

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

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	N1430 97-004	97.9.18
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		

1997年8月

動力炉・核燃料開発事業団

先行基礎工学分野に関する平成 8 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 6 年度に大学との研究協力のあり方等を検討した。その審議結果に基づき、平成 7 年度から、先行基礎工学研究協力制度を発足させ、2 年目を迎えた。

先行基礎工学研究協力制度は、事業団の施設を主に利用した原子力工学分野に関する基礎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。この制度は、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、研究者の応募をもとに、応募された研究協力課題を選考し、大学との共同研究の設定、客員研究員の受入れ、研究生の受入れ等により研究協力を実施してきた。

本報告書は、平成 8 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 20 件の研究協力課題の実施結果の概要をまとめたものである。

なお、20 件の研究協力課題のうち、高速増殖炉関係の 1 件、環境技術関係の 1 件については、平成 8 年度で終了した。

先行基礎工学分野に関する平成8年度研究協力の課題一覧(1/2)

【高速流動関係】

《☆☆ 平成8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	ページ
1. 液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究 ナトリウムの沸騰凝合過熱度と限界熱流束	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	1
2. 高密度比気液二相流に関する基礎研究 中性子カメラによる高密度比気液二相流の可視化と計測	大洗 基盤部 リスク評価室	飛田吉春	共同研究	三島 嘉郎 教授 京都大学原子炉実験所	5
3-(1) 損傷指標の定量化技術の研究 同上	大洗 安工部 機安室	青砥 紀身 永江 勇二	客員研究員 研究生	丸山 公一 教授 東北大学工学部 材料物性学科 他	14
3-(2) 損傷指標の定量化技術の研究 溶接部の高温劣化損傷の定量化技術	〃	青砥 紀身 木村 英隆	客員研究員	門馬 義雄 室長 STA 金井 研 損傷機構研究部 他	18
4-(1) 中性子エムカブに関する研究 同上	大洗 基盤部 炉心室	若林 和男	共同研究	鬼柳 善明 教授 北海道大学工学部 量子エレクトロニクス専攻 他	21
4-(2) 中性子エムカブに関する研究 同上 一高速中性子レンズ系の開発	〃	若林 和男	共同研究	古田島 久哉 教授 東北大学工学部 原子核工学科 他	26
5. 「常陽」実験炉試験片を用いたMA核種燃焼特性に関する研究 「常陽」照射MA試験片の測定結果を用いたMAの燃焼特性高精度評価	大洗 実験炉部 技術課	青山卓史	客員研究員 研究生	竹田 敏一 教授 大阪大学工学部 原子力工学科 他	☆☆ 30
6. 中性子測定データの計算機直接入力に関する研究 中性子測定データの計算機直接入力に関する研究	大洗 実験炉部 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	34
7. 高燃焼度燃料のIRIG評価 高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価	大洗 燃料部 AGS	山本一也 梶谷幹男	共同研究 研究生	佐藤 勇 大学院修士 九州大学工学部 応用原子核工学科 他	38
8. レーザを用いた高速炉の燃料破片飛出法に関する研究 レーザ共鳴分光分析を用いたFP飛出法の基礎研究	大洗 実験炉部 技術課	青山卓史	客員研究員	井口 哲夫 教授 名古屋大学 工学部 原子核工学科 他	42
9-(1) 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究 同上	大洗 基盤部 熱流本室	飯田将雄	共同研究	岡本 孝司 助教授 東京大学工学部付属 原子力工学研究施設 他	46
9-(2) 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究 同上	〃	〃	客員研究員	神永 文人 教授 茨城大学工学部 機械工学科	50

先行基礎工学分野に関する平成8年度研究協力の課題一覧(2/2)

【高速増産関係】

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	ページ
10-(1) 炉槽内流速分布測定への超音波 流速計の適用性評価 同上	大洗 安工部 炉工室	上出英樹 A. Tokuhiro	客員研究員	菱田 公一 助教授 慶応大学理工学部 流体力学工学科 他	54
11. 相変化を伴う融体析出挙動に関する 基礎研究 同上	大洗 安工部 炉女室	池野 勉 神山健司 小西賢介	共司研究 研究生	斎藤 正樹 助教授 東京工業大学 原子炉工学研究所 他	59
12. 高純度鉄基金属浴に関する研究 同上	大洗 安工部 機女室	榎原安英	客員研究員	安彦 兼久 助教授 東北大学 金属材料研究所 他	63

【環境技術関係】

《☆☆ 平成8年度で終了》

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	ページ
1. 不均質多孔質媒質中の水理・物質挙動 に関する研究 同上	東海 環研部 地層処分室	畑中耕一郎 井原裕二	共司研究	神野 健二教授 九州大学工学部 建設都市工学科	66
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 地質環境室	坪田浩二	客員研究員	渡辺 邦夫 助教授 埼玉大学工学部	69
3.-(1) 精密周波数制御連続電磁波調査法 の研究 同上 (有限要素法を用いた電磁法シミュレーション)	東農 技術開発課	長谷川 健 藪内 聡	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	74
3.-(2) 精密周波数制御連続電磁波調査法 の研究 高精度かつ高精度電磁波計測システムの 開発	〃	〃	客員研究員	牛島 恵輔 教授 九州大学工学部 資源工学科	☆☆ 79
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 (I) 同上	東農 技術開発課	長谷川 健 竹内竜史	共司研究 研究生	西垣 誠 教授 岡山大学 環境理工学部 環境理工工学科 他	82

〔高速増殖炉関係〕

先行基礎工学分野に関する平成8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		
研究協力課題名	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			
大学側	京都大学大学院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 塚 公明		
研究協力実施場所	京都大学大学院エネルギー科学研究科		
通算研究期間 (予定)	平成7年4月1日 ~ 平成11年3月31日	当該年度 研究期間	平成8年10月9日~ 平成9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理工学研究所 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）

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

- 平成9年度： 発熱率上昇速度が沸騰開始過熱度及び限界熱流束に及ぼす影響の解明
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

【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、液体ナトリウム中の酸素濃度の初期沸騰温度に対する影響に関する検討を実施した。

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しばしば観察された。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、カバーガス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

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。

4. 沸騰開始過熱度及び限界熱流束の測定

図3に平成8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。昨年度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ている。

本試験体を用いて、沸騰開始までの対流領域での履歴（沸騰開始前非沸騰過熱時間、沸騰経験時間等

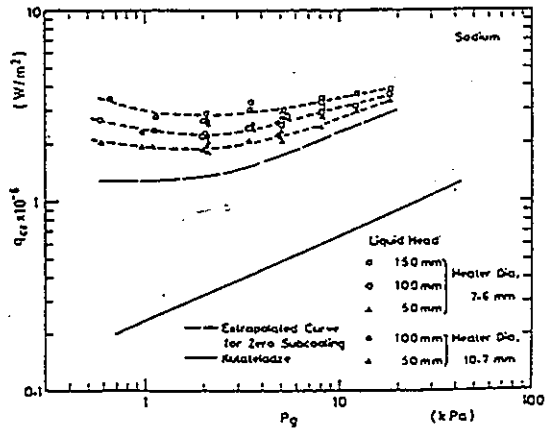
)を確認するとともに、液体ナトリウム中の酸素濃度を変えた初期沸騰温度の測定、さらに、限界熱流束にいたるまでの履歴について実験を実施した。

実験の結果、沸騰開始過熱度に関しては、過熱履歴の影響について明確な影響は認められなかった。一方、実験中に100 Kを越える過熱度が観察され、図4に示すようにコールドトラップ温度が低い状態のときに高い加熱度となる傾向が見られた。コールドトラップ温度は、ナトリウム中酸素濃度と相関していることから、沸騰開始過熱度は、酸素濃度に大きく影響されることが推測される。

5. まとめ

発熱リボンとシースともにタンタル製の新規に製作した試験発熱体を用いて、沸騰開始過熱度及び限界熱流束の測定試験を実施した。実験開始以前の履歴（非沸騰過熱時間、沸騰経験時間等）については明らかな依存性は観察されなかった。一方、酸素濃度に相関するコールドトラップ温度の影響についてコールドトラップ温度が低い条件で高い沸騰開始過熱度が観察される傾向が見られた。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】



