となる球形気泡、もしくは変形気泡の領域では S3-B ケースが実験に近い結果を与える。

1次元体系による解析では、プール内の2次元的な流動が考慮されないため、S3-1D-C ケースは実験よりも大きめのボイド率を与え、S3-1D-P ケースは実験結果とほぼ一致する結果となる。

以上の検討から、気泡形状が spherical cap となる状況での気液間運動量交換関数としては(8)式を用いることが適当であると考えられる。これは、2次元体系では2次元流動の影響を二重に考慮することになるが、その影響は小さく、また、1次元体系ではプール体系における気液間の抵抗を適切に考慮することができるためである。

### 5. まとめ

高速炉シビアアクシデント時の高密度比二相プール流動特性に関する基礎研究として、中性子ラジオグラフィを用いた窒素ガス-鉛ビスマス溶融金属二相流の可視化・計測実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 供給気相流速が 2cm/s 以下では球形気泡、楕円体気泡が、それ以上の気相流速では変形したキャップバブルが観察された。高密度比気液二相流の気泡形状・寸法と上昇速度の関係は通常密度比の気液二相流とほぼ同じであった。
- (2) プール内に液相の循環流れが生じていることがわかった。この流れに沿って気泡は運動し、気泡の合一、再分散を生じることがわかった。
- (3) 見かけの気相速度とボイド率の関係は、プール内気泡の形状を考慮することによって既存のドリフトフラックス式で表すことが可能であることがわかった。見かけの気相速度とボイド率の関係に及ぼす初期液高の影響は本実験範囲内では顕著ではなかった。

さらに、実験結果にもとづいて SIMMER-III による実験解析を実施し、以下の結果を得た。

- (1) SIMMER-III によって得られたプール内のボイド率分布の時間的変動挙動は定性的に実験結果と
- (2) 気泡形状を考慮した抵抗係数モデルを用いることにより、実験で得られたボイド率と見かけの気相速度の関係を良好に再現できる。
- (3) 気泡が spherical cap 形状を取る場合には、Kataoka-Ishii によるプール体系でのドリフト速度式を用いることが適切と考えられる。

#### 今後の予定

高速炉シビアアクシデント時の高密度比二相プール流動特性に関する基礎研究として、以下の研究を行う予定である。

- (1) 中性子ラジオグラフィ高速度撮像法により得られた画像から気泡径、気泡上昇速度の計測を行い、気泡の抗力係数を求め、抗力係数に及ぼす密度比の影響を検討する。
- (2) ダウンカマーを設置した矩形管試験部を用いて、平成 9 年度と同様の実験を行い、流動特性に及ぼす二次流れの影響を検討する。
- (3) 金カドミウム合金トレーサーを用い、液相流れ場を可視化、計測し基礎データとする。
- (4) 他の条件における実験の解析を進めて今回の結論の補強を行うとともに、プール内の動的なボイド分布変化の比較検討を行う。

本研究における中性子ラジオグラフィ実験は、日本原子力研究所 J R R - 3 M を利用して実施したものであり、同研究所研究炉技術開発室松林政仁氏、安藤均氏、京都大学大学院エネルギー科学研究科大学院生山本晃弘君の協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

## 使用記号

$C$	gain
$C_0$	distribution parameter
$C_D$	drag coefficient of bubble in two-phase media
$C_p$	specific heat
$d$	distance
$d_e$	hydraulic equivalent diameter
$D$	diameter of an entrance aperture
$D_H$	hydraulic diameter of vessel
$D_H^*$	dimensionless hydraulic diameter of vessel, $D_H / \sqrt{\sigma / g \Delta \rho}$
$E$	measurement error
$E'$	measurement error
$Eo$	Eötvös number, $g \Delta \rho d_e / \sigma$
$F$	neutron fluence per pixel area in the image sensor
$g$	gravitational acceleration
$G$	gray level of an image
$\tilde{G}^\circ$	normalized gray level or neutron transmittance
$G_0$	offset term of the gray level ( $G_S + G_D$ )
$G_D$	dark current component in the gray level
$G_S$	scattered neutron component in the gray level of an image
$H$	liquid level
$H_0$	liquid level without void (collapsed level)
$H_{NR}$	calculated liquid level using measured void fraction
$H_{\text{observation}}$	observed liquid level
$j$	mixture volumetric flux
$j_f$	superficial liquid velocity
$j_g$	superficial gas velocity
$j_g^*$	dimensionless superficial gas velocity $j_g / (\sigma g \Delta \rho / \rho_g)^{0.25}$

$L$	distance from entrance aperture to image plane
$L'$	distance between the test section and the converter
$M$	Morton number, $g\mu_f^4\Delta\rho/\rho_f^2\sigma^3$
$N_{\mu f}$	viscosity number, $\mu_f/(\rho_f\sigma\sqrt{\sigma/g\Delta\rho})^{0.5}$
$Pr$	Prandtl number
$r_b$	bubble radius
$R$	spatial resolution
$Re$	Reynolds number, $\rho_f d_e v_g / \mu_f$
$t$	time
$T$	temperature
$U_g$	unsharpness due to unparallelness of an incident neutron beam
$v_g$	gas velocity
$v_r$	bubble velocity
$V_{gj}$	drift velocity
$V_{gj}^+$	dimensionless drift velocity, $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle / (\sigma g \Delta \rho / \rho_f^2)^{0.25}$
$\langle\langle V_{gj}^+ \rangle\rangle$	dimensionless drift velocity, $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle / (\sigma g \Delta \rho / \rho_f^2)^{0.25}$
$w$	object width
$x$	spanwise direction
$z$	axial distance

### Greek Symbols

$\alpha$	void fraction
$\langle\alpha\rangle$	cross sectional average void fraction
$\langle\alpha\rangle_p$	area average void fraction in a pool
$\Delta t$	exposure time
$\gamma$	$\gamma$ -value of a camera
$\delta$	thickness of the material along the neutron path
$\Sigma$	total macroscopic cross section
$\phi_p$	penetrated neutron flux
$\phi_s$	scattered neutron flux falling on the converter
$\phi_{SM}$	scattered neutron flux in the object
$\phi_{SS}$	scattered neutron flux in the surrounding shields
$\phi_{th}$	incident neutron flux
$\lambda$	thermal conductivity



$\mu_f$	viscosity of liquid
$\nu$	kinetic viscosity
$\rho_f$	density of liquid
$\rho_g$	density of gas
$\Delta\rho$	density difference between gas and liquid
$\sigma$	surface tension

### Subscripts

A	neutron absorber
exp	experimental value
G	gas single-phase
L	liquid single-phase
ML	multiphase flow
literature	value in literature
M	two-phase mixture
ML	liquid-phase in the two-phase mixture
T	test section wall
W	water

### 参考文献

- [1] Clift, R, Grace, J. R., and Weber, M. E., *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, pp.23-28 (1978).
- [2] Kataoka, I., and Ishii, M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30**, pp.1927-1939 (1987).
- [3] Ishii, M., and Chawla, T. C., *ANL Report*, ANL-79-105 (1979).
- [4] Ishii, M., and Zuber, N., *AIChE Journal*, **25**, pp.843-855 (1979).
- [5] Ishii, M. and Kocamustafaoguralli, G., "Maximum fluid particle size for bubbles and drops," Proc. "Fundamental Aspects of Gas-Liquid Flow," FED-vol.29, p.99, Miami Beach, Florida, 17-22 Nov. (1985).

表 1 実験条件と結果(1)

Initial Liquid level $H_0$ [m]	Superficial Gas Velocity $\langle j_g \rangle$ [m/s]	Average Void Fraction in a Pool $\langle \alpha \rangle_p$ [-]	Gas Velocity $\langle v_g \rangle$ [m/s]	Flow Regime Observed with High-Speed Video
0.09	0.00	0.000	-	-
0.09	$1.31 \times 10^{-3}$	0.012	$1.07 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.09	$2.63 \times 10^{-3}$	0.033	$7.84 \times 10^{-2}$	Bubbly Flow
0.09	$5.28 \times 10^{-3}$	0.033	$1.58 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.09	$6.60 \times 10^{-3}$	0.027	$2.47 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.09	$1.10 \times 10^{-2}$	0.020	$5.39 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.09	$1.33 \times 10^{-2}$	0.036	$3.74 \times 10^{-1}$	N/A
0.09	$1.54 \times 10^{-2}$	0.045	$3.41 \times 10^{-1}$	N/A
0.09	$1.77 \times 10^{-2}$	0.027	$6.50 \times 10^{-1}$	Transient
0.09	$1.99 \times 10^{-2}$	0.029	$6.88 \times 10^{-1}$	N/A
0.09	$2.21 \times 10^{-2}$	0.051	$4.32 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$2.65 \times 10^{-2}$	0.037	$7.26 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$3.32 \times 10^{-2}$	0.070	$4.71 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$3.99 \times 10^{-2}$	0.082	$4.88 \times 10^{-1}$	N/A
0.09	$4.43 \times 10^{-2}$	0.088	$5.03 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$6.87 \times 10^{-2}$	0.097	$7.11 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$9.22 \times 10^{-2}$	0.146	$6.34 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$1.18 \times 10^{-1}$	0.169	$6.98 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.09	$2.75 \times 10^{-1}$	0.304	$9.06 \times 10^{-1}$	N/A
0.14	0.00	0.000	-	-
0.14	$1.38 \times 10^{-3}$	0.018	$7.60 \times 10^{-2}$	N/A
0.14	$2.76 \times 10^{-3}$	0.030	$9.21 \times 10^{-2}$	N/A
0.14	$5.53 \times 10^{-3}$	0.025	$2.21 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.14	$6.92 \times 10^{-3}$	0.046	$1.49 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.14	$1.10 \times 10^{-2}$	0.035	$3.14 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.14	$1.32 \times 10^{-2}$	0.043	$3.07 \times 10^{-1}$	Bubbly Flow
0.14	$1.54 \times 10^{-2}$	0.036	$4.30 \times 10^{-1}$	N/A
0.14	$1.76 \times 10^{-2}$	0.053	$3.31 \times 10^{-1}$	Transient
0.14	$1.97 \times 10^{-2}$	0.042	$4.75 \times 10^{-1}$	N/A
0.14	$2.19 \times 10^{-2}$	0.045	$4.87 \times 10^{-1}$	Transient
0.14	$2.63 \times 10^{-2}$	0.069	$3.82 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$3.29 \times 10^{-2}$	0.063	$5.24 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$3.96 \times 10^{-2}$	0.073	$5.44 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$4.39 \times 10^{-2}$	0.096	$4.59 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$6.62 \times 10^{-2}$	0.123	$5.37 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$9.02 \times 10^{-2}$	0.136	$6.64 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$1.15 \times 10^{-1}$	0.173	$6.67 \times 10^{-1}$	Cap Bubbly Flow
0.14	$2.81 \times 10^{-1}$	0.314	$8.97 \times 10^{-1}$	N/A

表1 实验条件与结果(2)

Initial Liquid level $H_0$ [m]	Superficial Gas Velocity $\langle J_g \rangle$ [m/s]	Average Void Fraction in a Pool $\langle \alpha \rangle_p$ [-]	Gas Velocity $\langle v_g \rangle$ [m/s]	Flow Regime Observed with High-Speed Video
0.29	0.00	-	-	-
0.29	$1.22 \times 10^{-3}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$2.45 \times 10^{-3}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$4.92 \times 10^{-3}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$6.14 \times 10^{-3}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$1.02 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$1.23 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$1.44 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$1.65 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$1.85 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$2.05 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$2.46 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$3.07 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$3.70 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$4.09 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$6.22 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$8.36 \times 10^{-2}$	N/A	N/A	N/A
0.29	$1.06 \times 10^{-1}$	N/A	N/A	N/A

\*N/A: not available

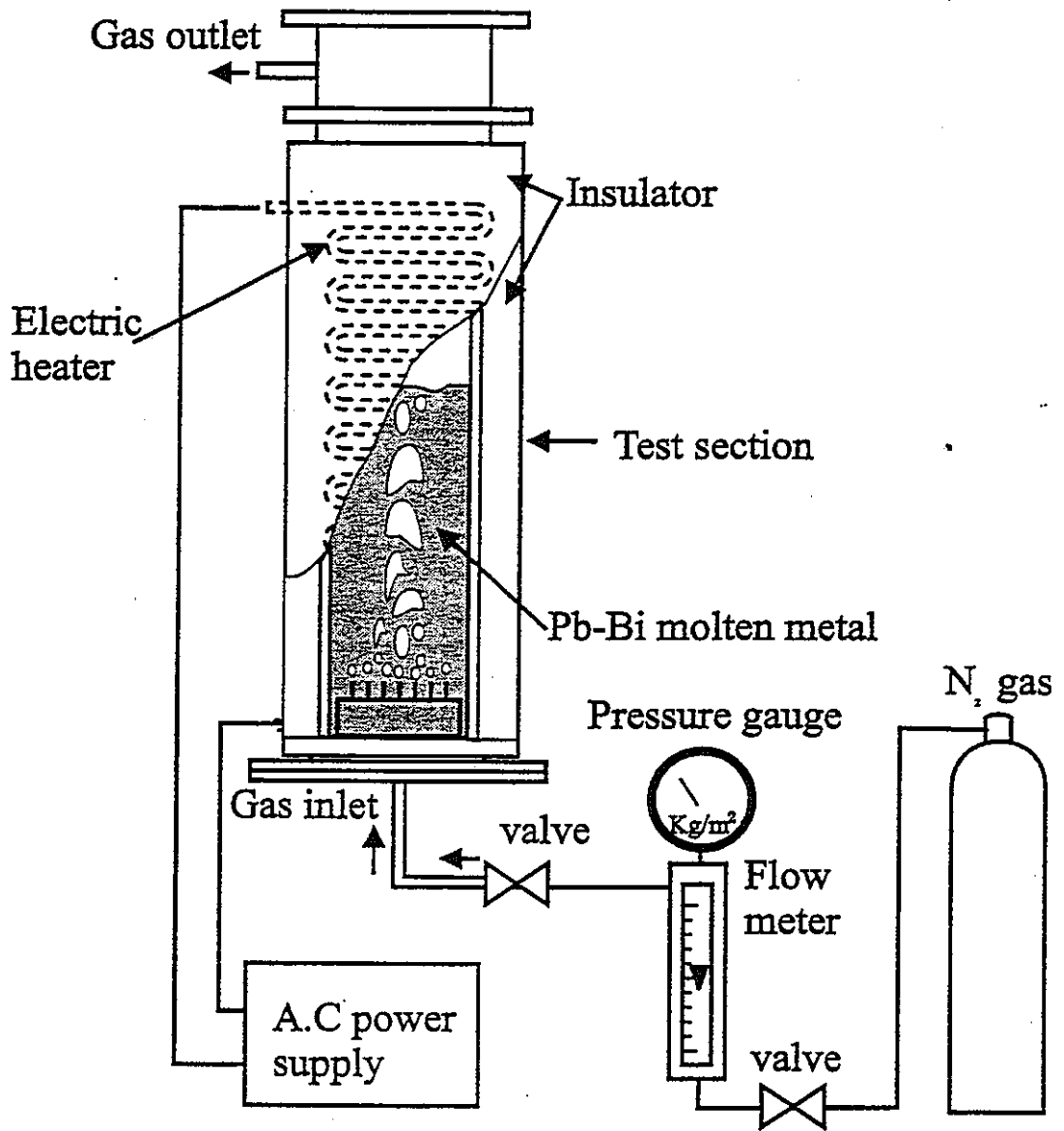


图1 实验装置

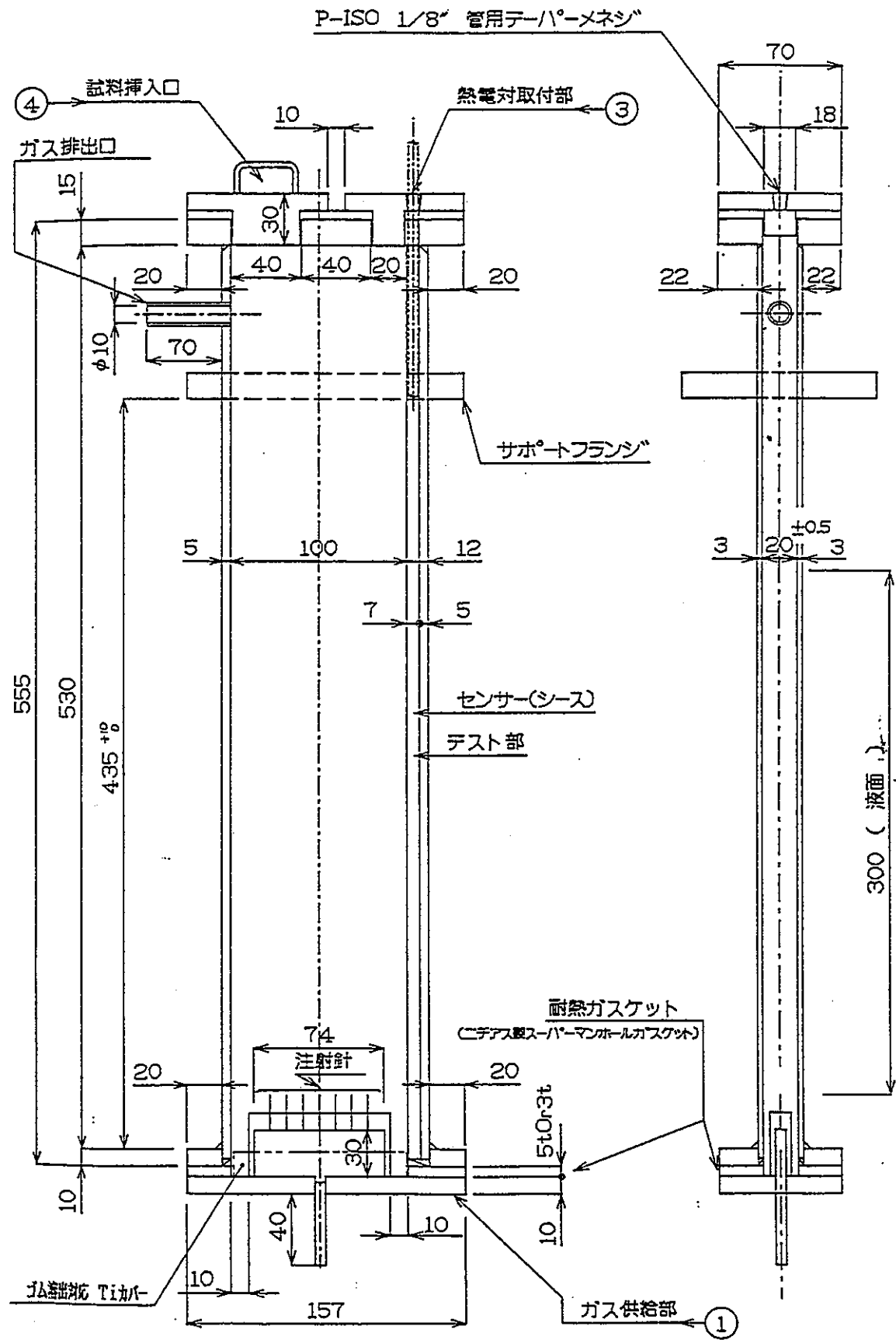
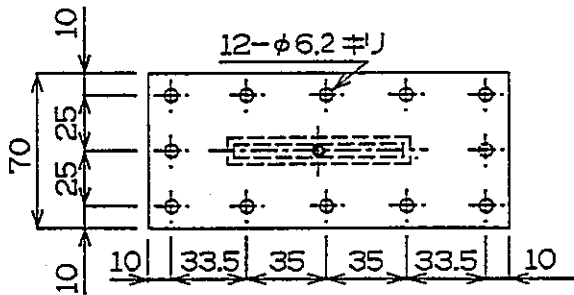
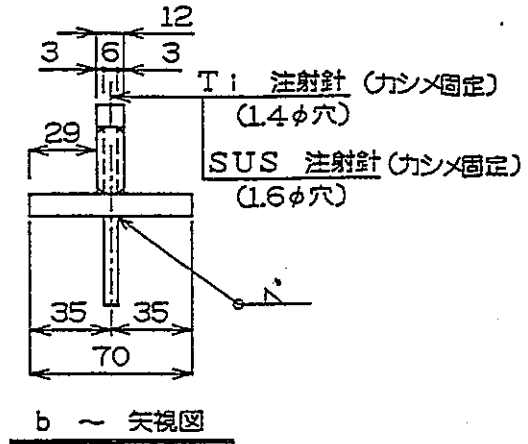
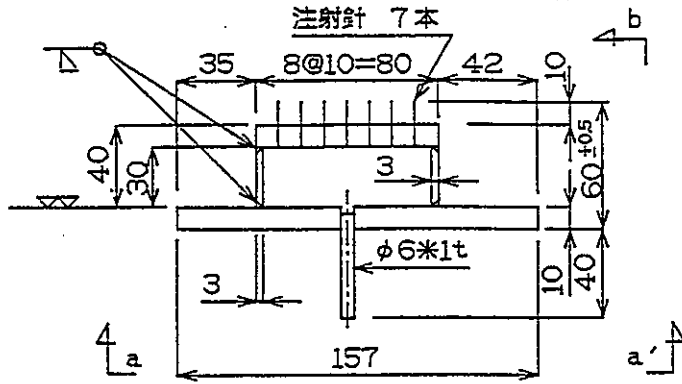


図2 試験体部

ガス供給部①詳細

Ti製注射針φ1.3 × 0.3 使用-2set製作  
 SUS製注射針φ1.5 × 0.5 使用-2set製作  
 (φ2 × 0.5t 材よりスウェーシング)



a-a' 矢視図

図3 ガス暖出部

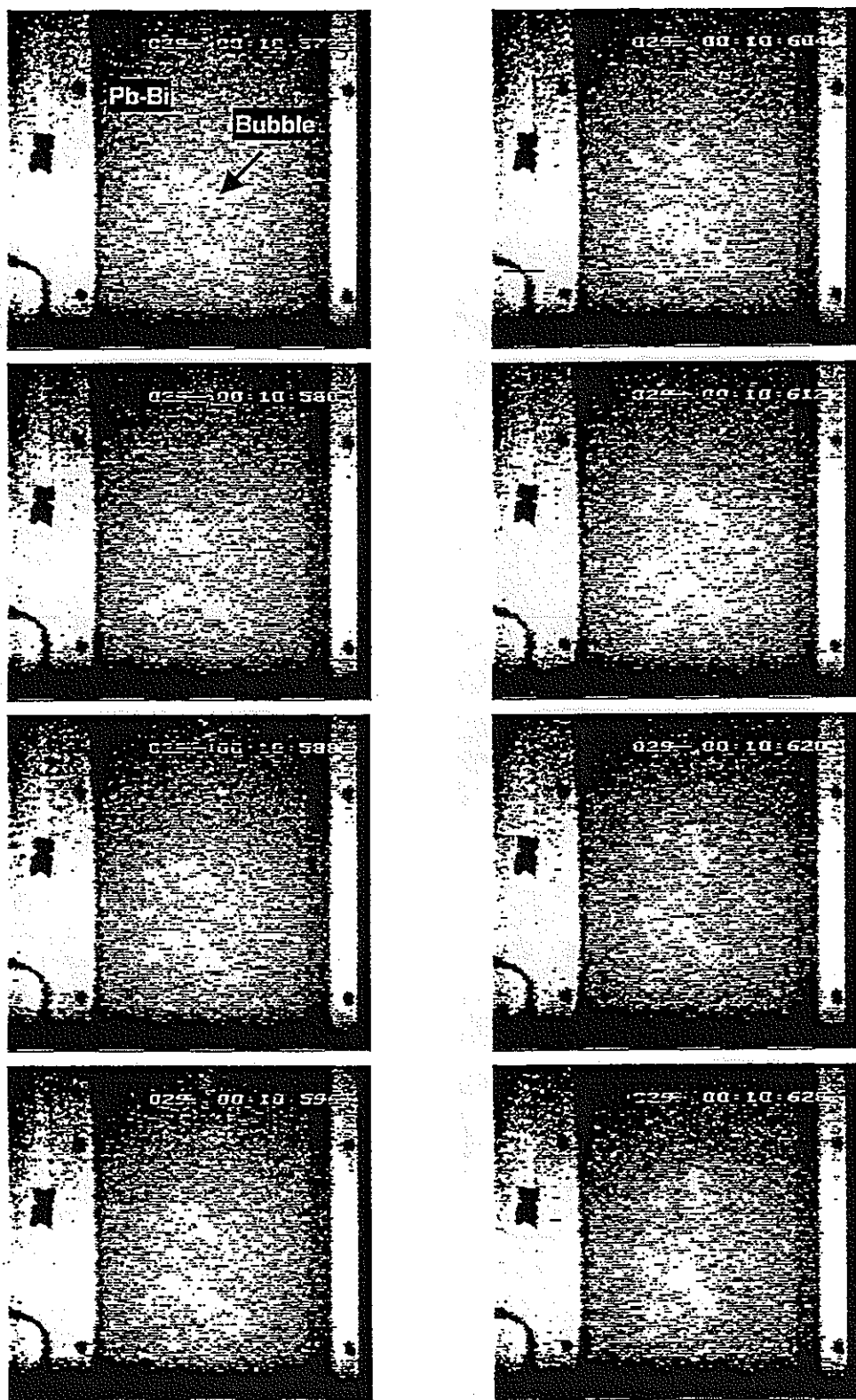


图4 气泡在合金中的可视化序列(c)

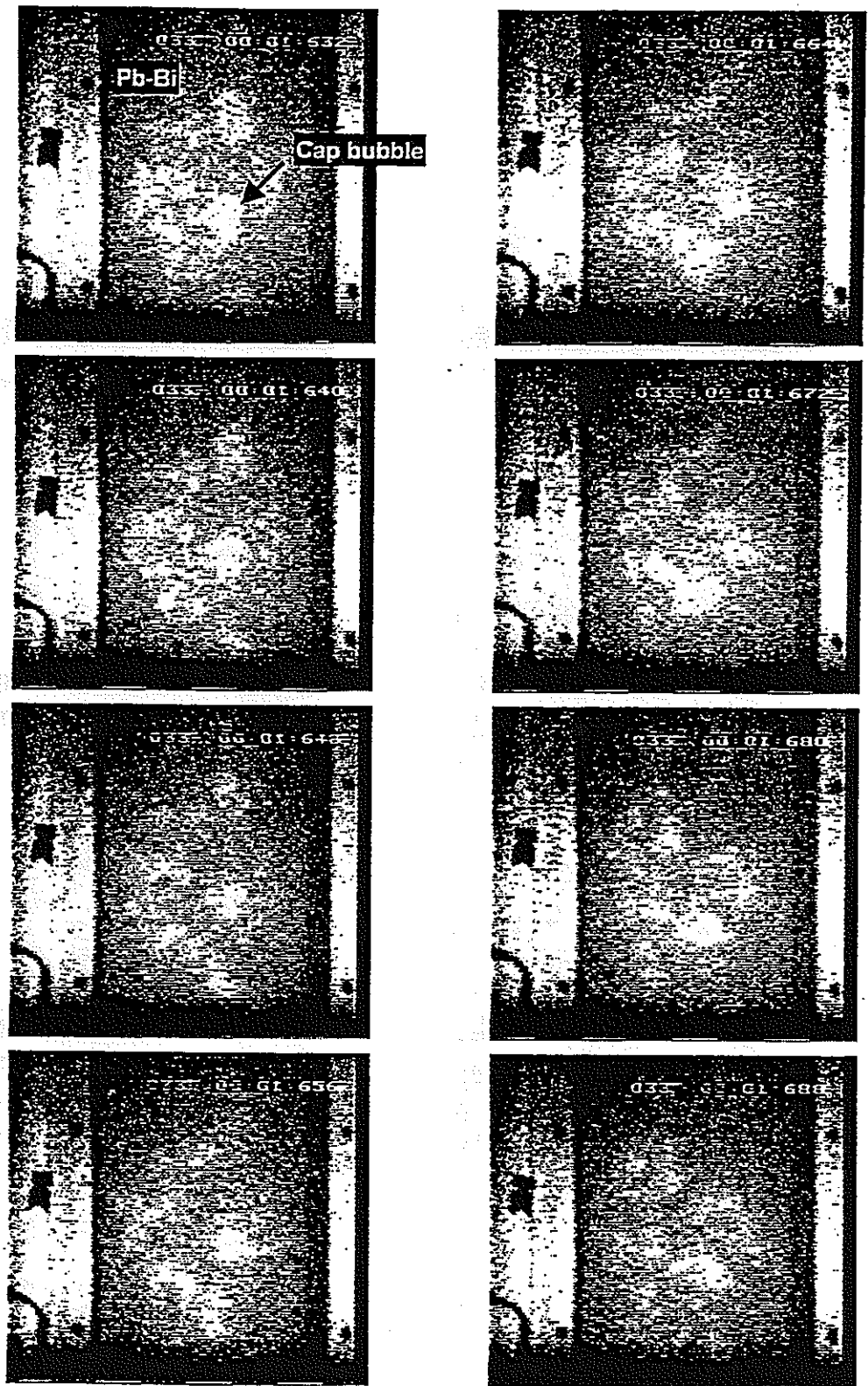


圖5 可視比例(2)



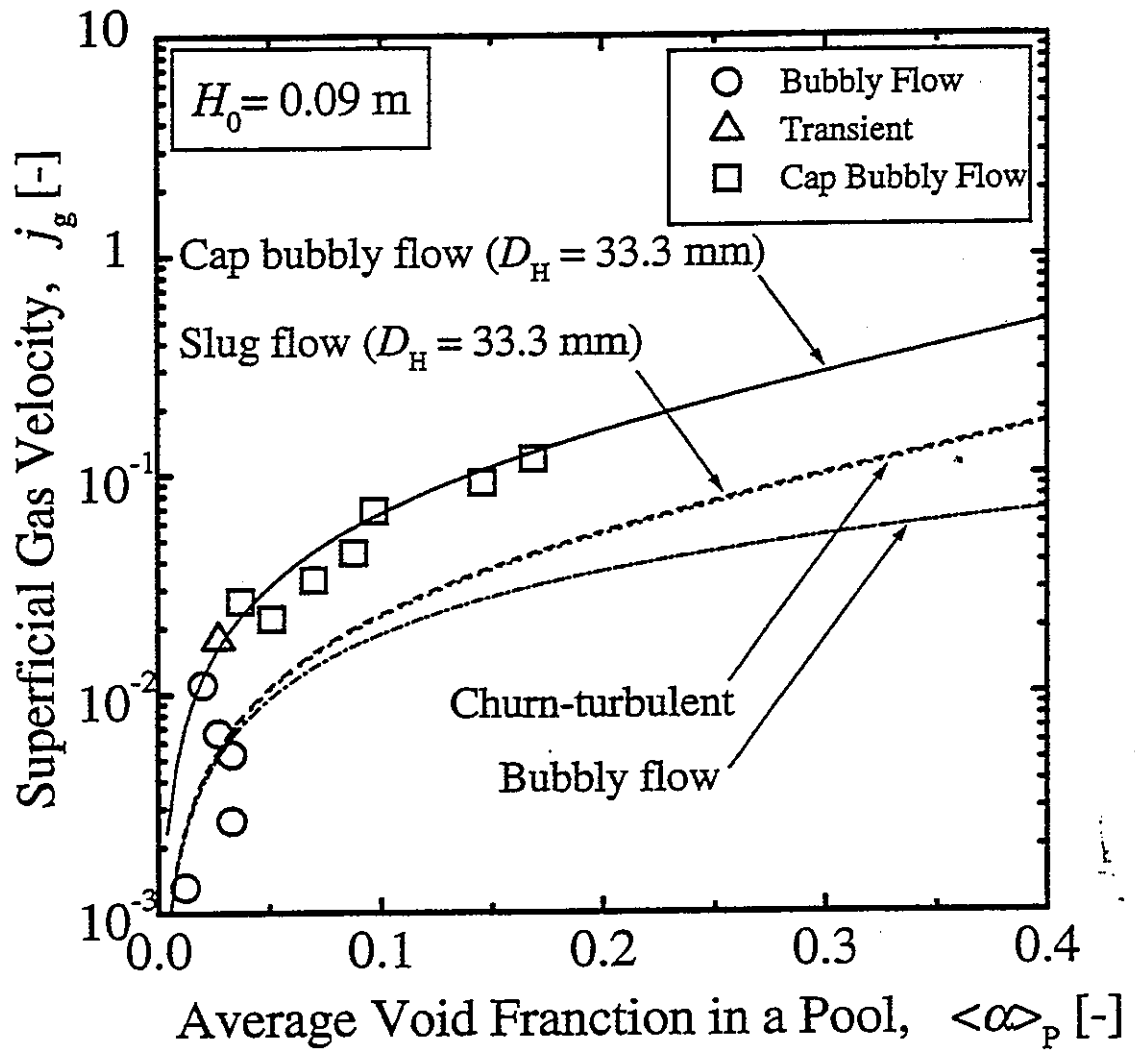


图6 实验结果(1)

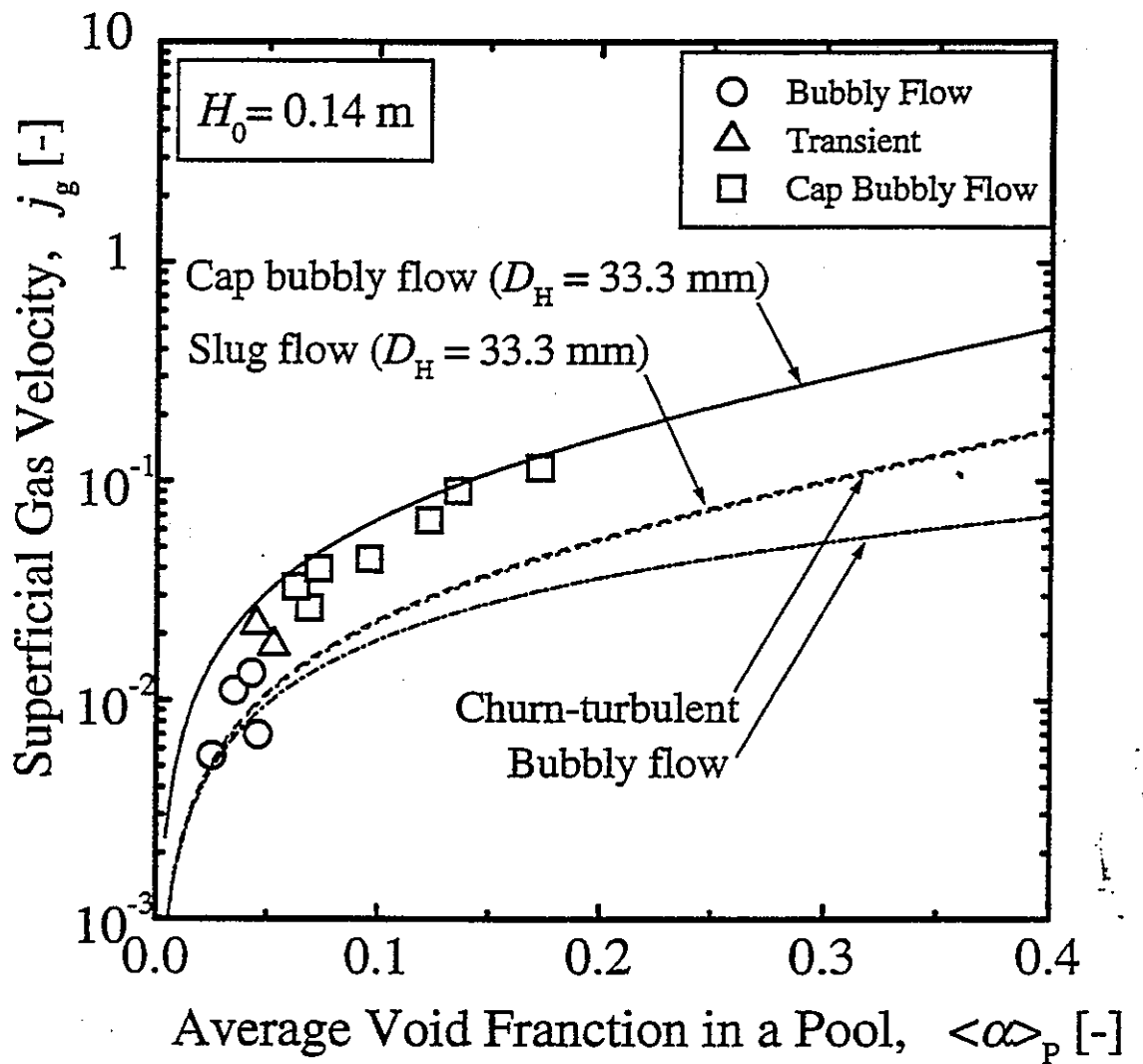


图7 实验结果(2)

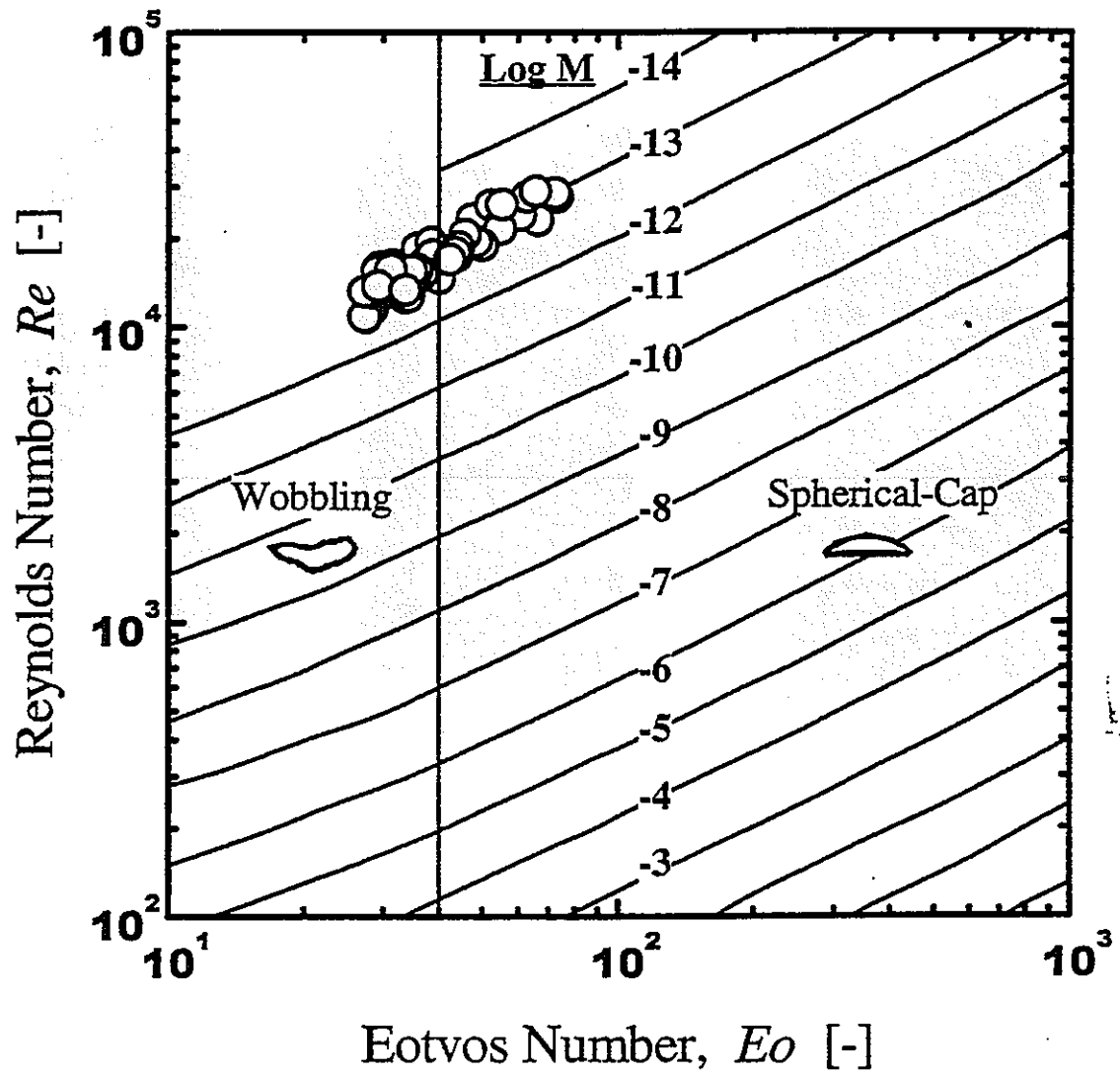
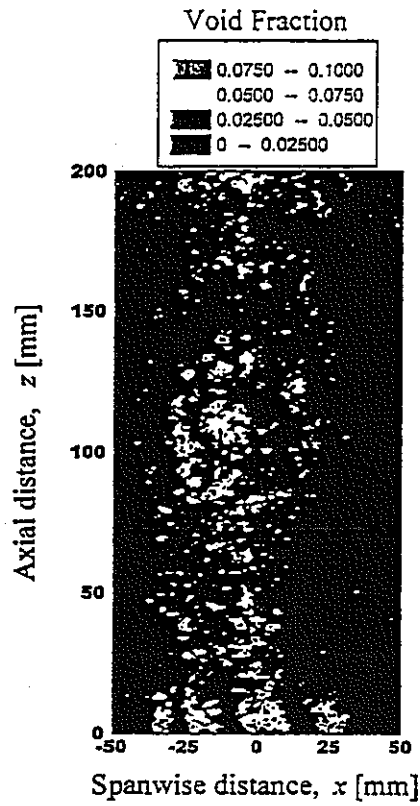
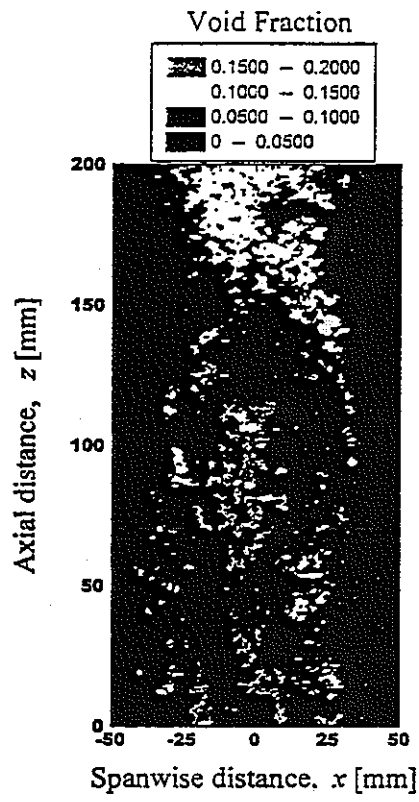


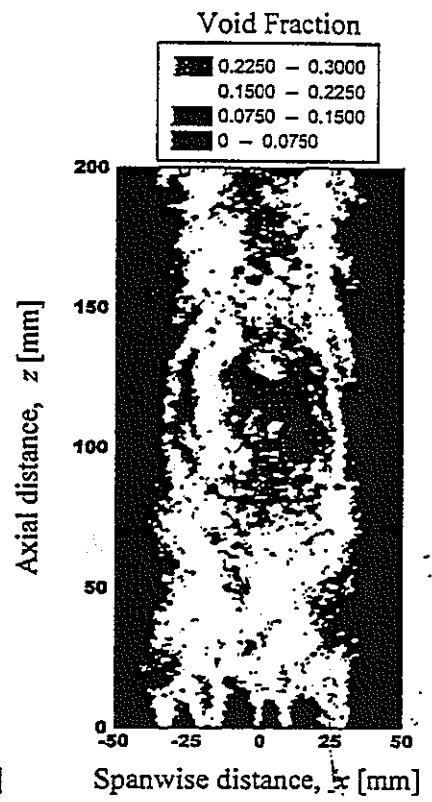
图8 气泡形状转移图



(a)  $j_g = 1.02$  cm/s



(b)  $j_g = 3.70$  cm/s



(c)  $j_g = 10.6$  cm/s

図9 ノズル内ボイド率分布

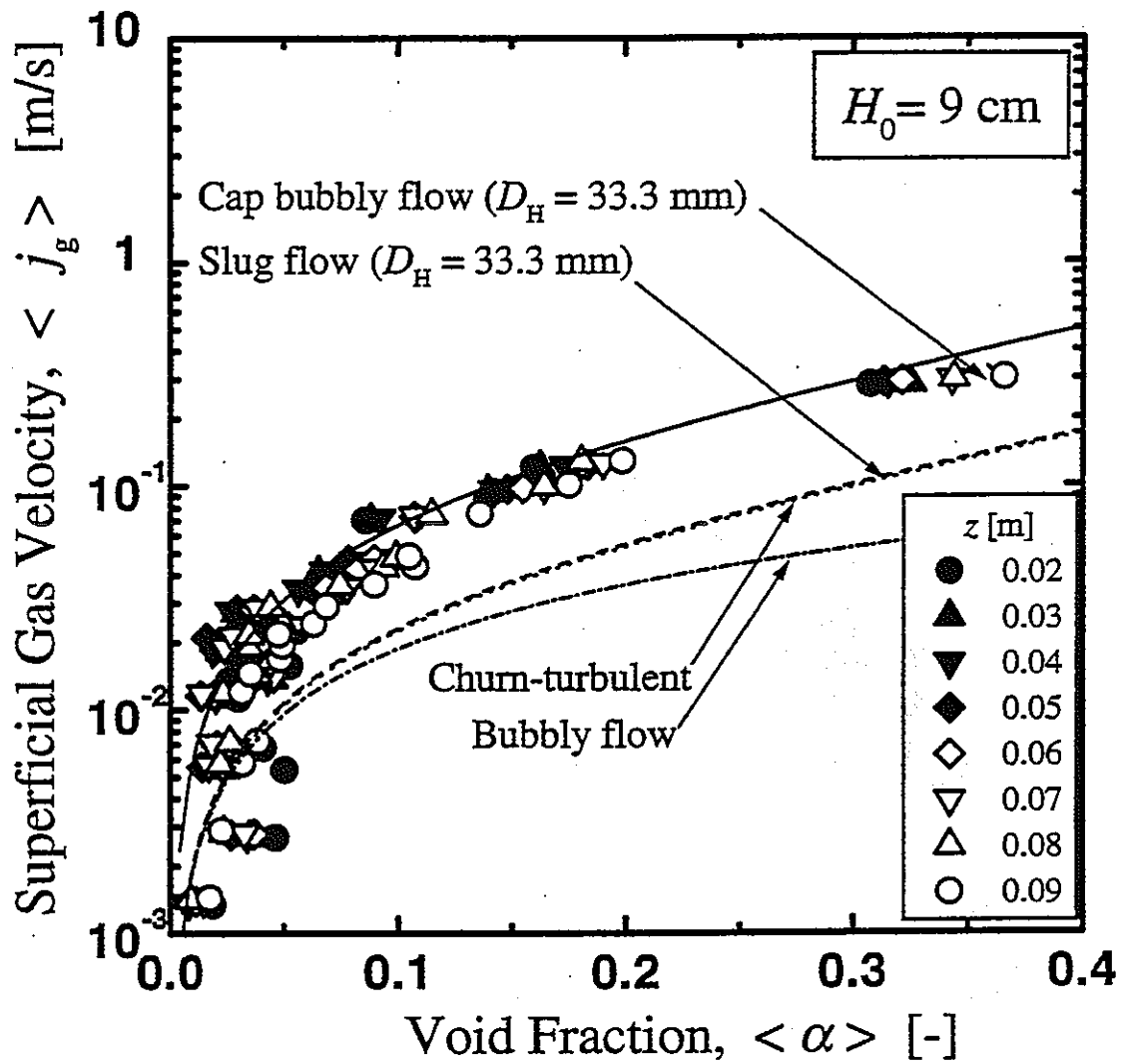


Fig 10 Variation of  $\langle j_g \rangle$  with  $\langle \alpha \rangle$  for various axial distance ( $H_0 = 0.09\text{ m}$ )

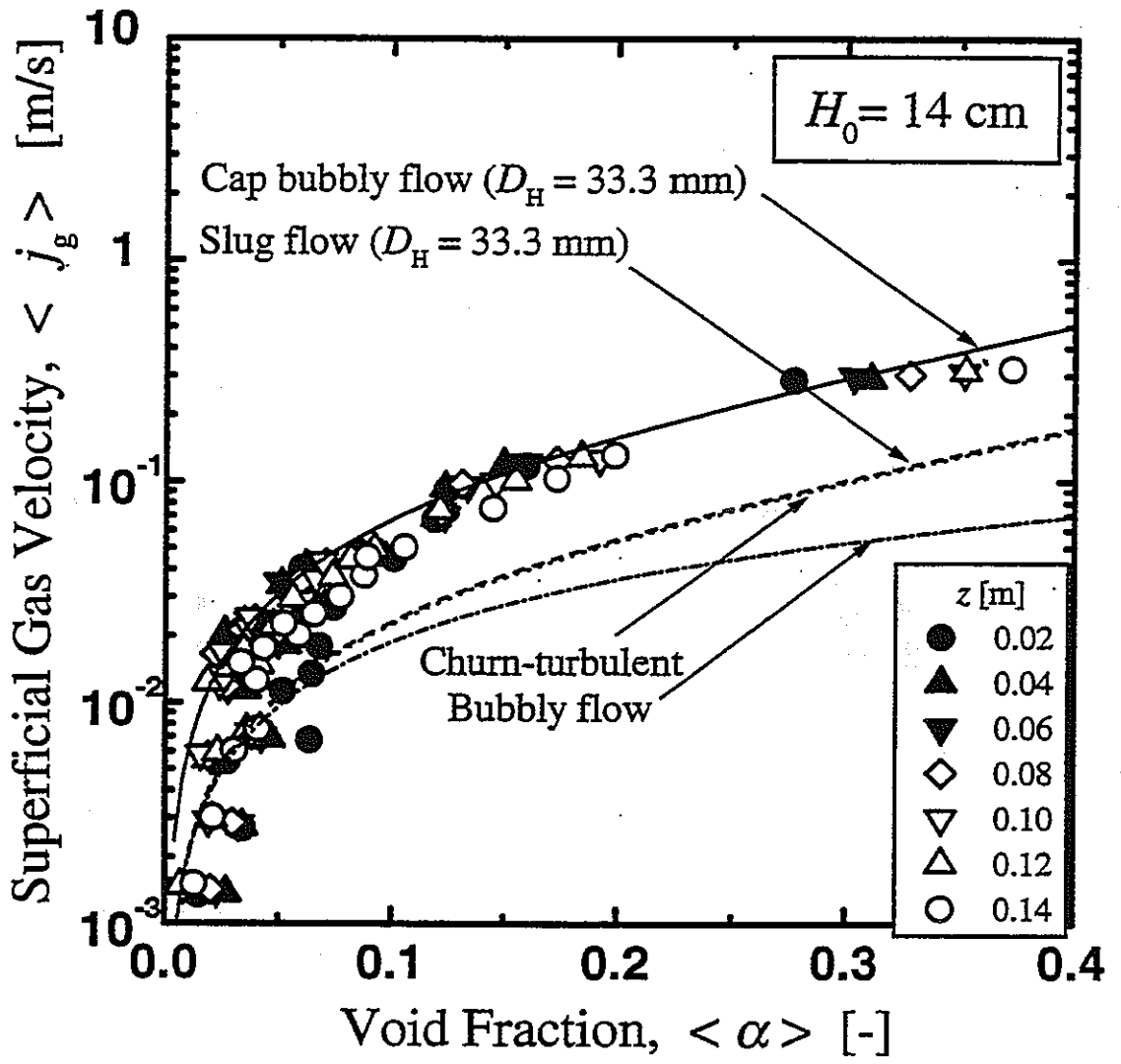


図11 同 ( $H_0 = 0.14$  m)

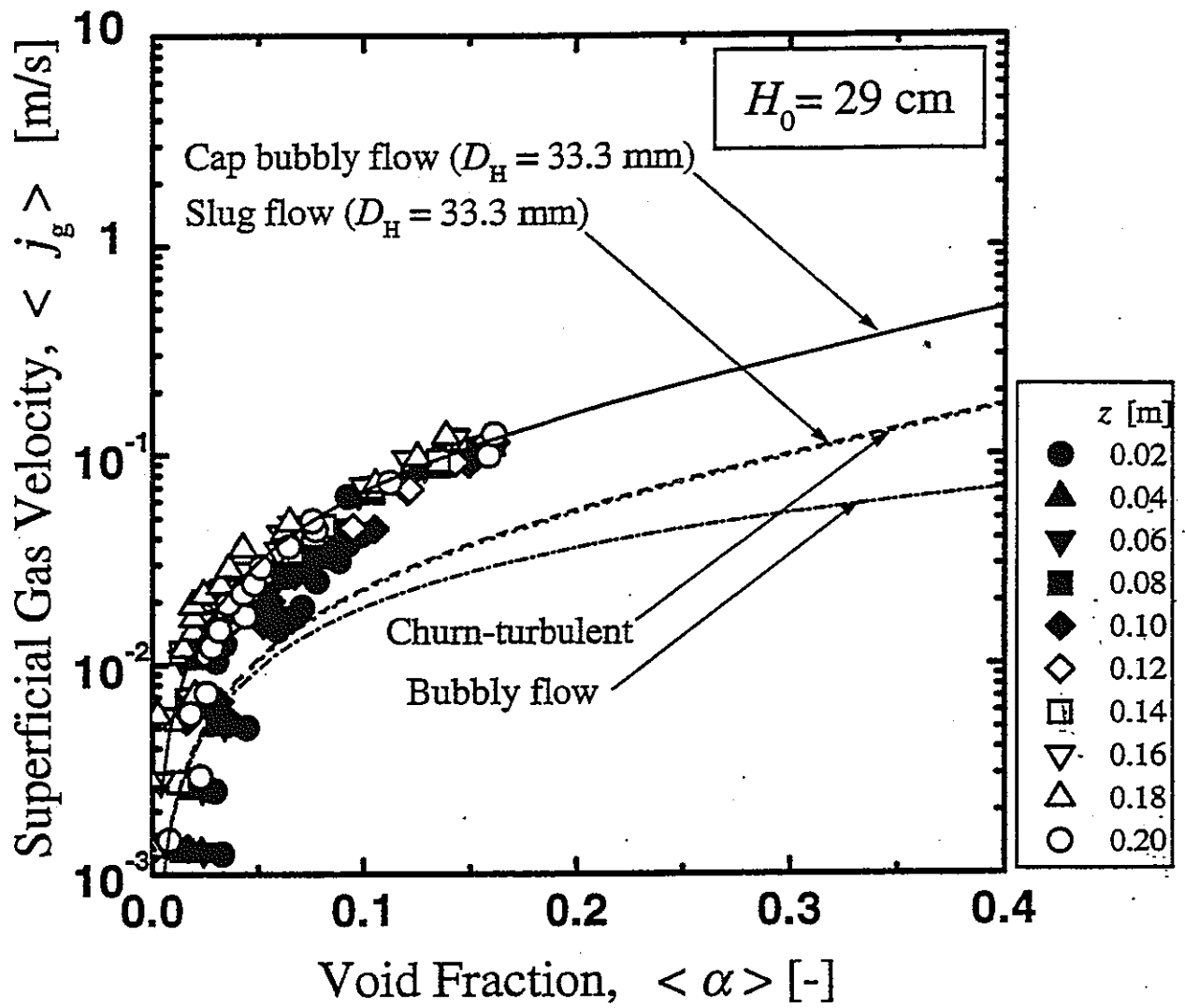


図12 同 ( $H_0 = 0.29 \text{ m}$ )

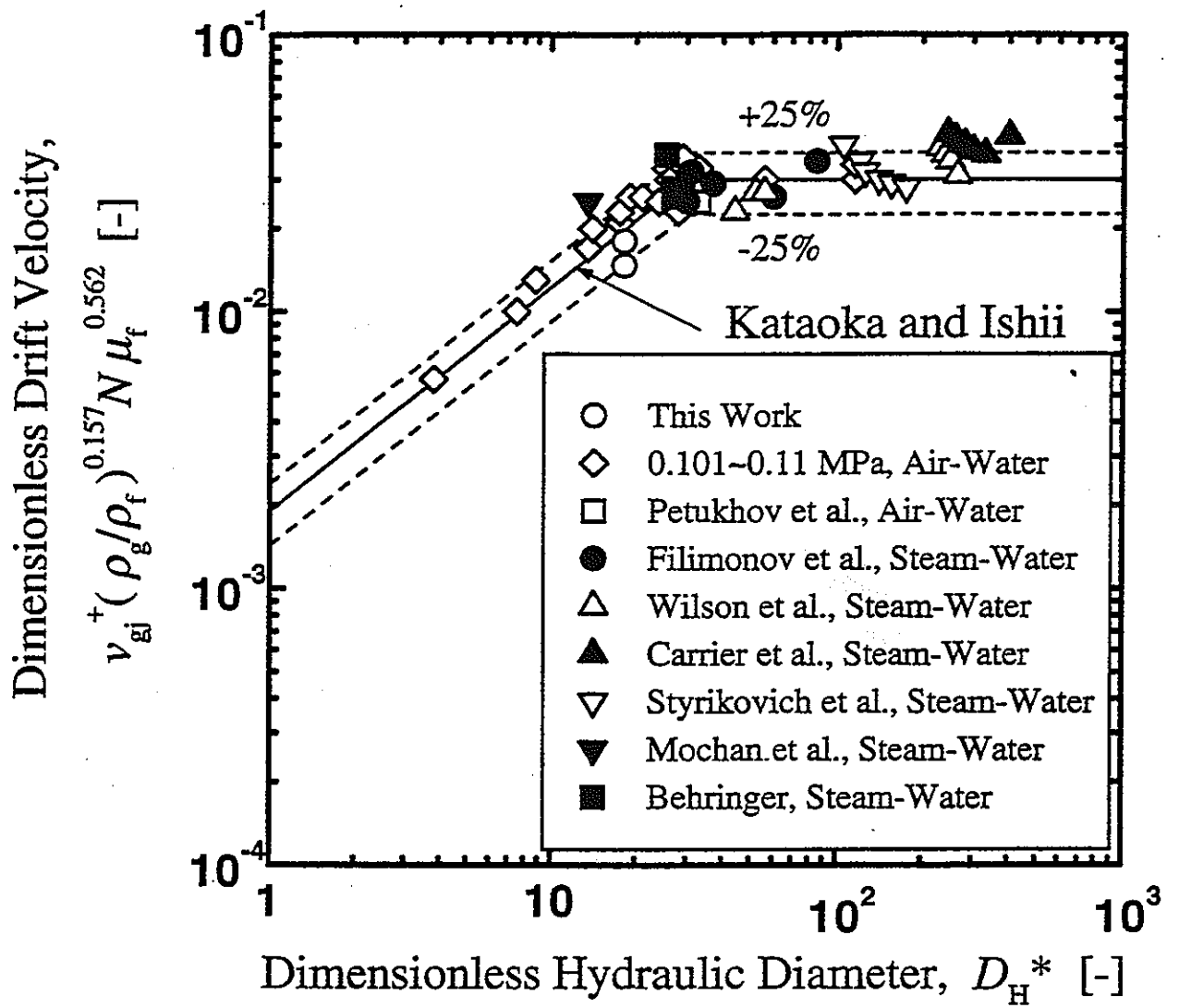


図13 フール中のドリフト速度の  $D_H$  に対する変化



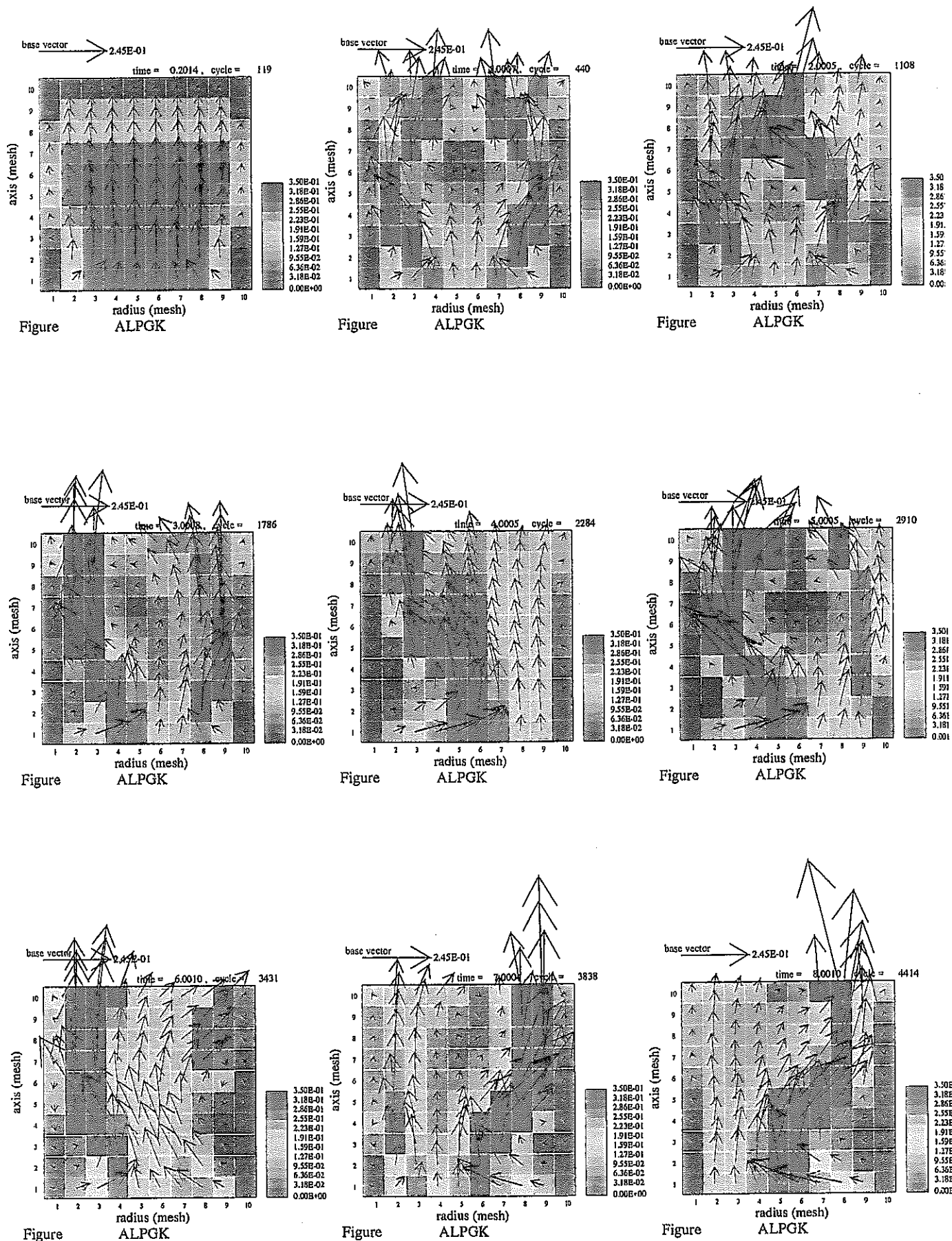


図14 SIMMER-Ⅱにおける作率分布の時間変化

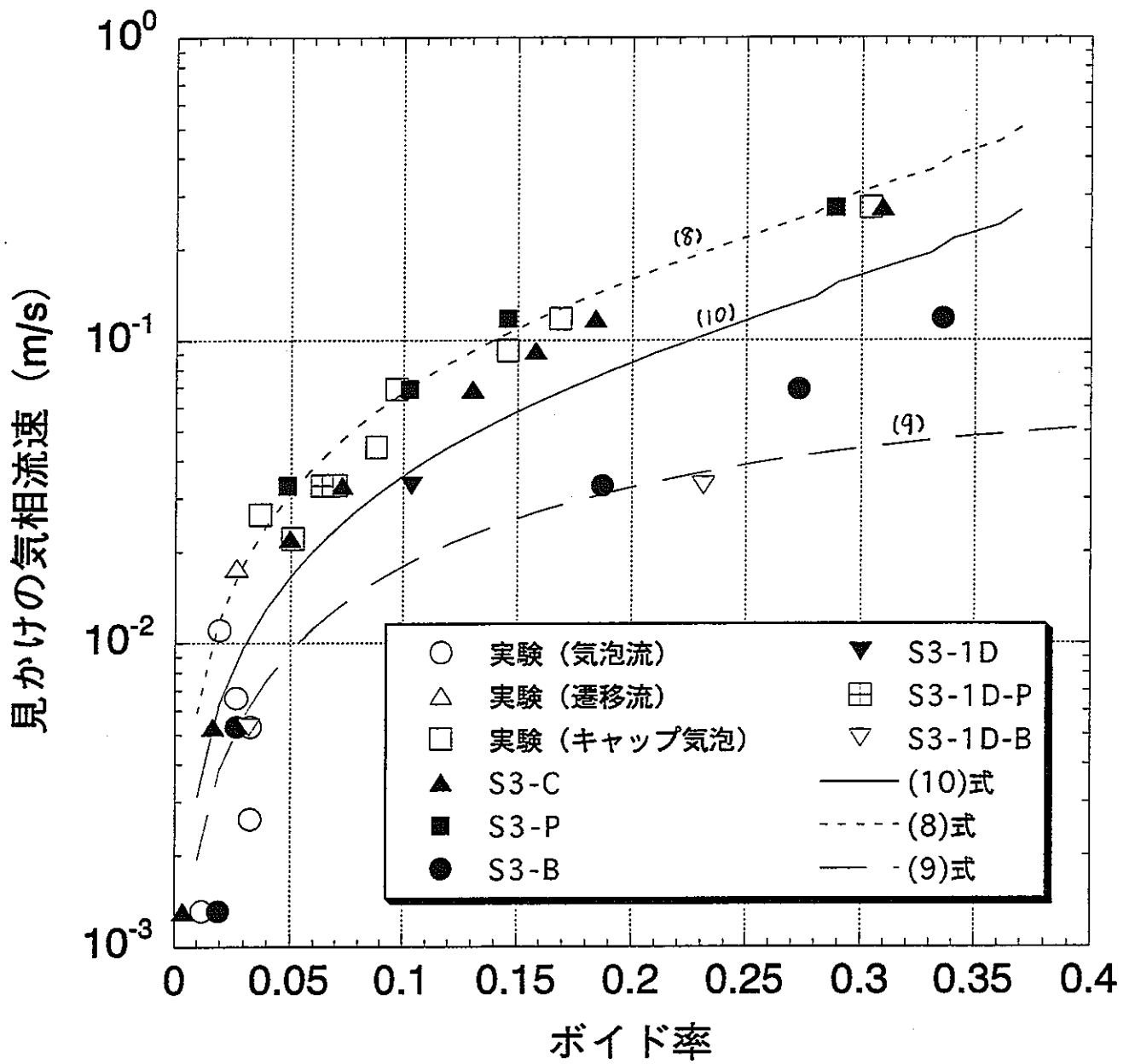


図15 ボイド率と見かけの気相流速の関係

## 【研究成果】

## 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

- (1) 中性子ラジオグラフィ高速撮像法により得られた画像から気泡径、気泡上昇速度の計測を行い、気泡の抗力係数を求め、抗力係数に及ぼす密度比の影響を検討する。
- (2) ダウンカマーを設置した矩形管試験部を用いて、平成9年度と同様の実験を行い、流動特性に及ぼす二次流れの影響を検討する。
- (3) 金カドミウム合金トレーサーを用い、液相流れ場を可視化、計測し基礎データとする。
- (4) 他の条件における実験の解析を進めて今回の結論の補強を行うとともに、プール内の動的なボイド分布変化の比較検討を行う。

## 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

齋藤、他 京都大学原子炉実験所第32回学術講演会報文集、pp.275-280 (1998) .

Mishima, K., et al., presented in the Third Topical Meeting on Neutron Radiography and submitted to Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高密度比気液二相流に関する基礎研究										
研究協力課題	高解像度陽子線ラジオグラフィー法による液体金属-ガス二相流および気泡挙動の研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 教授 芹澤昭示、助教授 片岡 勲 助手 高橋 修、 助手 河原全作 〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗 高速炉安全工学室 飛田 吉春</td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 教授 芹澤昭示、助教授 片岡 勲 助手 高橋 修、 助手 河原全作 〔*客員研究員 **研究生〕			動 燃 側	大洗 高速炉安全工学室 飛田 吉春		
大 学 側	京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 教授 芹澤昭示、助教授 片岡 勲 助手 高橋 修、 助手 河原全作 〔*客員研究員 **研究生〕										
動 燃 側	大洗 高速炉安全工学室 飛田 吉春										
研究協力実施場所	京都大学 芹澤研究室 動燃 大洗工学センター 高速炉安全工学室										
通算研究期間 (予定)	平成10年1月～ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年1月23日～ 平成10年3月31日								
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究										
<p>【研究目的】</p> <p>炉心損傷時の熔融炉心物質多相流に関する基礎的な知見を得ることを目的とする。特に、高密度比気液二相流のボイド率に関する相関式の評価、気泡形状、動態などを種々の可視化技術を駆使して実験的に解析し、通常流体気液二相流特性との比較検討から、気液密度比の影響を探る。</p>											
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>本研究グループが開発した陽子線ラジオグラフィー（加速器により加速された陽子線）を用いて液体金属-ガス二相流のマクロ及びマイクロ構造についての基礎研究を展開する。陽子線は中性子と異なり荷電粒子であるためビームの制御・収束性は格段に優れており、従来の中性子ラジオグラフィー法に比べ陽子線ラジオグラフィー法は高解像度のみならず、高速現象への適用性で勝る。このため、液体金属のような不透明流体中での気泡挙動についてもより一層鮮明な画像が得られる。本研究では特に、液体金属系気液二相流のボイド率相関式の改良とデータベースの構築、陽子線ラジオグラフィー法による気泡形状及び動態・拡散挙動の可視観察並びに数値シミュレーションを行う。</p>											
<p>【使用主要施設】</p> <p>京都大学理学部タンデム型加速器、東京大学原子核研究所サイクロトロン X線発生装置（京都大学）</p>											

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

研究実施期間の関係から十分なデータを集積するに至らなかったが、事項に述べる通り、ボイド相関式の評価、陽子線ラジオグラフィ法の適用性、NaK中での気泡挙動の測定などを行った。

### 【研究成果】

平成10年3月までの研究成果の概要を以下にまとめる。

#### (1) 液体金属系気液二相流のボイド率相関式

液体金属系気液二相流時のボイド率に関するデータベースについて調査研究を行い、各種相関式の比較・検討を行った。この調査結果からは特に通常流体気液二相流特性との顕著な相違は見られなかった。

#### (2) 陽子線ラジオグラフィ法による可視化測定法の確認試験

陽子線ラジオグラフィ法による可視化測定法の確認試験を定常プールにおける磁性流体中へのガス吹き込み、容器内磁性流体及びエチルアルコールでのプール沸騰、マイクロチャンネル内での自然循環沸騰などを用いて行った。これら一連の実験は京都大学理学部タンデム型加速器及び高エネルギー研究所（旧東京大学原子核研究所）サイクロトロンを用いて行った。また、中性子ラジオグラフィ法との比較検証のため、同じ実験体系で中性子ラジオグラフィ法による可視化実験を外部に依頼し行ったものもある。これらの結果からは、実験体系が小さい、即ち、陽子線の透過距離が数ミリメートル程度以下のマイクロチャンネル内気液二相流動については、陽子線ラジオグラフィ法が極めて精度及び時間的・空間的解像度に優れた可視化手法であることを再確認することができた。

ナトリウムやナックのようなアルカリ金属系への適用については、陽子によって放射化されたナトリウムを実験後如何に管理するかが放射線安全管理上の課題として残されている。

(図1、図2)。

#### (3) 気泡挙動の測定

気泡挙動の定量的測定については平成9年12月に高エネルギー研究所サイクロトロンのマシンタイムを申請し、磁性液体を用いて行ったが、実験途中で試験部観察部を構成する薄膜部が破損し、放射化された磁性流体の一部が漏洩したため、十分なデータをとることができなかった。次回マシンタイムを利用して再度実験する予定である。

なお、陽子線ラジオグラフィ法と並行して、X線法による可視化手法を用いて、室温で液体状態にあるナック (NaK-78) 中でのヘリウムガス気泡の上昇運動とその抗力係数を測定した。ここではその概略を報告する。なお、X線を用いた可視化では陽子線ラジオグラフィ法と比べると、画像の解像度は非常に悪いため、得られた画像をコンピュータで画像解析し、そのイメージから必要な情報を定量化して求めた。

(イ) 実験装置・方法

実験装置は図3に示すように、X線発生装置、試験容器、蛍光板、ビデオカメラからなる。陽子線ラジオグラフィ法と異なるのはX線発生装置の部分だけであり、他の手法は陽子線ラジオグラフィ法と本質的に変わるところはない。使用したX線発生装置の管電圧は最高で90kV、電流値は最大で50mAである。

試験容器は図4に示すようなステンレス製矩形容器で、観察窓には厚さ20ミクロンのステンレス箔を用いた。使用した液体は液体金属のナック (NaK-78) で、ヘリウムガス気泡は容器下部のノズルから注入した。

蛍光板は化成オプトニクス希土類蛍光板( $Gd_2O_3:S:Tb$ )を用いた。この蛍光板の10%残光時間は1.2 ミリ秒で、ビデオカメラで撮影した映像を画像処理して、気泡界面の位置、大きさ、形状、速度などを測定した。

(ロ) 測定結果の一例

図5に液体金属NaK中を上昇するヘリウム気泡の上昇速度の測定結果を示す。図6及び図7は参考までに、他の研究者によって報告されている水中、水銀中を上昇する空気泡および窒素気泡の速度の測定例を示す。気泡挙動は一般に流体の表面張力や粘性の影響を受けて、形状や運動の挙動が異なる。本実験では単一気泡のジグザグ運動や気泡列中での気泡運動についても定量的な測定をおこなった。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度は陽子線ラジオグラフィ法による可視化観察と超音波エコー法を用いて液体金属中に於ける気泡挙動の測定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】

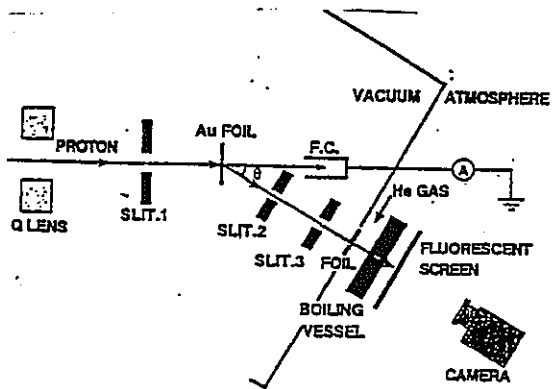


図1 陽子線ラジオグラフィ法の概略

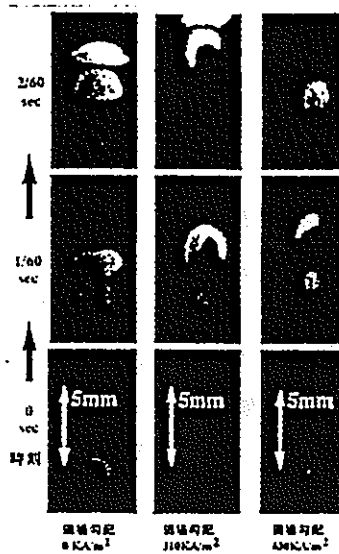


図2 陽子線ラジオグラフィ法による気泡挙動の可視化の例

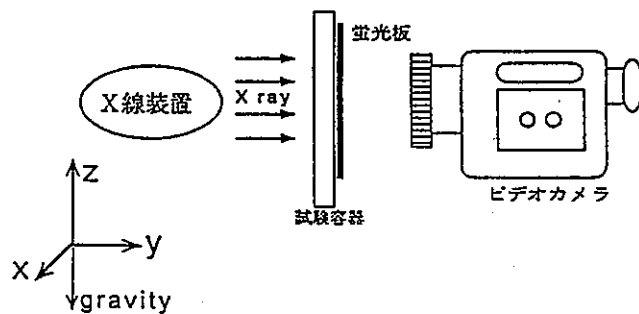


図3 X線法

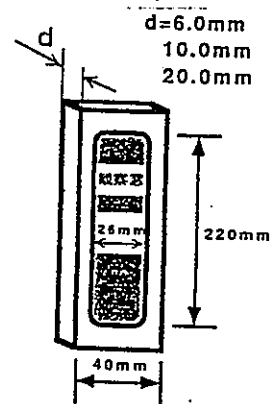


図4 試験部概略

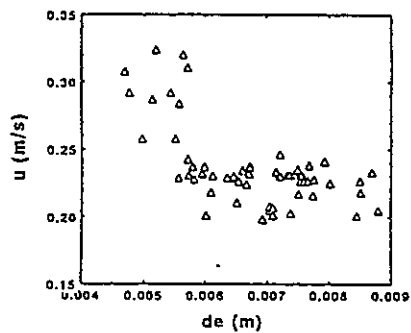


図5 気泡上昇速度 (NaK 中)

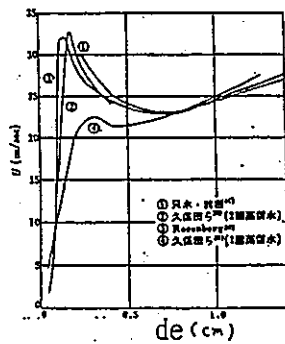


図6 気泡上昇速度 (水中)

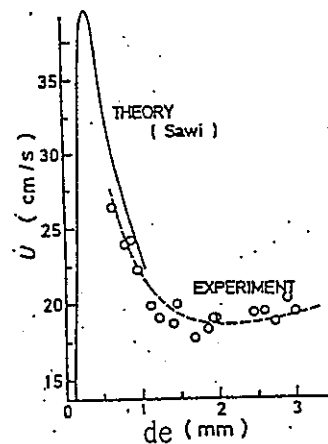


図7 気泡上昇速度 (水銀中)

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	損傷組織の定量化技術の研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名	東北大学工学研究科材料物性学専攻 教授 丸山 公一* 博士課程 澤田 浩太** [*客員研究員 **研究生]		
大学側			
動燃側	大洗 機器・構造安全工学室 青砥 紀身、永江 勇二		
研究協力実施場所	動燃 大洗工学センター 機器・構造安全工学室		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成9年4月1日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>                  事業団が進めているプラントの寿命・余寿命診断技術の開発や新構造材料の開発のために、強度評価の補強資料として定性的理解のみに用いられてきた材料組織の微視的観察結果や分析結果を定量的に把握し、金属組織変化が材料特性に及ぼす効果あるいは相関性を評価する。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b>                  材料および構造物試験後、また材料試験中断試験片の組織観察や分析結果の定量化に関する基礎技術開発を行う。事業団が進めているプラントの寿命・余寿命診断技術の開発や新構造材料の開発のためには、従来の定性的理解にとどまっている材料組織や分析結果を定量的に把握し、金属組織変化と材料強度特性との相関性を評価する必要がある。本研究では、材料試験後および中断試験片の組織観察から、定量化に有効な金属組織因子を選出し、さらに材料強度特性劣化を記述する手法を開発する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>                  各種分析装置（電界放射型電子顕微鏡など）                  損傷負荷試験機（単軸・多軸クリープ試験機、単軸・多軸疲労試験機）</p>			



### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度は、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープ変形組織観察を行い、寿命・余寿命評価に有効と考えられる金属組織因子の選出を行った。

### 【研究成果】

平成8年度の研究から、Mod. 9Cr-1Mo 鋼においてはマルテンサイト・ラス幅が、寿命・余寿命評価に有効な金属組織因子であることがわかった。平成9年度は、クリープ損傷の進行とともにマルテンサイト・ラス幅がどのように変化するかに着目し、組織観察を行った。平成10年3月までの研究成果の概要をまとめる。

#### （1）クリープ中断材の組織観察

Mod. 9Cr-1Mo 鋼の使用環境に近い温度域である575～650℃の範囲において、クリープ中断試験を行い、組織観察を行った。図1に、試験前、クリープ寿命比0.37および破断材の組織観察結果を示す。マルテンサイト・ラス幅は、クリープ変形の進行とともに広がっていることがわかる。このような観察結果は、すべての試験条件で得られた。

#### （2）マルテンサイト・ラス幅の変化

図2にクリープ変形にともなうマルテンサイト・ラス幅の変化を示す。破断ひずみが大きい試験条件では、ひずみ0.1付近で試験条件により決まる飽和値（飽和値 $d = 11Gb/\sigma$ 。ここで、G：剛性率、b：バーガース・ベクトル、 $\sigma$ ：応力）に達することがわかる。一方、破断ひずみが小さい試験条件では、試験条件により決まる飽和値まで直線的に増加することがわかる。今回観察を行ったすべての試験条件で、このような傾向が見られた。

クリープ変形にともなうマルテンサイト・ラス幅の変化に対し、応力や温度の影響を取り除くため、試験条件によって決まるマルテンサイト・ラス幅の飽和値でマルテンサイト・ラス幅を規格化した。図3および図4に、マルテンサイト・ラス幅の変化率 $\Delta d/\Delta ds$ とクリープ寿命比およびひずみとの関係を示す。ここで、 $\Delta d = d - d_0$ （d：ある時点でのラス幅、 $d_0$ ：試験前のラス幅）、 $\Delta ds = ds_{\text{atu}} - d_0$ （ $ds_{\text{atu}}$ ：破断した時点のラス幅）である。これらから、以下のことがわかる。

- ・マルテンサイト・ラス幅の変化率とクリープ寿命比およびひずみの関係は、試験温度や応力に依存しない。
- ・マルテンサイト・ラス幅の変化率は、ひずみ0.1までは直線関係があり、ひずみ0.1付近までに試験条件により決まる飽和値に達する。
- ・マルテンサイト・ラス幅の変化率とクリープ寿命比との関係は、クリープ曲線に対応している。

以上の結果、マルテンサイト・ラス幅はクリープ強度特性と密接な関係があり、マルテンサイト・ラス幅の増加にともない、クリープ損傷が蓄積されていることがわかった。

#### （3）今後の課題

平成9年度の研究から、マルテンサイト・ラス幅はクリープひずみと密接に関連していることがわかったが、クリープ疲労の場合においても、マルテンサイト・ラス幅の変化がひずみ量と密接な関係があるのかどうかを調べる必要がある。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度は、クリープ疲労試験片に対し、マルテンサイト・ラス幅の変化に着目して組織観察を行う予定である。

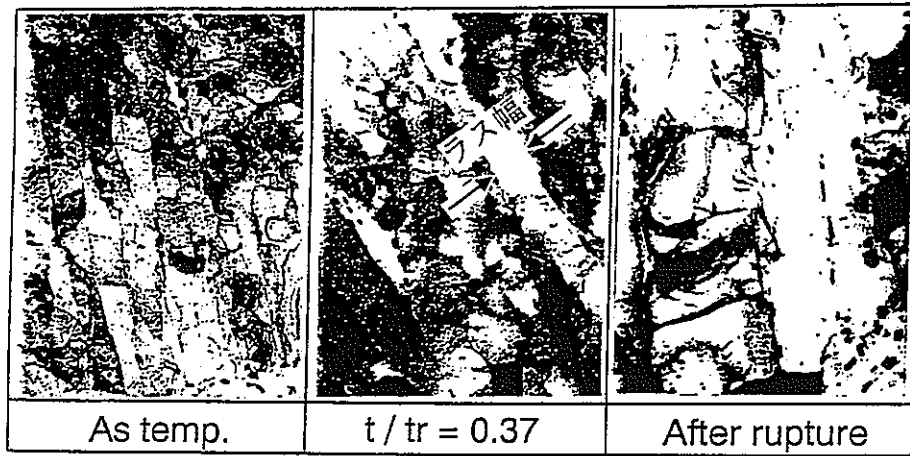
【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

澤田他、改良9Cr-1Mo 鋼のクリープ変形中の組織変化と寿命評価、鉄と鋼、83(1997), 54.

澤田他、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープ寿命評価に関する研究（その1）、PNC TN9410 97-035.

澤田他、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープ寿命評価に関する研究（その2）、PNC TN9410 98-018.

澤田他、改良9Cr-1Mo 鋼のマルテンサイトラス組織変化による余寿命評価、鉄と鋼 投稿中.