ナトリウムの臨界熱流束に対する液頭の影響、液温が P_g の飽和温度の場合

図1 従来研究

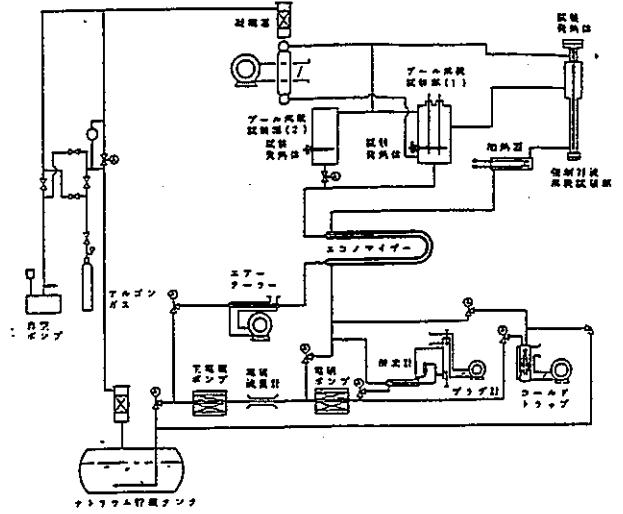


図2 試験装置

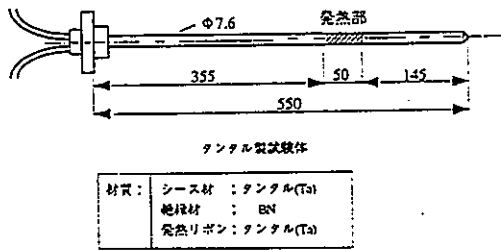


図3 試験体

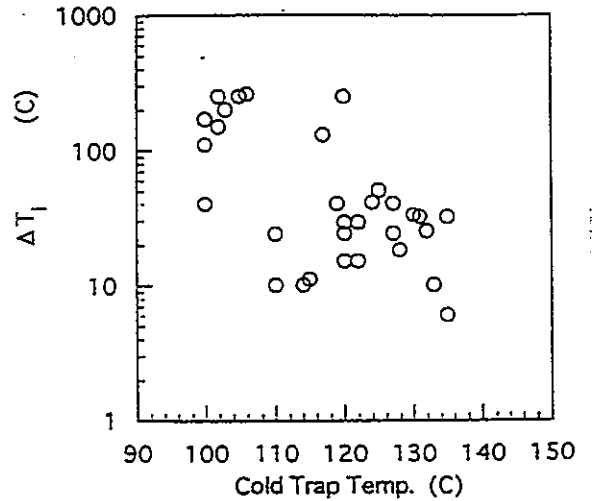


図4 試験結果

先行基礎工学分野に関する平成8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									
研究協力課題名	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	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="2">京都大学 原子炉実験所 教授 三島 嘉一郎</td> <td rowspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="2">大洗 リスク評価室 飛田 吉春</td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学 原子炉実験所 教授 三島 嘉一郎		〔*客員研究員 **研究生〕	動 燃 側	大洗 リスク評価室 飛田 吉春	
大 学 側	京都大学 原子炉実験所 教授 三島 嘉一郎		〔*客員研究員 **研究生〕							
動 燃 側	大洗 リスク評価室 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10月 ~ 平成10年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成8年6月1日~ 平成9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（溶融金属）の二相流を可視化測定することで、その流動特性を解明することを目的とする。</p>										
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>溶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>										

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成7年度は、気泡模擬形状の空間を有する固体試験体を置いた状態でのラジオグラフィ可視化試験を実施し、測定性能を確認した。平成8年度は実際に熔融低融点合金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度撮像法により可視化し、流動様式を観察し、得られた画像を処理することで気泡速度、ポイド率などの流動特性の計測を行った。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度は、マーカー粒子を用いた液相内の速度分布測定を行う予定である。

【研究成果】

1. 実験装置の製作

実験装置は、図1に示すように試験部及びガス供給系により構成される。試験部はチタン製矩形タンク（内寸20mm×100mm×500mm）である。チタン製矩形タンクには熔融鉛-ビスマスを満たし、その下部からノズルを通して窒素ガスポンプより供給された窒素ガスを吹き込むことにより、高密度比気液二相流を発生させる。試験部通過後、ガスは上部の気液分離器において熔融金属と分離し、逃がし弁をとおして大気に放散させる。熔融金属燃料は循環させず、試験部外側に巻いたヒーター（約500W）にて加熱し、最高200℃の温度の熔融状態に保持する。

2. 中性子ラジオグラフィ撮像システムの構成

図2に中性子ラジオグラフィによる高速度撮像系のブロックダイアグラムを示す。中性子ビームは右方向から入射し、試験部を通過した後、暗箱内のコンバータ/シンチレータにあたる。ここで可視光に変換され、シンチレータのスクリーン上に画像を投影する。これを画像増幅し高速度ビデオで撮影する。本研究では、中性子源にはJRR-3MのTNRF-2を利用した。この装置の撮像面における熱中性子束は $1.5 \times 10 \text{ n/cm}^2\text{s}$ 、カドミウム比は130、L/D比は垂直153 水平176である。シンチレータには ${}^6\text{LiF/ZnS:Ag}$ シンチレータを用いた。このシンチレータの残光時間は20~46 μs である。高速度ビデオはmac HSV-1000を用いた。このビデオのシャッタースピードは1/10,000、相対感度は50 (ISO) である。

3. 実験方法と条件

試験部に鉛-ビスマス合金を満たし、電気ヒーターにより約200℃まで加熱し、試験部底のガス吹き込み用ノズルより窒素ガスを試験部に吹き込み、気泡を発生させた。入口プレナム内で測定したガス温度は、170℃前後であり、吹き込み後速やかに液温と同温に達するものと考えられる。プール内の圧力は大気圧である。ガス吹き込みノズルは注射器を7本一列に並べた物で、本試験では内径0.5mm長さ20mmのステンレス鋼製のものを用いた。また、ノズルの数の影響を見るために、同じ注射針のノズルが1本のケースの実験も行った。実験方法としては、熔融プールの初期液高さをパラメータとして一定にし、吹き込む窒素ガスの流量を変化させ、その状態を中性子ラジオグラフィにより可視化し、録画した。初期液高さは9cm、14cm、29cmの3種類の条件で実験を行った。実験条件と結果の結果の概要を表1、表2及び表3に示す。表1に示した実験では、高速度ビデオにて毎秒500コマの速度で気泡挙動を可視化し、気泡形状の分類を行った。表2、3に示す実験では、可視化は通常のビ

デオカメラを用いて可視化した。この場合、撮像速度は毎秒30コマである。

4. 実験結果と考察

中性子ラジオグラフィによりプール内二相流を可視化し、これに画像処理を施すことによりボイド率を測定した。ボイド率の計算方法は以下の通りである。

$$\text{空のプールの画像輝度} : G^0_G = C\Phi_{th}\exp(-\Sigma_T\delta_T) + G_0$$

$$\text{熔融金属で満たした画像輝度} : G^0_L = C\Phi_{th}\exp(-\Sigma_L\delta_L - \Sigma_T\delta_T) + G_0$$

$$\text{二相流を流したときの画像輝度} : G^0_M = C\Phi_{th}\exp(-\Sigma_L\delta_{ML} - \Sigma_T\delta_T) + G_0$$

ただし、 G は画像輝度、 G_0 は輝度のオフセット（バックグラウンド）、 Φ_{th} は熱中性子束、 C は中性子束から輝度への変換係数、 Σ は中性子の巨視的断面積、 δ は各相の厚さ、添字 G は気相、 L は液相、 T は試験部容器の材料を表す。本来 G_0 は各画像で異なるが、これを画像処理で等しくなるよう正規化した。これによりボイド率は次式で与えられる。

$$\alpha = 1 - \frac{\delta_{ML}}{\delta_L} = \ln\left(\frac{G^0_L - G_0}{G^0_M - G_0}\right) / \ln\left(\frac{G^0_L - G_0}{G^0_G - G_0}\right)$$