Mod.9Cr-1Mo 923K 118MPa  $\cdot 1\mu\text{m}$

図1 クリープ変形にともなう組織変化

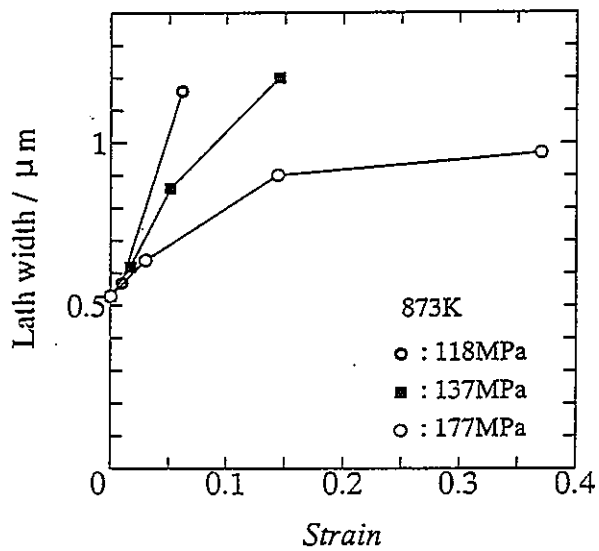


図2 クリープ変形にともなうラス幅の変化

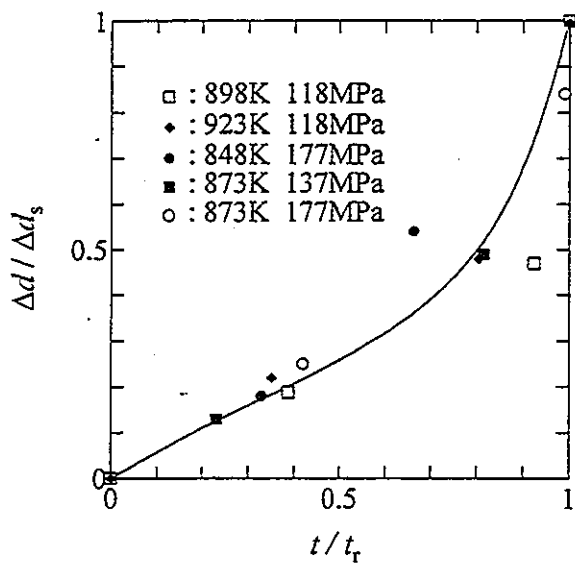


図3 ラス幅の変化率と  
クリープ寿命比との関係

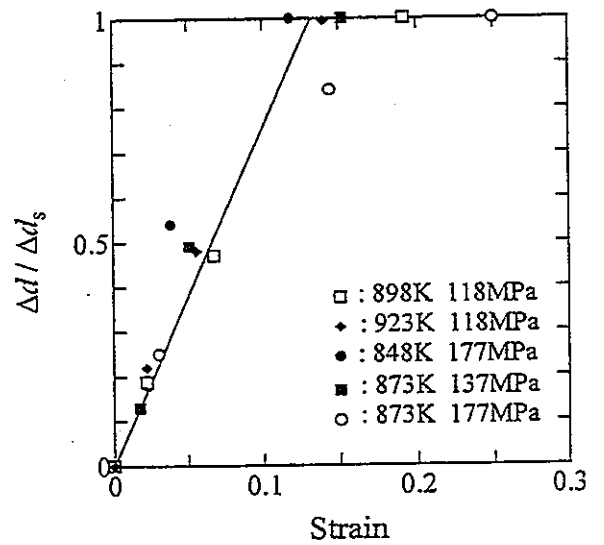


図4 ラス幅の変化率と  
ひずみとの関係

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	損傷組織の定量化技術の研究										
研究協力課題	溶接部の高温クリープ損傷の定量化技術										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄* 科学技術庁 金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義* 〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室 青砥紀身、木村英隆</td> </tr> </table>			大 学 側	高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄* 科学技術庁 金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義* 〔*客員研究員 **研究生〕			動 燃 側	大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室 青砥紀身、木村英隆		
大 学 側	高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄* 科学技術庁 金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義* 〔*客員研究員 **研究生〕										
動 燃 側	大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室 青砥紀身、木村英隆										
研究協力実施場所	高知工科大学工学部 物質・環境システム工学科、科学技術庁金属材料技術研究所 金属材料技術研究所 力学機構研究部、動燃大洗 機器・構造安全工学室										
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年4月1日～ 平成9年12月31日								
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究										
<p>【研究目的】</p> <p>溶接部の材料試験及び構造物試験後あるいは材料試験中断試験片の組織観察・分析結果の定量化に関する基礎技術開発を行う。</p>											
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>プラントの寿命・余寿命診断技術の開発および新構造材料の開発には従来強度評価の補強資料として定性的理解にのみ用いられてきた材料組織の微視的観察結果や分析データを定量的に把握し、組織変化が材料特性に及ぼす効果あるいは相関性を評価する手法が必要である。現段階では候補となるパラメータ（強度特性と組織変化との相関性を記述）や組織の経時変化記述手法（技術）を広範囲に検討する必要がある。本件では材質的、構造的に不連続な溶接部のクリープ損傷組織の定量化手法の検討を行う。</p>											
<p>【使用主要施設】</p> <p>金材研 力学機構研究部 金属組織解析関連施設、材料試験施設、 動燃 損傷予診断技術開発施設（各種分析機器、損傷負荷試験機、大型・小型試験機等）</p>											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度 溶接積層全厚を含む溶接継手のクリープひずみは特定の分布を示すことを明らかにした。

平成9年度 ① 316FR用16-8-2系溶接金属長時間クリープ破断材では $\sigma$ 相/母相界面にき裂が発生・伝播する。クリープ破断延性の低下は異相界面破壊の増加と対応する。②溶接部のクリープ特性に影響する因子として微細組織の差異が最も重要となると推察される。③溶接金属組織変化の定量化手法として透過電子顕微鏡による薄膜試料多点分析法が有望である。

【研究成果】

- ① 316FR鋼の16-8-2系溶接金属での長時間クリープ（30000h超）ではき裂が $\sigma$ 相/母相界面で発生し異相界面を伝播する（図1～3参照）。また、16-8-2系溶接金属のクリープ破断延性の低下は異相界面破壊の増加と対応している（図1、2と図4の対応）。
- ② 308系溶接金属内の部位による化学成分および初期 $\delta$ フェライト量に差がない試料において、溶接金属内の試験片の採取位置によってクリープ特性に違いが生じた。この原因は積層順序によってビード間の微細組織に差異が生じたことが最も大きな要因と推察される（表1および図5、6参照）。
- ③ TTS試験後の316FR鋼溶接金属（化学成分を表2に示す。）を用い、溶接金属組織変化の定量化手法として透過電子顕微鏡を用いた多点分析を実施した。薄膜試料を用い、加速電圧200kVの電子線が透過できる領域（厚さ0.3 $\mu$ m以下）において5000倍の視野を無作為に10箇所選んだ。各1視野ごとに100点（図7参照）、合計1000点の格子点状の測定点を設定し、測定点ごとに電子線を当てて特性X線エネルギー分散型分析スペクトル及び半定量値を取得した。この方法では各分析点の試料厚さが小さいために電子線の散乱領域が限られ、特性X線が発生する領域が小さい。すなわち分析領域の空間分解能が高く、0.5～1 $\mu$ m未満の大きさの析出相が識別できる。各相の分類基準を表3に示されるようにおいた場合の相の定量結果を表4に示す。この結果①で示されたように破壊に支配的な影響を及ぼす $\sigma$ 相の割合が定量化できた。また、②で示されたクリープ特性の差が各相の形状ではなく割合に起因するのであれば本方法を用いて解釈が可能となると考えられる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

動燃および金材研で同一の試験材料を用いて、動燃では前述の定量化方法を金材研では超音波波形解析による損傷組織の定量化手法を平行して着手し、損傷組織として微細組織変化および微細欠陥の発生成長の面から評価することを試みる。一方、微小領域硬度計を用いた転位組織評価に着手する。

現在、高知工科大学および金材研と試験材料および研究展開に関し詳細協議中である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 本郷宏通、山崎政義、渡部 隆、衣川純一、田辺龍彦、門馬義雄；第35回高温強度シンポジウム前刷集（1997）、164。
- 2) 山崎政義、本郷宏通、渡部 隆、衣川純一、田辺龍彦、門馬義雄；第35回高温強度シンポジウム前刷集（1997）、169。

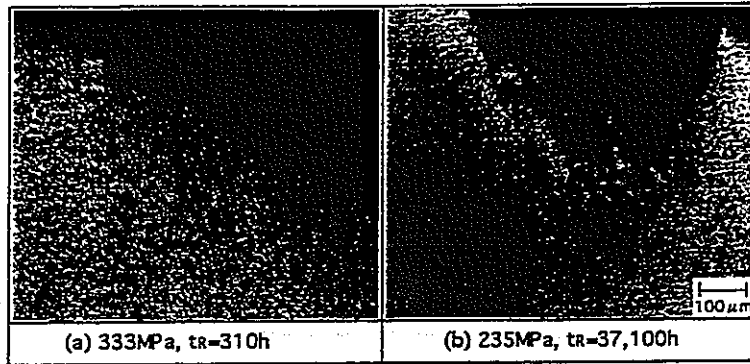


图1. Microstructure of rupture specimen at 550°C.

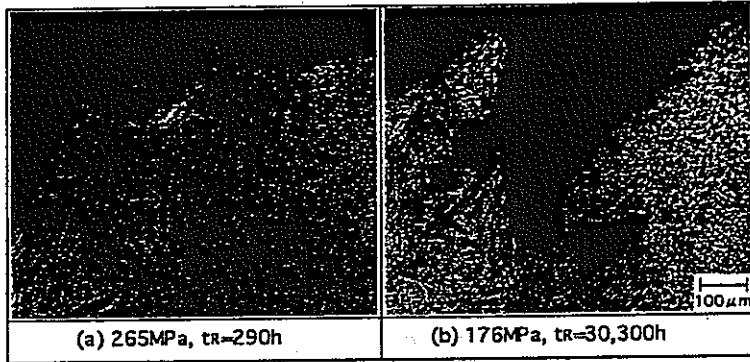


图2. Microstructure of rupture specimen at 600°C.

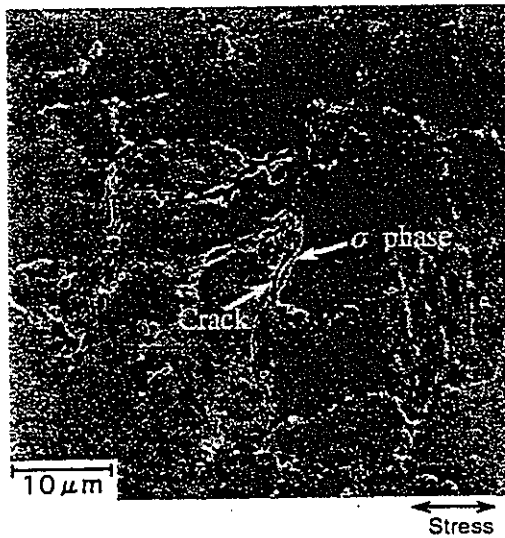


图3. Microstructure of rupture specimen at 600°C,  $t_R=30,300h$  (SEM microphotograph).

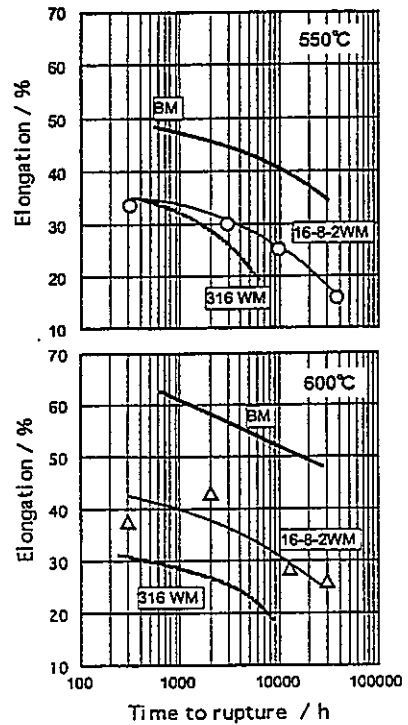


图4. Creep elongation versus time to rupture for base metal and weld metal.

表1. Welding Procedure.

Pass number	Welding current (A)	Welding speed (cm/min)	Arc voltage (V)	Heat input (kJ/cm)	Pass sequence
2 - 11	450 - 520	32 - 40	28 - 32	18.9 - 29.0	
12 - 16	470 - 500	23 - 25	28 - 30	32.7 - 37.8	

Wire: Type 308, 4mm diameter      Flux: High basic fused

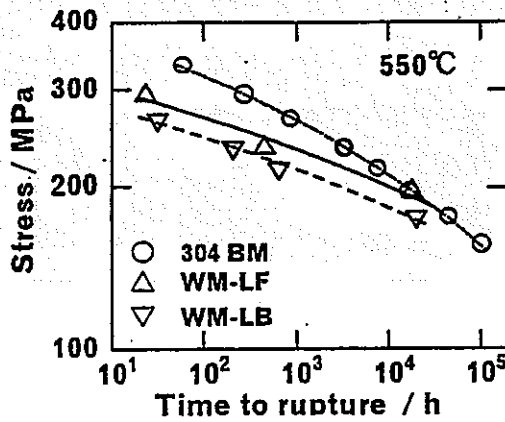


图5. Stress versus time to rupture of 304 base metal and 308 weld metals.

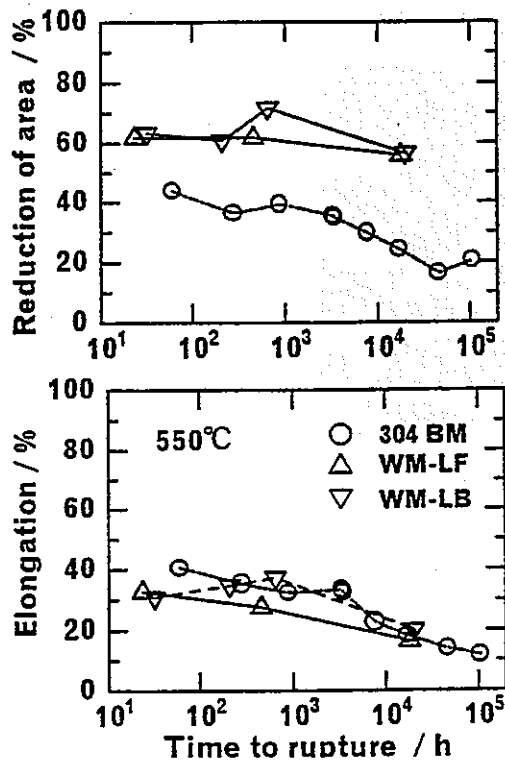


图6. Ductility versus time to rupture of 304 base metal and 308 weld metals.

表2. 素材化学成分 (Wt.%)

素材	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
316FR 母材	0.01	0.56	0.85	0.025	0.001	10.76	16.73	2.17	0.08
316FR 溶材	0.012	0.45	1.54	0.022	0.001	11.6	19.6	2.12	0.157

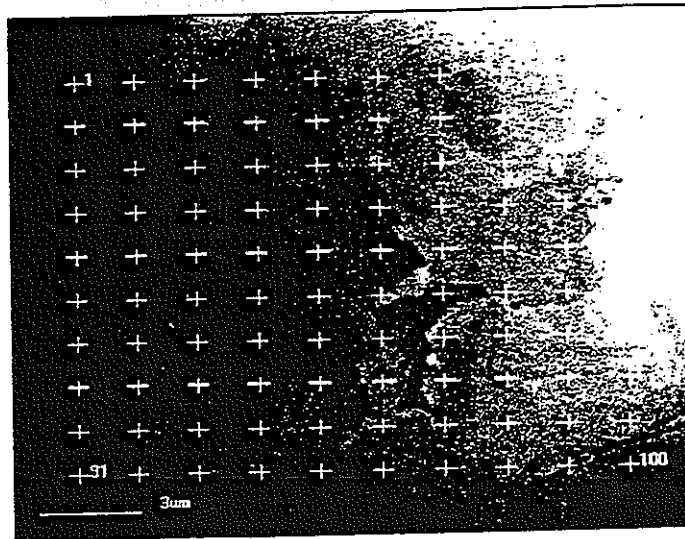


図7.1 視野あたりの分析点の例 (+格子点が分析点)

表3. 分類基準

σ相	Crが20%以上でNi量が10%以下
フェライト	Feが80%以上
Fe <sub>2</sub> Mo	Moが10%以上
母相	測定点数より上記総数を除いた残数

表4. 定量結果

検出相	母相	σ相	フェライト	Fe <sub>2</sub> Mo
検出点数	947	47	2	4
割合 (%)	94.7	4.7	0.2	0.4

(1/2板厚部、測定点数1000)



先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子ビームプローブに関する研究		
研究協力課題	同上 -中性子ビーム制御法の研究-		
研究者所属、氏名			
大学側	北海道大学工学研究科量子材料工学専攻 鬼柳善明、加美山隆、平賀富士夫、小川雪郎、須田義之、中川晴子 [*客員研究員 **研究生]		
動燃側	動燃・大洗工学センター 基盤技術開発部 炉心技術開発室 室長 若林 利男		
研究協力実施場所	北海道大学工学研究科 動燃・大洗工学センター 基盤技術開発部 炉心技術開発室		
通算研究期間(予定)	平成8年2月～ 平成10年3月	当該年度 研究期間	平成10年1月6日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>中性子、特に熱及び冷中性子は、基礎科学、医療、工業などの広い分野で使われている。中性子を利用する場合、実際に照射を行う位置まで強度を減ずることなく導いてくることが強く望まれている。</p> <p>本研究は中性子ビームをプローブとして使用する場合に重要となるビーム制御（ビームの方向の変更、収束など）の方法について研究することを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>中性子ビーム制御の方法としては、大きく分けて次の三つのものが考えられる。一つは中性子ガイド管による全反射を利用してビームの向きを変えるもの、二つ目は磁場を利用して中性子を収束させるもの、三つ目はキャピラリー管（細管）内での中性子の全反射を利用して中性子を導いてくるものである。中性子ガイド管については基本的なことはすでに知られている。本研究では先端分岐型の中性子ガイド管を用いて一本の中性子ビーム孔から実質的に二本のビームが取り出せることができるかどうかについて検討を行った。このとき、中性子波長スペクトルが異なったものが得られるようにし、それぞれの用途にあった中性子実験に使えるようにすることを企図する。磁場による中性子ビームの制御に関しては、中性子源から広がりを持って入射した中性子を磁場を通して一点に収束させることを行う。キャピラリー管についても同様にビームを一点に収束することをまず行う。さらに、平行ビームの輸送などについても検討する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>北海道大学工学部45MeV電子線型加速器</p> <p>性能 最大加速エネルギー 45MeV</p> <p>繰り返し周波数 1 から200Hz</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成7年度は、ガイド管による中性子ビームの分岐、また磁場による収束の数値解析を行った。さらに、実験の準備を行った。

平成8年度は、先端分岐型中性子ガイド管の特性を評価するため、中性子飛行時間法を用いてガイド管から放出される中性子の波長分布を測定した。長波長側の中性子成分が多いビームと長波長側成分の少ないビームの二つの異なったスペクトルをもつ中性子ビームが得られた。

磁場による中性子の収束に関しても、ビーム収束が起きているかどうか実験的に調べた。直径5mmのビームコリメーターを通して磁石を通したときに、約8から20オングストロームの範囲で中性子強度の増加が見られた。

平成9年度は、先端分岐型中性子ガイド管の角度依存性と空間分布の波長依存性を明らかにするための実験を行った。長波長側では、入射角が大きくなると強度比が増加するが、短波長側の強度比は角度にあまり依存しないという結果が得られた。

磁場による中性子収束に関しては、空間分布測定と強度増加率の正確な測定を行った。収束ビームの半値幅は約2mmであり、強度は約40倍になることが明らかとなった。

キャピラリー管については、簡単な数値シミュレーションを行った。また、直管、曲管の透過スペクトル測定も行ったが、バックグラウンドやアライメント調整を正確に行い、再実験の必要がある。

## 【研究成果】

### 1. 先端分岐型中性子ガイド管

先端分岐型中性子ガイド管を用いて、一本のビームラインを二本に分岐して使用することを企図した実験を行い、このガイド管の有効性について検討を行った。実験体系を図1に示す。ビーム孔の内部は、ニッケルコーティングされており、内部の側面にはスーパーミラーを取り付けている。このガイド管の上流に向かって左側にスーパーミラーを挿入し、これをオブリークミラーと呼ぶ。冷中性子源からガイド管入り口までの距離を1.1mとした。検出器は、位置敏感型検出器(PSD)を使用し、ガイド管出口からPSDまでの距離は、強度測定の場合10cm、空間分布の測定では180cmとした。

オブリークミラーに対する中性子強度の角度依存性を調べるため、ガイド管を入り口の中心を軸として反時計周りに回転させた。このとき、オブリークミラーに対する中性子入射角を30, 40, 50, 60mradとした。60mradのときは、オブリークミラー透過側のガイド管は減速材を直接見ている。

中性子の入射角とガイド管出口における6, 12Åの積分強度の角度依存性を図2, 3に示す。オブリークミラーなしでは、角度を大きくすると左側の強度が増しているが、逆に右側では減少している。この理由は、左側のガイド管はより減速材表面の法線の方へ向くのに対し、右側のガイド管は外れていくためである。また、オブリークミラーありでは、右側の強度の減少がオブリークミラーなしに比べて緩い傾きになっている。これは、オブリークミラーがある場合には右側はガイド管としての効果が強くなっているためである。

オブリークミラーがない場合に対するオブリークミラーがある時の強度比を図4に示す。12Åでは、オブリークミラーがないときの強度が大きく減少するため強度比は増加し、効率が上がったように見える。6Åの強度比はあまり変化が見られない。これは、減速材から直接くる中性子を見ているため、オブリークミラーの角度が変化しても反射がほとんど生じないからである。

ガイド管左右出口の強度比の位置依存性を図5, 6に示す。中央から測って右側を+、左側を-で表している。

右側出口の中央部(+72mm)では、減速材から放出された中性子を直接検出しているため、強度比の変化がほとんど現れていない。右部(+102mm)では、2Åより長波長で強度比が増している。これは、オブリークミラーによって反射した中性子を見ているためである。また、左部(+42mm)では6Åより長波長で強度比が増している。これもまた、オブリークミラーによって、反射した中性子であるが、オブリークミラーがある場合、右側のガイド管内では6~11.5Åの中性子は2回反射を起こすことができるため、この中性子がもう一度ガイド管内のスーパーミラーと反射して左部に検出される。

左側出口の中央部(-74mm)と左部(-103mm)では、それぞれ10Å、8Åより長波長側で強度比が減少している。これは、オブリークミラーがある場合、長波長中性子は反射するため透過する中性子が減るためである。右部(-43mm)では7Åより長波長で一度強度が減少しているが、14Å付近から増している。これは、右側のガイド管では11.5Å以上の中性子は3回反射できるため、右側ガイド管を通った長波長中性子が右部で検出されるからである。

## 2. 磁場による中性子の収束

6重極永久磁石中性子収束管(中性子レンズ管)の中性子ビームの波長スペクトルおよび空間分布の測定体系を図7に示す。実験は北大の冷中性子源を用いた。冷中性子源から中性子レンズ管の入口まで2750mmあり、レンズ管の全長は2020mmである。今回は2mmの穴が空いたコリメータをレンズの前方と検出器に取り付け中性子飛行時間スペクトルを測定した。検出器にはXYステージが取り付けられており、それを水平方向(x)と垂直方向(y)に動かすことで空間分布測定を行った。磁場による収束を明らかにするため、全く同じ形状をした無着磁の磁石を入れたレンズ管の測定も行った。また、昨年の実験では5Å付近で通常は出てこないピークが測定された。この原因が、レンズ管内の永久磁石の表面の全反射によるものであるということがわかったので、今回はマグネットユニットにカドミウムパイプを挿入して全反射を防いだ。

図8に磁場があるとき(ON)とないとき(OFF)の飛行時間スペクトルを示す。強度の増加の程度を調べるため、図9に両者の比をとった結果を示す。明らかに、14Å付近に約40倍の利得が見られる

検出器を1mm単位で変えて、x方向、y方向に動かしたときのそれぞれのスペクトルを図10に示す。どちらも中心では14Å付近でピークが見られているが、中心から±2mmずらしたところではピークの部分がへこんでいる。このことから、中心で中性子の収束が起こっていることがわかる。空間分布は、収束する波長領域である13~14Åの強度比を縦軸に用いた。レンズ管出口における空間分布を図11に示す。x, y方向ともに半値幅は約2mmとなっている。

## 3. キャピラリー管による中性子の収束

キャピラリー管については、数値シミュレーションを行った。計算体系を図12に示す。計算に用いたキャピラリーファイバーは、外径が1mmで開口率が60%である。曲管の曲率半径は2015mmとした。材料の組成比から臨界角は $1.14 \times 10^{-3} \text{rad}/\text{\AA}$ と求められた。2次元で考え、減速材表面から放出される中性子の空間分布はcos分布であるとした。また、全反射するときの反射率は、0.97とした。

計算結果を図13に示す。直管では、ファイバーがあるときの方が長波長側の強度の落ちかたが遅くなっている。これは長波長の中性子は、きつい角度でキャピラリーの内壁に衝突しても全反射することが予想されるからである。曲管でも、長波長の中性子は輸送されることがわかる。

今後は、ファイバーの長さや曲率を変えて計算を行い、レンズの設計をする予定である。

【今後の予定】

キャピラリー管については、今後も実験及び理論解析の両面から研究を進めていく予定である。  
また、キャピラリーとマグネットを組み合わせ、ビームの収束と平行化を行う。マグネットを2本組み合わせ、偏極した高密度中性子ビームを作成する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

須田義之、小川雪郎、岩佐浩克、平賀富士夫、加美山隆、鬼柳善明、大友季哉、古坂道弘、  
若林利男

“先端分岐型ガイド管による冷中性子ビームの振り分け” 日本原子力学会1997年春の年

須田義之、小川雪郎、岩佐浩克、平賀富士夫、加美山隆、鬼柳善明、奥隆之、加藤博、清水裕彦、  
若林利男

“中性子レンズ管による冷中性子ビームの収束” 日本原子力学会1997年秋の大会

H.M. Shimizu, H. Kato, T. Oku, Y. Kiyonagi, Y. Suda, Y. Ogawa, H. Iwasa, T. Kamiyama, and  
T. Wakabayashi : COLD NEUTRON BEAM CONTROL USING MAGNETIC FIELD GRADIENT, to be published in Physica B.



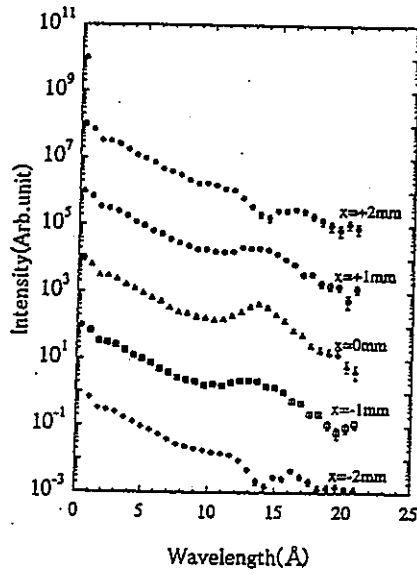


図10(a): x方向の波長スペクトル

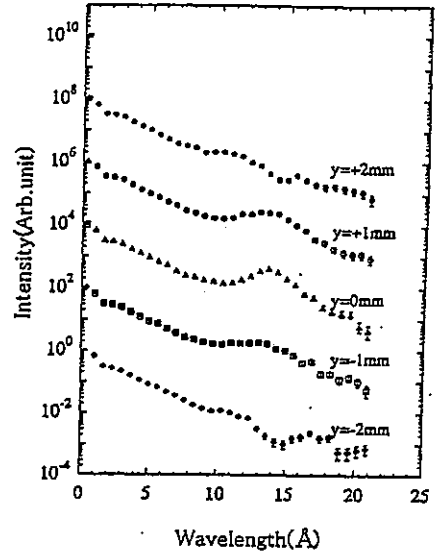


図10(b): y方向の波長スペクトル

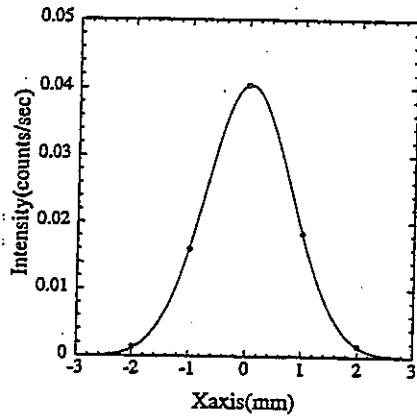


図11(a): x方向の空間分布

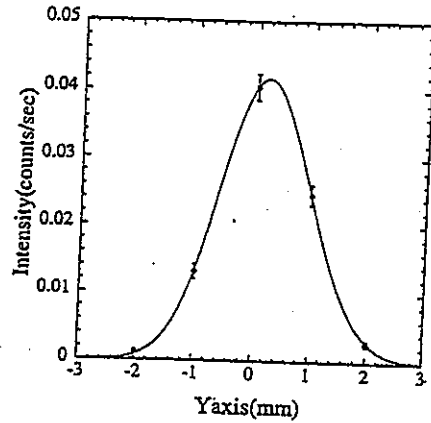


図11(b): y方向の空間分布

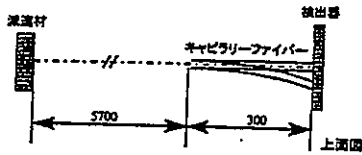


図12: キャピラリー管の計算体系

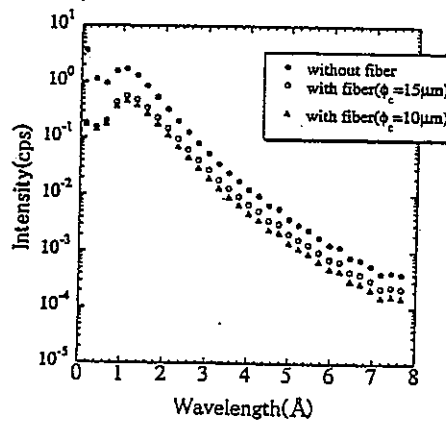


図13(a): 直管のスペクトル予想

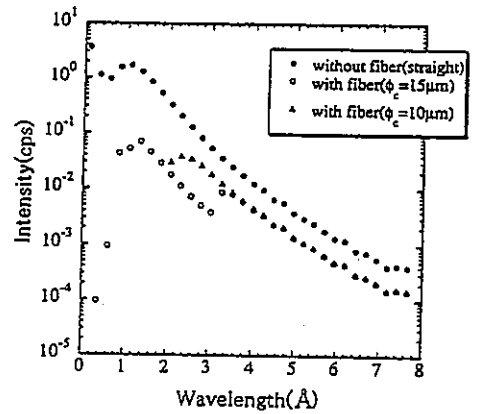


図13(b): 曲管のスペクトル予想

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子ビームプローブに関する研究		
研究協力課題	同上 -収束中性子の研究-		
研究者所属、氏名			
大学側	東北大学工学研究科量子材料工学専攻 教授 古田島久哉、技官 坂本 功、 博士課程 鈴木 一行、修士課程 大木 英樹 〔*客員研究員 **研究生〕		
動燃側	大洗 基盤技術開発部 炉心技術開発室 若林利男		
研究協力 実施場所	東北大学 サイクロトロンセンター 東北大学 工学部 加速器工学研究室 動燃 大洗工学センター 基盤技術開発部 炉心技術開発室		
通算研究期間 (予定)	平成8年2月 ~ 平成10年3月	当該年度 研究期間	平成9年11月18日~ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>          高速中性子の運動方向を制御することができれば、炉内中性子の挙動測定等のプローブとして利用できるのみならず、中性子研究者の永年の夢である高速中性子の標準場や高速中性子のマイクロビームを実現して、中性子の利用技術に関する画期的な新分野を開拓することができる。本研究は、高速中性子のビームを制御する方法についての可能性を論理的に検討するとともに、実際にそのレンズ系を試作して実用化のための検証実験を行うものである。</p>			
<p><b>【研究内容(概要)】</b>          照射視野が0.1mm程度の中性子ビームプローブを開発するためには、以下の3つの新しい技術開発が不可欠のものである。</p> <p>①従来の中性子源に見られるように、生成される中性子があらゆる方向に放出されるのではなく、限られた前方の狭いコーン内のみ放出される「収束中性子源」を開発し、</p> <p>②生成中性子を、極く微小の照射視野内に集束する「中性子レンズ系」を開発する。</p> <p>③随伴粒子の計数による放出中性子数の決定法を確立する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>① 東北大学AVFサイクロトロン          ② データ収集解析用電子計算機システム          ③ 集束中性子生成系          ④ 高速中性子検出器系</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成7年度：収束中性子源に関する理論的研究を実施した。

平成8年度：収束中性子のビーム生成のための実験を行った。収束中性子源と水素吸蔵ターゲットを利用することにより、精度の高い中性子プローブ（中性子のマイクロビーム）を実現出来る可能性が、実験的に検証された。

## 【研究成果】

①東北大学のAVFサイクロトロンを用いた収束中性子源の検証実験を行った。標的ターゲットとして水素のガスセルを（水素吸蔵ターゲットも試験した）、そして加速粒子としてはC-13を用いた。図1は、そのときの ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C}, n){}^{13}\text{N}$ 反応を使った収束中性子生成の検証実験の結果を示す。重イオンの照射エネルギーが反応のしきい値に近くなると、中性子の放出角度は小さく（ $15.6^\circ \Rightarrow 7.7^\circ$ ）なっていることが、明確に示されている。また、 ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C}, n){}^{13}\text{N}$ 反応による収束中性子生成のKINEMATICSを調べてみると、重イオンの照射エネルギーが比較的に高いうちは、放出中性子のエネルギーも2成分でその放出角度の限界も大きいですが、照射エネルギーがしきい値に近くなると、エネルギーも1成分となり放出角度の限界も小さくなっていくことが明らかになった。このことより、軽い核（水素）を標的とする重イオンの2体吸熱核反応により放出される中性子は、核反応の運動学により、前方の極く狭いコーン範囲の内に限定され、高い収束性を持つことが実験的に確認された。

1)

②生成中性子の強度を正確におさえることは、実験精度向上には不可欠である。今回、発生した収束中性子と1対1で生成する随伴粒子を同時計数する方法により、高い精度で中性子強度を求めることができた。1) 図2に収束中性子ビーム生成と中性子強度決定の実験装置を示す。また、図3に収束中性子源からの随伴粒子測定実験装置の詳細を示す。随伴粒子N-13は双極電磁石により曲げられて $\Delta E-E$ 半導体検出器で測定される。図4に収束中性子源を用いた随伴中性子法のエネルギーと粒子位置の2次元プロットを示す。この図から分かるように対象とする粒子N-13は他の粒子と明確に分離できており、このスペクトルを求めることにより、中性子源から放出された全ての中性子数を決定することができた。

③3年間の研究成果をまとめた報告書を作成した。



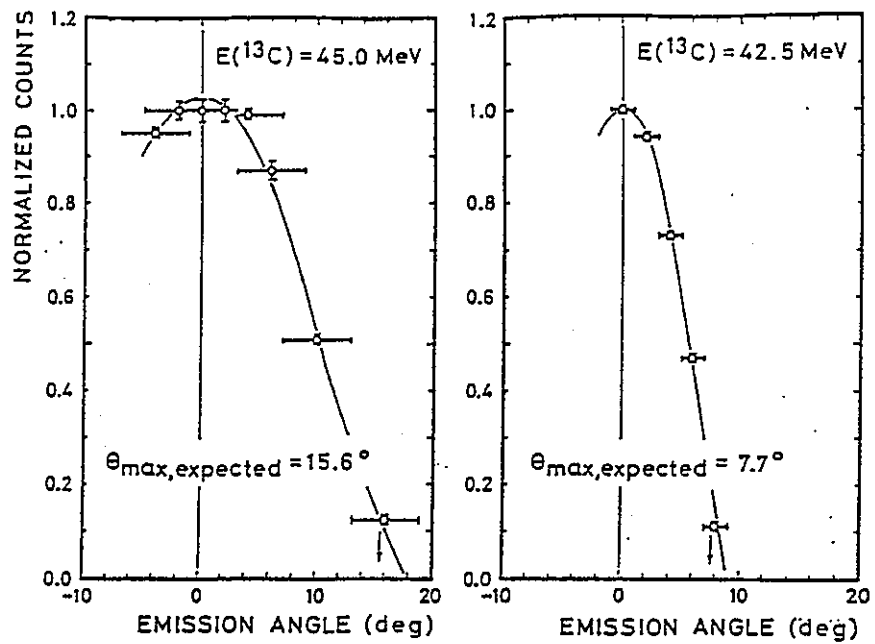


図1 収束中性子生成の検証実験結果

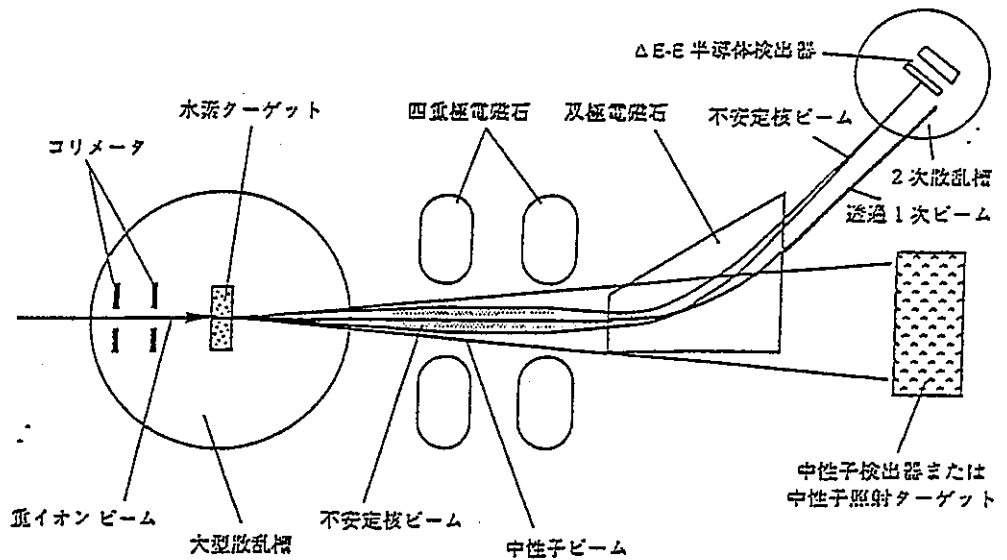


図2 収束中性子の発生及び中性子強度の決定のための実験装置

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度で本研究は終了した。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 収束中性子源を用いた単色中性子標準場の設計；鈴木一行、古田島久哉他、日本原子力学会1997年秋の大会 予稿集(1997)A16

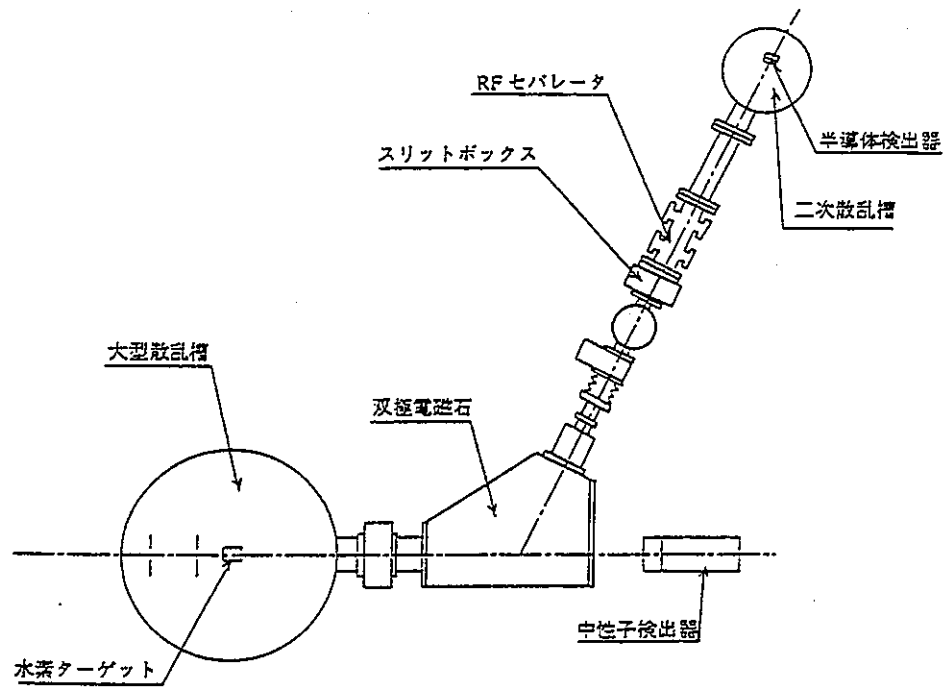


図3 随伴粒子測定実験装置

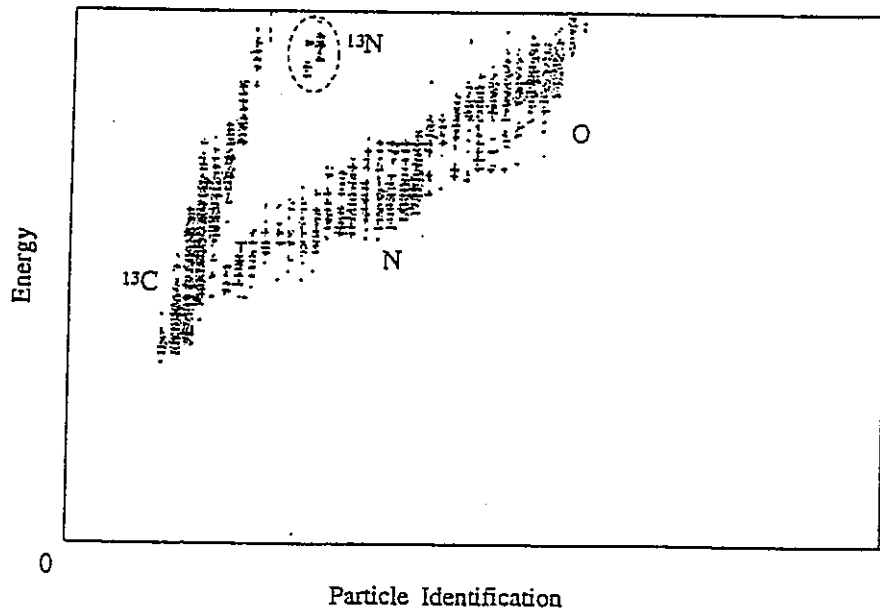


図4 収束中性源を用いた随伴粒子法のエネルギーとP I値の2次元プロット

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子計測データの計算機直接入力に関する研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大学側	九州大学 工学部応用原子核工学科 教授 的場 優、助教授 榮武二、 助手 納富昭弘、大学院修士課程 仁木 直人 〔*客員研究員 **研究生〕		
動燃側	大洗工学センター実験炉部・臨界工学試験室 大谷暢夫(注)、羽様 平 〔(注)現在、高速炉もんじゅ建設所技術開発部〕		
研究協力実施場所	大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室 九州大学工学部応用原子核工学科		
通算研究期間(予定)	平成8年2月～ 平成10年3月	当該年度 研究期間	平成9年12月17日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b> 高速炉燃料再処理施設等の核燃料施設に対する未臨界度モニターの高度化をはかる事を目的として、新しい概念による中性子計測処理システムを開発する。</p>			
<p><b>【研究内容(概要)】</b> 原子炉雑音の時系列データを計算機に直接入力する装置を開発し、未臨界度モニターとして実用的で且つ新しい機能を有する計測・処理系を実現する。複数の中性子検出器による原子炉雑音の時系列データを、計算機に直接入力する事によって収集し、得られたデータをオンライン処理して、自己・相互相関の情報を実時間上で評価できるシステムとする。 重水臨界実験装置の重水減速体系、及び、未臨界度測定試験体系を測定対象として炉雑音測定実験を実施し、異なる種類の測定システムとの比較評価によって適用性を検証する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b> 重水臨界実験装置(DCA)：重水減速圧力管型臨界実験装置、最大出力1kW</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

DCA の未臨界度測定試験体系において炉雑音測定実験を行い、マルチチャンネルスケーラー(MCS)による測定結果と比較することによって、本システムの適用性を確認した。計算機直接入力システムを用いて得られたデータがファインマン- $\alpha$ 法、ロッシ- $\alpha$ 法、自己相関法による炉雑音解析に適用できることを確認した。ファインマン- $\alpha$ 法については未臨界度モニタの開発も行い、性能を実験的に評価した。また、不感時間の短縮のためのシステム及び複数信号系列入力システムを製作し、性能を実験的に確認した。

### 【研究成果】

九州大学工学部で開発されてきた中性子検出信号の時系列データ直接測定システムに関して、基本性能の確認、検出不感時間の短縮の検討、及び複数信号入力システムの開発を行った。

#### (1) 基本性能の確認（取得データを用いた異なる測定手法による解析）

低濃縮ウランを使用した重水減速体系において、実効増倍率は0.8 から0.99の範囲で計算機直接入力システムによる炉雑音測定を行い、得られたデータ系列に異なる解析手法（ファインマン- $\alpha$ 法、ロッシ- $\alpha$ 法、自己相関関数法）を適用した。図-1に各解析手法による解析結果を、表-1に解析結果から得られた即発中性子減衰定数を示す。各解析手法により求められた即発中性子減衰定数は一致しており、従来のMCSを用いた測定システムでは不可能であった異なる測定手法の同時適用ができることが確認できた。

#### (2) 検出不感時間の短縮

計算機直接入力システムにおいて、パルス発生の時刻はコンピューターの割込み処理によって記録されているが、その処理に20 $\mu$ 秒程度の時間を必要とするため、不感時間として時系列データの取り込み性能の制限となっている。時系列処理回路の高性能化を目的として、FIFOメモリー（ファーストイン・ファーストアウトメモリー）をバッファとして使用した改良型の処理系を開発した。図-2に1系統の検出器からの信号を仮定した場合の概念を示す。システムに入ってきた時系列時刻データを、入ってきた順序でFIFOメモリーに記憶した後、コンピューターの処理能力に応じて順番にメモリに転送する。この様な手順を採ることによって、コンピューターの処理能力は、平均の計数率に対しては制限となるが、確率的に生じる短い時間間隔の事象に対しては、バッファがあふれない限り不感時間の要因とはならない。つまり、バッファがあふれない限り、処理の不感時間はハードウェアの性能で決まることとなる。回路系で決まるこの不感時間は1 $\mu$ 秒以下となると予想される。本システムは昨年度試作器が完成し、今年度システムの動作確認及び調整を終了した。

#### (3) 複数信号入力システム

複数検出器間の相関を解析することによって測定体系の空間的な相関情報を得ることができる。計算機直接入力処理システムを4系統の信号が入力できるように改良した。図-3に4系統入力測定システムの概念を示す。各系統から入力された信号を、系統番号付きの時刻データとしてFIFOメモリーに記憶し、1系統の場合と同様に処理する。性能の確認として実効増倍率が0.98の体系に設置した検出器2系統の信号を同時入力し、各系統の信号をファインマン- $\alpha$ 法で測定した。各系統の取得データから求めた即発中性子減衰定数は別途単系統入力システムで測定した値と一致しており、複数系統入力システムが正常に動作することが確認できた（表-2）。

#### (4) 今後の展望

現在のところ、測定システムの基本性能は確認でき、実験レベルでは複数入力信号を計算機直接入力によるデータ収集によって処理できるシステムが完成している。実用的な課題としてはシステムの動作安定性、高計数率への対応があるが、近く解決される見込みであり、DCAでの未臨界度測定実験への適用を予定している。

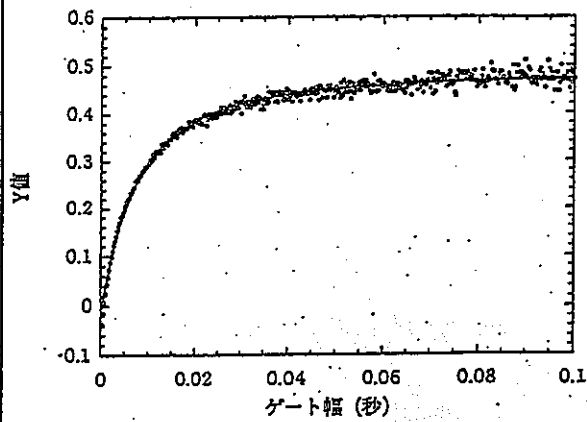
本システムは、計数の検知された時だけ計算機が作動しており、測定システムとして合理的な概念となっている。記憶容量、データ転送、及び演算装置の作動の観点から、将来性のある興味深い測定システムである。もっとも現状のファインマン $\alpha$ 法による処理はデータの持つ情報の一部しか利用していないため、将来的に時刻データそのものを利用した新しい統計計算処理手法を開発すれば本測定システムをさらに有効に活用できる。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

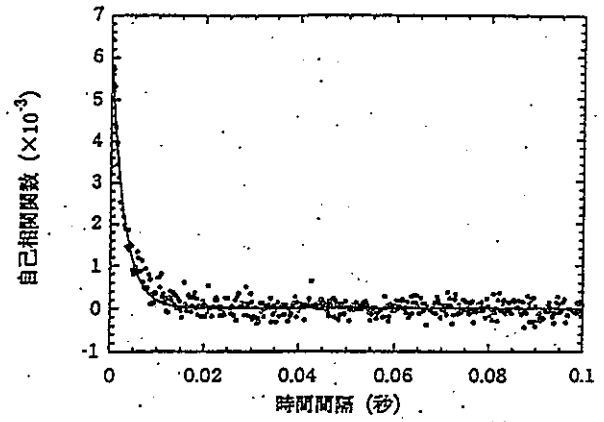
本共同研究は平成9年度末で終了した。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

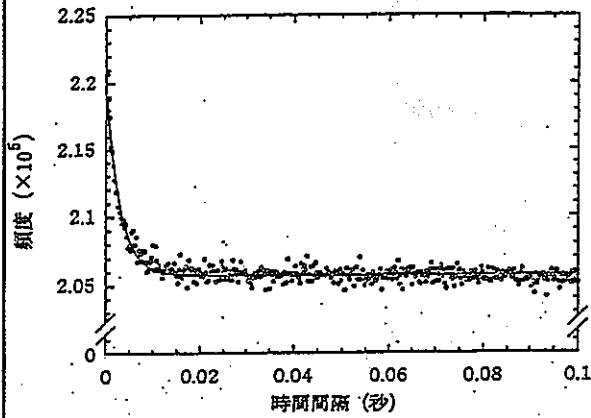
- 1) 北村他、時系列データ直接処理による未臨界度モニタの開発(1)、日本原子力学会「1996年秋の大会」A20
- 2) 北村他、時系列直接測定法により得られたデータの多面的評価、日本原子力学会「1997年秋の大会」A40



ファインマン- $\alpha$ 法による解析結果



自己相関関数法による解析結果



ロッシ- $\alpha$ 法による解析結果

図-1 異なる手法による解析結果

表-1 即発中性子減衰定数評価結果

未臨界度 ( $\beta$ )	即発中性子減衰定数 $\alpha_p$		
	ロッシ $\alpha$ 法	ファインマン $\alpha$ 法	自己相関関数法
0.9750	21.42 $\pm$ 2.191	22.44 $\pm$ 0.2563	22.47 $\pm$ 0.7026
2.773	39.03 $\pm$ 3.345	35.97 $\pm$ 0.4561	36.41 $\pm$ 1.653
7.898	131.5 $\pm$ 4.891	120.2 $\pm$ 1.606	142.87 $\pm$ 4.657
16.41	337.8 $\pm$ 10.75	325.4 $\pm$ 4.565	353.0 $\pm$ 9.389
25.97	531.8 $\pm$ 20.51	550.3 $\pm$ 20.64	578.3 $\pm$ 19.35
36.78	1006 $\pm$ 51.22	1024 $\pm$ 73.34	1007.2 $\pm$ 44.75

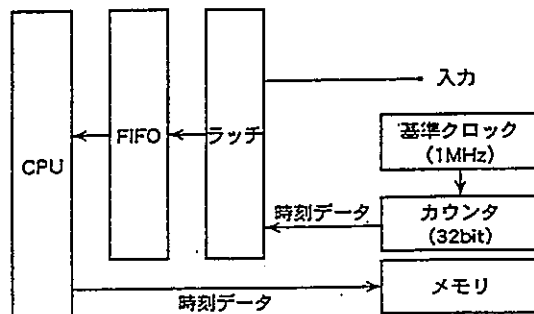


図-2 FIFOバッファを搭載したパルス時系列測定システム

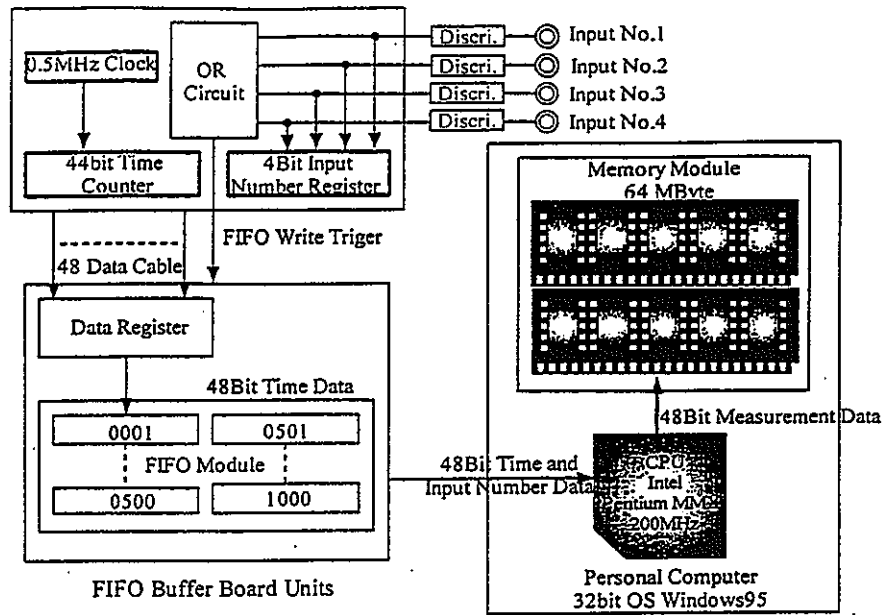


図-3 複数信号入力システム

表-2 複数系統入力システムを用いた測定結果

測定システム	複数系統入力		単系統入力
検出器 # (種類)	検出器 # 1 (1" BF3)	検出器 # 2 (1/2" He-3)	検出器 # 1 (1" BF3)
即発中性子減衰定数	86 ± 8	78 ± 12	74 ± 7

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高燃焼度燃料のスエリング評価		
研究協力課題名	高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価		
研究者所属、氏名	九州大学工学部応用原子核工学科 教授 古屋廣高, 助手 有馬立身, 大学院博士課程 佐藤 勇** [*客員研究員 **研究生]		
大学側	九州大学工学部応用原子核工学科 教授 古屋廣高, 助手 有馬立身, 大学院博士課程 佐藤 勇** [*客員研究員 **研究生]		
動燃側	大洗 照射燃料試験室 山本一也, 今野廣一		
研究協力実施場所	九州大学 工学部 古屋研究室 動燃 大洗工学センター 照射燃料試験室 (AGS)		
通算研究期間 (予定)	平成7年11月～ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成9年11月14日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>[研究目的]</p> <p>実用化を目指したFBR燃料の高燃焼度化を達成するためには、燃料中に高い濃度で蓄積される固体状の核分裂生成物 (FP) が、燃料物性を変化させるだけでなく、燃料ペレットのスエリングや被覆管内面腐食 (FCCI) を発生させることから、その照射時の挙動と燃料物性に与える影響を把握することが必要である。</p> <p>本研究は、高燃焼度のFBR燃料中の固体FPの照射による再分布挙動と酸素ポテンシャルへの影響について、照射済燃料を用いた実験的データから明らかにするとともに、その熱力学的解析等を通して固体FPの照射挙動評価モデルの理論的基礎を構築するものである。</p>			
<p>[研究内容 (概要)]</p> <p>本研究は、燃料内に生成される固体FPの中でも特に生成収率が高く、化学的に酸素ポテンシャルへの影響が大きいMo, Cs, 白色金属相及びBa化合物析出相等に着目して、これらの再分布挙動等について試験評価を行っている。平成7年度では、照射済燃料のMo分布についての測定評価と酸素ポテンシャルの関係について調べたが、平成8年度からは、3年間の大学との共同研究とし、上記固体FP元素の燃料中の再分布挙動及び析出相について、「常陽」で照射された照射済燃料に対する遮蔽型X線マイクロアナライザー(SXMA)での分析評価データの拡充、金相写真の画像解析による析出相の分析評価、被覆管材料の炉外腐食試験による酸素ポテンシャル評価及び熱力学解析コードによる固体FPの化学的状態の評価を中心に実施するものである。</p>			
<p>[使用主要施設]</p> <p>照射燃料試験施設 (AGF) 及び照射燃料集合体試験施設 (FMF) 金相セル (動燃) 酸化反応試験装置, 機器分析装置 (九州大学)</p>			



[進捗状況(当該年度までの概要)]

平成7年度では、照射済燃料のMo再分布についての測定評価と酸素ポテンシャルの関係、O/M比分布への効果について調べた。さらに平成8年度は、大学との共同研究として開始し、7年度に見い出された高燃焼度燃料におけるMoの燃料ペレット外への放出現象のメカニズム、被覆管の酸化による酸素ポテンシャル変化を評価するための炉外酸化試験を実施した。9年度ではMoの再分布挙動に重要な働きをし、固体FPスエリングの主要因でもある白色金属相、同じく固体FPスエリングの主要因となるZr, Baの燃料中分布に関する照射済燃料試験並びに低酸素ポテンシャル条件下の被覆管酸化試験の装置準備を実施した。

[研究成果]

1. 照射済燃料中のFP再分布評価

燃料の固体FPスエリングを発生させる固体FP元素の中でも白色金属析出相や酸化物析出相を形成するものは、燃料内を容易に移動したりペレット外に放出されるなど複雑な挙動を示すものがあることが知られているが、実際に高燃焼度燃料を用いて行われた研究は非常に限られている。これまでに本研究では、「常陽」の高燃焼度照射済試験燃料を機器分析によって、燃料内で温度と酸素ポテンシャルに応じ、金属状態(白色金属析出相)と酸化物状態の両方で存在するMoについて、高燃焼度では白色金属析出相に析出したMoが、Csのように燃料内を移動し、ペレット外に放出されることを実験的に確認し、SOLGASMIXコードを用いた熱力学的解析により、白色金属析出相に析出したMoの一部が、MoO<sub>3</sub>の形で燃料ペレットのクラックや気孔を介して気相移動している可能性が高いことを示した。

平成9年度では、上述の高燃焼度照射済燃料の白色金属析出相に関して微小元素分析を更に実施した。その結果、白色金属析出相構成元素の内、Moだけでなく、Pdも燃料の径方向に沿って含有率が変化しており、Moと同様にPdも燃料内を移動していることを確認した。さらに、この移動は、Moが10at%の燃焼度では観察されず、約13at%で生じていたのに対して、Pdでは6.77at%の試料でも確認できることから、比較的低い燃焼度から生じること、燃焼度が13.3at%の高燃焼度では被覆管内面から約700 $\mu$ m付近にピークが現れること、このPd含有率のピーク位置では白色金属析出相の析出割合が他領域よりも大きい傾向を持つことなどが分かった。(図1参照)さらに、このPd含有率ピーク位置に存在する白色金属析出物の組成の均質性を調べると、Pd含有率の高い析出相と低い(すなわちRu含有率が高い)析出相の2相に分かれ、また隣接してBaの酸化物の析出物が存在するという特長を持つことが分かった。(図2, 3参照)Pd含有率ピーク位置ではない領域の白色金属析出相では、このような特長は見られなかった。

このようなPdの挙動を説明するため、いくつかの解析評価を行った。その結果、照射中においては、熱力学的にPdは酸化物ではなく、Pd単体あるいは合金として存在し、蒸気圧の計算から、炉内の温度条件では、Pdのみが金属蒸気として有意な量存在することが分かった。これらの結果から、Moが酸化物の蒸気で燃料中を移行するという昨年度の結果と似て、Pd蒸気が燃料中のマイクロクラックや結晶粒界のFPガスバブルによって形成された粒界のトンネルを通して移行している可能性が示された。

さらに平成9年度では、同じ固体FPスエリングを発生させる固体FP元素の中でも酸化物析出相を形成するZr, Baについて、酸化物析出相の組成と燃料内分布を照射済燃料の機器分析により調べた。Zr, Baの酸化物相が燃料中に析出することは以前から知られているが、その定量的評価や燃料内分布については文献によって大きな相違があり、あまり良く分かっていないのが現状である。平成9年度の結果では、Sariらの文献で報告されているようにBaは燃

料中に均一に分布せず、燃料外周に向かって濃度が高くなることが確認された。また、Baの酸化物析出相も、燃焼度6at%の燃料で既に確認でき、彼らの報告と一致した。このようなBaの挙動は、燃料内の温度分布による熱拡散とBaOの蒸発凝縮過程による移動とする彼らの考えが正しいことを示唆するものと考えられる。(図4参照)一方、Zrについては、10at%まではほとんど析出相は観察されず、燃料マトリックス中にほぼ均一に分布していた。(図4参照)しかし、13.3at%の試料では、ZrがBaと共に酸化物として析出していることが確認された。このことから、Zrの燃料中への固溶限界は0.0237~0.0336と推定している。

## 2. 炉外被覆管酸化試験による酸素ポテンシャル評価

固体FPの化学的状態は燃料中の酸素ポテンシャルと温度で決まるが、これを評価するためには、照射中に生じる被覆管材料の腐食による酸素ポテンシャルの変化量を見積る必要がある。本研究で用いている「常陽」照射済燃料は被覆管材料として改良型SUS316鋼を用いているが、この被覆管を使用した燃料ピンは、従来のSUS316鋼被覆管の燃料ピンに比較して被覆管内面腐食(FCCI)が小さい傾向を持つ。そのため、この改良型SUS316鋼の酸化特性データの取得を平成8年度から開始し、これまで、酸化試験として一般に行われるような比較的高い酸素ポテンシャル下では、従来のSUS316鋼と差は見られないという結果を得ている。

平成9年度では、実際の燃料ピン内に相当する低い酸素ポテンシャル状態で、長時間に及ぶ酸化特性データを取得するため、酸化試験装置を改造し、試験を行った。(図5参照)試験後、キャリアガス抽出法による微量酸化量の計測、X線回折やSEM-EDXによる表面反応層の分析を行った。その結果、 $10^{-21}$ ~ $10^{-28}$ atmという酸素分圧範囲で、700℃以上では従来のSUS316鋼よりも改良型SUS316鋼の方が酸化量が大きく、600℃では逆に改良型SUS316鋼の酸化量の方が小さくなった。この試験の酸素ポテンシャル下では、Feは酸化せず、Crのみが酸化すると考えられること、改良型SUS316鋼の結晶粒径が3~5倍ほど大きいことなどがこのような酸化挙動の違いの原因となった可能性が考えられる。

また、これまでの酸化試験結果を踏まえ、照射燃料ピンに生じるFCCIによる酸化量を評価するための腐食試験を開始した。腐食試験は低い酸素ポテンシャル状態で、形成されたCr酸化物とFPの反応を見るもので、Teを用いて試験方法を確認した。(図6参照)

### [今後の予定(翌年度以降の概要)]

10年度は、本研究の最終年度であり、9年度に取得した照射済燃料の金相試験並びに機器分析による白色金属相及びZr, Ba化合物析出相等FP元素再分布のデータ解析, Mo, Pdの燃料内移行挙動並びにZr, Ba化合物析出挙動モデル, 炉内条件に近い酸素ポテンシャル下における被覆管酸化腐食試験評価をまとめ、固体スエリングに係わるこれらの元素の再分布/析出挙動と酸素ポテンシャルの影響について理論的なベースを構築する。

### [レポート、学会誌・国際会議への発表論文等]

1. PNC TY9606 97-001 高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価  
-先行基礎工学分野に関する平成8年度報告書(中間報告)-
2. I. Sato, et al., "Distribution of Molybdenum in FBR Fuel Irradiated to High Burnup"  
J. Nucl. Mater. 247 (1997) 46-49.
3. 高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価  
-先行基礎工学分野に関する平成9年度報告書(中間報告)- 査読中
4. I. Sato, et al., "Behavior of metallic fission products in uranium-plutonium mixed oxide fuel"  
第15回化学熱力学国際会議-ポルトガル(1998年7月)

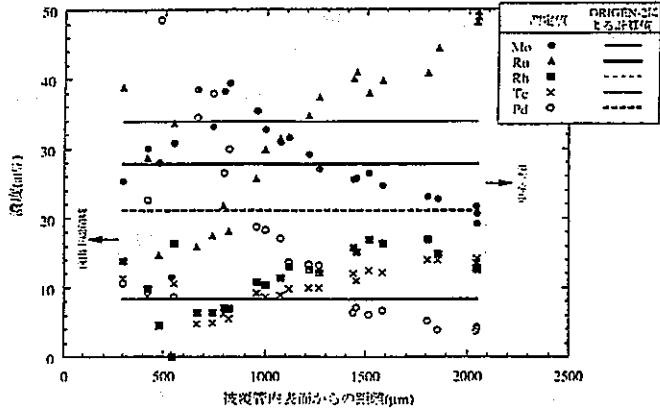


図1 白色金属析出物におけるMo、Ru、Rh、Tc、Pdの燃料棒方向濃度分布(燃焼度=1.333at%, 試料=G35751)

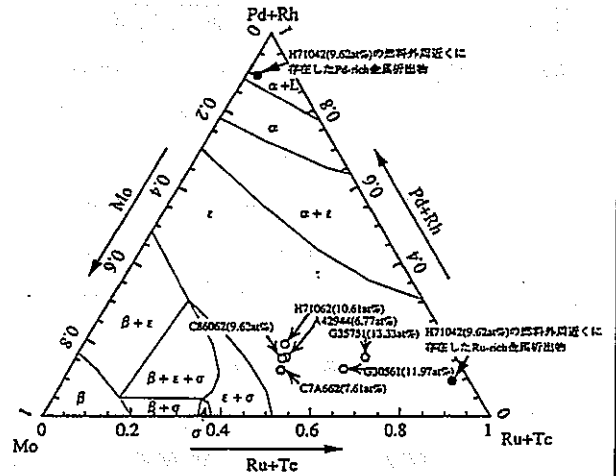


図2 1700°CにおけるMo-(Tc, Ru)-(Pd, Rh)の状態図(○ open symbolは中心空孔付近の白色金属析出物、● close symbolは燃料周辺部に存在したPd、Ru-rich金属析出物)

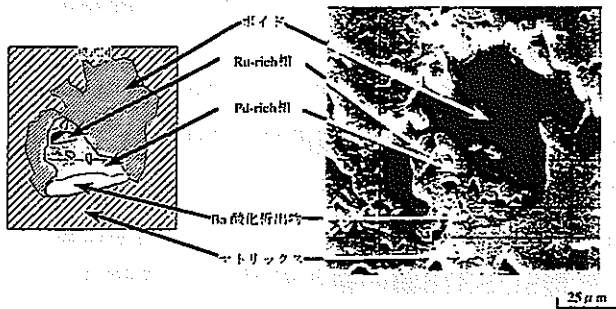


図3 燃料周辺部に多く見られるPd-rich相の例

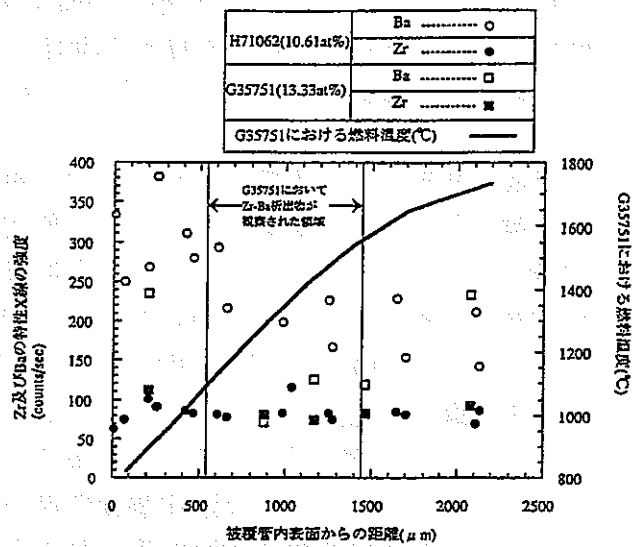


図4 G35751とH71062における燃料マトリックス内のZr、Baの濃度分布及びG35751における照射末期時の温度分布

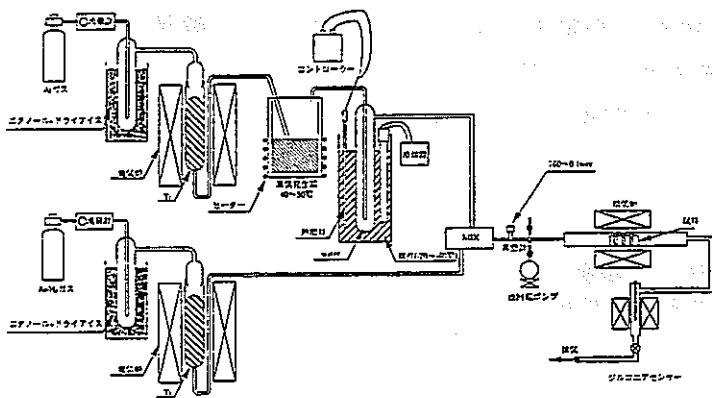


図5 低酸素ポテンシャル下酸化実験装置図

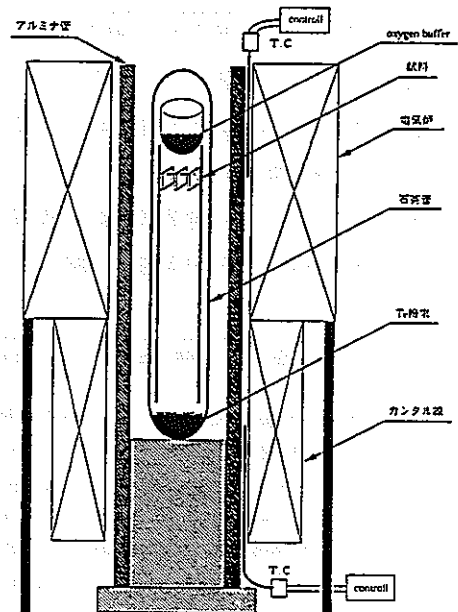


図6 照射用実験装置

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	レーザーを用いた高速炉の燃料破損検出法に関する研究		
研究協力課題	レーザー共鳴イオン化分光を用いたFPガスモニタリングの基礎研究		
研究者所属、氏名			
大学側	名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻 教授 井口哲夫* 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 教授 中澤正治* [*客員研究員 **研究生]		
動燃側	大洗工学センター実験炉部技術課 青山卓史、伊藤主税		
研究協力実施場所	名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻 井口研究室 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 中澤研究室 動燃 大洗工学センター実験炉部技術課		
通算研究期間(予定)	平成8年4月～ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成9年4月1日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>燃料破損時や限界照射試験において、燃料ピン等の破損検知及び同定の精度と信頼性を向上させるため、感度良く高いS/N比でかつ迅速に検出できるレーザーを用いた超高感度の共鳴イオン化質量分析法を高速炉のカバーガス分析に適用して、燃料破損検出及び位置決めのためのFPガスモニタリングに関する基礎研究を行う。</p>			
<p>【研究内容(概要)】</p> <p>レーザー共鳴イオン化分光法は、近年、超高感度の微量元素分析や効率的な同位体分離等の先端技術として脚光を浴びており、レーザーの性能向上と相まって、さらに広範な工学応用への展開が見込まれている。本研究は、このレーザー共鳴イオン化分光法と質量分析計からなるRIMS (Resonance Ionization Mass Spectrometry) を用い、従来のXe、Kr等のFPガスモニタリングによる破損燃料検出法(Failed Fuel Detection and Location:FFDL)の高精度化の可能性を検討するものである。Xe、Kr等の希ガス試料の分析はRIMSの得意とするところであり、これまでも環境ドシメトリヤや加速器ウランターゲットの健全性モニタリング等に適用するアイデアが提案されてきたが、必ずしも定量的かつ具体的な計測システムの成立性まで言及できていない。</p> <p>本研究では、Xeガス検出を例題に、本手法の原理確認と検出感度やS/N比等の基本性能を明確にし、レーザー集光系の改善や希ガスコールドトラップとレーザーアブレーション併用による検出感度の向上を図る。このシステムを用いて、高速実験炉「常陽」で照射されたタグガスやカバーガス分析により本手法の性能実証試験を行うとともに、燃焼に伴う同位体組成比変化を評価する。また、Xe、Krガス同時検出を含む高速炉破損燃料検出に適した計測システムの設計検討を行う。</p>			

### 【使用主要施設】

東京大学工学部附属原子力工学研究施設 レーザー共鳴イオン化質量分析システム  
高速実験炉「常陽」  
東京大学工学部附属原子力工学研究施設 高速中性子源炉「弥生」

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設のレーザー共鳴イオン化質量分析システムに、「常陽」の炉容器内カバーガス試料の導入系を付設・整備し、標準Xeガスを用いた性能確認試験と理論的評価、及び実際のカバーガス試料に含まれるXe同位体比の予備的な分析実験を実施した。また、検出感度の向上を目指してコールドトラップで金属（Cu）表面に吸着したXeガスを分析するため、共鳴レーザーアブレーションの基礎実験と理論的検討を行った。

### 【研究成果】

#### 1. 高速実験炉「常陽」のカバーガス分析のための性能確認実験と理論的評価

「常陽」のカバーガス試料の分析を行うため、東大に既設のレーザー共鳴イオン化質量分析システム（RIMS）へ試料ガスポンベの簡便な装着と分析チェンバーへのガス流量の制御ができる配管系を新たに付設・整備した。この試料ガス導入系について、Xeの検出性能を確認するため、カバーガスを模擬したN<sub>2</sub> 99%、Xe 1%の標準混合ガス（N<sub>2</sub>、Xeともに天然組成）を分析した。その結果、飛行時間質量分析において、入射レーザーの波長が255.946nmの時に共鳴（選択）的検出が起こること及びXe同位体比が定量的に分析できる（実験誤差の範囲内で文献値と一致する）ことを確認した。

また、図1(a)にXe検出感度（イオン収率）のレーザー出力依存性を示すが、2光子共鳴吸収の理論モデル式にフィッティングしたところ、実験結果をよく再現できた。その結果を外挿する（図1(b）と、レーザー出力密度が $6.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 付近でイオン化が飽和することから、現システムのレーザー出力（ $5.0 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ）の増強により、約5倍の感度向上が期待できる。

さらに、図2にXe同位体の濃度割合と質量分析計のマイクロチャンネルプレート（MCP）で検出されたレーザーパルス1ショット当たりの推定イオン個数をプロットした結果を示すが、両者の間には良好な直線性があり、最小二乗法で直線フィッティングすると、その関係式は、

$$Y = (8.02 \pm 0.10) X - (23.7 \pm 152.0)$$

（X：Xe原子数濃度、Y：MCPで検出されたイオン個数）

となった。そこで、検出限界として、MCPでイオンが1個検出された場合を仮定し、この直線を外挿し、かつ検出限界を安全側に、即ち検出限界が大きくなるように評価した結果、その検出限界は21ppmとなった。ここで、有感体積として、共鳴イオン化により質量分析器へのイオンの引き出しが可能な領域と考えると、レーザービーム径とイオンの引き出し孔に囲まれる空間の体積から、 $1.33 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ と見積もられる。したがって、分析チェンバー内の圧力が本実験時の $5.7 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ の場合、検出限界の21ppmは～51個/有感体積と換算され、これまでの事前評価を裏付ける結果となった。

一方、「常陽」におけるタグガス放出実験時に採取されたカバーガス試料中のXeについて予備的な分析を行ったが、予想される濃度が $\sim 10^2 \text{ ppm}$ であり、東大の現システムでは1個のXeイオンを検出するために $\sim 10^4$ ショット（～1000秒間の飛行時間質量分析）が必要となって、S/N比的に有意な結果が得られなかった。したがって、このカバーガス分析を現システムで実用的に行うためには、レーザーのイオン化領域内におけるXe原子の濃度を $10^2 \sim 10^4$ 倍程度濃縮する工夫（コールドトラップによる吸着や超音速バルブを用いた局所的高圧ガス注入等）やレーザー性能の向上（レーザー出力やレーザーパルスの繰り返し率の増強等）が必要と考えられる。

## 2. 共鳴レーザーアブレーションの基礎実験と理論解析

現RISMシステムの検出感度を向上させる方策として、本研究では、希ガスコールドトラップを分析チェンバーに導入して、金属表面に吸着したXe原子を蒸発させるレーザーアブレーションとそれらの共鳴イオン化を1本の波長に同調されたレーザービームで同時に行う共鳴レーザーアブレーション(Resonant Laser Ablation; RLA)の適用を検討している。

平成9年度は、吸着ターゲットであるCuについてRLA現象を確認し、同位体比分析に対する検出感度や質量分解能の評価を行うとともに、Cuイオン収率のレーザー出力及び波長依存性の実験データから、共鳴イオン化成分と非共鳴成分(熱的過程のみによるイオン化成分)を分離し、その結果に基づくRLA現象の理論モデルを検討した。図3に、横軸と縦軸のスケールを適切に調整して実験と計算を比較した結果を示すが、レーザーパルス初期に生成される試料蒸発ガスの圧力による試料表面での沸点上昇効果を考慮することで、実験結果を良く説明できることがわかった。また、RLAを用いた微量元素分析では、S/N比と検出感度の向上という観点から、入射レーザーの出力密度に最適範囲があり、Cu試料では $\sim 2.5 \times 10^{13} \text{W/m}^2$ 程度にするのが良いこともわかった。

なお、現時点での検出感度の評価値は、レーザーパルス1ショット当たり $\sim 8 \text{ppm}$ 程度で、必ずしも超高感度と言えないが、レーザーパルスの繰り返し率や質量分析系へのイオン引き出し効率に対して、十分改良の余地がある。

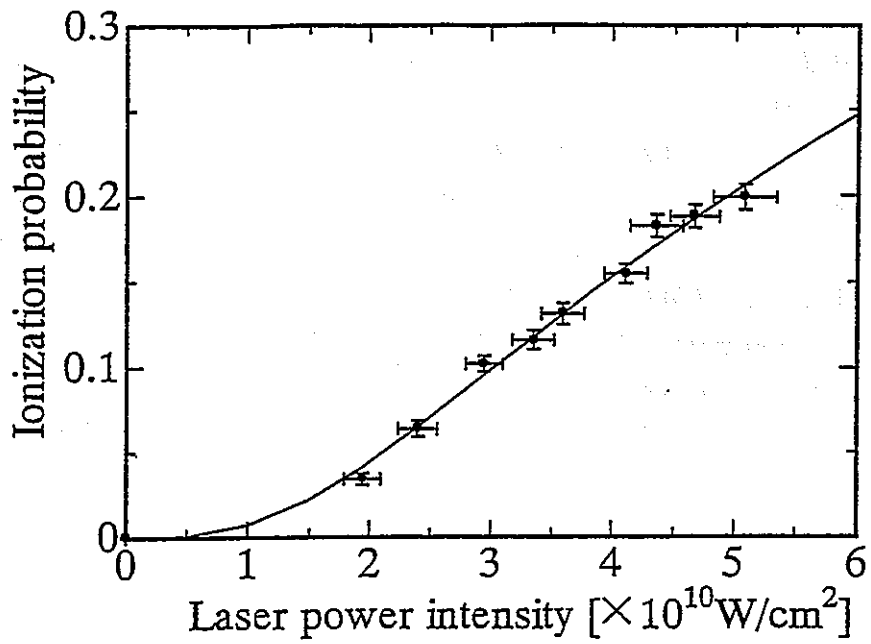
### 【今後の予定(翌年度以降の概要)】

平成10年度は、平成9年度の実験結果を踏まえて、「常陽」におけるタゲガス放出実験試料の系統的分析を進め、微量タゲガスの分析精度の評価と改善を行う。また、希ガスコールドトラップとレーザーアブレーション併用等による検出感度向上策を実証する。

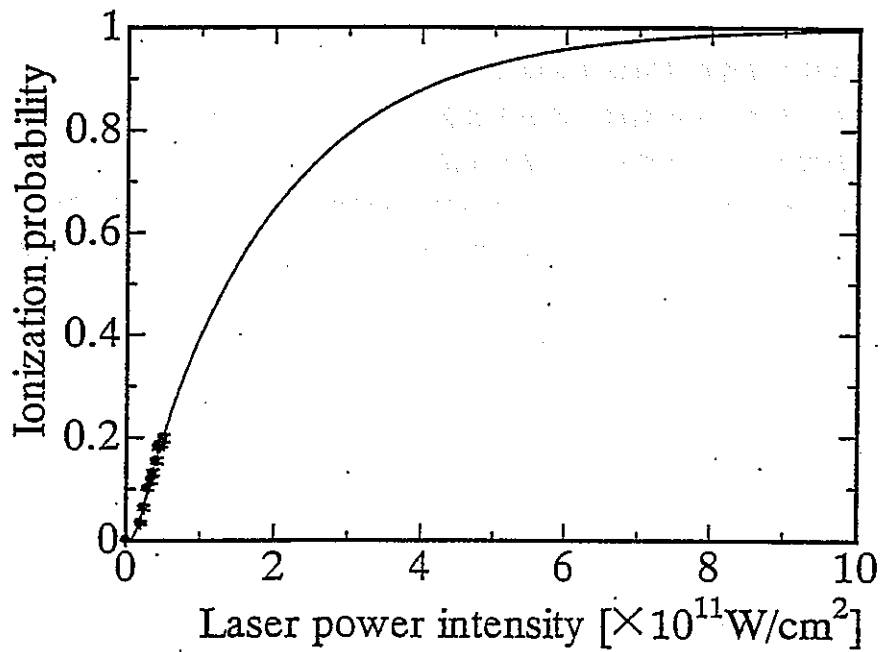
平成11年度は、高燃焼度燃料の安定FPガスの同位体組成比の分析による破損燃料の燃焼度の推定の可能性を検討する。また、Xe及びKrガスの同時検出を含む高速炉用FFDLに適した計測システムの設計及び実用化の検討を行う。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) M. Nakazawa, T. Iguchi, et al., "Standard neutron fields and researches on advanced nuclear measurement technique," Progress in Nuclear Energy, Vol.32, No.1/2, p. 25-41 (Special Issue: Fast Neutron Reactor YAYOI and Related Nuclear Engineering Researches of the University of Tokyo - A Comprehensive Review) (1998)
- 2) 渡辺賢一、井口哲夫 他、「共鳴レーザーアブレーションを用いた極微量核変換生成物検出法の開発(2)」、日本原子力学会1997年秋の大会、沖縄、C28 (1997)
- 3) 渡辺賢一、井口哲夫 他、「共鳴レーザーアブレーションを用いた極微量核変換生成物検出法の開発(3)」、日本原子力学会1998年春の年会、近畿大学、C7 (1998)



(a) 低出力領域



(b) 高出力領域への外挿

図1 Xeイオン収率のレーザー出力依存性に関する理論モデルのフィッティング結果

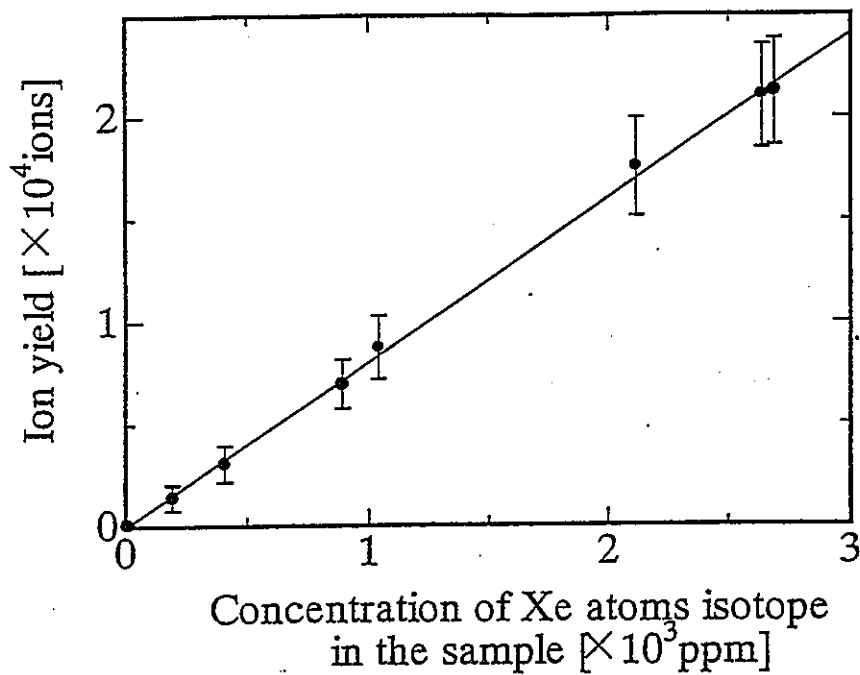


図2 天然組成のXeガス試料における各同位体濃度割合とXeイオン検出数の直線関係

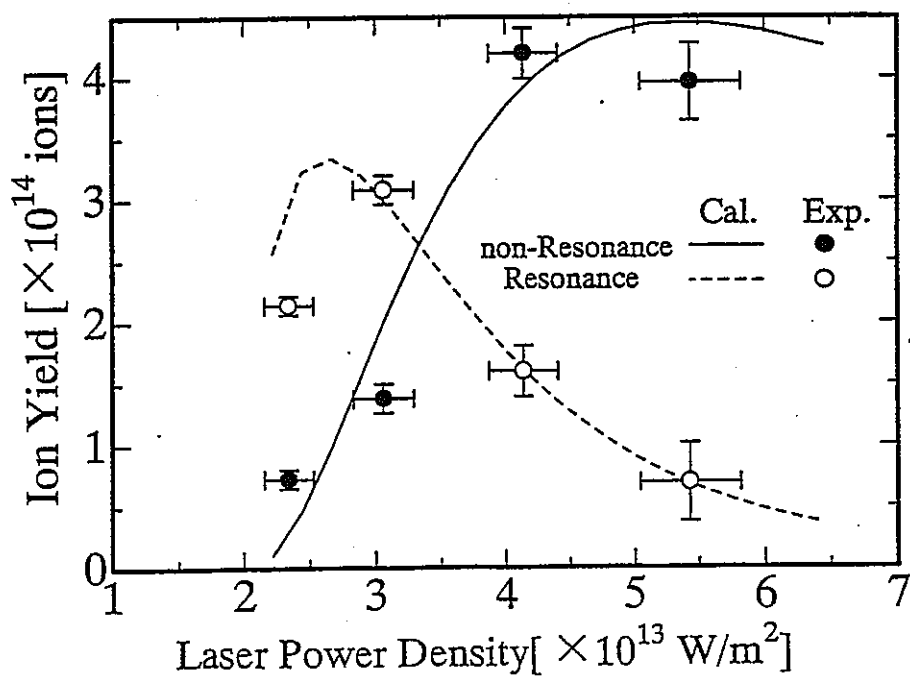


図3 Cuイオン収率における共鳴/非共鳴成分のレーザー出力依存性に関する実験と理論の比較



先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	液面の非線型不安定現象に関する基礎研究		
研究協力分野名	同上 -液面下の流れによる不安定現象-		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学 工学部附属原子力工学研究施設 原子炉設計工学部門 班目 春樹 教授, 岡本 孝司 助教授, 鶴 大悟 助手		
動 燃 側	大洗 熱流体技術開発室 飯田 将雄		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京大学 工学部 班目研究室 動燃 大洗工学センター 熱流体技術開発室		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月 ~ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年11月5日~ 平成10年3月28日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>容器内流体の自由液面下に流れが存在する場合、液面の自励揺動など自由液面と流れの相互作用に起因する非線型不安定現象が発生する可能性がある。実験的研究によりこのような現象に関する知見を得て発生機構を解明し、さらに解析コードを用いた発生予測手法を確立することを本研究の目的とする。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>本研究では、自由液面の非線型不安定現象に関する基礎的な知見を得るため、水を試験流体とし単純形状の試験体を用いた実験を行う。この知見に基づき、現象の一般的な発生条件および発生機構を解明する。さらに自由液面を扱う流動解析コードを現象の発生予測に利用可能とすべく、解析能力の検証を取得したデータに基づいて実施する。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>東大工学部原子力工学研究施設内 水ループ 高架水槽高さ 5m、最大流量 2000 l/min</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度には、液面に衝突する平面噴流の自励振動の発生機構の検討、および高分子溶液による自由液面乱流抑制効果の検討を実施した。平成9年度はそれらを発展させ、液面に衝突する円筒噴流の自励振動に関する実験的・理論的研究、鉛直噴流による自由液面自励スロッシングの数値解析、そして高分子溶液による剪断乱流抑制効果についての実験的研究を実施した。