ここで G_0 の値は Σ -スケージング法により次式で計算される。

$$G_0 = \frac{G^0_L - G^0_G \exp(-\Sigma_L\delta_L)}{1 - \exp(-\Sigma_L\delta_L)}$$

図3に実験結果とドリフトフラックスモデルによる予測との比較を示す。実線がドリフトフラックスモデルによる予測を表す。実験値は予測値よりもかなり小さくなっている。これはプール内の対流によるものと考えられる。すなわち、プール壁近くでは、下降流、中心部では上昇流となっており、このため中心部に多く集まって流れる気泡の速度が増したものと考えられる。これよりプール内では、管内気液二相流を1次元的に取り扱うドリフトフラックスモデルではうまく表現できないものと思われる。今後は気泡と液との界面抗力からの気液両相の運動量保存式をとり、液相の流れも考慮するとともに、液相流速を実験で測定する必要がある。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

現在のところ、ありません。

表1 高密度気液二相流実験条件 (高速度ビデオ撮像試験)

実験条件: 液高さ H=90mm

Run No.	融液温度 T [°C]	ガス空塔速度 V [m/s]	
9	214.7	0.00E+00	気泡流
10	214.9	6.91E-04	気泡流
11	213.4	1.38E-03	気泡流
12	213.8	2.76E-03	気泡流
13	213.6	4.14E-03	気泡流
14	212.7	5.53E-03	気泡流
15	211.5	6.91E-03	気泡流
16	211	2.30E-02	カップバブル
17	211.2	4.60E-02	カップバブル
18	210.8	6.91E-02	カップバブル
19	210.3	9.21E-02	カップバブル
20	209.4	1.15E-01	カップバブル
21	208.9	3.45E-02	カップバブル
22	208.1	1.15E-02	気泡流
23	208.9	1.84E-02	気泡流&カップバブル
24	209	2.76E-02	カップバブル
25	208.9	4.14E-02	カップバブル

実験条件: 液高さ H=142mm

Run No.	融液温度 T [°C]	ガス空塔速度 V [m/s]	
29	219.6	2.30E-02	気泡流
30	220.1	4.60E-02	カップバブル
31	220	6.91E-02	カップバブル
32	220	9.21E-02	カップバブル
33	220	1.15E-01	カップバブル
34	216.9	1.15E-02	気泡流
35	220.4	1.84E-02	気泡流&カップバブル
36	220.6	3.45E-02	カップバブル
37	220.5	2.76E-02	気泡流&カップバブル
38	220.5	1.38E-02	気泡流
39	220	3.91E-02	カップバブル
40	219.4	3.22E-02	カップバブル

実験条件: 液高さ H=142mm, 単一ノズル

Run No.	融液温度 T [°C]	ガス空塔速度 V [m/s]	
45	236.8	2.90E-03	気泡流
46	222.3	5.53E-03	気泡流
47	212.3	5.66E-03	気泡流
48	207	6.22E-03	気泡流
49	205.9	1.38E-03	気泡流
50	205.6	2.76E-03	気泡流
51	206.4	4.14E-03	気泡流

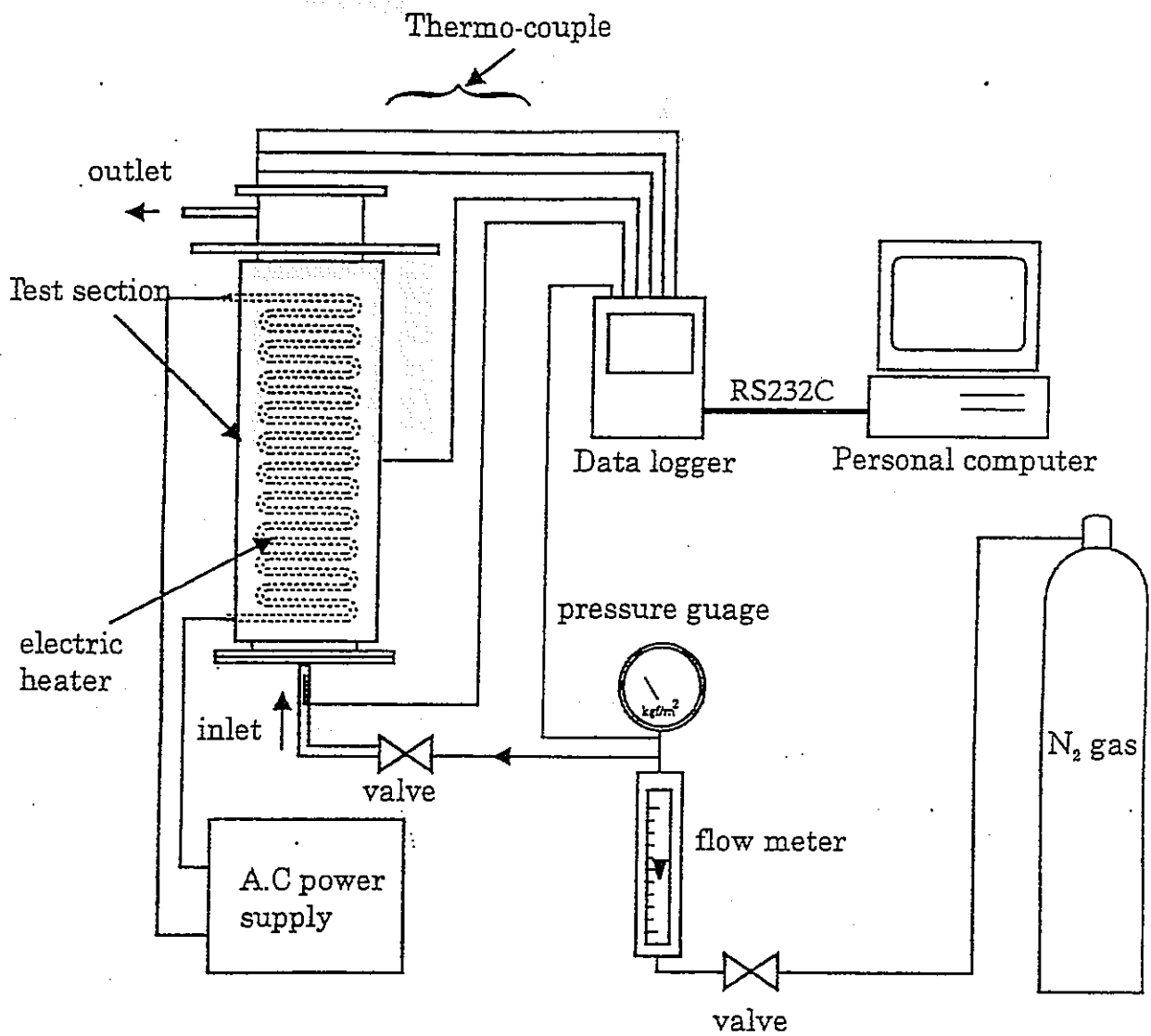
表 2 直密度比気液二相流 - SIT管実験 実験条件

Run No.	初期液高さ H [m]	ガス見かけ流速 v [cm/s]	液温度 (上) T1 [°C]	液温度 (中) T2 [°C]	液温度 (下) T3 [°C]	ガス入口温 度 T4 [°C]	ヒータ温度 T5 [°C]	流量計温度 T6 [°C]	流量計圧力 P [kg/cm ²]	備考
1	0									
2	0									BackGround
3	0									BackGround + sample
4	0									Pb-Bi 600g
5	0	0.0000								1600g
6	0	0.0000	215.7	201.1	200.5	172.5	233.4	22.3	0.00	1600g(Total 2800g)
7	0.09	0.1395	219.0	203.3	202.9	185.3	237.5	22.3	0.00	PorGround
8	0.09	0.2796	220.7	204.4	204.0	183.3	239.4	22.4	0.08	
9	0.09	0.5674	223.5	204.8	204.4	178.7	241.9	22.3	0.08	
10	0.09	0.7095	225.9	205.2	204.8	178.1	244.2	22.4	0.09	
11	0.09	1.1703	227.7	206.4	206.1	179.8	246.7	22.3	0.09	
12	0.09	1.4275	230.0	207.8	207.1	179.7	248.9	22.3	0.08	
13	0.09	1.6445	231.1	208.2	207.9	179.0	247.6	22.3	0.09	
14	0.09	1.9045	229.9	208.1	207.8	178.4	245.7	22.3	0.08	
15	0.09	2.1434	228.7	208.3	208.0	177.6	243.6	22.3	0.09	
16	0.09	2.3796	227.8	207.9	207.3	176.8	241.3	22.3	0.09	
17	0.09	2.8532	225.8	207.5	206.9	174.9	239.4	22.3	0.09	
18	0.09	3.5635	224.5	207.1	206.5	171.7	238.0	22.3	0.09	
19	0.09	4.3298	223.3	206.7	206.4	169.5	236.7	22.3	0.09	
20	0.09	4.8054	221.7	206.4	206.1	167.3	235.7	22.4	0.10	Run No. wrong
21	0.09	7.9716	220.1	205.6	205.1	159.8	234.4	22.4	0.18	
22	0.09	10.8768	217.8	204.9	204.7	152.8	233.5	22.4	0.20	
23	0.09	14.7300	213.7	203.6	202.8	143.6	231.2	22.4	0.27	
24	0.09	58.7965	204.0	198.1	197.7	175.7	216.9	22.4	1.20	
25	0.14	0.0000	204.6	202.3	202.1	177.3	222.5	22.2	0.00	PorGround(3800g)
26	0.14	0.1555	206.5	203.1	202.7	188.5	221.8	22.2	0.20	
27	0.14	0.3112	207.0	203.5	203.2	187.1	221.7	22.2	0.20	
28	0.14	0.6230	207.2	203.9	203.4	182.5	221.4	22.2	0.20	
29	0.14	0.7789	207.2	204.0	203.0	180.8	221.0	22.2	0.20	
30	0.14	1.2827	206.5	204.1	203.8	182.9	219.3	22.2	0.19	
31	0.14	1.5390	205.3	204.0	203.2	181.5	218.1	22.2	0.19	
32	0.14	1.7945	205.0	204.0	202.6	180.3	217.1	22.3	0.19	
33	0.14	2.0500	204.8	203.8	201.3	179.2	216.6	22.3	0.19	
34	0.14	2.3065	204.8	203.6	202.1	178.7	216.6	22.2	0.19	
35	0.14	2.5604	204.2	203.4	202.7	177.7	215.5	22.3	0.19	
36	0.14	3.0718	201.0	203.3	202.2	175.9	215.1	22.3	0.19	

表3 高密度化気液二相流-SIT管実験 実験条件

Run No.	初期液高さ H[m]	ガス見かけ流速 v [cm/s]	液温度(上) T1 [°C]	液温度(中) T2 [°C]	液温度(下) T3 [°C]	ガス入口温度 T4 [°C]	ヒータ温度 T5 [°C]	流量計温度 T6 [°C]	流量計圧力 P[kg/cm ²]	備考
37	0.14	3.8393	203.1	203.0	202.7	173.8	214.5	22.2	0.19	
38	0.14	4.6595	203.0	202.8	202.5	171.9	214.0	22.3	0.20	
39	0.14	5.1729	202.6	202.4	202.1	170.4	213.4	22.3	0.20	
40	0.14	7.8506	202.4	202.2	201.9	163.6	212.0	22.3	0.21	
41	0.14	11.2178	201.7	201.5	201.2	155.8	208.8	22.3	0.27	
42	0.14	14.9829	201.0	200.9	200.7	146.2	206.0	22.3	0.33	
43	0.14	68.0134	198.9	198.5	198.2	107.6	200.2	22.2	1.50	
44	0.29	0.0000	202.3	202.2	201.3	176.0	204.3	22.1	0.30	
45	0.29	0.1579	203.0	203.3	203.1	187.2	204.7	22.1	0.32	
46	0.29	0.3167	204.8	204.7	204.5	186.5	206.1	22.1	0.32	
47	0.29	0.6344	205.3	205.4	204.4	184.1	205.7	22.1	0.32	
48	0.29	0.7927	205.3	205.2	204.1	183.7	205.0	22.1	0.32	
49	0.29	1.3203	205.1	204.9	204.6	183.6	204.6	22.1	0.32	
50	0.29	1.6023	205.1	205.0	204.8	182.8	204.4	22.1	0.33	
51	0.29	1.8695	205.0	204.8	204.0	181.0	204.3	22.0	0.33	
52	0.29	2.1591	204.9	204.8	204.6	181.0	204.2	22.1	0.34	
53	0.29	2.4020	204.7	204.7	204.4	180.3	204.1	22.1	0.33	
54	0.29	2.6700	204.6	204.9	204.3	179.4	204.1	22.1	0.33	
55	0.29	3.1999	204.3	204.3	204.0	177.5	204.0	22.1	0.33	
56	0.29	3.9966	204.0	203.9	203.2	175.4	203.7	22.1	0.33	
57	0.29	4.8457	203.8	203.6	203.0	173.3	203.4	22.1	0.34	
58	0.29	5.3187	203.1	203.0	202.6	171.6	202.9	22.1	0.33	
59	0.29	8.3196	202.4	202.3	202.1	163.9	202.4	22.1	0.37	
60	0.29	11.4216	201.1	201.1	200.9	154.6	201.4	22.1	0.40	
61	0.29	14.8318	199.7	199.6	199.1	144.2	200.8	22.1	0.44	

ForGround(6800g)



Schematic diagram of experimental apparatus.