## 【研究成果】

### (1) ジェットフラッタのメカニズム解明

自由液面と噴流の相互作用によるジェットフラッタのメカニズムを解明するため、実験計測、理論解析を実施した。特に円筒容器内ジェットフラッタに注目し、可視化実験からジェット変動、液面変動、圧力変動などを同時計測し、相互の位相、相関を実験的に得た。図1に実験において撮影した画像を解析して得た噴流の変動の様子を示す。また、噴流の位相遅れの様子を、昨年度提案した矩形容器ジェットフラッタモデルに基づく解析結果と併せて示す。このモデルでは、噴流と液面との位相関係が重要な役割を果たす。両者の傾向は良く一致しており、円筒容器内ジェットフラッタも矩形容器内のものと同様のメカニズムで発生していることを示すことができた。

### (2) 鉛直噴流による自由液面自励スロッシングメカニズム解明

自由液面と噴流の相互作用による自励スロッシングのメカニズムを解明するため、数値解析を実施した。PNC所有の解析コード(SPLASH-ALE)により、鉛直噴流による自励スロッシングをシミュレートした。この結果、2次元の振動を正しく予測することができた。また、噴流振動の位相遅れを実験結果と比較することで、このシミュレーション結果が自励スロッシング現象を正しく予測できていることを明らかにした。

図2に自励スロッシングの実験と計算を比較して示す。実験はインクにより噴流を可視化している。また解析では仮想トレーサにより噴流を可視化している。解析において、スロッシング状態における噴流のうねり(変動)と液面形状が正しく模擬できていることが判る。すなわち、シミュレーションで模擬されたスロッシング現象は実験で観測されたスロッシング現象と同じメカニズムで発生している事が判る。しかしながら、スロッシングの発生条件は必ずしも実験と計算では一致しない。これは、シミュレーションが層流コードに基づいていることに起因している。予測に用いるためには乱流モデルが必須である。

### (3) 自由液面と乱流との相互作用

自由液面における乱流境界に対する理解は、いまだ不十分である。解析コードによって自由液面を正確にシミュレートするためには、自由液面における乱流の状況を把握する必要がある。自由液面の乱流条件をモデル化する事によって、自由液面を含む乱流場をシミュレーションコードによって容易に予測する事が可能となると考えられる。そこで、自由液面における乱流挙動を明確にし、モデル化を行なう事を目的として、基礎的な実験と計測を実施した。

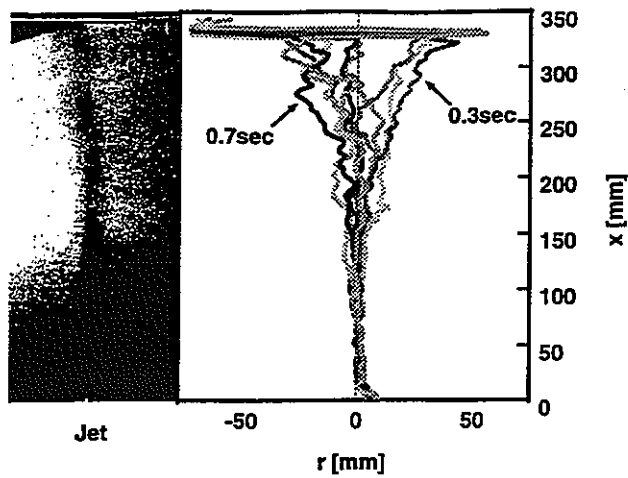
微量の鎖状高分子を混入することにより、自由液面乱流の抑制に関して、実験的検討を実施し、これらの影響によって自由液面の乱れが減衰することを定性的に確認した。LIF (Laser Induced Fluorescence) を用い、液面下噴流を可視化することで、水噴流と高分子溶液噴流の定性的な挙動の違いを明確にした。図3にLIFによる噴流の可視化写真を示す。ここに示すように高分子溶液噴流では噴流の広がり角度が小さくまとまって流れている。せん断の大きな噴流端においては乱れが抑制され噴流と周囲流との相互作用が小さくなり、その結果発生する乱れは小さくなる。このため高分子溶液噴流における自由液面の乱れが小さくなっているのは、この発生する乱れが少なくなっていることに起因している事を明らかにすることができた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

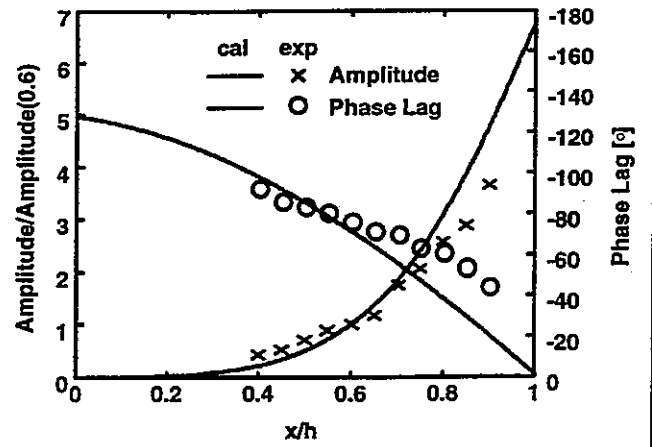
平成10年度は、引続き自由液面の非線形不安定挙動に関する研究を推進する。具体的には、ジェットフラッタ、自励スロッシングなどの液面自励振動現象のメカニズム解明と発生予測精度の向上を目指し、数値シミュレーションの改良および精度の高い実験を続ける予定である。さらに、基礎的な自由液面乱流挙動の定量的な把握を行うため可視化計測技術の高度化を実施し、より精度の良い実験データを蓄積する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・ Madarame, H. and Iida, M., "Jet-Flutter: Oscillation of upward plane jet making surface swell (1st Report: Streak line of Jet)," JSME, ICFE, No.97-203, Tokyo, (1997), pp.533-538.
- ・ Madarame, H., "Jet-Flutter: Oscillation of upward plane jet making surface swell (2nd Report: Mechanism of Oscillation)," JSME, ICFE, No.97-203, Tokyo, (1997), pp.539-544.
- ・ Okamoto, K., "Simultaneous measurement of free surface and velocity using image processing technique," Proc. FLUCOME'97, Hayama, (1997), pp.965-970.
- ・ 班目 春樹、「液面衝突上向き平面噴流自励振動現象—ジェットフラッタの振動数決定機構」、日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集(III), No.97-1(III), (1997), pp.344-345.
- ・ 岡本 孝司、「自由液面—流れ相互作用の画像による計測(第2報：液面形状再構築)」日本原子力学会1997年秋の大会、(1997), G67
- ・ Bistriteanu M., Okamoto, K. and Madarame, H., "Numerical simulation on self-induced sloshing by vertical plane jet," 日本原子力学会1997年秋の大会、(1997), G69



(a)噴流流脈線

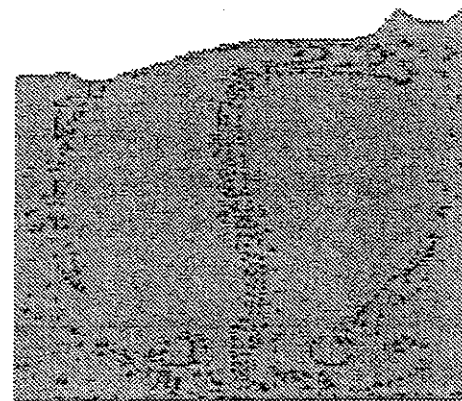


(b)噴流振幅・位相の実験及び計算結果

図1：円筒容器内ジェットフラッタ実験結果

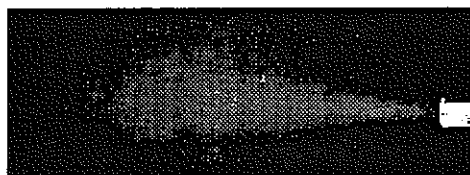


Experiment

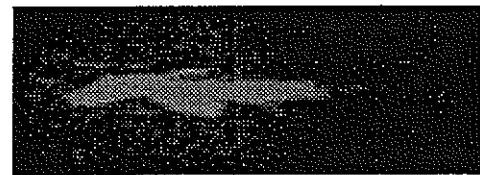


Simulation

図2：自励スロッシングの可視化とシミュレーション



Water jet



Polymer-solution jet

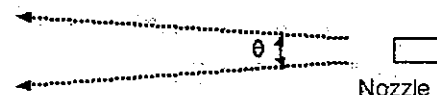
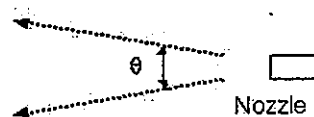


図3：自由液面下噴流の可視化

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	液面の非線型不安定現象に関する基礎研究		
研究協力分野名	同上 -流れ込みに対する液面応答-		
研究者所属、氏名			
大学側	茨城大学 工学部 機械工学科 神永 文人 教授, 松村 邦仁 助手		
動燃側	大洗 熱流体技術開発室 飯田 将雄		
研究協力実施場所	茨城大学 工学部 神永研究室 動燃 大洗工学センター 熱流体技術開発室		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月 ~ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成9年10月6日~ 平成10年3月28日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>            容器内流体の自由液面と液面へ流れ込む流れの相互作用に起因する非線型不安定現象について、現象の詳細な知見と、発生予測手法を得ることを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b>            本研究では、自由液面に液体が流れ込む場合の非線型不安定現象を対象とした実験を水を試験流体として行い、流れ込みに対する跳水や気泡巻き込み等の液面挙動を実験的に調査する。液面挙動と内部流れの相関といった統計的性質の検討を行い、流れ込みに対する液面挙動の支配因子と現象の機構を解明する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>            茨大工学部機械工学科内 水ループ</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度は、昨年度の予備実験をふまえ2次元体系の試験装置を製作し、容器内自由液面に生じる振動現象について実験的に調べた。その結果、流入条件によっては自由液面ではスロッシングに類似した揺動がみられ、その発生条件として容器長さ、深さ、及び流入角度等が関連していることが分かった。

### 【研究成果】

平成10年3月までの研究成果の概要をまとめる。

自由液面を含む容器内に流体が流れ込む現象は、複雑な多液面を有するFBRの熱出力特性などの炉心安全性に大きく関連するため、非常に高精度の解析手法の確率が要求される。しかし、従来の開水路流れを対象とした研究を除くと、液体流れ込みに伴う自由液面の揺動等の現象についてはこれまでほとんど研究がなされていない。そこで本研究では、液体の流れ込みにより誘起される内部流れと容器内自由液面との相互作用によって生じる液面振動について明らかにすることを目的としている。特に、現象の基本的特性を理解するため側面からの観察が可能な2次元体系での実験を行い、流入条件等の各パラメータの影響について調べた。

#### (1)流れ込みに伴う液面揺動実験

本年度の実験に使用した装置の概略図を図1に示す。実験は昨年度とほぼ同じく、液の水深(H)、液面に対するジェットの入流角度( $\theta$ )、容器長さ(W)、及び流入位置(L)を種々に変化させ、容器内部の流れと自由液面に生じる代表的な流動現象の分類を行った。また、いくつかの実験条件については容量式波高計を使用して、液面振動を測定した。各パラメータの変化範囲は  $H=320\sim 460$ 、 $\theta=18\sim 60^\circ$ 、 $W=500\sim 1700$ 、である。このうち、WとHについては仕切り板の操作によって大きさを変化できるように設計されている。また、水面流入時のジェットの流速は最大でおよそ1.62m/sである。

#### (2)流動現象の分類

代表的な液面振動時の様相を図2に示す。本実験体系では流出口と液面との間に2~3cmの距離があるため、非常に多くの気泡を伴って水が測定部に流入する。また、噴流の左右には渦が存在し、水槽内部を循環する。このとき、ある特定の流入条件では噴流が左右に大きく揺れ始めるとともに、定常的な液面の自励振動が観察された。本実験体系で見られた現象を大きく分類すると、(a)安定した液面振動、(b)非振動に大別できる。このうち、(a)の液面振動では最大4次モードまでの高次の振動が見られた。自由液面の振動現象は主にジェットの流入角度( $\theta$ )によって変化し、振動発生条件はジェットの流入角に依存していることがわかった。すなわち、流入角度が大きくジェットの垂直方向速度が大きい場合は液面振動は見られず、そのときの液面の状態は(b)の非振動的となる。また、流入角度が水平に近い場合には本実験の流速範囲では、跳水現象が見られ、この場合も液面の振動は観察されなかった。

(a)の安定した自由液面振動は、ジェットの流入角度がこれらの中間の条件にある時に観察された。本実験で生じた液面振動の発生条件の一例を図3( $H=370\text{mm}$ )に示す。図中の各記号は振動のモードを表しており、容器長さ(W)が大きくなるにつれてより高次のモードの揺動が現れている。また各モード間には、遷移的な振動を示す領域が存在する。

図4は波高計によって測定した自由液面の振動について、周波数解析を行って得られた振動周波数と、容器長さ(W)との関係を示している。図中の実線は理論的に得られた1次から3次までのスロッシング周波数である。この図からも判るように、本実験条件で得られた液面振動の周波数は、スロッシングの理論式とそれぞれ良く一致している。

今後はこの実験装置を用いて、さらに詳細な流動現象の分類を行うとともに、液面の振動現象が現れる場合について水位変動の測定、及び流入口付近における流速の測定を行う予定である。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 10 年度は、液面形状、水位変動、容器内部でのジェットの挙動と流体速度を計測し、容器内自由液表面に液体が流れ込む場合の液面の揺動に関する系統的なデータベース作成する予定である。また、容器の寸法が現象に与える効果についても調べる予定である。また測定されたデータを用いて前年度に引き続き液面揺動の統計的性質について、パワースペクトル分布、自己相関、確率密度分布、相関次元、ウェーブレット変換等を援用して調べる予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

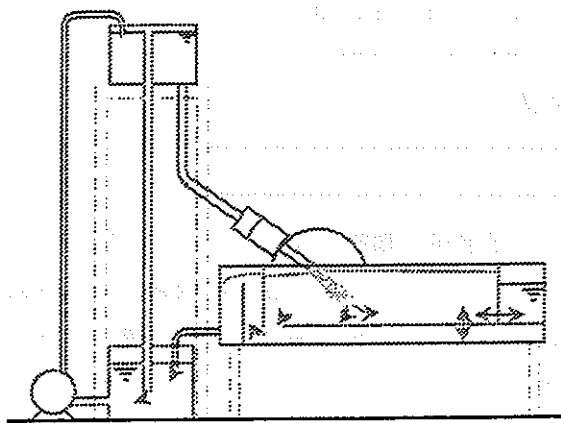


Fig. 1 実験装置概要図

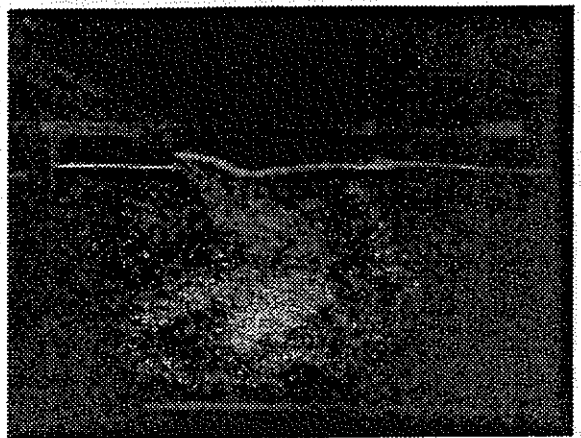


Fig. 2 液面流入時の様相

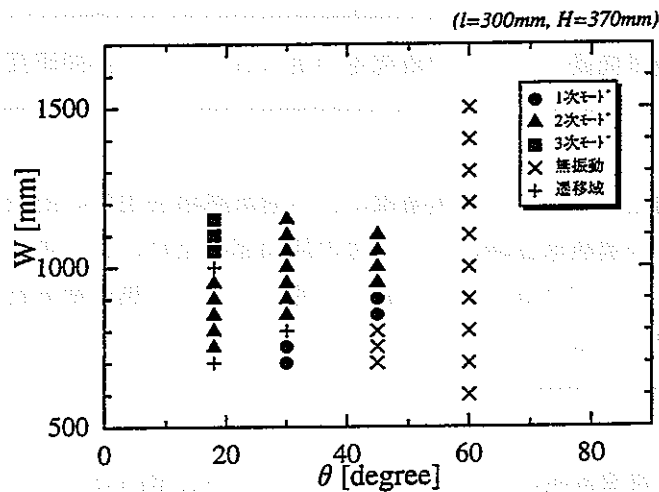


Fig. 3 液面自励振動発生条件

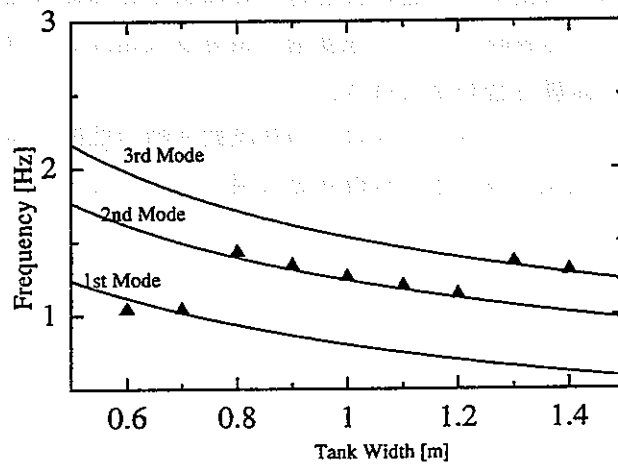


Fig. 4 理論値と実験値との比較



先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価														
研究協力課題	非等温場における噴流の流速分布計測														
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授 菱田公一*</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: right;">[*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗 原子炉工学室 上出 英樹、A.Tokuhiro、木村 暢之、平林 勝、大木 義久</td> </tr> </table>			大 学 側	慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授 菱田公一*				[*客員研究員 **研究生]			動 燃 側	大洗 原子炉工学室 上出 英樹、A.Tokuhiro、木村 暢之、平林 勝、大木 義久		
大 学 側	慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授 菱田公一*														
	[*客員研究員 **研究生]														
動 燃 側	大洗 原子炉工学室 上出 英樹、A.Tokuhiro、木村 暢之、平林 勝、大木 義久														
研究協力実施場所	慶應大学 菱田研究室 動燃 大洗工学センター 原子炉工学室														
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年4月1日～ 平成10年3月31												
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究														
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>高速炉の受動的安全性向上において、自然循環による崩壊熱除去現象の把握とその評価手法の確立は重要なテーマである。近年崩壊熱除去時のラップ管の隙間部の流れによる炉心の冷却現象が着目されている。この流れはインターラップフロー（IWF）と呼ばれ、その熱流動挙動の解明および解析評価手法の確立を今後進める必要がある。</p>															
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>インターラップフローの現象解明のための基礎研究として炉心槽内および上部プレナム内のグローバルな流況を流れの可視化と画像処理により定量化する。また最新の可視化技術により画像処理による速度場と温度場の同時計測を実施する。さらに超音波流速計によりラップ管隙間部の詳細な流速分布計測を実施し、画像処理により得られたデータとの突き合わせにより隙間部の流れに対する適用性を評価する。粒子の画像処理から得られる瞬時2次元の速度場と超音波流速計から得られる瞬時1次元の速度場を比較するにあたり、基礎的試験も合わせて行う。</p> <p>試験で得られたデータは、インターラップフローの熱流動挙動の把握・解明、及び解析コードの検証に活用する。さらに試験での知見に基づき、解析評価に用いる流動分布抵抗などの物理モデルを開発・構築する。</p>															
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>サーマルストライピング試験装置（大洗 水流動） 水キャビテーション試験装置（大洗 水流動）</p>															

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度には、気泡の近傍の流れ場についてUVP（超音波流速分布測定装置）とPIV（粒子画像流速分布測定法）を用いて流速測定を実施した結果、気液界面が存在し、複雑形状で光りの反射がある場にも両者が適用できることを明らかにした。9年度には温度の異なる噴流間の混合現象に対して、UVPとPIVを適用し、非等温場における速度計測について両者の適用性を明らかにした。

## 【研究成果】

### 1. はじめに

UVPを炉心槽内流速場測定に適用するための基礎試験として、9年度は非等温場への適用性を確認する。実験は水を作動流体とする平行3噴流体系で行い、UVPとPIVを流速場測定に適用して比較する事により、UVPの適用性を明らかにする。

### 2. 実験装置と計測手法

図1にテストセクションの概略を示す。水を作動流体とし、矩形の試験容器の中に平行に置かれた3本のスリットから鉛直上方に噴流が試験容器に流れ込む体系となっている。中央のスリットからは外側よりも低温あるいは等温の噴流を流出させることができる。各スリットの寸法は20mm x 169mmで水力等価直径は35.8mmである。

温度計測は直径0.3mmのK型熱電対を水平に39本並べた櫛状の計測ユニットで行った。ある高さで0.02秒間隔で20秒間の測定をし、熱電対ユニットを上方にスライドさせながら温度場を計測した。UVPについては、水平から時計回りに10度傾けたラインに沿って超音波を射出し（右方向）、そのライン上の流速分布（ラインに沿った速度成分）を0.07秒間隔で70秒間計測した。計測ラインを上方にスライドさせながら測定するとともに、水平から反時計回りに10度傾けたラインに沿っての測定（左方向）を繰り返し、2次元の時間平均流速分布データを得た。PIVについては試験容器の側面からレーザーライトシートを0.5msec間隔で2回照射し、CCDカメラにより2枚1組の画像を収録した。これから画像処理により2次元の流速ベクトルを得た。UVP、PIVともに超音波あるいは光の散乱源（トレーサー）としてポリエチレン系粉末（直径50~100ミクロン）を用いた。

### 3. 実験条件

本実験の目的は非等温場の速度場計測への影響を確認することにある。まず、噴流体系への適用性を確認するため、等温場での単一噴流（中央のスリットのみ）について既存の実験データとUVPの測定結果を比較した。次に、中央の噴流を外側の噴流より5℃だけ低温とし、突出流速は3本の噴流で一様（0.5m/s）としたケースについて、2.で示したPIVならびにUVPによる速度場計測と温度場計測を行った。

### 4. 実験結果

#### 4.1 単一噴流での既往実験との比較

図2に噴流の中心線に沿った軸方向流速の分布についてKataoka, Corrsin, Warrenらの試験結果と本試験体系にUVPを適用した結果を比較して示す。ポテンシャルコアを過ぎて流速が低下する過程がKataokaらの試験結果とUVPの計測結果とでよく一致することがわかる。この比較から等温場におけるUVP速度計測の妥当性が確認できた。

#### 4. 2 温度場の測定結果

平行3噴流体系について、現象を理解する上で、温度分布をまず議論する。図3に熱電対で計測した時間平均の温度場をコンター図として示す。スリットから下流に行くに従い、中央の低温噴流に向かって左右の高温噴流が接近し、混合が進む様子がわかる。

#### 4. 3 流況の比較

上記の温度分布をもった体系に対してUVPを適用し、速度場を計測した。UVPにて計測した1次元の流速分布データについて右方向に超音波を射出したデータと左方向からのデータを合成することにより、2次元の流速ベクトルを計算し、これから体系全体の速度場を得た結果を図4に示す。温度場の計測結果で見られた左右の噴流が中央に接近する様子が速度場からも確認できる。

次に比較対象としてPIVによる測定結果を図5に示す。1秒間(約30組)の測定画像データから流速ベクトルを計算し、その時間平均値として流速ベクトル図を得た。画面左側についてスリット光の減衰により、画像の質が悪くなっており誤ベクトルが多くなっている。PIVとUVPによる流速分布は、噴流の形状などがよく一致しており、定性的ではあるが、時間平均の速度場を計測する手法として両者が適用可能であることがわかる。

#### 4. 4 時間変動挙動の比較

UVPによる計測の特徴として、時間変動挙動を観測できる点が挙げられる。ビデオを用いた観測によれば、中央の噴流は時間と共に左右に振動している。これにともなう速度場と温度場の時間変動挙動をUVPと熱電対の測定結果で比較した。中央の噴流と右側の噴流との中間位置で流速と温度の時間変動の周波数特性の軸方向分布をを比較した結果を図6に示す。温度ならびにUVPで計測された速度は同一の卓越周波数をもっており、UVPの時間変動挙動への適用性が確認できた。

#### 5. まとめ

UVPによる速度場計測手法を噴流体系で既存の試験データ、PIV、温度場測定と比較し、本手法が時間変動挙動を含めて高い適用性をもつことを明らかにした。

#### 【今後の予定(翌年度以降の概要)】

今年度の結果から得られる温度差による計測データの評価方法を元に、非接触による流体温度温度計測についても研究を進め、狭隙間部における流速と温度分布の同時計測を視野に、炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価につなげる。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) A. Tokuhiro, K. Hishida, et al., "Measurements in the wake of two bubbles in close proximity by combined shadow-image and PIV technique," 1997 ASME Fluids Eng. Div. Summer Mtg., P.1, Vancouver, Canada (1997)
- 2) A. Tokuhiro, N. Kimura, H. Miyakoshi, "An experimental investigation on thermal striping. Part I: Mixing of a vertical cooled jet with two adjacent heated jets as measured by by ultrasound Doppler velocimetry," NURETH-8, p.1712-1723, Kyoto, Japan(1997)
- 3) 木村 暢之、A. Tokuhiro 他、「平行三噴流のサーマルストライピング現象に関する実験研究 - 超音波流速計による流れ場変動特性の評価 -」原子力学会1998年春の年会、H51 (1998)

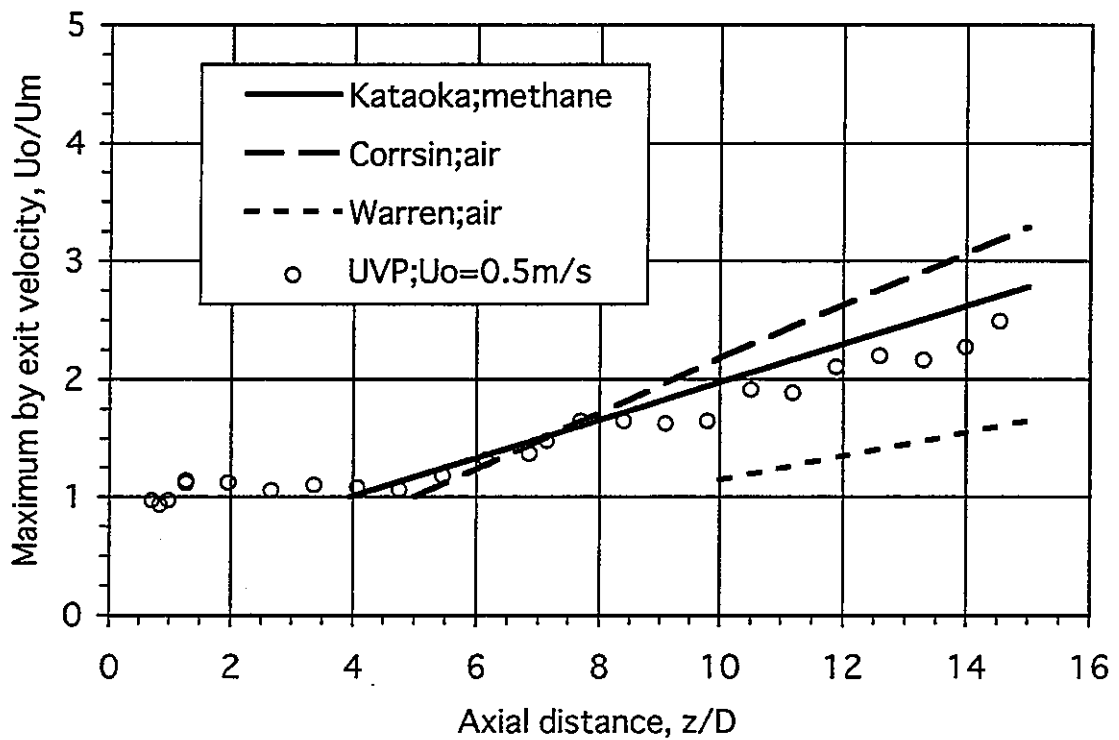
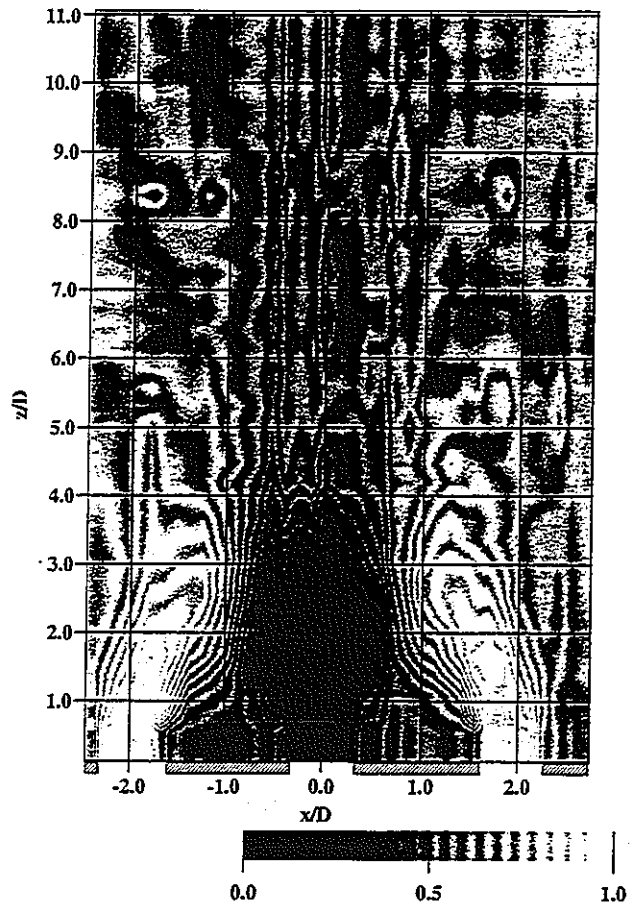
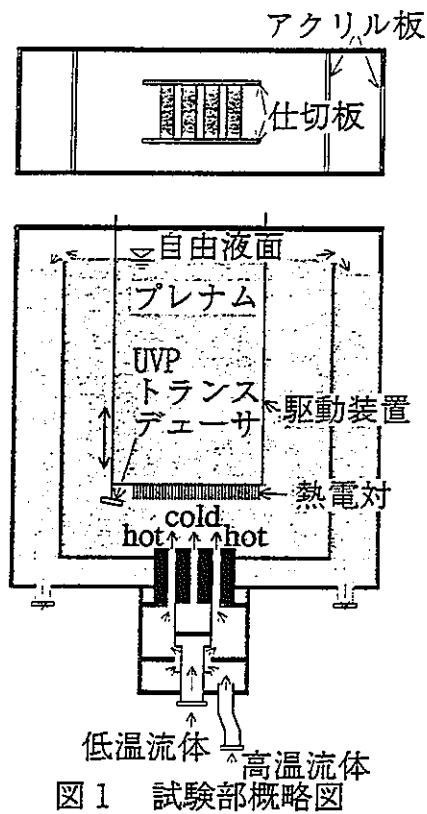


図2 単一噴流における軸方向流速成分の軸方向分布  
UVPによる測定と既往試験との比較

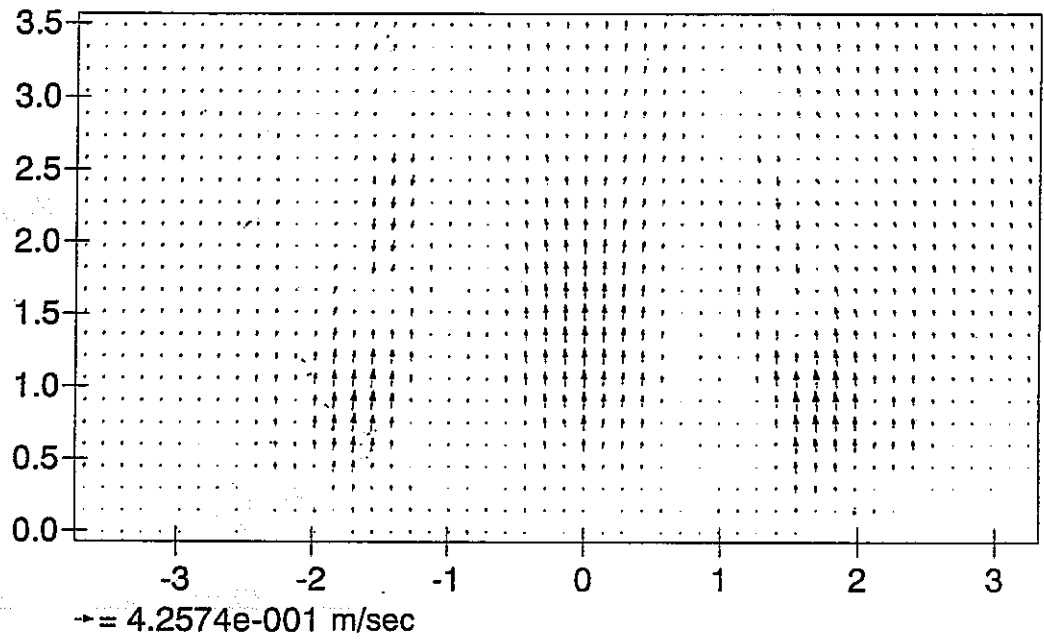


図4 UVPによる時間平均速度場

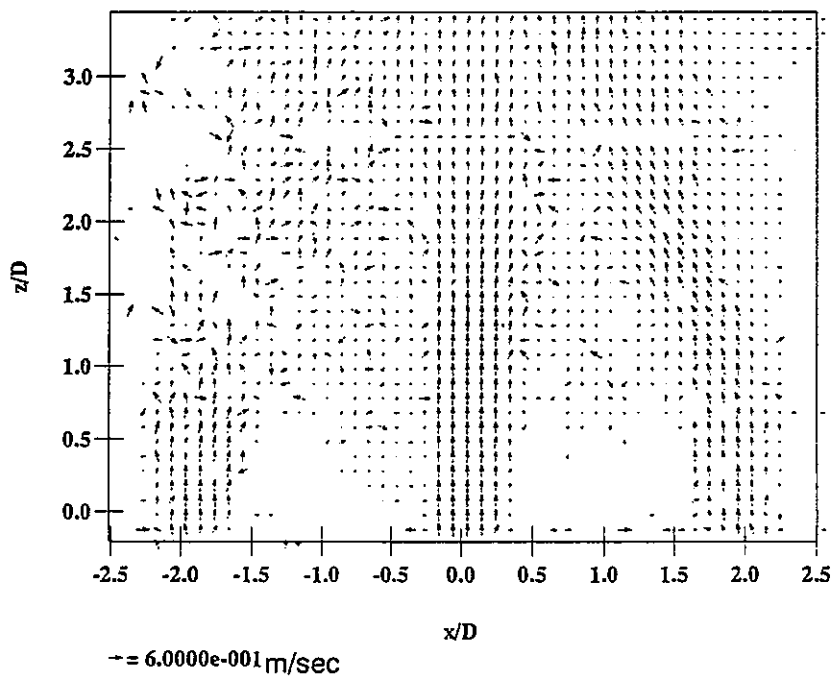


図5 PIVによる時間平均速度場

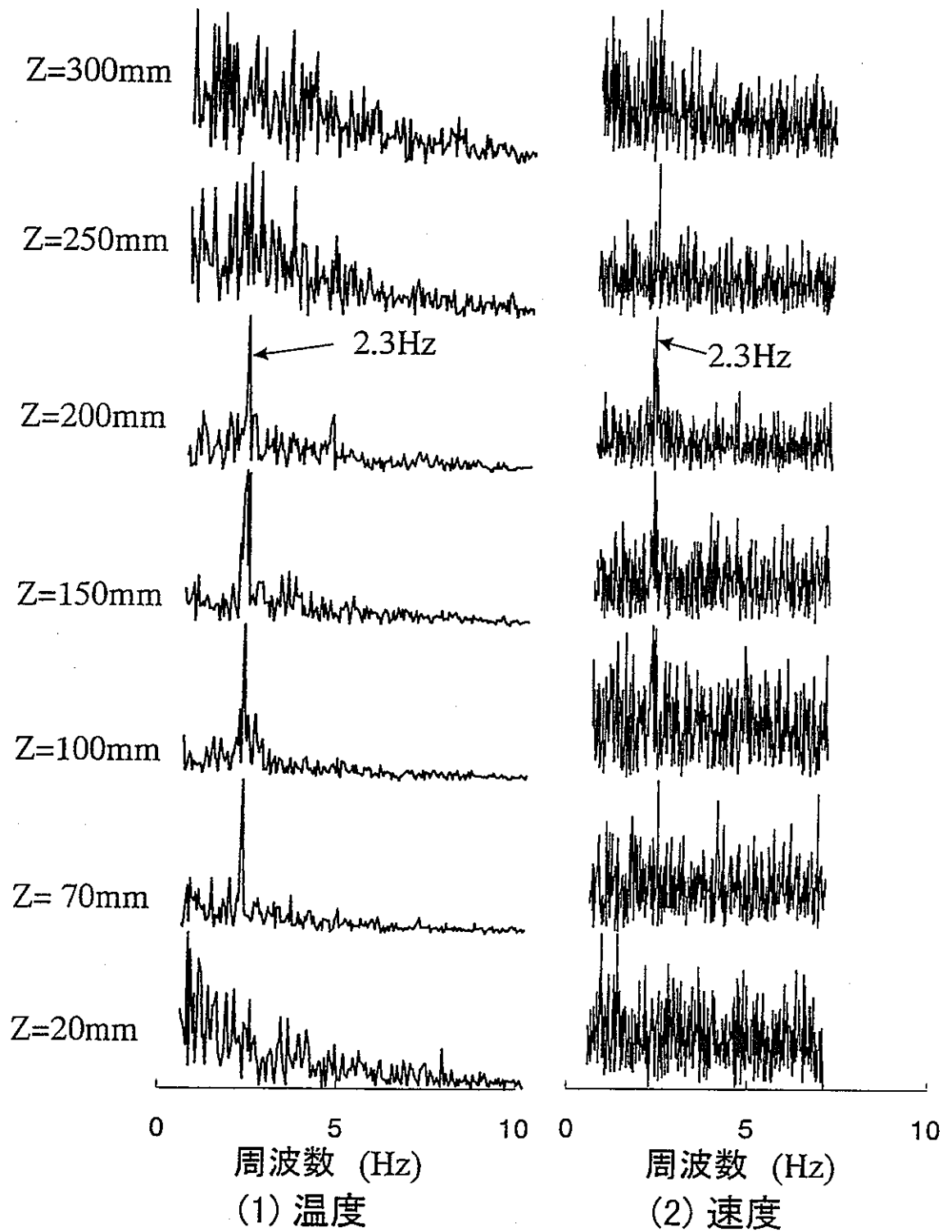


図6 温度／速度変動のスペクトル分布

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	相変化を伴う融体移行挙動に関する基礎研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大学側	東京工業大学原子炉工学研究所 助教授 齊藤正樹、助手 澤田哲生、 技官 根津 篤 [*客員研究員 **研究生]		
動燃側	大洗 高速炉安全工学室 小西賢介、神山健司、今堀真司		
研究協力実施場所	東京工業大学 原子炉工学研究所 齊藤研究室 動燃 大洗工学センター 高速炉安全工学室		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成9年10月28日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>高速炉の安全評価において、炉心損傷事故時の再臨界の可能性を排除するために、熔融炉心物質の早期分散量を精度良く評価する必要がある。そこで、熔融炉心物質の分散量評価で支配的な因子となる、分散経路での固化現象に関する試験データを取得し、この現象に対する基礎的知見を得ることを目的とする。またこれらの試験データは、多相多成分流体力学コードSIMMER-IIIのモデル改良及び検証に反映する。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>従来、分散経路での固化現象を模擬した試験は数多く実施されてきたにも関わらず、以下に関する試験データが不十分である。すなわち、</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 固化熱伝達時のクラスト形成条件</li> <li>(2) 固体粒子混入時の熔融燃料の固化挙動</li> <li>(3) 構造材の熔融を伴う熔融燃料の固化挙動</li> </ol> <p>である。</p> <p>本研究では、構造材、熔融燃料に対する適切な模擬物質を選定し、上述の現象を模擬した試験を実施する。この際、分散経路を模擬した試験体系を単純なものとし、形状に起因する試験データの不確定性を排除することにより、現象を特徴づけるパラメータの抽出を容易にする。また、固化熱伝達現象を把握するために重要である、固化過程における流動状況の解明にも重点を置き、そのために必要な計測技術の高度化も目指す。また、実験解析を通じ、SIMMER-IIIのモデル改良及び検証を行う。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>大洗工学センター高速炉安全性第2試験室（融体侵入固化試験装置） 東京工業大学原子炉工学研究所（固化試験装置）</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度に実施した予備試験結果を分析することにより、固化熱伝達現象を特徴づける要因を推測した。また、その要因の一つであるクラスト形成に関する基礎実験を、大学側の固化試験装置を用いて実施した。さらに、SIMMER-IIIコードに対し、固化現象を取り扱う汎用的な機構論モデルを整備した。