図1 鉛-ビスマス実験装置概略

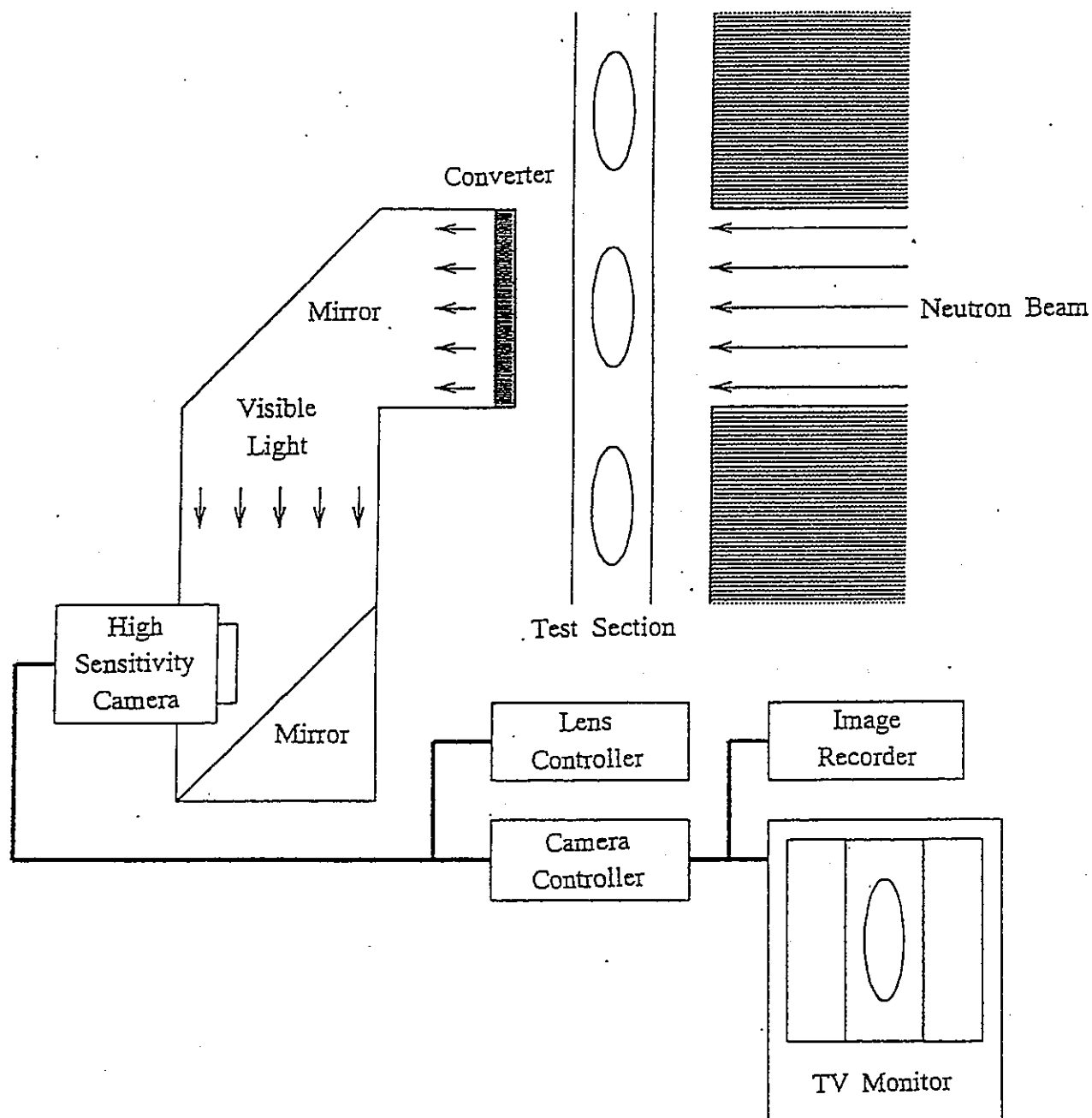


図 2 中性子ラジオグラフィ実験撮像系のブロックダイアグラム

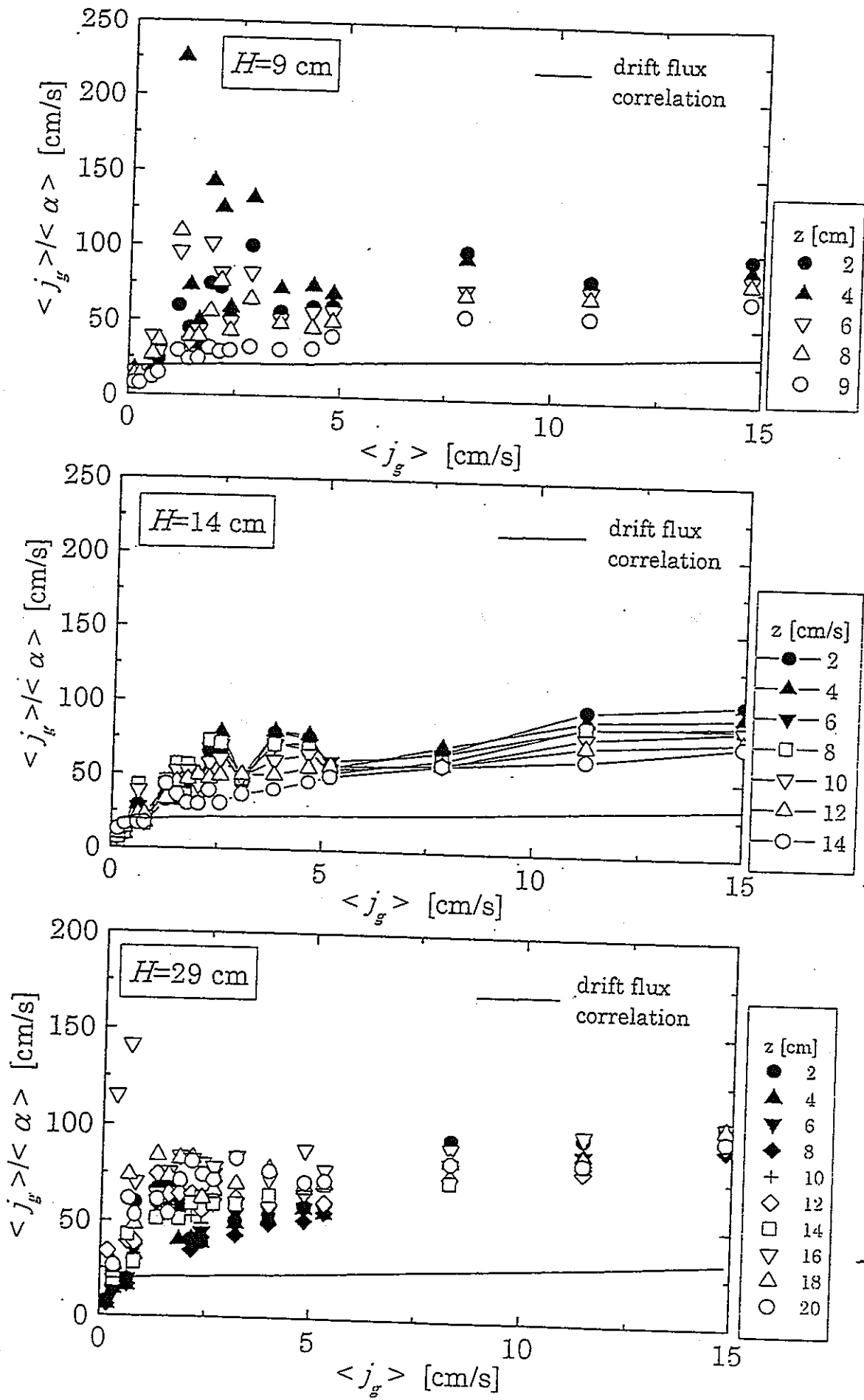


図3 皮相速度 $\langle j_g \rangle$ と $\langle j_g \rangle / \langle \alpha \rangle$ の関係

先行基礎工学分野に関する平成8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														
研究協力課題名	損傷組織の定量化技術の研究														
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">東北大学工学部材料物性学科 教授 丸山 公一*</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">大学院博士課程 澤田 浩太** (*客員研究員 **研究生)</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗 機器・構造安全工学室 青砥 紀身、永江 勇二</td> </tr> </table>			大 学 側	東北大学工学部材料物性学科 教授 丸山 公一*				大学院博士課程 澤田 浩太** (*客員研究員 **研究生)			動 燃 側	大洗 機器・構造安全工学室 青砥 紀身、永江 勇二		
大 学 側	東北大学工学部材料物性学科 教授 丸山 公一*														
	大学院博士課程 澤田 浩太** (*客員研究員 **研究生)														
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10年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成8年4月1日～ 平成9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>【研究目的】</p> <p>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>【研究内容（概要）】</p> <p>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>【使用主要施設】 大型・小型計算機 各種分析機器（電解放射型透過電子顕微鏡など） 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を選出した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度は、平成8年度に得られた研究成果に基づき、選出された金属組織因子と材料強度特性の相関性について検討を行う予定である。

【研究成果】

Mod. 9Cr-1Mo 鋼の寿命評価について、クリープ変形に伴う組織変化を調べ、寿命評価に有効な金属組織因子の検討を行った。

Mod. 9Cr-1Mo 鋼の使用環境に近い温度域である550～650℃の範囲において、クリープ変形材の組織観察を行った。Mod. 9Cr-1Mo 鋼の変形前の組織観察を行い（図1）、Mod. 9Cr-1Mo 鋼において有効になると考えられる金属組織因子を、以下の三つに絞った。

- (1) マルテンサイト・ラス幅の変化
- (2) マルテンサイト・ラス内の転位密度の変化
- (3) 析出物の変化（大きさや分布）

種々の試験条件における破断材の組織観察を行い、変形前の組織と比較したところ、マルテンサイト・ラスの幅が増加することが分かった（図2）。マルテンサイト・ラスは、純金属をクリープ変形させた時に形成されるサブグレインと同等と考えられる。マルテンサイト・ラスの幅と応力を、サブグレイン径と応力の間で得られている経験的關係式に適用してみた（図3）。マルテンサイト・ラスは、応力と一定の關係があり、温度に依存しないことが分かる。しかも、純金属で得られている關係式とほぼ同じ關係式で表される。

転位密度についても破断材において測定を行ったが、測定誤差が大きいために、定量化パラメータとして有効でないと判断した（図4）。しかし、転位密度は材料強度を支配するパラメータの一つと考えられるので、総合的な寿命・余寿命を評価する上では重要であると考えている。

析出物については、本年度は詳しく観察を行っていない。現在のところ、マルテンサイト・ラスの安定性との關係で重要ではないかと考えている。また、析出物はボイドの発生場所となる場合があり、寿命後期に発生するボイドについても、情報を提供してくれる金属組織因子であると考えている。

また、マルテンサイト・ラスや転位密度について、クリープ変形にともなう変化の過程を中断試験により調べた（図5）。マルテンサイト・ラス幅は、ひずみ約0.2付近で応力により決まる飽和値に達することが分かる。時間との關係を見ると、マルテンサイト・ラス幅は破断まで直線的に増加していることが分かる。マルテンサイト・ラス幅と寿命比との關係については、今後、詳細な検討を行っていく予定である。

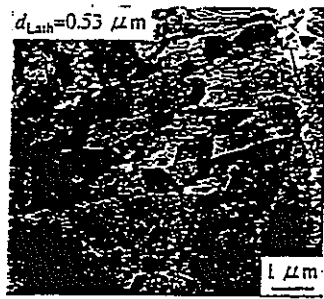
以上、組織観察より、マルテンサイト・ラス幅が、寿命評価に利用できる可能性があることが分かった。このマルテンサイト・ラス幅を簡単に検出する方法として硬さに注目した。マルテンサイト・ラス幅と硬さには一定の關係があり、硬さ測定によってマルテンサイト・ラス幅を推定できることが分かった。

本年度の研究成果をまとめると以下ようになる。（1）マルテンサイト・ラス幅は変形初期から応

力によって決まる飽和値まで増加すること、(2) 硬さ測定からマルテンサイト・ラス幅を推定できることから、マルテンサイト・ラス幅は、寿命・余寿命評価に有効な金属組織因子であると判断した。

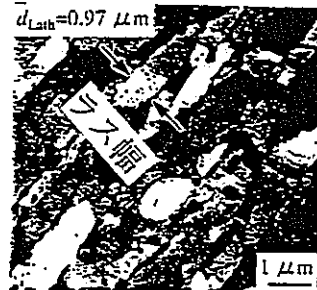
【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・澤田、丸山、小峰、永江、「改良9Cr-1Mo 鋼のクリープ変形中の組織変化」、CAMP-ISIJ Vol.10 (1997)525.

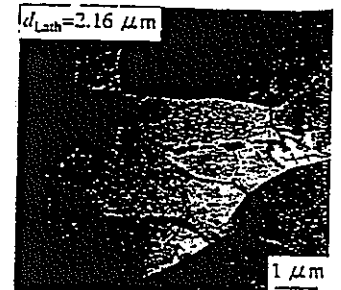


受入材

図1 変形前の組織観察結果



873K 177MPa



923K 73.5MPa

図2 クリープ破断後の組織観察結果

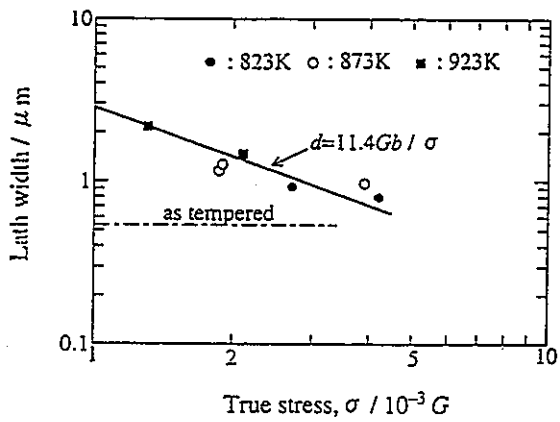


図3 ラス幅の応力依存性

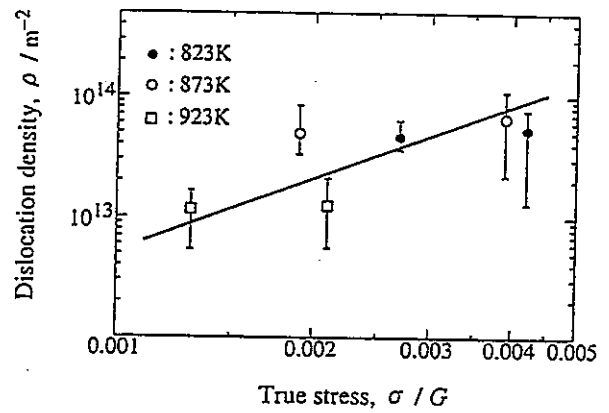


図4 転位密度の応力依存性

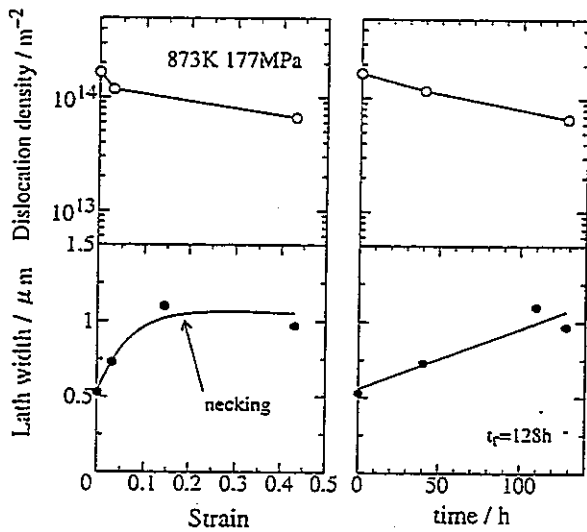


図5 ラス幅および転位密度の時間、ひずみ依存性

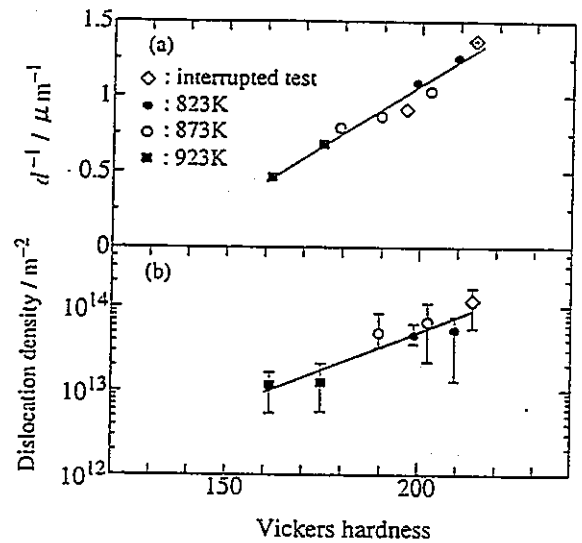


図6 ラス幅および転位密度と硬さの関係

先行基礎工学分野に関する平成8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										
研究協力課題名	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">科学技術庁 金属材料技術研究所 損傷機構研究部 門馬 義雄 第2研究室長*、山崎 政義 主任研究官* [*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗 機器・構造安全工学室 青砥 紀身、木村 英隆</td> </tr> </table>			大 学 側	科学技術庁 金属材料技術研究所 損傷機構研究部 門馬 義雄 第2研究室長*、山崎 政義 主任研究官* [*客員研究員 **研究生]			動 燃 側	大洗 機器・構造安全工学室 青砥 紀身、木村 英隆		
大 学 側	科学技術庁 金属材料技術研究所 損傷機構研究部 門馬 義雄 第2研究室長*、山崎 政義 主任研究官* [*客員研究員 **研究生]										
動 燃 側	大洗 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	金属材料技術研究所 損傷機構研究部 第2研究室 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10年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成8年4月1日～ 平成9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>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 損傷機構研究部 第2研究室 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）】

①現行の高温構造物設計基準を溶接継手に適用する場合の課題を明らかにした。②溶接積層全厚を含んだ大型クリープ試験材の解析から溶接継手のクリープひずみ分布は一様でなく、特定の分布を示すことを明らかにした。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年7月に本年度の両者の調査・検討結果を協議し、有望と判断される手法を選び次年度以降の研究展開方針を決定する予定である。