## 【研究成果】

### 1. 実験的研究

#### (1) 予備試験結果の分析

溶融錫を模擬溶融炉心物質とした侵入固化試験においては、一般的に、

- ・侵入速度は、駆動圧力が高くなるほど大きくなる。
- ・侵入距離は、管径の増大、また侵入速度の増大に伴い増大する。

といった傾向が得られているが、管径の小さい場合には例外的にこの傾向が不明確となっていることがわかった。この原因として、クラスト形成の影響が考えられるため、SIMMER-IIIコードによる解析と併せ、管軸方向のみではなく管径方向にも着目して流動状況を多次元的に観察する必要があるという結論を得た。

#### (2) クラスト形成に関する基礎試験

水の融点以下に冷却したアクリル製の管に水を定常的に流すことにより、管内面にクラストを形成させる実験を行った。実験装置の概略を図1に、実験条件を表1にそれぞれ示す。本実験において、試験部定点温度及びクラスト厚さを測定することにより、以下の知見を得た。

融体クラストは流路入口から下流へ向かって次第に厚さを増し、その厚みは流路管壁の冷却条件により大きく影響を受ける。(図2)

層流条件下におけるクラスト厚さは従来の層流モデルによる予測値よりも小さく、レイノルズ数の増加により両者の差はさらに大きくなる。また、クラスト厚さがある程度まで増加すると、下流において界面がステップ状に減少する。これは、クラスト厚さが下流側へ増加することにより流れが加速されて局部的に乱流化し、熱伝達が向上するためであると考えられる。

相変化を伴う場合の平均熱伝達率は従来の单相熱伝達相関式と比べて小さくなり、流路管壁の冷却条件により大きく影響を受ける。これは、流路管壁の冷却条件が強くなるのに従ってクラスト界面近傍における固化粒子の発生が顕著になり(シャーベット状になり)、流れの乱れが抑えられるためであると推察される。そこで、従来から提唱されている相変化を伴わない場合の熱伝達特性を $Nu_0$ 、相変化を伴う場合の熱伝達特性を $Nu$ とし、冷却パラメータ( $C^*$ )が熱伝達に及ぼす影響( $f(C^*)$ )との間に以下の相関があると仮定した。

$$Nu = f(C^*) Nu_0$$

実験データを図3のように整理すると、冷却パラメータの増加に伴い $f(C^*)$ の値が減少する傾向が見られる。補正関数は以下の式にて表すことができ、

$$f(C^*) = 1 / (1 + 0.017 C^{*1.9})$$

この式を用いて実験結果を図4のように整理すると、比較的良い一致をみることができた。



## 2. 融体固化現象の機構論的モデル化

### (1) モデル化の背景

従来の研究によれば、一般に、固化クラストが形成される場合には、これが熱抵抗となり熱伝導支配型の固化現象 (conduction freezing) が生じる。一方、固化クラストが形成されない条件においては流路に侵入する融体の先端部のバルクエンタルピーが凝固条件を満たした時点で固化・閉塞 (bulk freezing) が生じる。閉塞形成に至るまでの融体の侵入距離でみると、前者の固化モードの方が後者に比べて一桁程度長くなる。

融点からの過熱度がそれほど大きくない溶融燃料の低温スティール流路での固化においては、熱的条件からは、両者の固化モードが同時に生じる混合固化現象 (mixed freezing) が生じるものと予想される。また、クラストと構造材との間にギャップが形成されるために生じる熱抵抗も重要な効果を持つことが知られている。従って、本研究では、融体の固化現象に係るこれらのメカニズムを機構論的にモデル化することにより高温の実炉心物質の固化現象から低温模擬物質の固化現象までを汎用的に解析できる評価手法を開発した。

### (2) SIMMER-IIIコードを用いた固化機構のモデル化

SIMMER-IIIは多相・多成分流をモデル化した安全解析コードであり、流体物質間及び流体と構造壁との熱交換を溶融/固化の相変化を含めて汎用的にモデル化しており、熱的条件に依存して上記の熱伝導支配型固化及びバルク熱伝達支配型固化現象が正確に予測できることが確認されている。今年度は混合固化現象を記述するために、構造壁近傍の過冷却融体の存在、クラストと構造壁とのギャップの存在等に係るモデル改良を行った。これにより、溶融酸化物の固化・閉塞形成に対する同コードの適用性の拡大が図られた。

### (3) 溶融燃料固化実験の解析

上記モデル改良の結果を検証するために、溶融UO<sub>2</sub>を用いた炉外固化試験 (CEA のGEYSER及びJRC のBLOKKER) の解析を行った。表2に試験条件及び混合固化現象をモデル化したSIMMER-IIIと試験データとの比較を示す。また、簡易バルク固化モデル (融体と構造壁との間の熱抵抗を加味) との比較結果を図5に示す。計算された溶融UO<sub>2</sub>の侵入距離は、実験データのばらつきの範囲で良い一致を見ている。さらに、固化クラストの形成についても実験後の観察結果と定性的に対応しており、混合固化モードの取扱いの妥当性が検証された。

### 【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

平成10年度は、侵入固化試験を追加実施するとともに、SIMMER-IIIコードによる実験解析を行って知見を整理し、3年計画の成果をとりまとめる。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 福重貴浩、根津 篤、齊藤正樹「原子炉炉心溶融事故時の溶融炉心物質移行挙動に関する基礎研究」  
日本原子力学会 1997年春の年会、東京大学、H51
- (2) 小林重継、根津 篤、齊藤正樹「溶融炉心物質の固化挙動に関する基礎研究」  
日本原子力学会 1998年春の年会、近畿大学、I29
- (3) David Brear、飛田吉春、守田幸路、神山健司、近藤 悟「Modelling of fuel freezing for reactor safety analysis」、日本原子力学会 1997年秋の大会、沖縄、H57

表1 実験条件

融体流量 (l/min)	1 ~ 30
融体入口温度 (°C)	2 ~ 5
試験部管壁温度 (°C) [Tw]	-400 ~ 0
レイノルズ数 [Re]	400 ~ 4000
プラントル数 [Pr]	11.6 ~ 12.9
冷却パラメータ [C*]	3 ~ 14

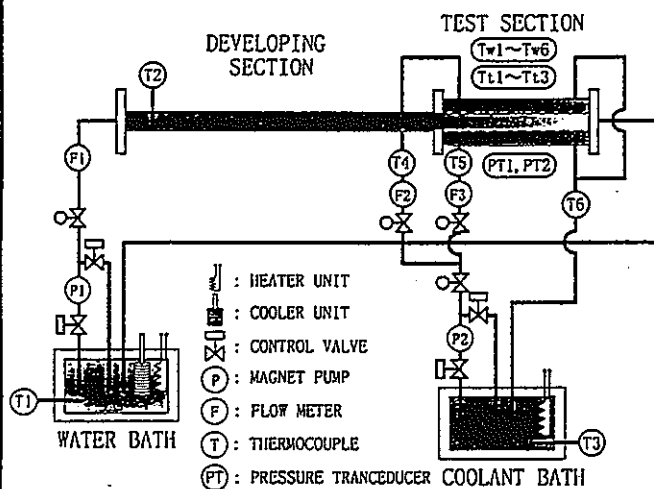


図1 実験装置概略

ここで、 $C^* = k^* \cdot T_w$

$$k^* = k_s / k_L$$

( $k_s$  : 固体の熱伝導度、 $k_L$  : 液体の熱伝導度)

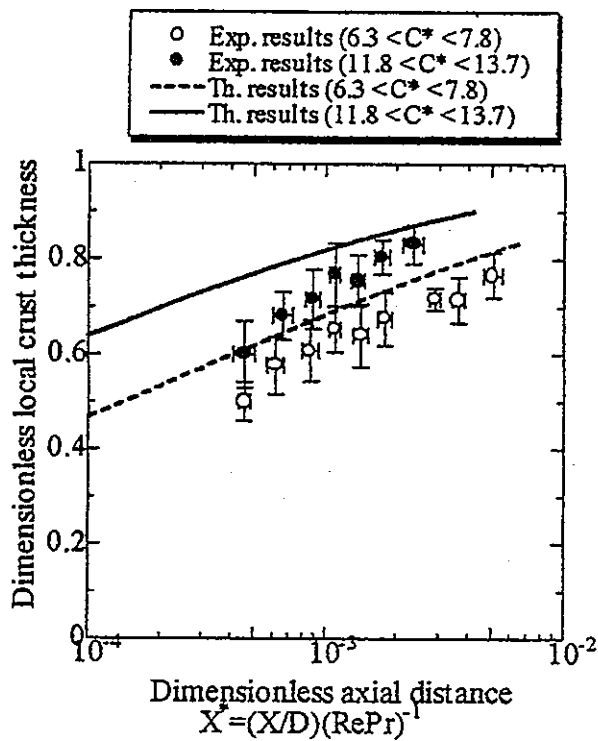


図2 無次元軸方向数と無次元局所クラスト厚さ

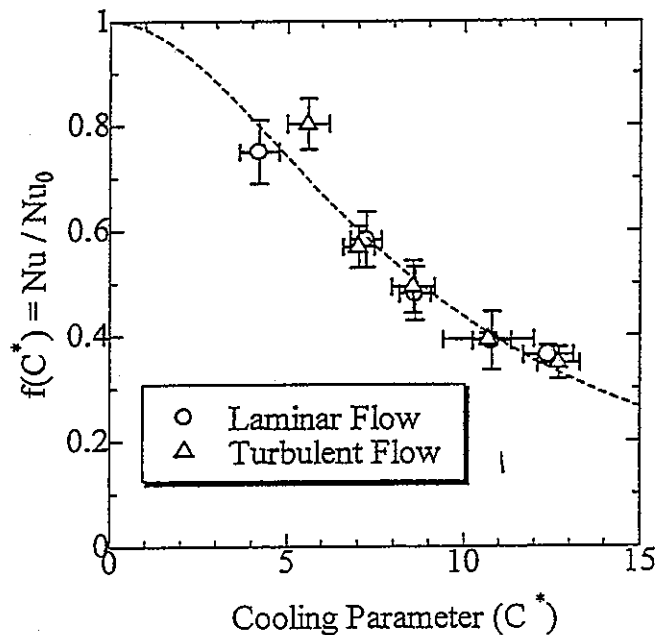


図3 冷却パラメータの影響

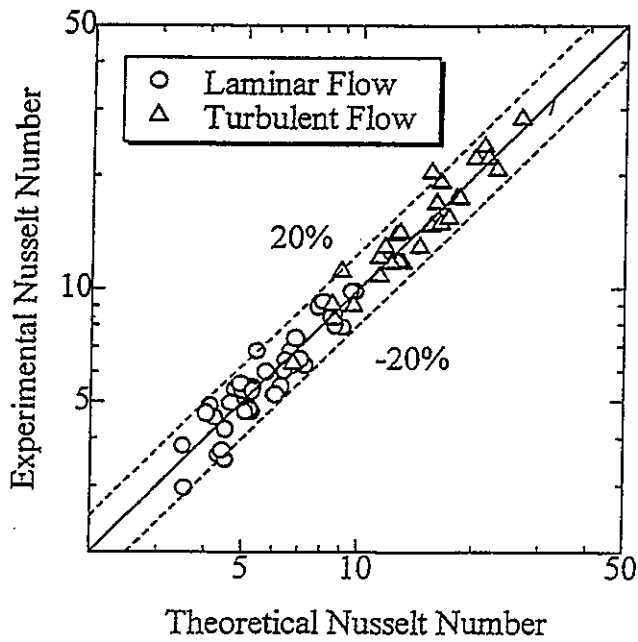


図4 実験結果との比較

表2 UO<sub>2</sub> 固化実験解析結果

Test Name	Test conditions:			Measured penetration:		Calculated penetration:	
	Tube diameter (mm)	Initial Velocity (m/s)	Wall temperature (K)	length (cm)	time (ms)	length (cm)	time (ms)
Geyser 4	4	3.2	293	60	190	57	200
Geyser 7	4	4.2	1273	75	180	68	200
Geyser 8	4	4	1273	48	120	67	200
Geyser 9	4	1.8	293	47	260	48	260
Geyser 11	4	1.9	293	80	420	74	~450
Geyser 12	4	3	293	100	700	66	~250
Geyser 13	4	1.7	293	45	300	48	~290
Geyser 15	4	3.3	293	73	310	64	~200
Blokker 1	4.0	3.6	673	40	100	68	220
Blokker 3	8.5	5.3	673	200	380	180	~450
Blokker 4	9.9	7.4	673	200	270	235	~450
Blokker 5	9.9	3.3	673	150	450	180	~600

NB 1) Liquid UO<sub>2</sub> initial superheat was 150 K in all tests.

NB 2) No or little wall melting in tests and in calculations.

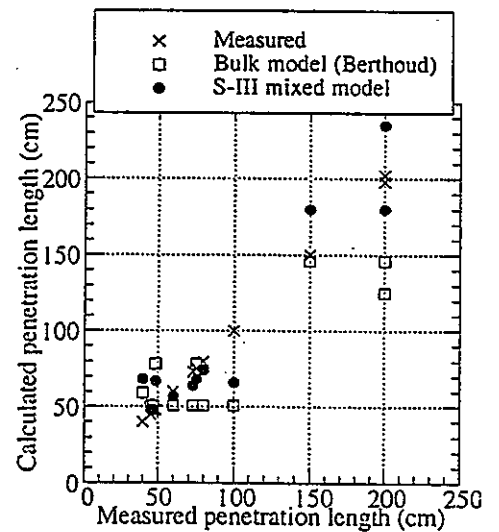


図5 侵入距離 (解析と実験の比較)

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高純度鉄基合金開発に関する研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大学側	東北大学 金属材料研究所 助教授 安彦 兼次* 東北大学 金属材料研究所 助手 高木 清一* [*客員研究員 **研究生]		
動燃側	大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室 榊原 安英		
研究協力実施場所	動燃事業団 大洗工学センター 機器構造安全工学室		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成9年4月1日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>現状技術で製作可能な高純度鉄及び高純度鉄基合金の材料諸特性を把握し、事業団が進める ①先進的高速炉の構造材料開発、②機能材料開発 への適用見通しを得ることを目的とする。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>古くから各種産業を支える基盤材料として多種、多様、大量に利用されてきた鉄基合金は、徹底的に高純度化することにより、従来とは全く異なった特性を持ち、高温における強度の増加、靱性の改善が成されることが当該研究者らによって明らかとなってきた。この材料の性能を十分に活かせる適用分野として高速炉機器の構造材料を考えた場合、開発された材料が高速炉の使用条件、使用環境にも耐えられるものであるかどうか見通す事が重要な課題となる。本研究は、まず高速炉の特徴である高温流動ナトリウム環境と構造材料との共存性について検討を進めるため、高純度鉄基合金について、先進的高速炉の構造材料（高強度指向または熱応力低減材料）及び機能材料（耐サーマルストライピング材料等）として要望に合致する合金の成分系を選択し、高速炉適用性可否の判断材料となるナトリウム環境の影響について検討する。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>なし</p>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度は、引く続き鉄基合金系の材料選定及び製造・試験片加工を行うとともに、ナトリウム浸漬試験を大洗工学センターのナトリウム試験装置を用いて実施する予定であったが、施設安全点検の結果、当該試験装置の安全対策が必要となり、予定していた試験は実施できなかった。

【研究成果】

東北大学側により開発された、超高真空コールドクルージブル溶解装置を用いて10kg単位の超高純度鉄を溶製することが出来た。製造されたインゴットを熱間鍛造、熱間圧延、スエーピング機械加工等を行い、引張試験、クリープ試験等の機械試験とナトリウム中浸漬試験に応じた試料製作を進めた。

また、溶製された純鉄・高純度鉄、超高純度鉄について、30元素以上の不純物元素の定量分析と状態分析を実施し、その溶製された鉄が当初予定したとおり不純物が十分に少ないものであることを確認した。下表に、鉄原料と溶製インゴットに含まれる微量不純物元素の分析結果を示す。さらに、超高純度鉄をベースとした耐蝕性、強度等の機械的性質の優れたフェライト系ステンレス鋼として今日実用化されている鉄-クロム合金を製作した。従来から鉄-クロム合金のクロム添加上限は30%で、それを越えると脆く、加工することが困難であったものが、50%クロム添加であっても、熱間及び冷間加工が自由自在にというほど加工性の改善が図られることが分かった。当然のことながら、耐熱性、耐蝕性、耐酸化性などの特性も著しく向上させることが出来た。今年度に昨年の計画どおりナトリウム浸漬試験を実施する予定であったが、試験装置の安全点検により、当該試験装置の安全対策が必要との判断により、安全対策を実施するため本年度中には試験を実施することが出来なかった。

表

高純度電解鉄原料と溶製した超高純度鉄の化学組成 (wt. ppm)											
元素	Al	B	Bi	C	Cd	Co	Cr	Cu	H	Mg	Mn
高純度電解鉄	0.5	0.7	<0.1	2.8	0.004	1	0.2	0.3	1.95	<0.01	<0.01
超高純度鉄	0.2	0.03	<0.1	1.1	<0.001	0.7	0.2	0.5	0.68	<0.01	<0.01

元素	N	Ni	O	Pb	S	Ti	Zn
高純度電解鉄	0.2	<0.1	14.1	0.3	0.5	<0.1	2.3
超高純度鉄	0.2	0.1	7.5	0.04	0.6	<0.1	0.6

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度は、平成8年度の計画どおり選択された材料の浸漬試験とその後に行う引張試験、クリプ試験を行い、ナトリウム環境の効果について定量的な評価を行う予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	金属燃料の過渡時挙動に関する基礎的研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大学側	東北大学工学研究科量子材料工学専攻 教授 平川 直弘、助手 岩崎 智彦、 大学院博士課程 平野 豪** (*客員研究員 **研究生)		
動燃側	動燃 大洗工学センター 基盤技術開発部 リスク評価技術開発室 丹羽 元、川田 賢一		
研究協力実施場所	東北大学 平川研究室 動燃 大洗工学センター リスク評価技術開発室		
通算研究期間(予定)	平成9年4月～ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成10年2月2日～ 平成10年3月20日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>                  本研究では、将来の新型燃料の候補の一つである金属燃料を用いた高速炉炉心を対象とし、炉心損傷事故時の過渡時挙動の特徴、及び放出エネルギーに係わる基本的傾向を明らかにすることにより、新型燃料の採用検討に際しての基礎的知見の整備を図る。</p>			
<p><b>【研究内容(概要)】</b>                  動燃が所有する酸化物燃料炉心用の過渡時挙動安全解析コードを金属燃料炉心にも適用できるように改良し、物性値等の入力データを改訂する。大学にて設計された金属燃料炉心に対して炉心損傷事故の代表的な事象である1次冷却系流量喪失時炉停止失敗事象について解析を行い、過渡事象推移の特徴を検討し、金属燃料炉心における炉心安全上の基本的特徴を明らかにする。平成10年度には遷移過程評価並びに放出エネルギー評価を行い、諸設計因子への依存性を考察する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>                  なし</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度においては、金属燃料高速増殖炉を対象として、冷却材流量喪失時炉停止失敗（ULOF）事象の起因過程について解析を行い、新燃料炉心（初装荷炉心）については解析を終了した。引き続き燃焼の進んだ炉心についての解析を実施中である。

### 【研究成果】

平成9年度までの研究成果の概要は以下の通りである。

#### (1) 炉心損傷事象起因過程解析コードの金属燃料への適用

本研究で用いる炉心損傷事象起因過程解析コード（SAS-3Dコード）は酸化燃料を対象に開発されたコードである。このコードを金属燃料炉心に適用出来るようにするため物性値や入力パラメータを検討し、必要な改訂を行った。ついで、改訂された入力定数を用いて、電気出力600MWの金属燃料炉心の新燃料装荷時におけるULOF事象の解析を行った。

解析結果（各反応度の時間変化）を図1に示す。この炉心のポイド反応度は同出力の酸化燃料炉心より大きく（炉心全体で約4%、正の和で約6%）設計されている。金属燃料の融点と冷却材の沸点が近いことから、冷却材の沸騰後まもなく燃料ピンは破損する。また、破損後は冷却材の蒸気圧が燃料分散を有効に生じさせるため、即発臨界に至ることはない。さらに、燃料分散による負の反応度は正のポイド反応度より絶対値が大きいため、その後再臨界に至ることはない。この結果、起因過程においては即発臨界および再臨界に達する恐れはない、という基本的特性を明らかにした。

#### (2) SAS-3Dコードの反応度計算の評価

(1)において、金属燃料炉心のULOF事象では、事故過程で炉心が大きく変形することが分かった。SAS-3Dコードでは各種反応度を定常時からの摂動という概念（摂動法で作成した反応度マップによる計算）で算出しているため、炉心変形が大きい場合には、計算された反応度の誤差が大きくなると予想される。そこで、SAS-3Dコードが与える反応度が正しいかどうかをCITATION-FBRコードによる計算値と比較することにより検討した。その結果、SAS-3Dコードによる解析は、保守的な結果、すなわち負の反応度を過小に見積もることを確認した。これは、(1)で得られた結果を補強するものである。

#### (3) 燃焼した炉心の解析

今までは、初装荷炉心を対象として解析を行ってきた。今後は、燃焼の進んだ炉心についての解析を行う。そのために、金属燃料に特有のエクストリュージョン（燃料破損前に生じる軸方向への著し膨張変形現象）をモデル化する必要がある。そのためのモデルを作成して引き続きコードへの組み込み作業を行っている。

#### (4) 新型炉心に対応するためのSAS-3Dコード核計算部の改良

金属燃料高速炉の新しい炉心概念の1つに諸反応度係数の改善を目的とした減速材添加燃料炉心が挙げられる。ところが、この新型炉心は炉心損傷時に減速材（ZrH）中の水素の解離が生じるため、その核的影響を現行のSAS-3Dコードで的確に考慮するのは困難であった。このため、核計算部を核計算コードによる直接計算に改良する（図2、3に示す）。この新しいモデルは、断熱近似空間依存動特性解析に相当するものであり、水素の解離の他に、物質の大規模な移動に対しても核計算精度の向上が図られる。モデルの組み込み作業が終了し、金属燃料炉心に対するサンプル解析による確認が終わった（サンプル解析の結果を図4、5に示す）。出力やNet反応度のピーク値には大きな違いはないが、改良したコードの方が事象推移がわずかに早くなっている。オリジナルのSAS-3Dコードでは、摂



動法により算出した反応度マップを用いて得られた単ピンの反応度計算の結果を集合体数で重み付けして炉心の値としているのに対し、改良したコードの計算では、2次元R-Z体系に合うよう燃料質量・温度分布を変換し、求めた値を用いて核計算を行っており、この反応度算出時の解析体系の違いが事象推移の早さの僅かな違いの原因である。平成10年度には減速材の解離を考慮に入れた解析を行う。

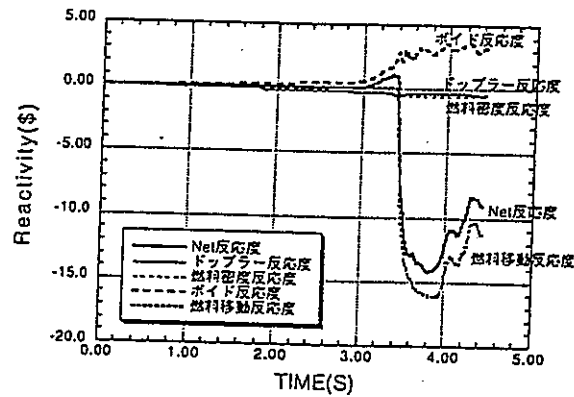


図1 SAS-3Dコードによる金属燃料炉心ULOF事象の解析結果

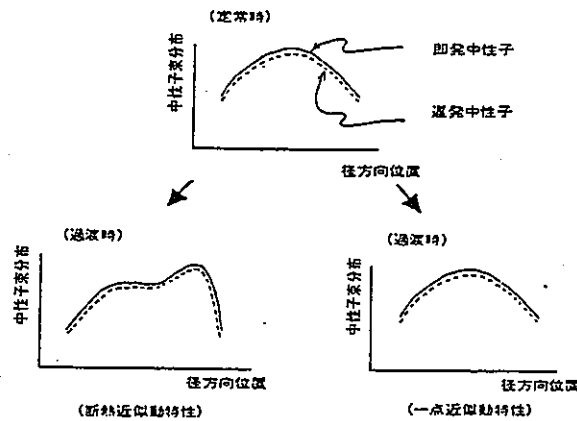


図2 核計算部の改良の概念図

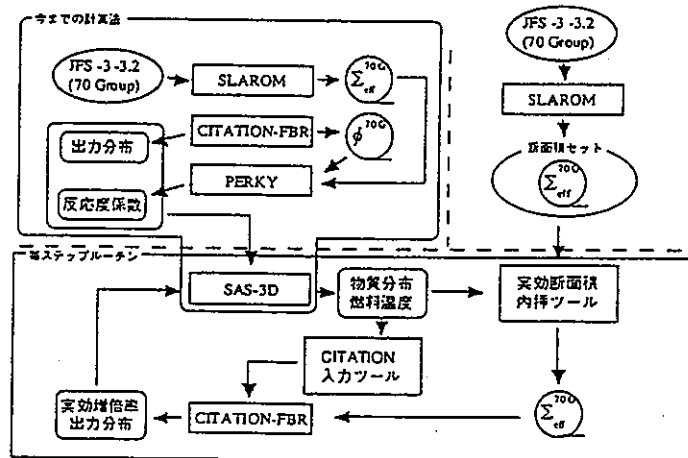


図3 核計算部の改良 (計算ルーチン)

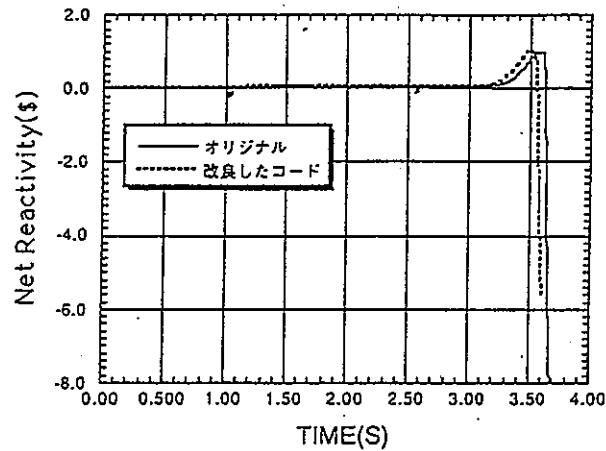


図4 反応度の時間変化の比較

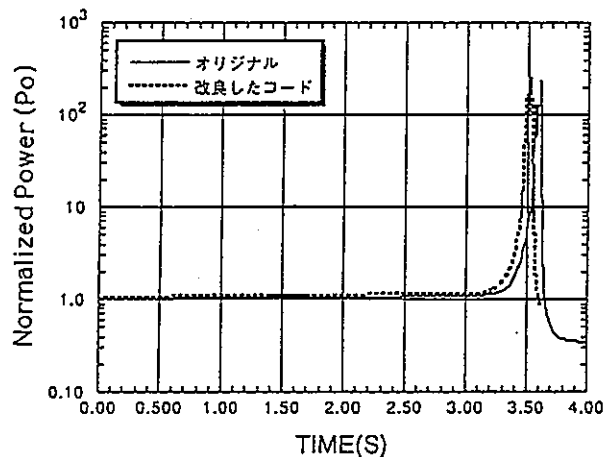


図5 出力の時間変化の比較

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度は、起因過程において、燃焼した炉心の解析に必要なモデルの組み込みを引き続き行う。また、遷移過程の解析を行い放出エネルギーを評価し、この事象の諸設計依存性について考察する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

平野他、「金属燃料高速炉のULOF事象起因過程の解析、日本原子力学会」1997年秋の大会 H56

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	き裂進展のモニタリング技術開発に係る基礎研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学 先端科学技術研究センター 岸 輝雄 教授、 榎 学 助教授 〔*客員研究員 **研究生〕		
動 燃 側	大洗 安全工学部 機器・構造安全工学室 榊原 安英、 川崎 弘嗣		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京大学 先端科学技術研究センター 岸研究室 動燃 大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室		
通算研究期間 (予定)	平成 9年12月 ~ 平成12年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 9年12月 1日~ 平成10年 2月28日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>FBRプラントの機器の異常振動の検出、およびき裂の発生・進展の検出を高感度・高精度に非破壊検出できるシステムを開発する。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>本研究は、FBRプラント機器の異常振動の発生を検出すること、異常振動部のき裂発生・進展を検出する方法を開発することである。異常振動の検出においては、数百Hz程度までの高サイクル振動を検出することができる非破壊検出システムを開発する。このため、非破壊検出法として非接触もしくは接触式の超音波センサー等を適用した検出システムを開発する。検出した超音波波動の散乱および乱れ等に注目して、高サイクル振動を高感度・高精度に検出する。また、機器の異常振動は、プラント運転によるバックグラウンド信号の中から抽出されなければならない。このため、試験装置中に高サイクル振動発生源を置いた模擬試験装置を用いて、非破壊検出信号を取得、評価していく。き裂発生・進展の検出においては、超音波センサー等を用いて、高サイクル疲労試験中に生じたき裂に関する信号を検出評価する。低温側での高サイクル試験により検出手法を検討し、高温試験にて手法の適用性を検討するとともに、センサーから得られた信号からき裂信号を抽出評価する信号処理法を開発する。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>レーザードップラ振動計 (東京大学) 振動試験装置、高サイクル疲労試験装置 (機安室)</p>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

9年度：レーザー超音波装置の種類、照射出力及び計測感度を高める最適条件の検討を実施（東大）  
高サイクル振動を発生させる装置及び試験体の検討を実施（動燃）

【研究成果】

1. レーザー超音波装置の開発

高サイクル振動およびき裂発生・進展を計測するための非破壊検出装置として、レーザー超音波装置の開発に着手した。以下の項目について検討を進めている。

- ①パルスレーザーの種類検討
- ②レーザー照射の出力の検討
- ③材料に損傷を与えることなしに計測感度を高めるための最適条件の検討
- ④種々の材料における超音波発生挙動の検討
- ⑤レーザー干渉による超音波受信方法の検討
  - ・マイケルソン干渉法適用の検討
  - ・装置構成、検出感度の向上方法の検討

これらの検討から、高サイクル振動計測に適した装置構成を提案していく。

2. 高サイクル振動発生模擬試験装置および試験体の検討

レーザー超音波装置により高サイクル振動を検出するため、高サイクル振動を発生させる装置および試験体の検討に着手した。

試料を振動させるためには、加振力として流力振動や機械的振動を与える方法があるが、振動計測手法を開発することが目的であるため、比較的簡便にできる機械的振動を与える装置を検討した。また、それに伴って、試験体を数百Hzに高サイクル振動させる形状や材質の検討を実施する。そこで、いくつかの加振器に対して検討を進めている。

- ・振動台                   : 加振周波数     ~ 100 Hz  
                                  試験体           試験体の周波数を加振周波数より高くするための検討を行う。
- ・導電型加振器       : 加振周波数     ~ 1000 Hz  
                                  試験体           試験体の周波数を目標値に確保することは容易。  
  材質、取り付け方法等の検討を行う。
- ・油圧型加振器       : 加振周波数     ~ 300 Hz  
                                  試験体           試験体の周波数を目標値に確保することは容易。  
  材質、取り付け方法等の検討を行う。
- ・振動台と加振器の複合  
                                  加振周波数     ~ 1000 Hz  
                                  試験体           試験体の周波数を目標値に確保することは容易。  
  バックグラウンドノイズとして振動台の加振周波数を利用。  
  材質、取り付け方法等の検討を行う。

これらの検討から、レーザー超音波法の計測精度を確かめるための最適な装置や試験体の絞り込みを行う。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

10年度：検出法の高精度化、波動伝播挙動による定量化および高サイクル振動模擬装置を用いた振動計測の見通しを得る予定。

11年度：レーザー超音波計測法により、高サイクル疲労試験によるき裂発生・進展を計測し、計測手法の適用性を調べる予定。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	ODSフェライト鋼の照射特性に関する研究		
研究協力課題	ODSフェライト鋼の照射特性の電子線による評価		
研究者所属、氏名			
大学側	北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻 教授 大貫 惣明、助教授 渡辺 精一 技官 須田 孝徳、博士課程2年 松川 義孝、修士課程2年 斉藤 順 修士課程1年 山下 真一郎**  〔*客員研究員 **研究生〕		
動燃側	大洗 燃材部 MMS 赤坂 尚昭		
研究協力 実施場所	北海道大学 大貫研究室 動燃 大洗工学センター MMS		
通算研究期間 (予定)	平成9年4月～ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成10年1月6日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>動燃で製作したODSフェライト鋼に対して電子線照射を行い、照射欠陥の形成過程を検討し、照射特性の評価を行う。特に、ボイド形成に対する冷間加工とHeガス雰囲気MAの効果について着目する。</p>			
<p>【研究内容(概要)】</p> <p>Arガス雰囲気でもMA処理し再結晶させた試料3種(Ar1000, Ar1100, Ar1200)、Ar1100を冷間加工した試料2種(20%CW, 40%CW)、Heガス雰囲気でもMA処理し再結晶させた試料1種(He1000)の計6種のODS試料に対して、12dpaまで電子線照射を行った。</p> <p>Ar1000、Ar1100、Ar1200の場合、ボイドの形成が見られ、スエリングは最大で0.8% (425℃)に達した。高温で再結晶処理した試料では、照射により<math>\alpha'</math>相の形成が促進された。冷間加工によりスエリングは減少し、高密度転位の導入はスエリングの抑制に効果的であることが示された。He1100の場合、ボイドの形成はほとんど確認されなかったことから、残留する不活性ガスの量がボイド形成に重要な因子であることが推定された。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>1MeV超高压電子顕微鏡 (北海道大学)</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度は動燃提供による6種のODSフェライト鋼の電子線照射試験を実施した。12dpa までの範囲では、各試料のボイド形成の差が明確となった。

### 【研究成果】

#### (1)照射前組織

図1に照射前組織を示す。各試料の組織とも再結晶化した領域と転位密度の高い未再結晶領域の存在が確認された。再結晶化温度の異なるAr1000、Ar1100、Ar1200で比較すると、再結晶化温度が高いほど内部組織的な再結晶化率が高いことが確認された。冷間加工材20%CW、40%CWでは、結晶粒は圧延方向に伸び、その程度は圧延率に依存し大きくなった。同時に転位密度の増加が見られた。酸化物粒子の分散状態を図2に示す。場所による変化が大きいものの再結晶処理後もほぼ均一に微細分散していることが確認された。ただし、Ar1200での分散粒子の僅かな粗大化や不均一化とHe1100での分散粒子の微細化が認められた。

#### (2)照射後の組織

図3に425℃で0.4dpaまで照射した各試料の転位組織を示す。各試料とも $b=a\langle 100 \rangle$ タイプの転位ループと $b=a/2 \cdot \langle 111 \rangle$ タイプの転位ループが観察された。Ar1200の試料では $\alpha'$ 相の形成により $b=a/2 \cdot \langle 111 \rangle$ ループの成長が部分的に阻害されていることが示唆された。またHe1100では転位ループの核形成及び成長が抑制されていることが明らかとなった。

図4に425℃で12dpaまで照射した各試料の組織を示す。He1100を除く全ての試料において明確にボイドの形成が認められる。また、ボイド形成は試料の処理条件に大きく依存する。図5にボイドスエリングの温度依存性を示す。ほとんどの試料においてスエリングのピークは425℃付近であった。

#### (3)再結晶化温度の影響

図4、図5に示すようにAr1000、Ar1100、Ar1200ではいずれもボイドの形成が顕著に見られ、スエリングは0.8%に達した。このことからスエリングは再結晶化温度によらず、再結晶化領域ではほぼ同様の値となることが分かる。Ar1200で分散粒子の状態が若干異なっていたにもかかわらずスエリング量が同等であった理由として、照射中に形成する $\alpha'$ 相の形成量が多く、それが点欠陥シンクとして働いたためと推察される。また図6に示すように、再結晶化温度が高くなるとボイド数密度が低下し、ボイド径が大きくなる傾向がある。これはボイドの核と成りうる製造時に混入したArのガスバブルが、高温で再結晶処理した際に集合し、ガスバブルの数密度が低下したためと推察される。

#### (4)冷間加工の効果

図4、図5に示すように20%CW、40%CWでは冷間加工率に応じてスエリングが減少した。このことは冷間加工による高密度転位の導入がスエリングの抑制に効果的であることを示している。

(5)メカニカルアロイング時の不活性ガスの影響

図4、図5に示すようにArガス雰囲気で作成した全ての試料においてボイドの形成が認められたのに対して、He1100ではボイドの形成はほとんど確認されなかった。この原因として組織中に残留する不活性ガスの量が異なるためと推定される。Ar材ではAr残留量が50ppm程度であるのに対し、He材ではHe残留量が3ppm程度であった。不活性ガスの鋼中の固溶度は一般的に小さいため、残留しているガスはガスバブルとして存在していると考えられる。また、He材の分散粒子はAr材に比べ微細であり、点欠陥シンク量も多いと推定され、これもボイド形成の抑制原因と考えられる。これらのことはメカニカルアロイング時に使用する不活性ガスの選択が重要であることを示しており、引き続き検討していく必要がある。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度は、再結晶化率の向上を図ったODSフェライト鋼について、引き続き冷間加工とHeガスの効果を検討する予定である。

平成11年度は、等軸変態を利用して強度異方性を改善したODSマルテンサイト鋼の照射特性について検討する予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

本共同研究の成果は、来年度以降の金属学会にて発表する予定である。



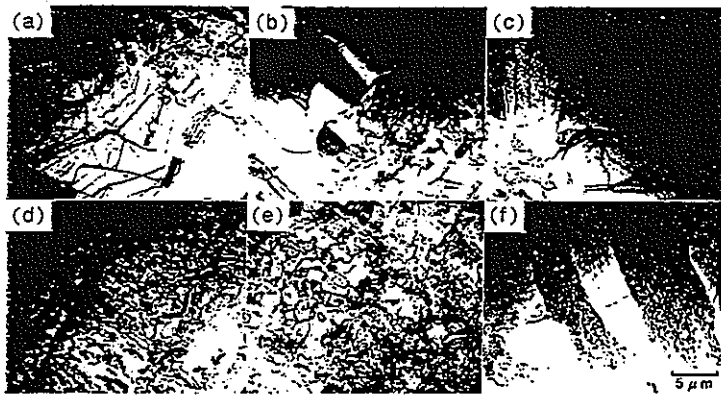


図1 照射前の母相の組織  
(a) Ar1000 (b) Ar1100 (c) Ar1200 (d) 20%CW (e) 40%CW (f) He1100

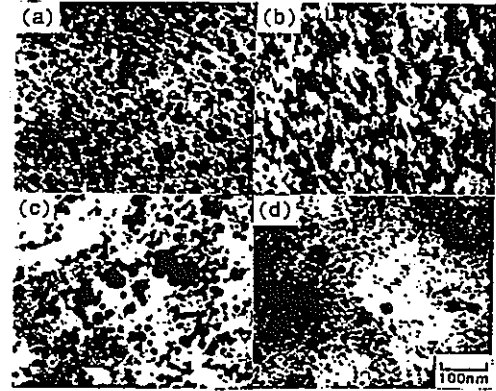


図2 照射後の放射性粒子の分散状態  
(a) Ar1000 (b) Ar1100 (c) Ar1200 (d) He1100

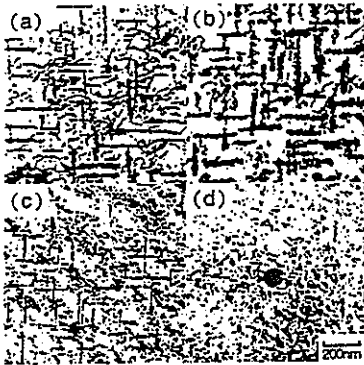


図3 照射後の転位ループ (698K, 0.1dpa)  
(a) Ar1000 (b) Ar1100 (c) Ar1200 (d) He1100

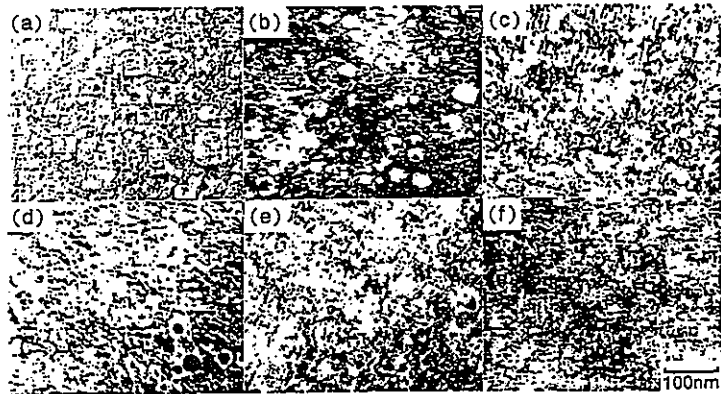


図4 ボイド組織 (698K, 10dpa)  
(a) Ar1000 (b) Ar1100 (c) Ar1200 (d) 20%CW (e) 40%CW (f) He1100

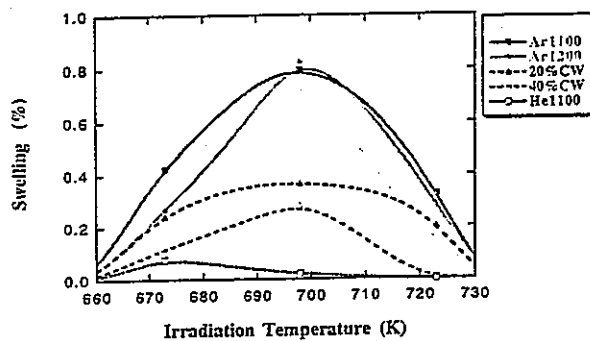


図5 Ar1000, Ar1100, Ar1200, 20%CW, 40%CW, He1100のスエリングの温度依存性 (12dpa)