【研究成果】

1. 溶接継手を扱う上での課題

金材研と動燃のそれぞれの溶接継手に関するこれまでの研究結果報告から、溶接継手を扱う上での課題について以下の共通認識を得た。

①高温構造物の設計基準としてASTM Boiler & Pressure Vessel Code Case N-47 が用いられるが、本Codeで設定されているクリープ破断強さの継手効率は溶接方法や溶接材料などの効果が考慮されていない¹⁾。そこで、長時間データに基づく継手効率の見直しが必要となるが、そのための金属組織変化を考慮した合理的な評価手法を開発する。

②多層盛溶接継手では、溶接部位置によるクリープひずみ分布が一様でなく母材部全厚と溶接金属表面部にひずみの集中が見られるため、溶接金属および母材単体の小型試験片のみのクリープ強度評価でなく、全積層を含んだ大型試験片による評価が必要である^{2, 3)}（図1参照）。一方、動燃における溶接継手小型熱衝撃試験（STST）体において、熱応力が集中する円筒型試験体内面の溶接金属部の硬度が高い（図2参照）。したがって、溶接金属の表面部近傍のマイクロ損傷解析が重要であると考えられる。

2. 溶接金属部の金属組織変化の定量化手法

金属組織変化の定量化手法の候補を挙げ、検討・協議を行う予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1)山崎政義、渡部 隆、本郷宏通、門馬義雄、田中千秋；材料、第41巻(1992)、第 471号、1779.
- 2)M YAMAZAKI, Y MONMA, T WATANABE, J KINUGAWA；IMechE, (1996), C494/089, 361.
- 3)本郷宏通、山崎政義、渡部 隆、衣川純一、門馬義雄、中澤崇徳；CAMP-ISIJ, 9(1996), 1437.

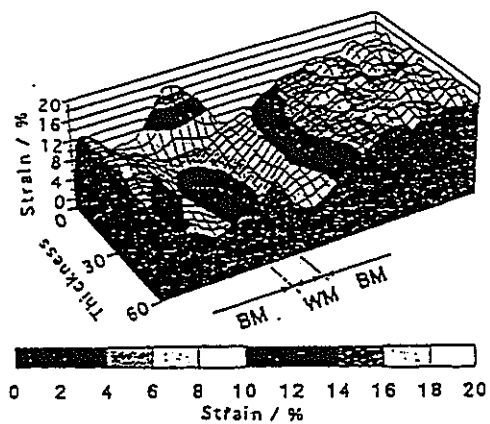
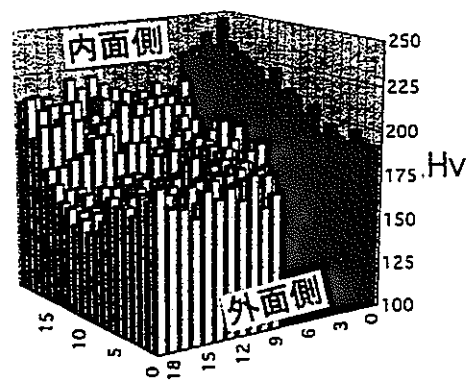


図1. SUS304溶接継手断面クリープひずみ分布²⁾



暗色部：溶金，白色部：母材

図2. 316FR STST材溶接継手断面の硬度分布

先行基礎工学分野に関する平成8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										
研究協力課題名	中性子ビームプローブに関する研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻、教授 鬼柳善明、助教授 加美山隆、 助手 平賀富士夫、博士過程 小川雪郎、修士過程 須田義之</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗 基盤技術開発部 炉心技術開発室 若林利男</td> </tr> </table>			大 学 側	北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻、教授 鬼柳善明、助教授 加美山隆、 助手 平賀富士夫、博士過程 小川雪郎、修士過程 須田義之			動 燃 側	大洗 基盤技術開発部 炉心技術開発室 若林利男		
大 学 側	北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻、教授 鬼柳善明、助教授 加美山隆、 助手 平賀富士夫、博士過程 小川雪郎、修士過程 須田義之										
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	北海道大学 工学部 鬼柳研究室 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8年4月1日～ 平成9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>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。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>【研究内容（概要）】</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>【使用主要施設】</p> <p>北海道大学工学部45MeV電子線型加速器 性能 最大加速エネルギー 45MeV 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による数値解析を行った。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、ビーム収束が起こっ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。これは、理論的に予想される領域であり、この方法によって中性子収束が行われていることが確認された。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

先端分岐型中性子ガイド管については、角度依存性について実験によって調べる。これらによるデータをもとに空間分布の波長依存性を明らかにする。磁場による中性子収束については、まだ十分な統計を得ていないこと、周囲の構造体からの散乱の影響の評価など、実験的にも理論的にも調べて行かなくてはならない課題がある。キャピラリー管については、今後、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。

【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。アライメントは、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。この体系でオブリークミラーを挿入した場合の効果は、オブリークミラーに対して反対側で長波長の中性子強度が増大することが予想される。その効果を実験的に調べた。

図2に飛行時間スペクトルを示す。また、図3にオブリークミラーが無いときに対するオブリークミラーを入れたときの強度比を示す。中性子源に向かって右側、つまりオブリークミラーで反射した中性子が通る方は、長波長側ほど強度が増加している。20オングストローム程度で強度比が飽和するのは、臨界角の増大によって、減速材表面全体をガイド管が見るようになったためである。一方、左側では6オングストロームまではほとんど強度が減少していない。10オングストローム程度でも70%程度の強度が残っているので、あまり長波長の中性子が必要でないような実験に有効であることがわかる。

図4に6オングストローム、図5に12オングストロームの各ガイド管出口から出てきた中性子の空間分布を示す。図4で右側のビームがオブリークミラーがある場合外側に広がっている。これは、オブリークミラーで反射された中性子によるものである。図5では図4との場合と異なりビームの分布は内側にも広がっている。これは、12オングストロームの中性子に対する全反射臨界角が大きいため、ガイド管の右側側面のスーパーミラーで反射して、中性子が内側に回り込むためである。同様に、オブリークミラーが無い場合でも両端で反射したビームが外側に向かうため大きく広がっている。

次に、中性子ビームラインとガイド管のなす角を変化させたときのガイド管出口から出てくる中性子強度の変化を調べた。図6にオブリークミラー無し、図7にオブリークミラー有りの場合の積分強度の

角度依存性を示す。横軸は減速材表面の法線方向に対するオブリークミラーのなす角である。図6では角度を大きくすると左側では強度が増加しているが、逆に右側では減少している。減速材表面の中性子分布がコサイン分布に近いので、角度が変化することで減速材中心を見ている方のガイド管出口の強度が増すと考えられる。図7では、この場合も角度を大きくすると左側では強度が増し、逆に右側では減少している。ただし、右側の強度の減少は図6に比べて少なくなっている。

図8にオブリークミラーが無いときに対するオブリークミラーを入れたときの強度比を示す。右側の強度は、分母のオブリークミラーが無い場合大きく減少するのに対し、分子のオブリークミラーがある場合は強度があまり減少しないため強度比が大きくなり、効率が上がったように見える。一方、左側はスーパーミラーのトランスミッションを見ているため角度にはほとんど依存しないと考えられる。

このガイド管を用いて、エネルギースペクトルの異なるビームを取り出せることがわかった。右側からはオブリークミラーの効果で長波長側にゲインを持ったビームを、左側からは短波長領域の中性子を取り出すことができた。この技術はビームラインを増やし、空間的な利用の向上や、中性子利用率という意味での実効的な中性子源の性能向上に利用できる。

2. 磁場による中性子の収束

角度発散をもってビーム孔から出てくる中性子を磁場をレンズのように働かせて、一点に収束させることが原理的に考えられる。それを実証するため北大の冷中性子源を用いて実験を行った。実験体系を図9に示す。冷中性子源から中性子レンズ管の入口まで5.8mあり、レンズ管の長さは2mである。今回用いたレンズ管の磁石の強さと長さから約14オングストロームの中性子が収束する。収束する中性子の波長範囲はビームのサイズに依存し、サイズが大きければ波長範囲が広がる。今回は、中性子強度を上げることを考えレンズ管の前方に2mmの穴があいたコリメータ、後方に5mmのコリメータを取り付け、出口のところで中性子飛行時間スペクトルを測定した。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。