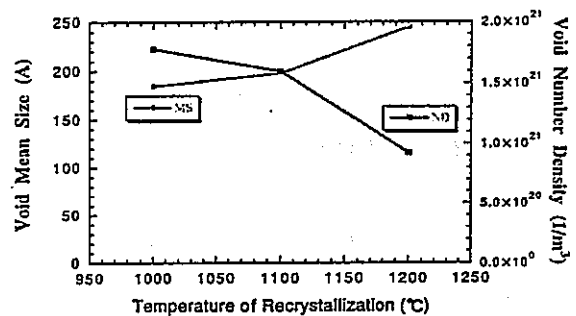


図6 Ar1100におけるボイドの平均サイズ及び数密度の再結晶化温度依存性 (12dpa)

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定法に関する研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大学側	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 教授 中澤正治、 助手 高田英治、大学院博士課程 イエンセン・フレデリッキ**、 大学院修士課程 木村敦** 〔*客員研究員 **研究生〕		
動燃側	大洗工学センター実験炉部技術課 前田幸基		
研究協力実施場所	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 中澤研究室 動燃大洗工学センター実験炉部技術課		
通算研究期間 (予定)	平成9年4月～ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成9年9月10日～ 平成10年3月20日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>動燃で進めているプラント監視技術の高度化の一環として、光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定技術を開発する。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>プラント監視技術の高度化のため、光ファイバを用いた温度分布測定技術の開発を行う。この温度分布測定では、放射線照射による伝送損失の解明が課題となっており、高速炉プラントの1次冷却系機器に光ファイバを適用するためには、冷却材ナトリウムの<math>\gamma</math>線等の放射線による影響を確認することが不可欠である。</p> <p>そこで、「常陽」の格納容器床下の1次主冷却系配管を対象に、その外装板表面にラマン散乱光ファイバ温度分布センサを敷設して放射線照射による伝送損失特性を測定し、得られた光ファイバの伝送損失特性から、長期に亘る光ファイバの耐放射線性や、伝送損失によって生じる温度誤差の補正方法を検討する。</p> <p>また、光ファイバの設置条件による温度測定への影響を検討するため、2次主冷却系配管外装板表面に1次系で使用したファイバと同様の光ファイバを設置して測定を行う。</p> <p>さらに、光ファイバによる配管の変位モニタリングへの適用性評価のため、2次主冷却系配管の外装板表面でブリュアン散乱光ファイバ歪み分布センサを用いた測定を行う。</p>			

## 【使用主要施設】

高速実験炉「常陽」

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

「常陽」格納容器床下の1次主冷却系配管外装板表面に、約100mの光ファイバを一定方向・螺旋状（50cmピッチ）に設置し（図1）、「常陽」100MW第30サイクルから第32サイクル運転（1997年3月～1998年2月）で温度分布を測定した。また、光ファイバの任意の2点間の伝送損失を補正する方法を検討するため、2次主冷却系配管外装板表面にファイバ（1次系に敷設したものと同仕様）を往復させて敷設し、第32サイクル運転（1997年12月～1998年2月）で温度分布を測定した。

さらに、2次主冷却系配管の外装板表面にブリュアン散乱光ファイバ歪み分布センサを設置し、第32サイクル運転で歪み分布を測定した。

## 【研究成果】

### (1)伝送損失の特性

1次系に設置した光ファイバ温度分布センサと熱電対による温度測定結果の差（伝送損失による温度誤差）は、時間経過とともに一定となる傾向にあり、各サイクルとも100mの光ファイバ温度センサの先端に近い部分で、熱電対による測定結果と比べて約25℃の誤差が生じることを確認した（図2）。

この温度誤差は、光ファイバを初めて装荷した第30サイクルの出力上昇時は時間の経過とともに緩やかに増加したが、同じ光ファイバを用いて測定した第31サイクル及び第32サイクルの出力上昇時は速やかに増加した。

また、光ファイバの放射線誘起損失は、各サイクルとも時間経過に対して一定となる傾向を示しており、今後も急激な特性変化はないものと予想される（図3）。今回の測定により、照射線量 $3 \times 10^7 \text{R}$ までの光ファイバ温度分布センサの使用実績を積むことができた。

なお、8月26日に発生した外部電源喪失による原子炉スクラムにおいて、熱電対と光ファイバ温度分布センサによる温度測定値の変化は同様の傾向を示しており、光ファイバによる温度測定値が原子炉スクラム時の1次主冷却系配管外装板表面の温度変化に追従することを確認した。

### (2)伝送損失の補正

光ファイバの放射線誘起損失が一定であると仮定して、2点の校正用熱電対による測定値とその位置に相当する光ファイバの温度測定値を合わせることによって、その間の光ファイバの伝送損失による温度誤差を補正した。その結果、補正後の値は、校正用熱電対の間に設置した比較用熱電対の位置で、熱電対による測定値と比べて3℃以内で一致した。

なお、本温度分布の結果から、1次主冷却系配管外装板表面の温度分布に周期性があることが分かったため、雰囲気の影響による実際のばらつきか、ファイバの特性によるものかを今後検討する。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度は、1次系主配管外装板表面に、ループ状に光ファイバを設置する。また、2次系での放射線以外の要因による伝送損失の評価、周期的な温度分布の要因検討、及び歪み測定結果の評価を行う。

平成11年度は、光ファイバのループ状設置による誤差補正法の評価を行う。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1)木村、他「光ファイバーセンサーの原子カプラントへの適用」

日本原子力学会1997年秋の大会、F30 (1997/10/15)

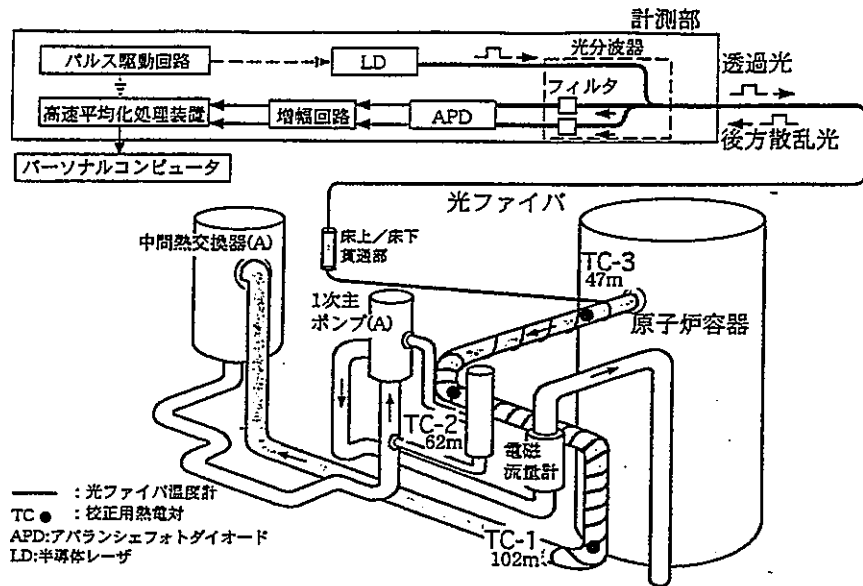


図1 光ファイバ温度分布センサ設置図

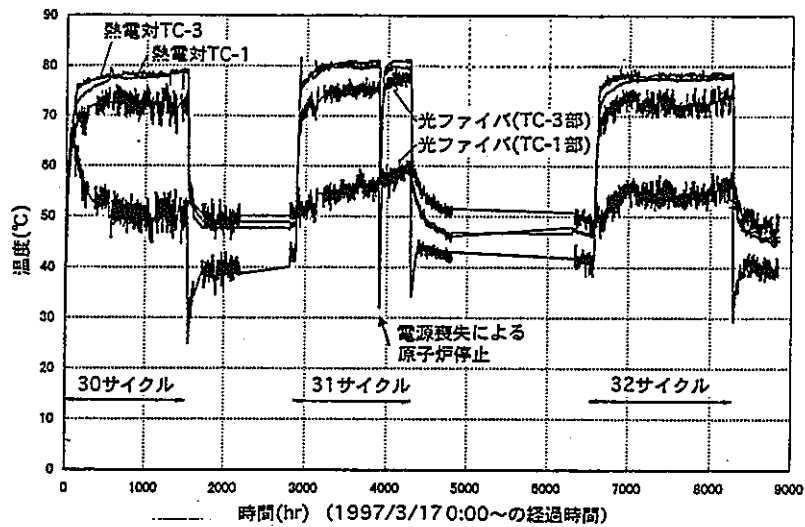


図2 温度測定結果

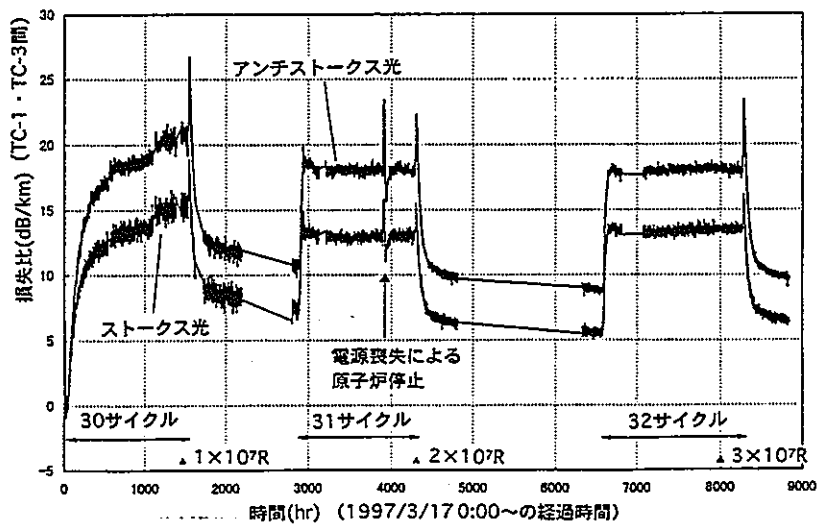


図3 光ファイバ温度分布センサの伝送損失

## 2. 先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力概要報告

### (2) 環境技術関係

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究										
研究協力課題名	同上										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">九州大学工学部建設都市工学科 教授 神野健二 九州大学工学部建設都市工学科 中川啓 [*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">東海 環境技術開発部 処分システム解析室 井尻裕二、亘真吾、畑中耕一郎</td> </tr> </table>			大 学 側	九州大学工学部建設都市工学科 教授 神野健二 九州大学工学部建設都市工学科 中川啓 [*客員研究員 **研究生]			動 燃 側	東海 環境技術開発部 処分システム解析室 井尻裕二、亘真吾、畑中耕一郎		
大 学 側	九州大学工学部建設都市工学科 教授 神野健二 九州大学工学部建設都市工学科 中川啓 [*客員研究員 **研究生]										
動 燃 側	東海 環境技術開発部 処分システム解析室 井尻裕二、亘真吾、畑中耕一郎										
研究協力実施場所	九州大学 工学部 建設都市工学科 動燃 東海 環境技術開発部 処分システム解析室										
通算研究期間 (予定)	平成8年9月～ 平成11年3月	当該年度 研究期間	平成9年10月16日～ 平成10年3月31日								
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究										
<p>【研究目的】</p> <p>不均質な多孔質媒体中の水理・物質移動現象の1つである分散パラメータのスケール依存性について明らかにすることを目的とする。</p>											
<p>【研究内容(概要)】</p> <p>多孔質媒体水理試験設備(MACRO)において不均質な透水係数場を粒径の異なる6種類のガラスビーズを用いて人工的に作成し、種々の水理条件のもとでトレーサ試験を実施し、物質移動モデルの開発/検証と分散パラメータのスケール依存性について検討を行う。トレーサには、NaClを用い、媒体内部に配置した導電率計により濃度変化を測定している。また、NaClの他に染料トレーサを用いて視覚的にも物質移動現象を観察している。</p> <p>本試験を通じて、流速の変動により生じる分散現象を場の特性が既知な実験室レベルからモデル化してゆき、従来の移流分散モデルを用いて物質移行を解析する際のパラメータのスケール依存性について明らかにする。</p>											
<p>【使用主要施設】</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所 地層処分基盤研究施設 多孔質媒体水理試験設備(MACRO)</p>											

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度は、多孔質媒体水理試験設備（MACRO）を用いたトレーサ試験を実施し、九州大学神野教授が開発した特性曲線法による物質移行解析コード及び動燃保有の粒子追跡法によるコードを用いてシミュレーション解析を実施した。その上で解析コードの適用性について検討した。

平成9年度は、前年度適用性が確認された解析コードを用いて数値シミュレーションを実施し、不均質特性と物質移行挙動の関係について検討した。また、MACRO試験設備を用いて単孔式トレーサ注水・揚水試験を実施し分散長を測定し、物質の移行距離と分散長の関係について検討した。

### 【研究成果】

平成9年度3月までの研究成果の概要は以下の通りである。

#### （1）多孔質媒体水理試験（MACRO試験）

フラクタルスケーリング則にもとづき6種類の粒径の異なるガラスビーズを用いて図1に示すような縦横75cm厚さ10cmの不均質透水係数場を作成し、単孔式トレーサ注水・揚水試験を実施した。不均質場の側方境界条件として固定水頭境界条件を与え、上下面には不透水境界条件を与えた。また不均質場の中心部にトレーサ注水・揚水用の井戸を設けた。トレーサ移行試験を実施する際には、一定流量でトレーサを注水した後、同様の流量でトレーサの揚水を行い、井戸内におけるトレーサ濃度の変化を導電率計を用いて記録した。分散長は、揚水時の井戸内のトレーサ濃度の変化に対して理論解によるカーブフィッティングを行うことにより求めた。試験ケースとしては、注水／揚水流量と総注水体積をそれぞれ3ケースずつ設定し合計9ケース実施した。

試験の結果以下の結論を得た。

- ・本試験による分散長と、本試験で使用したガラスビーズについてカラム型トレーサ移行試験を行って測定した分散長の結果を図2に示す。本試験およびカラム型試験による分散長を比較したところ前者のほうが値が大きい傾向が見られた。したがって、本試験において場の不均質性に起因する巨視的分散が生じていることが確認された。
- ・本試験による分散長と、原位置において測定されている分散長はほぼ同様の傾向、すなわちスケール依存性を示したことから、本試験において不均質場作成に使用したフラクタル法が実際の地盤の不均質性を再現する上で有効な手法であることの妥当性の確認を間接的に示すことができた。
- ・本試験による分散長は流量（流速）が小さいほど分散長が大きくなる傾向を示した。したがって、原位置の測定において同様の観測距離であっても分散長の取りうる値が様々であることは流速にも関係あることが示唆された。

今後は、さらに多様な不均質場における試験を実施し場の不均質特性と分散の関係についてデータを蓄積していく。

#### （2）数値シミュレーション

2次元不均質透水場におけるトレーサの移行挙動を数値シミュレーションにより解析することにより巨視的分散係数を算定し、場の不均質特性を代表するパラメータの一つである積分特性距離との関係について検討した。

不均質場は透水係数の対数変換値の分布が自己回帰式に従うと仮定し発生させた（図3）。発生させ



た場の特性は、スペクトル分布（図4）および自己相関係数（図5）を用いて検討した。さらに、自己相関係数から積分特性距離を評価した。不均質場におけるトレーサ移行挙動の数値シミュレーションには、前年度の研究において適用性が確認された特性曲線法を使用した。トレーサソースは2次元場の上流側全面に設定し、流れ方向断面の平均濃度の分布から巨視的分散係数を評価した。

以上の手法により積分特性距離と巨視的分散係数の関係について検討した結果、以下の結論を得た。

- ・積分特性距離と巨視的分散係数から導いた分散長の間にはほぼ線型関係が成立する（図6）。すなわち、スケール依存性が確認できた。
- ・積分特性距離と、巨視的分散係数が一定値となるトレーサ移行時間およびトレーサ移行距離との関係について検討した結果、今回用いた不均質場においては、積分特性距離の約3.4倍の距離をトレーサが移行すれば一定の巨視的分散係数に到達することがわかった（図7）。

今後は巨視的分散係数の測定から場の不均質特性を推定する手法について検討を行う。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

来年度においても、分散パラメータのスケール依存性に着目して解析および試験を実施していく予定であり、引き続き九州大学に解析支援をお願いする予定である。また、MACRO第2機において実施予定の物質移動試験を含む研究を併せて行う予定である。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

井尻他、「*ラカル* 透水場における巨視的分散現象に関する実験的研究」、日本原子力学会「1998年春の年会」L33

中川他、「不均一多孔質媒体中の流れと物質輸送特性について」、地下水学会誌、第40号第1号、pp. 1 - 16、1998

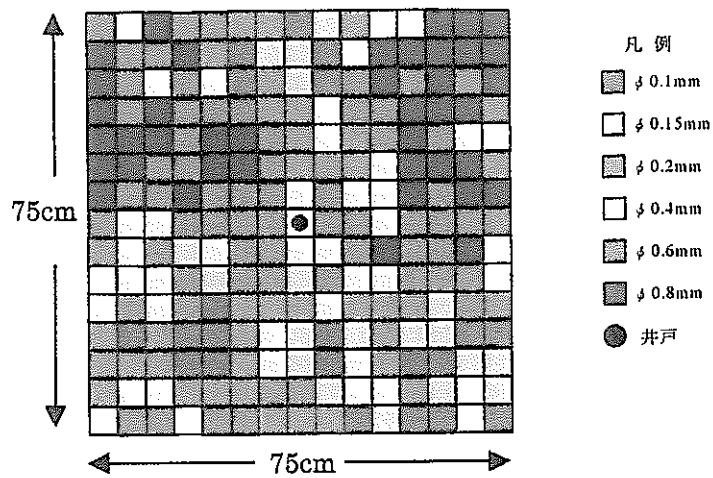


図1 不均質透水場と井戸配置

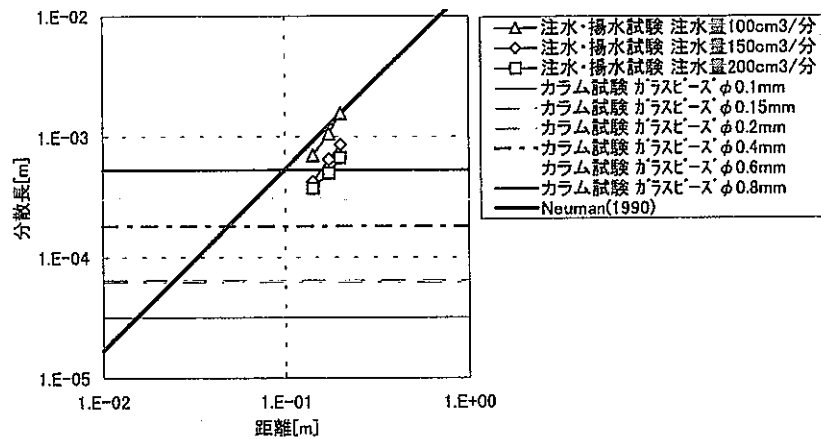


図2 分散長と距離

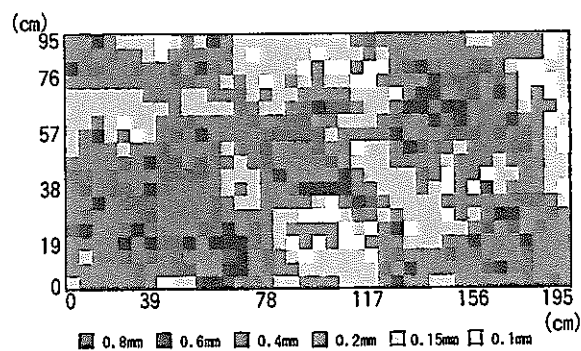


図3 生成した不均質場の例

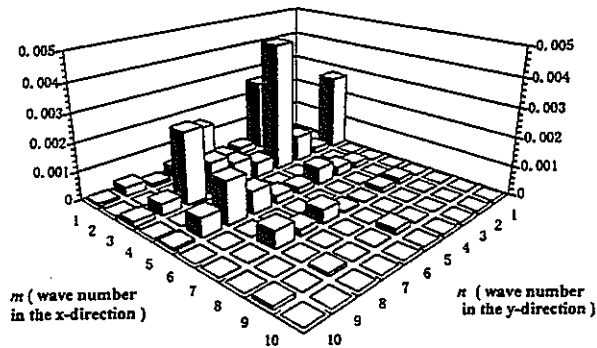


図4 スペクトル分布の例

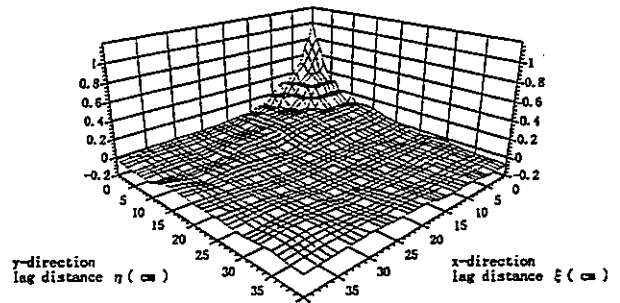


図5 自己相関係数の例

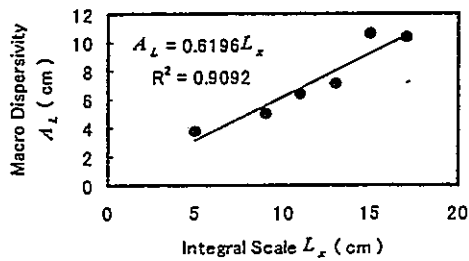


図6 積分特性距離と巨視的分散定数

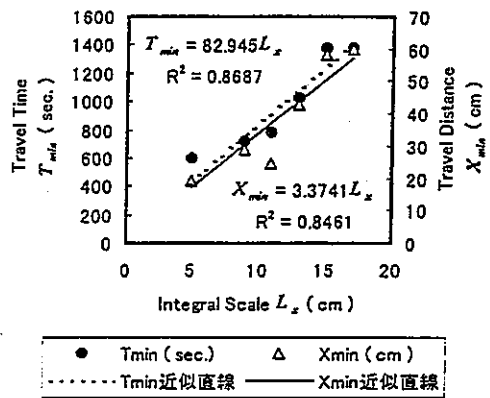


図7 積分特性距離と到達流下時間および到達流下距離の関係

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	地下水流動調査研究										
研究協力課題	地下水流動の総合調査・解析システムの開発										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設 教授 渡辺邦夫* [*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">東濃地科学センター 地質環境研究室 尾方伸久 , 三枝博光</td> </tr> </table>			大 学 側	埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設 教授 渡辺邦夫* [*客員研究員 **研究生]			動 燃 側	東濃地科学センター 地質環境研究室 尾方伸久 , 三枝博光		
大 学 側	埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設 教授 渡辺邦夫* [*客員研究員 **研究生]										
動 燃 側	東濃地科学センター 地質環境研究室 尾方伸久 , 三枝博光										
研究協力実施場所	動燃事業団 東濃地科学センター 地質環境研究室										
通算研究期間 (予定)	平成8年4月 ~ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年4月1日~ 平成9年9月30日								
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究										
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>地層処分研究開発の基盤研究として位置づけられている地層科学研究では、地表から地下深部までの地下水の流動特性を把握することが重要な研究課題とされている。本研究は、この課題に向けて、地下水流動機構把握のための調査・解析手法の開発と精度の向上、さらにはそれらの体系化を目的に、地下水流動特性評価プロセスの構築に向けた研究を実施する。</p>											
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>本研究では上記目的を受けて以下の研究を実施する。</p> <p>① 亀裂性岩盤の割れ目系のモデル化に関する研究</p> <p>② 地表部の水収支を把握するための蒸発散計測装置の精度の向上、および現地測定と水分移動解析</p> <p>③ 飽和・不飽和領域の地下水解析法の高度化</p>											
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>東濃地科学センターの東濃鉱山およびその周辺 , 釜石原位置試験場 , 神岡鉱山 埼玉大学構内</p>											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

岩盤割れ目系のモデル化を目的とした現場調査を実施し、割れ目系の水理地質特性を割れ目形成プロセスから評価・モデル化する考え方の妥当性を示し、従来より開発してきたチャンネルネットワーク解析への割れ目系調査結果の導入方法を明らかにした。また、簡易ベンチレーション試験による蒸発散計測において熱収支を考慮することによって、計測精度の向上を計ると共に、蒸発散量計測装置を改良・開発し、原位置試験を実施した。さらに、蒸発計測の手法を発展させ、難透水性軟岩からの湧水をボーリング孔内で測定する新しい調査技術、「Evaporation Logging」を開発し、原位置での適用試験を実施した。

【研究成果】

① 亀裂性岩盤の割れ目系のモデル化に関する研究

- ・ 近年、ヨーロッパを中心として提案されている割れ目系の分類方法（図1）の考え方に基づき、釜石鉱山550m坑道内において割れ目調査を実施し、当該地域における割れ目系のタイプ分類を行った。
- ・ 釜石鉱山550m坑道内における割れ目系のタイプ分類を実施した結果（図2）、ヨーロッパを中心として提案されている割れ目系の分類方法の考え方を基本とした割れ目のタイプ分類方法（図1）を提案し、日本の岩盤では熱水変質の効果が大きく作用しているため、それを考慮した分類も必要であることなどを釜石での割れ目調査で確認した。

② 簡易ベンチレーション型蒸発散計測装置の改良に関する研究

- ・ 蒸発散計測を実施するための簡易ベンチレーション試験機に熱収支計測（顕熱移動計測、潜熱移動計測、放射収支量計測）機能を追加し、その計測装置を用いた原位置試験を実施した（図3）。

③ 「Evaporation Logging」の技術開発

- ・ 難透水性軟岩からの湧水を試錐孔内で測定する新しい調査技術、「Evaporation Logging」を開発し（図4）、東濃鉱山において原位置での適用試験を行った。
- ・ 「Evaporation Logging」を用いた難透水性岩盤における透水係数の推定を行うために、サクシオン圧計測装置の取り付けなどの計測装置の改良を試みた。

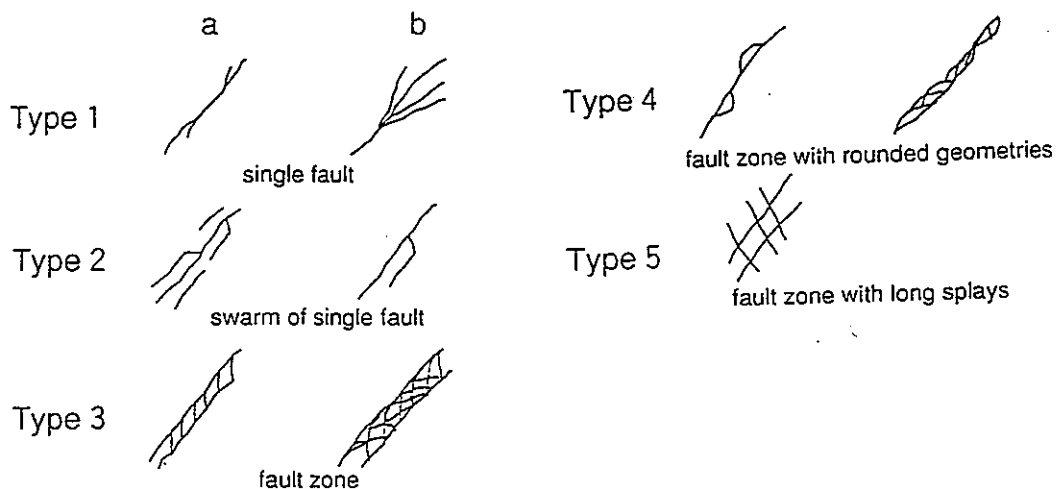


図1 割れ目系の分類方法

a:ヨーロッパで提案されている割れ目系のタイプ分類  
b: aを考慮した釜石での割れ目系のタイプ分類

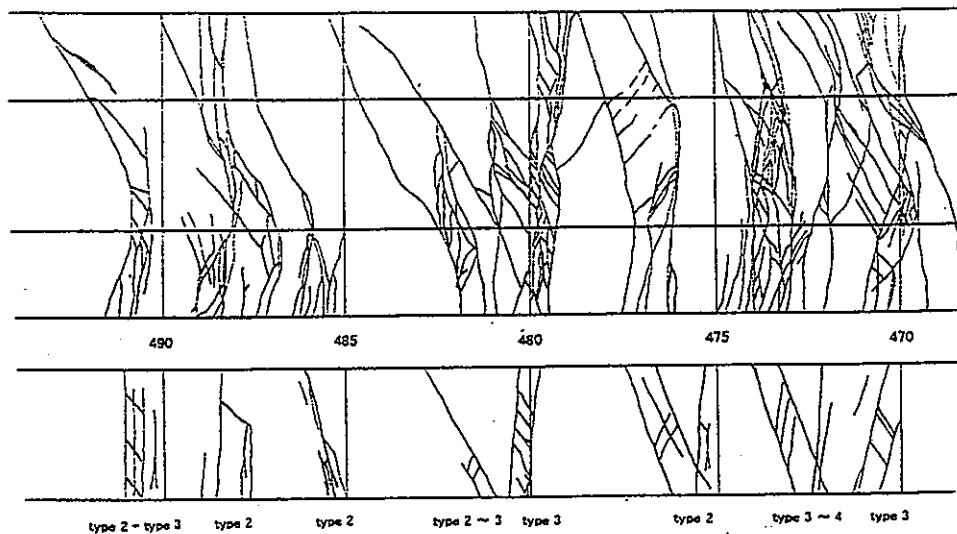


図2 釜石鉱山550m坑道における割れ目スケッチ

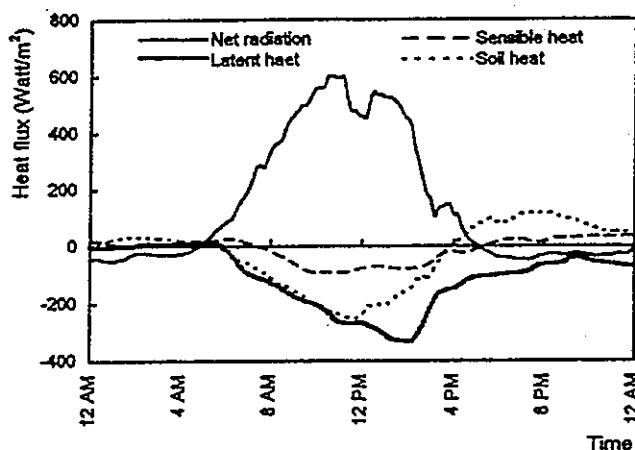


図3 土壌表面(裸地)におけるエネルギーバランス計測結果

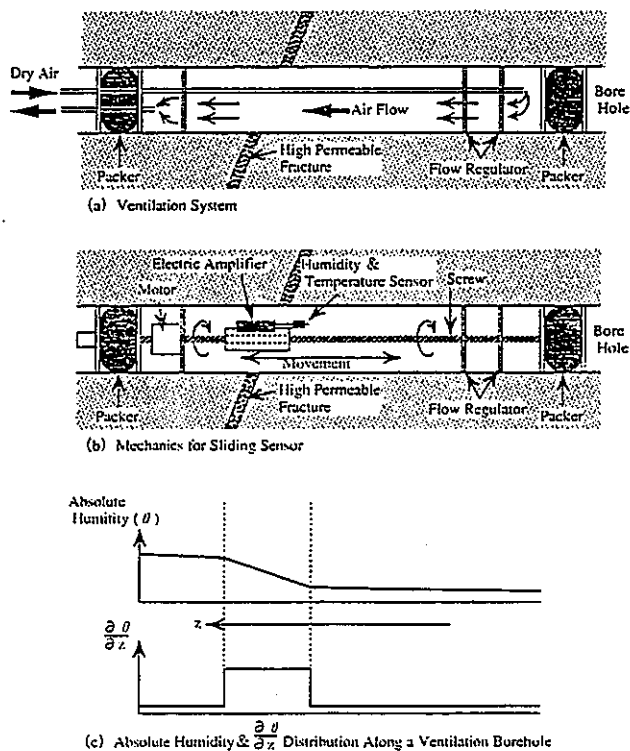


図4 Evaporation Loggingの概要

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

- ① 熱水変質の効果などを考慮した亀裂性岩盤の割れ目系の分類方法に関する検討を実施する。
- ② 改良した蒸発散計測法による現地計測を行う。
- ③ 原位置で得られた不飽和特性を用いた飽和・不飽和浸透流解析の高度化を行う。
- ④ 「Evaporation Logging」の開発を継続し、原位置試験を実施する。また、試錐孔壁におけるサクション圧計測のための技術開発を行う。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・ ALI, AR. M. , WATANABE, K. and KUROKAWA, U. : Simple Method for Determining the Bare Soil Resistance to Evaporation, 地下水学会誌, 第39巻, 第2号, pp. 97-113, (1997. 5).
- ・ ABOUZEID, G. A. , WATANABE, K. 他 : Unsaturated Hydraulic Properties and their Influence on the Moisture Content of Layered Soils, 地下水学会誌, 第39巻, 第2号, pp. 115-126, (1997. 5).
- ・ 森田豊, 渡辺邦夫他 : 風化花崗岩の割れ目系の特性と透水性評価, 地球, Vol. 19, No. 16, pp. 381-386, (1997. 6).
- ・ 志田原史子, 渡辺邦夫, 森田豊 : トンネル内湧水地点の水理地質構造把握と割れ目交線方向分布の特徴, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1271-1272, (1997. 7).
- ・ 渡辺邦夫, 風間秀彦 : スイス、モンテリ地下実験場における蒸発計測, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1951-1952, (1997. 7).
- ・ ALI, AR. M. and WATANABE, K. : Field Investigation on the Bare Soil Resistance Parameters to Evaporation in Greenhouse, 土木学会年次学術講演会概要集, 第3部A, pp. 466-467, (1997, 9).
- ・ ABOUZEID, G. A. , WATANABE, K. 他 : Soil Hydraulic Properties and their Influence on the Design of Sub-surface Irrigation under Evaporation, 土木学会年次学術講演会概要集, 第3部A, pp. 468-469, (1997, 9).

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	精密周波数制御連続電磁波調査法の研究									
研究協力課題	計算機を用いた連続電磁波のシミュレーションおよび解析手法の研究									
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>京都大学 大学院 工学研究科 資源工学専攻 博士課程 真田 佳典**</td> <td>助手 渡辺 俊樹*</td> <td rowspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td>東濃地科学センター 技術開発課</td> <td>藪内 聡, 小出 馨</td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学 大学院 工学研究科 資源工学専攻 博士課程 真田 佳典**	助手 渡辺 俊樹*	〔*客員研究員 **研究生〕	動 燃 側	東濃地科学センター 技術開発課	藪内 聡, 小出 馨
大 学 側	京都大学 大学院 工学研究科 資源工学専攻 博士課程 真田 佳典**	助手 渡辺 俊樹*	〔*客員研究員 **研究生〕							
動 燃 側	東濃地科学センター 技術開発課	藪内 聡, 小出 馨								
研究協力実施場所	動燃 東濃地科学センター 技術開発課									
通算研究期間 (予定)	平成8年8月～ 平成13年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年11月10日～ 平成10年3月6日							
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究									
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>地下に正弦波的に変化するエネルギーを連続して長時間送り込む手法を採用することにより、調査深度の拡大や解析精度の向上ならびに調査機器の小型化を目指した地球物理学的調査の研究開発の一環として、室内および野外実験を効率よく進めるため電磁波の応答をシミュレーションできる計算機プログラムを開発する。</p>										
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>本研究は、精密に周波数を制御した連続波を用いることにより、従来の電磁波調査法と比較して、調査深度の拡大や解析精度の向上を目指すものであり、大きく分けて以下の3つの研究開発から構成される。</p> <p>(1)ハードウェアの開発 精密に周波数を制御した連続波を用いた岩盤調査用レーダー（ハードウェア）の開発。</p> <p>(2)解析アルゴリズムの開発 長期観測された連続波データから地下構造に起因する信号を抽出するアルゴリズムの開発。</p> <p>(3)電磁波挙動シミュレーション技術の開発 岩盤中を伝わる電磁波の挙動を把握する（可視化する）ための計算機プログラムの開発。</p> <p>本研究の協力課題は、主に(2)および(3)の研究開発に関するものである。</p>										
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>ワークステーション COMPAQ Deskpro 5150</p>										



## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度に開発した電磁波のシミュレーションプログラムを連続波を取り扱えるように改良したとともに、データ解析アルゴリズムの開発の一環として連続ウェーブレット変換による時間周波数解析の研究を開始した。

## 【研究成果】

### (1)電磁波のシミュレーションプログラムの開発

岩盤調査用レーダーに用いられるパルス波を送信源としたMHz帯の電磁波の伝播を波動現象として捉え、Maxwell方程式の差分式を時間軸で逐次的に計算するFDTD法（時間領域有限差分法）を採用したシミュレーションプログラムの開発を平成8年度に実施した。

今年度は、本シミュレーションプログラムを連続波を送信源とした場合にも適用できるように改良を実施した。

等方均質媒質における2次元モデル計算の例では、中間概要報告の段階では受信直後の波形に揺らぎが認められたが、平滑化ウィンドウを施すことによりこの揺らぎは解消された（図-1、図-2、図-3）。また、FM変調波を送信源とした場合でも波形の揺らぎは認められず（図-4）、3次元モデル計算においても同様の結果が得られたことから、本プログラムが連続波を送信源とした場合にも適用可能であることを確認した。

### (2)データ解析手法の開発

実際の調査では、連続波を用いた場合はデータ処理において受信波のスペクトル解析などが必要となることから、高速フーリエ変換（FFT）が広く用いられている。

FFTは、有限時間上のデータからデータに含まれる各周波数におけるエネルギーの分布が求められるが、その周波数成分が時間軸上のどの時刻に存在するかは不明である。この問題を解決するために、連続ウェーブレット変換を用いた時間周波数解析の研究を開始した。本解析手法を用いることによって、ある特定の周波数成分が局在する波や時間変化を伴う周波数の検出精度が大幅に向上することが期待できる。

複数の周波数成分を含む正弦波（図-5）に対するFFTの結果（図-6）および連続ウェーブレット変換を用いた時間周波数解析の結果（図-7）から、本解析により、FFT同様に各周波数におけるエネルギー分布が求められることを確認した。なお、本解析で使用するウェーブレットについては、Gaborのマザーウェーブレットを採用した。

また、特定の周波数成分が時間的に局在するように合成した波（図-8）に対する、時間周波数解析結果（図-9）から、本解析により、時間軸における各周波数のエネルギー分布が求められることを確認した。

以上の結果から、連続ウェーブレット変換を用いて、受信波の時間周波数解析が原理的に可能であることが確認できた。今後は、実験などで取得した実データを対象として、本手法の有効性を確認する予定である。

## 参考文献

### (1)電磁波のシミュレーションプログラムの開発

- 1)橋本修, 阿部啄美: FDTD時間領域差分法入門, 森北出版, 1996
- 2)何一偉, 宇野亨, 安達三郎: FDTD法を用いた地中柱状埋設物による円筒波の過渡散乱解析, EMT-91-130, pp41-48, 1991
- 3)K. S. Kunz and R. J. Luebbers: The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, CRC Press, 1993
- 4)G. Mur: Absorbing Boundary Conditions for the Finite Difference Approximation of the Time Domain Electromagnetic Field Equations, IEEE Trans. EMC, vol. 23-4, pp377-382, 1981
- 5)T. Wang and A. C. Tripp: FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media, Geophysics, 61, pp110-120, 1996
- 6)K. S. Yee: Numerical Solution of Initial Boundary Value Problem Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media, IEEE Trans. AP, vol. 14-3, pp302-382, 1966

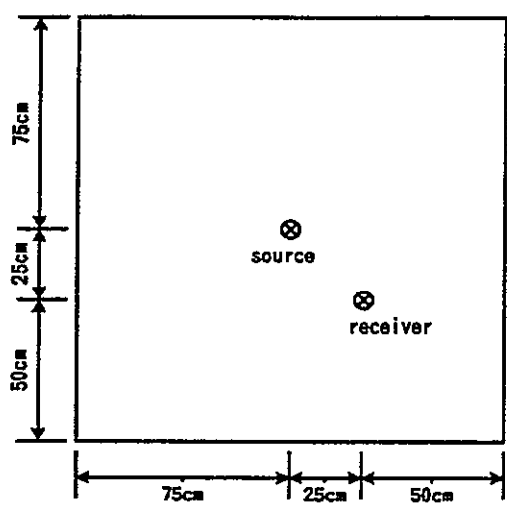
### (2)データ解析アルゴリズムの開発

- 1)芦野 他: ウェーブレット解析, 共立出版, 1997
- 2)袋谷 賢吉 訳, ヤング: ウェーブレット信号処理とシステム推定への応用, トップラン, 1997
- 3)日野 幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1997
- 4)北川 源四郎: FORTRAN77 時系列解析プログラミング, 岩波書店, 1993
- 5)南 茂夫: 科学計測のための波形データ処理, CQ出版, 1986
- 6)大崎 順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1983
- 7)榊原 進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電気大学出版局, 1995
- 8)桜井 他訳, チュウイ: ウェーブレット応用 信号解析のための数学的手法, 東京電気大学出版局 1997

### 【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

ハードウェアの開発においては、連続波を用いた岩盤調査用レーダーの実験機を製作し、岩盤供試体を用いた基礎実験により実データを取得する。そして、これまでに開発してきた電磁波シミュレーションプログラムおよび解析プログラムを適用し、基礎実験のシミュレーションと取得データの解析を行うことにより、岩盤物性に対する電磁波の伝播特性を評価する。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】



計算時間ステップ  $\Delta t = 5.0 \times 10^{-2} [\text{ns}]$   
 グリッド幅  $\Delta x = \Delta y = 1.0 [\text{cm}]$   
 比誘電率  $\epsilon_r = 9.0$   
 比透磁率  $\mu_r = 1.0$   
 比抵抗  $\rho = 100 [\Omega \cdot \text{m}]$   
 送信波の周波数 = 200 [MHz]

図-1 2次元モデル

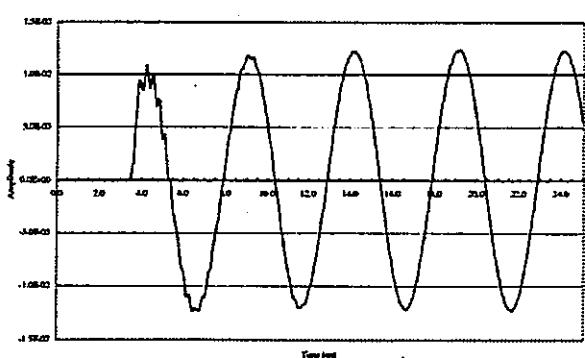


図-2 連続波（正弦波）の観測波形

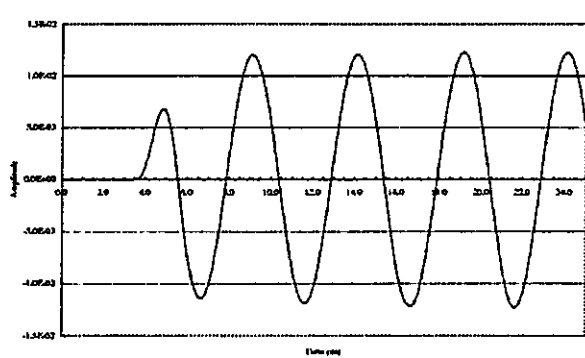


図-3 平滑化ウィンドウをかけた連続波（正弦波）の観測波形

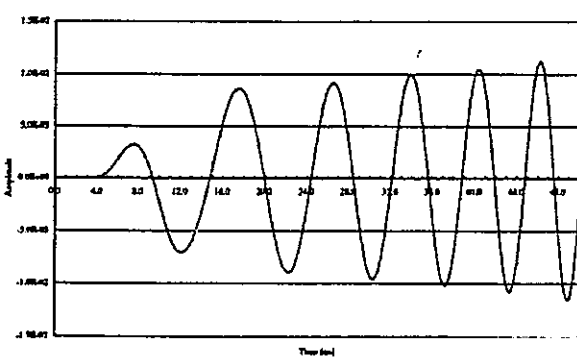
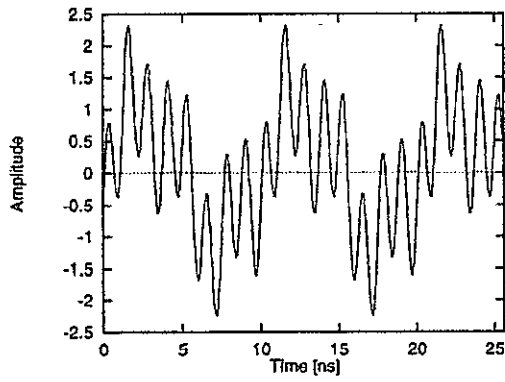


図-4 平滑化ウィンドウをかけたFM変調波の観測波形



Frequency = 100[MHz], Amplitude = 1.0, Phase lag = 0.0  
 Frequency = 300[MHz], Amplitude = 0.5, Phase lag =  $\pi/2$   
 Frequency = 800[MHz], Amplitude = 1.0, Phase lag = 0.0

図-5 3つの周波数成分を含む正弦波

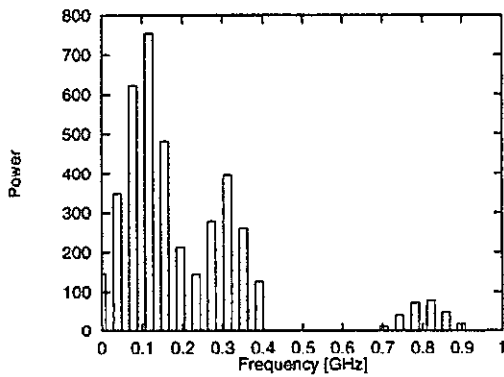


図-6 FFTによるスペクトル解析

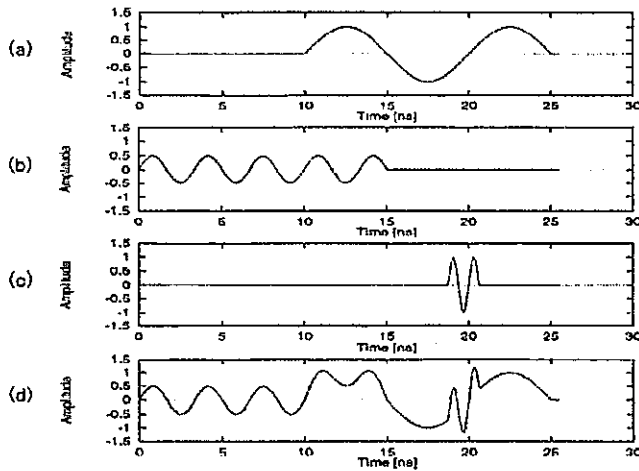


図-8 時間的に異なる3つの周波数成分を含む合成波(d)  
 (a):100MHz,(b):300MHz,(c):800MHz

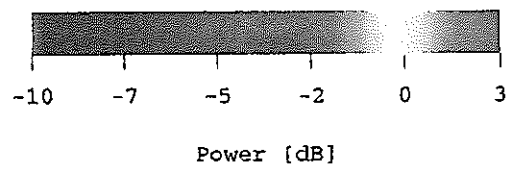
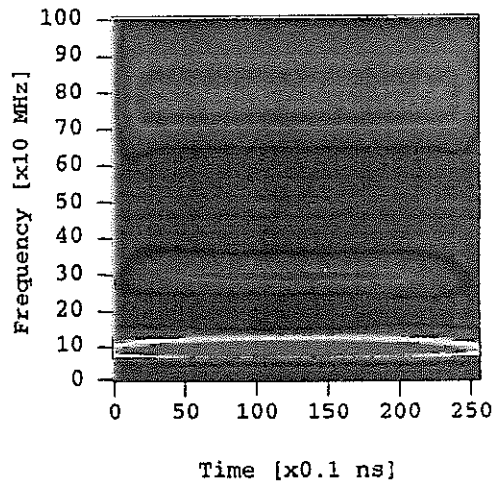


図-7 連続ウェーブレット変換による  
時間周波数解析(1)

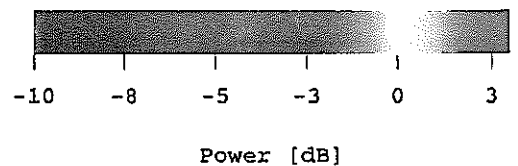
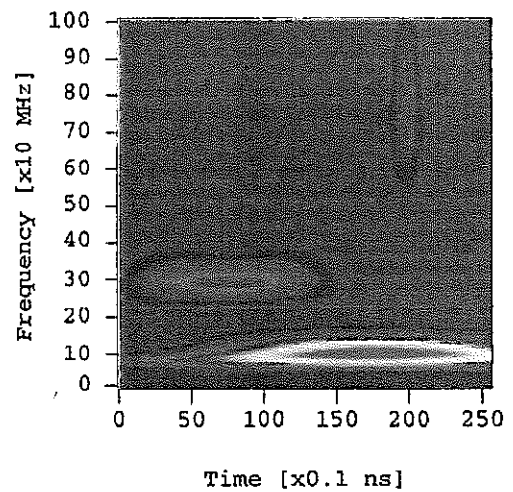


図-9 連続ウェーブレット変換による  
時間周波数解析(2)

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	水理試験と地球物理学的調査手法を組み合わせた地下水の調査・解析手法の研究		
研究協力課題	同上		
研究者所属、氏名			
大学側	岡山大学 環境理工学部環境デザイン工学科 教授 西垣 誠、 大学院修士課程 新堂 充彦**  〔*客員研究員 **研究生〕		
動燃側	中野 勝志、竹内 竜史		
研究協力実施場所	動燃 東濃地科学センター 技術開発課 岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科		
通算研究期間 (予定)	平成8年9月～ 平成13年3月	当該年度 研究期間	平成9年11月5日～ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>定圧・定流量・正弦波などによるクロスホール水理試験の調査結果と比抵抗・弾性波・電磁波などの地球物理学的調査手法による調査結果を組み合わせ、岩盤中の地下水の流動経路や水理特性の空間的な広がりを3次元的に把握するための調査・解析手法の体系化を図る。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>研究内容は、以下の3項目に区分される。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. クロスホール水理試験装置の開発と試験手法に関する研究                      現有の試験装置の改良や新たな試験装置の開発、種々のクロスホール水理試験の適応限界を把握するための検討を行う。</li> <li>2. クロスホール水理試験データの解析手法に関する研究                      地球物理学的調査手法で用いられている解析手法の原理をクロスホール水理試験データの解析に導入し、さらに短時間で解析できるようにするための解析コードの開発を行う。</li> <li>3. クロスホール水理試験と地球物理学的調査手法を組み合わせた調査・解析手法の研究                      岩盤中の地下水の移行経路や水理特性を把握するためのクロスホール水理試験と地球物理学的調査手法を組み合わせた調査・解析手法の体系化を図る。</li> </ol>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>動燃事業団：東濃地科学センターの施設（解析設備など）、試験装置（試験孔間水理試験装置など）                      釜石鉾山原位置試験場                      岡山大学：岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科の施設（解析設備など）</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

- 1.平成8年度に釜石鉾山原位置試験場で取得したクロスホール水理試験データの解析を実施した。また、昨年度に引き続き、釜石鉾山原位置試験場で2孔間でのクロスホール水理試験を実施し、本研究に必要な現場データを取得した。
- 2.クロスホール水理試験データを解析するために必要な浸透流解析コードを開発した。

### 【研究成果】

#### 1.クロスホール水理試験装置の開発と試験手法に関する研究

##### (1)2孔間現場クロスホール水理試験データの解析

平成8年度、釜石鉾山原位置試験場550mレベル坑道で実施した正弦波注水試験データについて、詳細な解析を実施した。

##### ①現場試験レイアウトの概要

試験孔レイアウトの概念図を図-1に示す。試験孔は下向き45°で、第1試験孔は坑道と平行に、第2試験孔は孔壁外側に7°の角度で掘削されている。

試験区間レイアウトを図-2に示す。図-2の注水区間A、Bは、坑道壁面で湧水が認められた透水性割れ目のうち、単一割れ目に近いと思われる割れ目を挟む1mの区間とした。また、観測区間については、中心区間Ⅱを注水区間Bに連結すると考えられる割れ目を挟む1mの区間とし、その上下部約10mの区間でも水圧応答を観測した。

##### ②試験結果

正弦波注水の試験条件は、注水区間の安定水位+100kPaを中心に、発信振幅を約50kPaとし、発信周期を10分、60分、360分の3段階で変化させた。全ての測線における発信周波数と観測結果の一覧を表-1に示す。

##### ③試験結果の解析

表-1に示す各測線での正弦波注水試験結果について、Blackらによって提案された放射状流(2D-Flow)モデルと球状流(3D-Flow)モデルの理論式<sup>1)</sup>、および、Noyらによって提案されている非整数次元流れ(Fractional dimension flow)モデルの理論式<sup>2)</sup>を用いて解析した。算定された各測線の透水係数および比貯留係数を表-2に示す。

##### ④解析結果の考察

表-2中の2次元および3次元モデルから算定された結果は、透水係数については周波数によらずほぼ同じ値となったものの、比貯留係数は周波数により値が大きく異なった。このことは、これらのモデルが実際の流れを十分に表現できていないことを示していると考えられる。一方、非整数次元流れモデルから算定された透水係数および比貯留係数は、各測線に応じた流れの次元を設定することで周波数に大きく依存しない値となった。このことから、非整数次元流れのモデルを考慮することで、実際の地下水の流れに応じた結果を算定することができたと考えられる。

##### (2)現場試験による2孔間クロスホール水理試験データの取得

釜石原位置試験場250mレベル坑道において、シングルホールでの定圧・定流量注水試験、および、2孔間での定圧・定流量・正弦波注水試験を実施し、本研究で必要となる現場試験データを取得した。

## 2. クロスホール水理試験データの解析手法に関する研究

### (1) トモグラフィ解析手法に関する基本的検討 (L T G法を用いた3次元浸透流解析コードの開発)

本研究では、L T G法 (Laplace Transformation Galerkin Method) を用いたトモグラフィ解析コードの開発を進めており、平成9年度にはラプラス変換およびラプラス逆変換アルゴリズムに関する検討を実施し、その結果を基に、L T G法を用いた3次元浸透流解析コードを開発した。また、開発した解析コードの妥当性を検証するために、従来から広く用いられている時間差分法による解析コード (PC-UNSAF) での計算結果と開発した解析コードでの解析結果を比較した。

図-3に解析モデルを示す。このモデルは均質等方性媒体で、透水係数 $1.0 \times 10^{-6}$  (cm/s)、比貯留係数 $1.0 \times 10^{-8}$  (1/cm)と設定した。また、境界条件は右側面の水位を20mに固定し、左側面は、基準水位30m、周期6hour/1cycle、振幅0.18mで正弦波変化させた。解析結果の一例を図-4に、解析に要した演算時間を表-3に示す。

図-4にみられるように、両手法の解析結果は、概ね一致した。しかし、演算時間は明らかにL T G法の方が短い。このことから、シヌソイダル試験のように境界条件が周期的に変動する場合には、L T G法が演算時間だけでなく、解の信頼性、安定性の面でも有効であることが確認できた。

### (参考文献)

- 1) J. H. Black et al. (1986): Crosshole investigations, The method, theory and analysis of crosshole sinusoidal pressure tests in fissured rock, Stripa Project IR 86-03, SKB, S Stockholm, Sweden.
- 2) D. Noy et al. (1988): Corsshole investigations, Implementation and fractional dimension interpretation of sinusoidal tests, Stripa Project IR 88-01, SKB, Stockholm, Sweden.

### 【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

1. 平成9年度に釜石鉾山原位置試験場で取得したクロスホール水理試験データの解析を実施し、異なる解析モデルを用いた解析結果の比較・検討を行う。
2. クロスホール水理試験データを解析するためのトモグラフィ解析コードについて、逆解析アルゴリズムに関する検討を行うと共に、3次元でのトモグラフィ解析コードを開発する。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

竹内他：孔間水理試験装置の開発と現場適用例，第10回岩の力学国内シンポジウム(1998)

(予定)

新堂他：亀裂性岩盤における三次元浸透流解析手法に関する研究，第53回土木工学会年次学術講演会(1998)

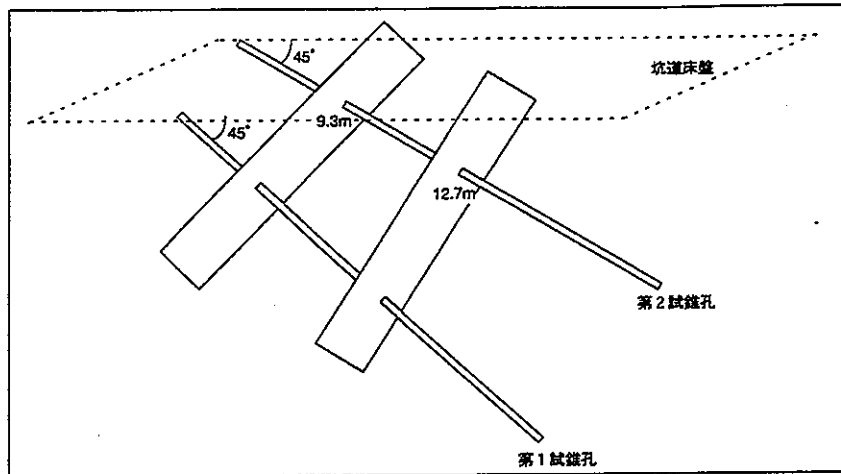


図-1 試錐孔レイアウトの概念図

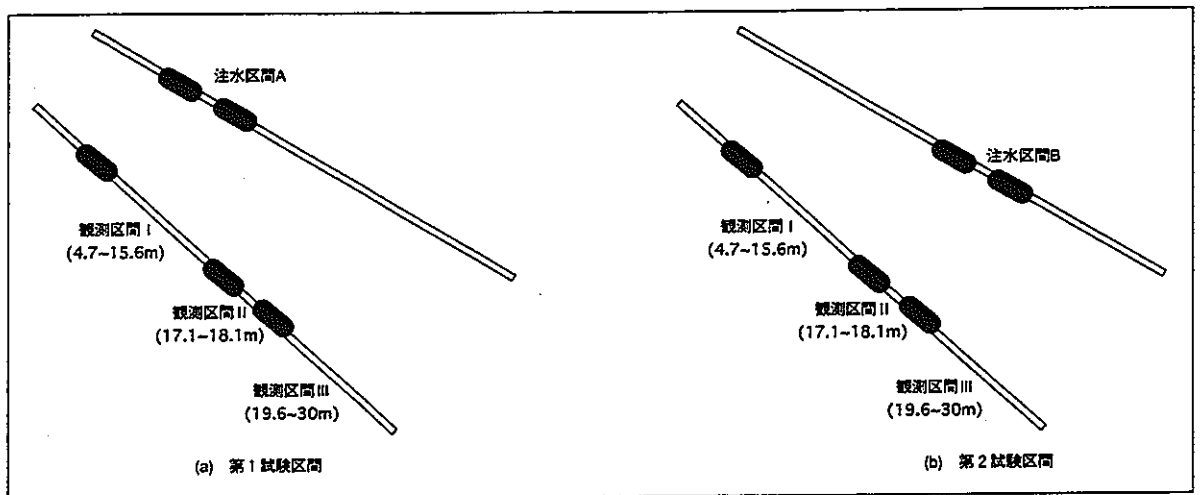


図-2 試験区間レイアウトの概念図

表-1 正弦波注水試験結果一覧

測線	注水区間 (第1 試錐孔)	観測区間 (第2 試錐孔)	測線距離 (m)	観測区間長 (m)	周期 (min)	注水圧力 $A_0$ (kPa)	注水流量 ( $\ell/h$ )	観測圧力 A (kPa)	減衰 $A/A_0$	位相 (radian)
A-I	注水区間A	観測区間I	3.0	10.8	10	47.9	5.06	0.35	7.274E-03	0.35
					60	50.5	5.46	0.44	8.767E-03	0.44
					360	50.0	5.76	0.59	1.170E-02	0.59
A-II		観測区間II	7.6	1.0	10	47.9	5.06	NO RESPONSE		
					60	50.5	5.46			
					360	50.0	5.76			
A-III		観測区間III	14.5	10.4	10	47.9	5.06	0.11	2.310E-03	0.62
					60	50.5	5.46	0.17	3.427E-03	0.30
					360	50.0	5.76	0.26	5.126E-03	0.17
B-I	注水区間B	観測区間I	7.5	10.9	10	77.4	5.55	0.30	3.811E-03	0.38
					60	77.4	5.71	0.41	5.300E-03	0.24
					360	80.2	5.43	0.48	5.924E-03	0.18
B-II		観測区間II	3.5	1.0	10	77.4	5.55	0.35	4.560E-03	1.66
					60	77.4	5.71	2.26	2.915E-02	1.19
					360	80.2	5.43	4.60	5.738E-02	0.58
B-III		観測区間III	8.7	10.4	10	77.4	5.55	0.22	2.842E-03	0.34
					60	77.4	5.71	0.31	3.854E-03	0.23
					360	80.2	5.43	0.36	4.470E-03	0.19



表-2 正弦波注水試験による透水係数と比貯留係数

測線	周期 (min)	3次元モデル			2次元モデル			非整数次元モデル			
		透水係数 (cm/s)	比貯留係数 (1/cm)	水頭拡散率 (m <sup>2</sup> /s)	透水係数 (cm/s)	比貯留係数 (1/cm)	水頭拡散率 (m <sup>2</sup> /s)	次元	透水係数 (cm/s)	比貯留係数 (1/cm)	水頭拡散率 (m <sup>2</sup> /s)
A-I	10	7.38E-05	2.04E-08	0.362	1.84E-05	1.19E-08	0.154	2.0	1.84E-05	1.19E-08	0.154
	60	7.31E-05	4.11E-08	0.178	1.92E-05	9.91E-09	0.194		1.92E-05	9.91E-09	0.194
	360	6.08E-05	1.33E-08	0.046	1.53E-05	1.64E-08	0.093		1.53E-05	1.64E-08	0.093
A-II	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	60	—	—	—	—	—	—		—	—	—
	360	—	—	—	—	—	—		—	—	—
A-III	10	3.77E-05	1.30E-09	2.896	2.30E-05	2.14E-08	0.108	3.0	3.77E-05	1.30E-09	2.896
	60	3.57E-05	1.76E-09	2.033	3.48E-05	9.08E-09	0.384		3.57E-05	1.76E-09	2.033
	360	2.89E-05	2.75E-09	1.052	4.60E-05	7.91E-10	5.812		2.89E-05	2.75E-09	1.052
B-I	10	3.80E-05	1.92E-09	1.977	1.45E-05	7.52E-09	0.194	2.1	1.11E-05	3.28E-09	0.337
	60	3.26E-05	3.74E-09	0.871	1.84E-05	3.94E-09	0.467		1.06E-05	4.96E-09	0.213
	360	2.83E-05	1.17E-08	0.241	2.21E-05	2.99E-09	0.740		1.21E-05	4.96E-09	0.244
B-II	10	1.90E-05	8.25E-08	0.023	1.50E-05	4.00E-08	0.037	1.7	3.61E-05	6.35E-08	0.057
	60	4.90E-06	6.53E-08	0.008	4.98E-06	3.33E-08	0.015		2.25E-05	5.28E-08	0.043
	360	4.18E-06	8.10E-08	0.005	7.20E-06	3.04E-08	0.024		2.38E-05	3.49E-08	0.068
B-III	10	4.55E-05	1.35E-09	3.367	2.30E-05	4.55E-09	0.506	2.1	1.52E-05	3.01E-09	0.506
	60	3.87E-05	3.05E-09	1.269	2.76E-05	2.74E-09	1.009		1.52E-05	4.34E-09	0.350
	360	3.19E-05	1.02E-08	0.314	2.90E-05	4.15E-09	0.699		1.27E-05	4.76E-09	0.266

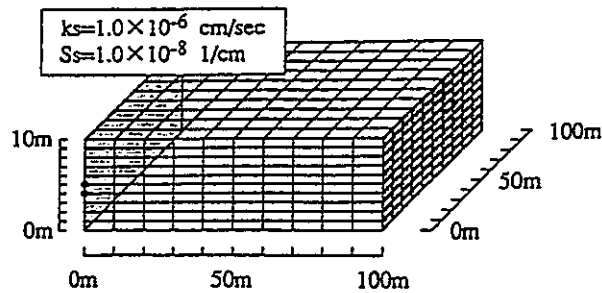


図-3 解析モデル図

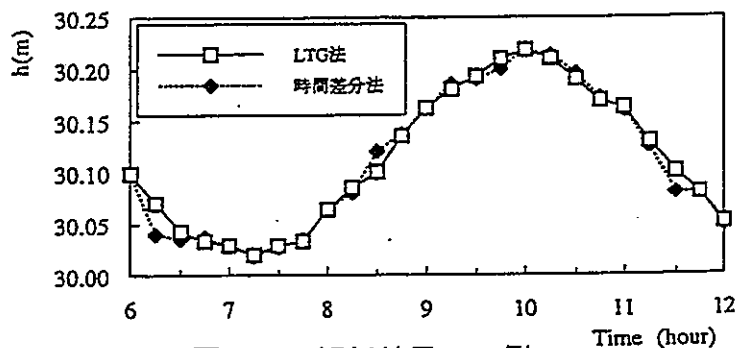


図-4 解析結果の一例

表-3 境界条件の扱いと演算時間

	LTG法	時間差分法
シノイダル境界条件の 導入法(1cycle)	関数化 (ラプラス変換)	120分割
演算時間 (sec)	3560	10640

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	岩石及び鉱物と地下水との反応試験									
研究協力課題	緑泥石温度計についての加温・加圧試験研究									
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="2">兵庫教育大学 学校教育学部 地学 助教授 澁江靖弘*</td> <td rowspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="2">人形峠事業所 環境資源開発課 時澤孝之, 鶴留浩二</td> </tr> </table>			大 学 側	兵庫教育大学 学校教育学部 地学 助教授 澁江靖弘*		〔*客員研究員 **研究生〕	動 燃 側	人形峠事業所 環境資源開発課 時澤孝之, 鶴留浩二	
大 学 側	兵庫教育大学 学校教育学部 地学 助教授 澁江靖弘*		〔*客員研究員 **研究生〕							
動 燃 側	人形峠事業所 環境資源開発課 時澤孝之, 鶴留浩二									
研究協力実施場所	動燃 人形峠事業所 環境資源開発部 環境資源開発課 兵庫教育大学 地学教室									
通算研究期間 (予定)	平成9年4月 ~ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成9年4月1日~ 平成10年3月31日							
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究									
<p>【研究目的】</p> <p>地熱地帯に適用されている緑泥石地質温度計について、その妥当性を実験的研究を通して検証する。実験によって玄武岩と熱水との反応で生じる緑泥石化あるいは粘土鉱物化について検討する。さらに、これらの化学組成と熱水の温度との関係を検討することを目的とする。</p>										
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>緑泥石は地熱地帯で産する変質鉱物の代表的な鉱物の一つであり、その化学組成は大きな変化を示す。緑泥石の化学組成と熱水の温度との関係を経験的に表した地質温度計（例えば、Cathelineau and Neiva, 1985）がいくつかの地熱地帯に適用されてきたが、その有効性について疑問が出されている（Essen and Peacor, 1995）。これまで緑泥石地質温度計については、地熱水の温度と化学組成および緑泥石の化学組成の観点から検討されてきた。しかしながら、実験的な検討は十分にされていない。</p> <p>そこで、玄武岩と熱水を高温高圧状態で反応させて、生成する緑泥石などの粘土鉱物の化学組成や熱水変質の様子について検討する。また、緑泥石化や粘土鉱物化がどのような反応経路を通して生じるのかを、微細な領域での化学分析に基づいて検討を行った。</p>										
<p>【使用主要施設】</p> <p>動燃事業団：高温高圧試験装置（オートクレーブ）、X線マイクロアナライザ（EPMA）、反射顕微鏡、偏光顕微鏡 兵庫教育大学：原子吸光度計</p>										

【進捗状況（当該年度までの概要）】

【研究成果】

以下に平成9年度の研究成果の概要をまとめる。

〔実験方法〕

- (1)玄武岩試料を粉末状にしたものと縦横数cmの大きさに切った角柱を金チューブに入れて、海水を加えた後で金チューブを封入した。この時の岩石試料の重さ（粉末と角柱の重さの和）と海水の重さの比は400℃、300kgf/cm<sup>2</sup>の条件で12日間では1.6、20日間では1.9、30日間では2.5であり、350℃、160kgf/cm<sup>2</sup>（飽和蒸気圧）の条件で10日間では1.8、21日間では2.3、32日間では1.7である。
- (2)高温高圧試験装置（オートクレーブ）を用いて400℃、300kgf/cm<sup>2</sup>の条件で12日間、20日間、30日間を、350℃、160kgf/cm<sup>2</sup>の条件で、玄武岩と熱水を反応させて実験を行った。
- (3)実験終了後、固相と液相をマイクロポアフィルターを用いて分離した。粉末試料については、乾燥させた後にX線粉末回折による鉱物の同定を行った。また金チューブから取り出した角柱は変質の状況を観察するために、研磨薄片を作製した。その作製方法は、角柱の長さ方向の両端部分の2ヶ所を切断したものを板状ガラスの上に接着剤で張りつけた後に、厚さ30μm程度まで研磨するものである。また、分離した水溶液の組成は原子吸光光度計を用いて測定を行った。

〔実験結果〕

- (1)固相粉末のX線回折分析の結果、400℃、300kgf/cm<sup>2</sup>の条件でスメクタイトが生成していることが判明した。しかしながら、緑泥石あるいは緑泥石/スルクワイト混合層の生成は確認できなかった。一方、350℃、160kgf/cm<sup>2</sup>の条件では、10日間の実験においてエチレングリコール処理後のピークの移動からスメクタイトが生成していることが確認できた。また、21日間及び32日間の実験では、ピークの移動が認められず、スメクタイト以外の粘土鉱物の生成が考えられ、緑泥石の可能性もある。これについてはさらに検討する必要がある。
- (2)角柱の薄片の顕微鏡写真を末尾に示す。熱水変質が進行したために、玄武岩の組織が乱されていることが明らかである。しかも熱水変質を被った部分と新鮮な部分とは明瞭な境界線で区切られている。
- (3)反応させた海水の組成と実験後の水溶液の組成を比較すると、陽イオンの重量比に変化が認められる。これを以下の表に示す。

表 試験前後の陽イオンの重量比

温度：400 °C, 圧力：300kgf/cm<sup>2</sup>

	実験前	12日後	20日後	30日後
①(Na 濃度) / (K 濃度)	43.4	5.15	5.34	14.1
②(Na 濃度) / (Mg濃度) <sup>0.5</sup>	3.76	29.9	27.1	19.1
③(Na 濃度) / (Ca濃度) <sup>0.5</sup>	6.90	5.00	5.89	3.08

温度：350 °C, 圧力：160kgf/cm<sup>2</sup>

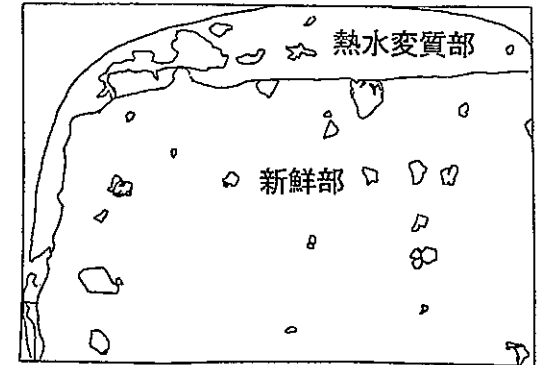
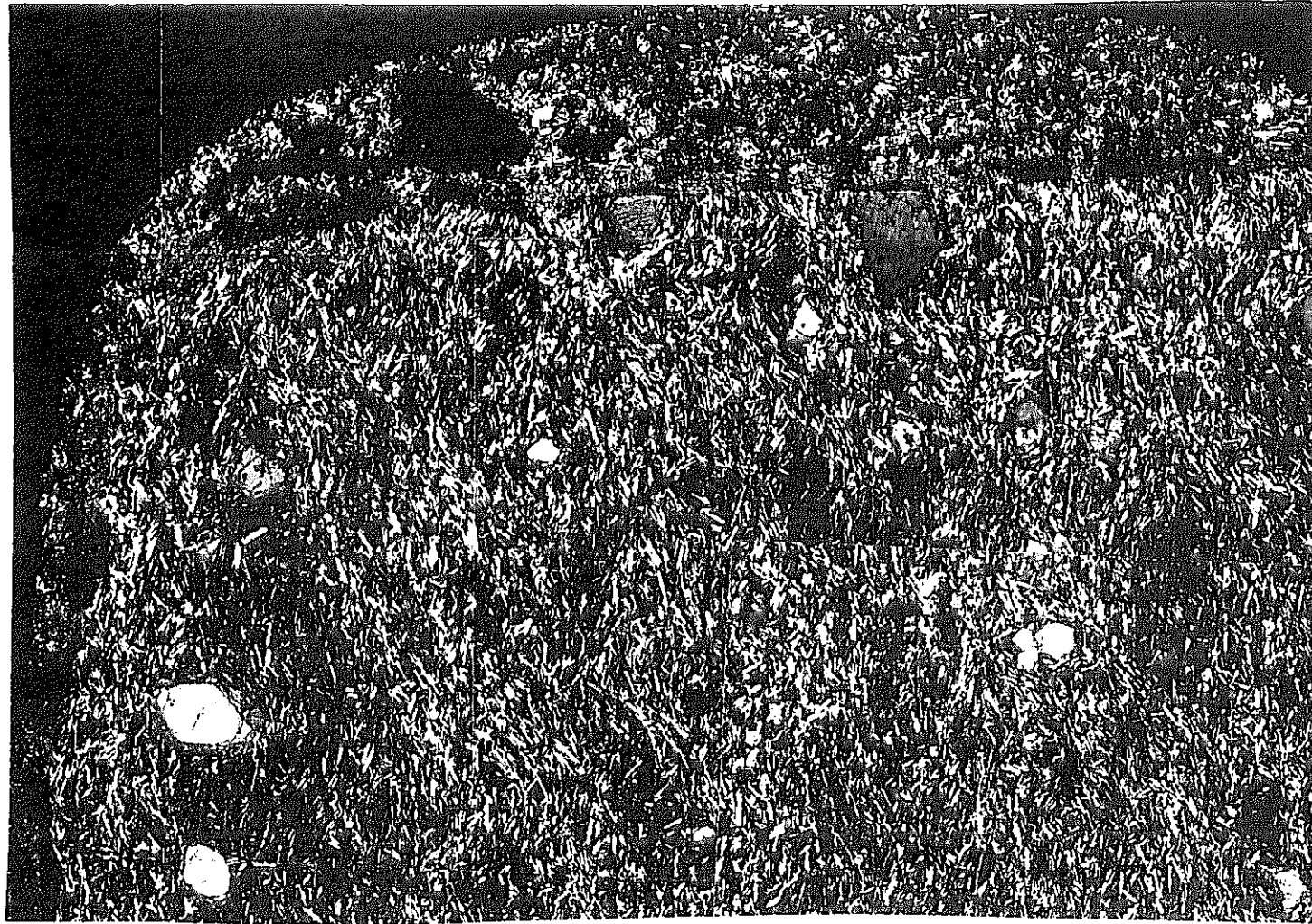
	実験前	10日後	21日後	32日後
①(Na 濃度) / (K 濃度)	43.4	59.6	68.0	※
②(Na 濃度) / (Mg濃度) <sup>0.5</sup>	3.76	24.1	29.8	26.3
③(Na 濃度) / (Ca濃度) <sup>0.5</sup>	6.90	6.43	7.94	5.46

注) ※ K 濃度については分析中

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度に引き続いて玄武岩と海水との高温高压実験を行う。特に、反応速度と溶液の組成との関係や生成する粘土鉱物の化学組成について検討するとともに、固相の化学組成については微細な領域での分析に重点をおいて行う。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】



0.5mm

試験後の角柱の薄片写真(12日間;400°C, 300kgf/cm<sup>2</sup>)

先行基礎工学分野に関する平成9年度研究概要報告書

研究協力テーマ	放射性物質の植物への移行と影響に関する研究		
研究協力課題	放射性物質のシロイヌナズナへの移行と影響に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	岡山大学 農学部総合農業科学科 教授 山田哲治* [*客員研究員 **研究生]		
動燃側	人形峠事業所 環境資源開発課 時澤孝之, 鶴留浩二		
研究協力実施場所	動燃 人形峠事業所 環境資源開発部 環境資源開発課 岡山大学 農学部 総合農業科学科		
通算研究期間 (予定)	平成9年4月 ~ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成9年4月1日~ 平成10年3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>                  本研究では、温度、湿度、照度、日照時間を制御できる植物育成試験装置を用いて、放射性物質のU、Raの植物体への移行メカニズムを解明し、更にはDNA レベルでの影響評価を行う。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b>                  人間への放射線被曝を評価する上での食物連鎖の観点から、地下水に含まれる放射性物質の植物体への移行、または植物への影響を評価することは重要なテーマである。特に本研究では、植物の培養条件（温度、湿度、照度、日照時間等）を実験的に再現し、種々のデータを蓄積する。                  そこで、本研究では植物の遺伝子構造が最もよく明らかにされているシロイヌナズナ（<i>Arabidopsis thaliana</i>）の放射性物質に対して変異を受けやすい遺伝子（例えばアントシアン合成遺伝子）をモデルにU、Raの放射線量と変異の頻度を明らかにする。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>                  動燃事業団：植物育成試験装置（グロースチャンバ）、PCR Thermal Cycler（DNA 増幅装置）                  電気泳動装置、                  岡山大学：岡山大学農学部総合農業科学科の施設（解析設備など）</p>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

- (1) 人形峠事業所周辺の土壌を用いたアラビドプシスの生育条件の検討。コントロール実験として岡山大学圃場の土壌を用いる。
- (2) 生育したアラビドプシスの葉組織からのDNAの抽出
- (3) PCR (polymerase chain reaction) 法によるDNA増幅及びDNA解析

【研究成果】

以下に平成9年度3月までの研究経過の概要をまとめる。

〔実験方法及び経過〕

①アラビドプシスの生育条件

温度22℃，湿度50%，照度3,000lx，明期16時間－暗期8時間

②使用土壌

1. 岡山大学圃場の土壌 土壌中のウラン量 0.011Bq/g (濃度では0.89ppm)
  2. 人形峠開発試験棟側の土壌 0.017Bq/g (1.37ppm)
  3. 人形峠夜次鉦津ダム内の土壌 10Bq/g (806ppm)
  4. 人形峠夜次鉦津ダム内の土壌＋バーミキュライト(1:1)混合土壌
- 合計4種類(図1参照)。

それぞれに葉土壌：牛糞＝7：3の割合で牛糞を混合

③容器・・・ポットを使用(1土壌に3個使用するので、合計12個)

(理由)ポットを使用した理由としては、バットを使用すると土壌量が多く必要となり、一度に複数実験することが出来ないため。

④植物栽培期間・・・4週間

(理由)計画当初2週間で予定していたが、2週間の栽培では植物体は芽が出た程度の大きさで、土壌の違いによる影響が出にくいと考えたため。

⑤繰り返し数・・・1回

⑥DNA抽出

1) DNA抽出法

・DNA抽出法はシロイヌナズナのゲノミックDNA迅速単離法を用いた(植物のPCR実験プロトコール, 1997 秀潤社 参照)。

・サンプル数

1ポット3カ所×ポット数3個×土壌4種類＝36サンプル

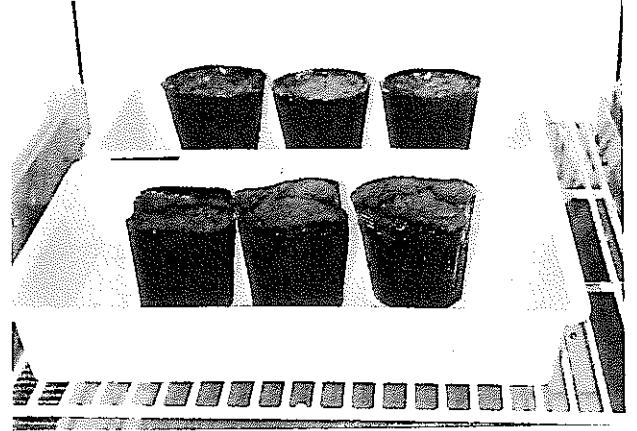
DNA抽出のアガロース電気泳動解析を図2に示す。

2) 予備実験としてのPCR

動燃・人形峠事業所のPCRを用いて、予備実験を兼ねて、岡山大学で開発したトランスジェニックタバコ植物体に導入したGUS遺伝子のDNA増幅実験を行ったところ、岡山大学で用いているPCR条件で問題なくDNA断片が増幅した。



左上：岡山大学圃場の土壌  
左下：開発試験棟側の土壌



右上：夜次鉱滓ダム内の土+パーミキュライト  
右下：夜次鉱滓ダム内の土壌

図1 各土壌の植物栽培状況

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

- 1) アラビドプシスやイネ科植物の放射性物質に対して変異を受けやすい、例えばアントシアニン合成遺伝子といった遺伝子をモデルにDNA レベルでウラン、ラジウムといったウラン鉱山にまつわる放射性核種からの放射線影響と変異の頻度を明らかにするものである。このため、アラビドプシスの培養条件（温度、湿度、照度、照射時間等）を制御再現した中で育成したアラビドプシスの各部位における移行特性に係わる諸データを収集するとともに、育成した植物体の葉組織からDNA を抽出し確認する。
- 2) PCR を用いた特異的遺伝子DNA 断片の増幅  
アラビドプシスから抽出したDNA を、放射性物質に対して変異を受けやすい遺伝子（例えばアントシアニン合成遺伝子）などが解析しやすいよう、PCR（DNA 増幅装置）を用いて増幅する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】



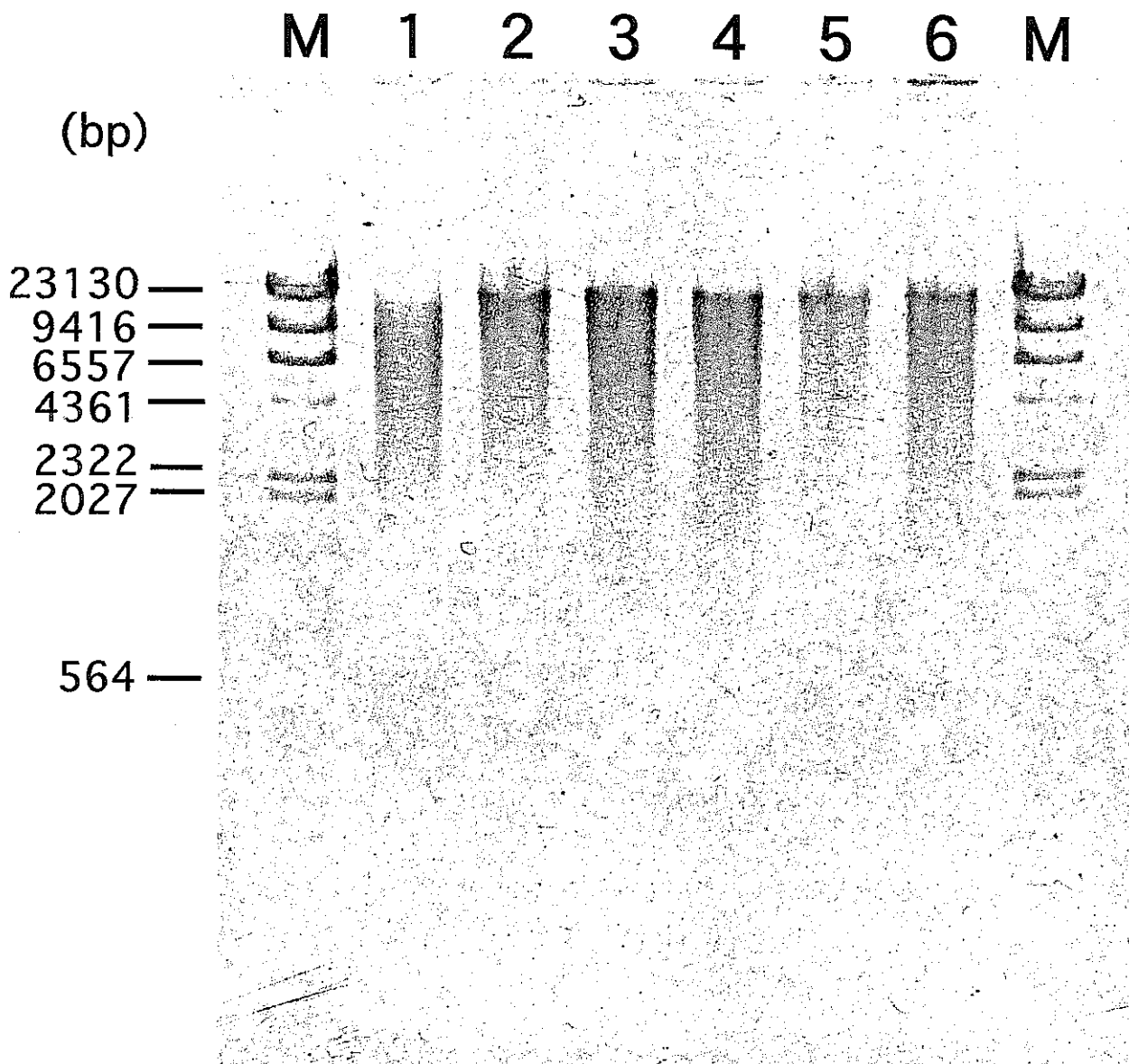


図2 DNA抽出のアガロース電気泳動解析結果

レーンM:  $\lambda$ -Hind III (マーカー)

レーン1-6: 開発試験棟土壌で生育したシロイヌナズナから  
単離したDNA

泳動写真の結果から、各レーンのバンドがマーカーの1番上と2番目の間で確認できるので、DNAは抽出できていると思われる。