図10に磁場があるとき(ON)と無いとき(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11に両者の比をとった結果を示す。明らかに14オングストローム付近で強度が増加していることがわかる。これは計算で予測される波長領域とほぼ一致している。この実験によって磁場による中性子の収束が起こっていることが観測された。ただ、5オングストローム付近で通常の飛行時間スペクトルではでてこないピークを磁場があるときでもないときでも測定されたので、このピークが磁石の中性子に対する全反射によるものかどうかを今後調べていく必要がある。また、管壁からの全反射の影響の評価など、収束による中性子増加を正確に見積もるための補正実験、理論解析を行っていく。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 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、大友李哉、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年春の年会
- 2) 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 proceedings of ICNS97

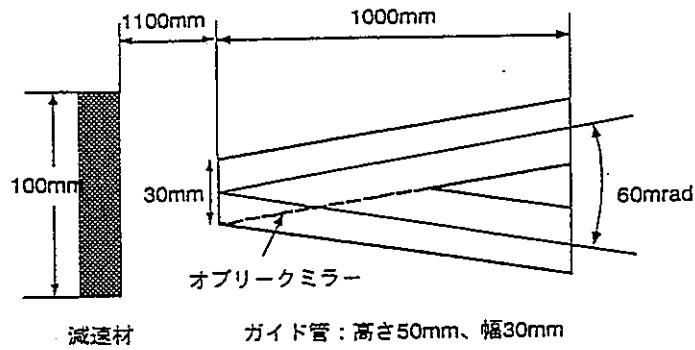


図1 先端分岐型ガイド管

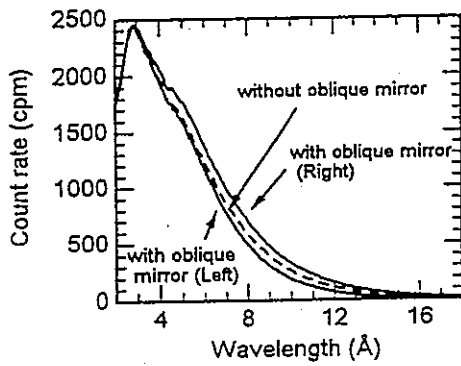


図2 飛行時間スペクトル

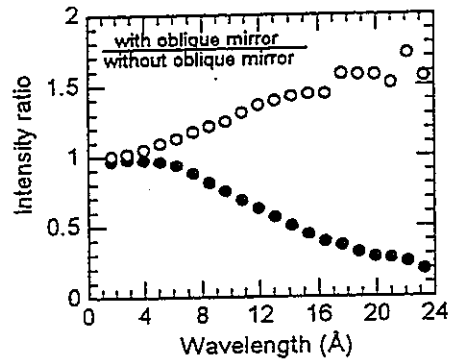


図3 強度比

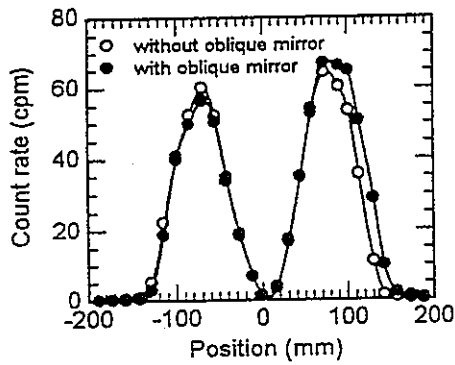


図4 空間分布 ($\lambda = 6\text{Å}$)

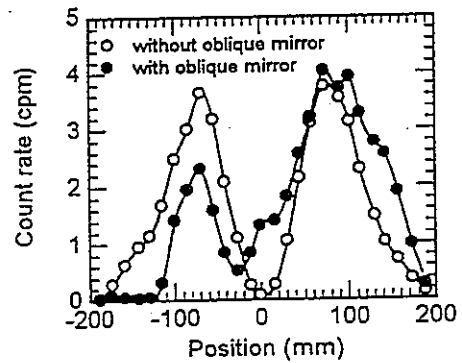


図5 空間分布 ($\lambda = 12\text{Å}$)

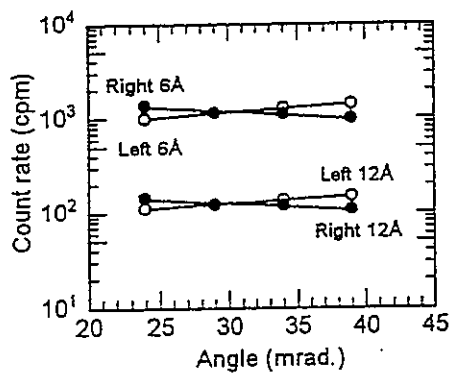


図6 積分強度の角度依存性 (without oblique)

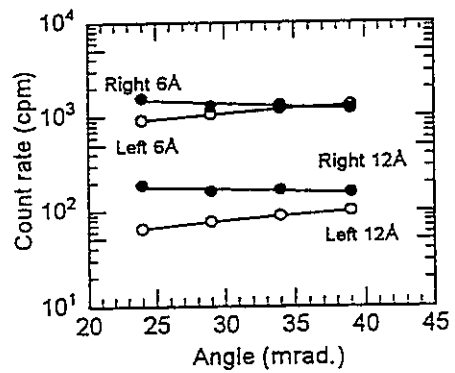


図7 積分強度の角度依存性 (with oblique)

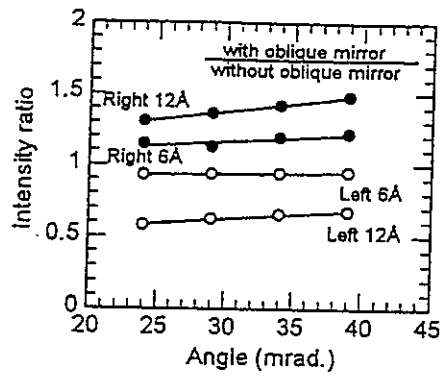


図8 強度比の角度依存性

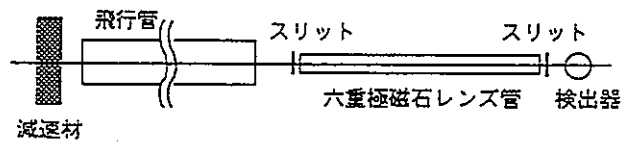


図9 中性子収束実験体系 (概略)

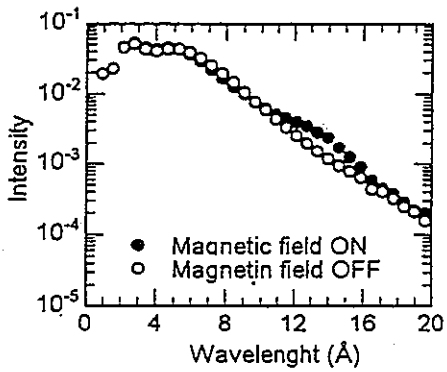


図10 飛行時間スペクトル

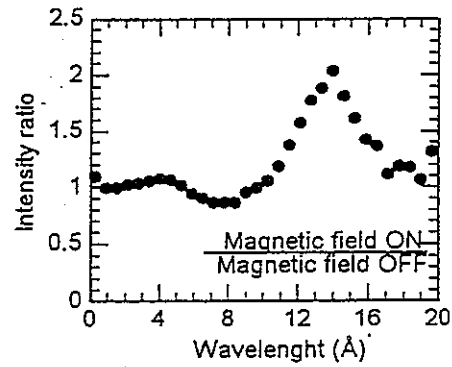


図11 強度比

先行基礎工学分野に関する平成8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										
研究協力課題名	中性子ビームプローブに関する研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻 教授 鬼柳善明、助教授 加美山隆、 助手 平賀富士夫、博士課程 小川雪郎、修士課程 須田義之</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗 基盤技術開発部 炉心技術開発室 若林利男</td> </tr> </table>			大 学 側	北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻 教授 鬼柳善明、助教授 加美山隆、 助手 平賀富士夫、博士課程 小川雪郎、修士課程 須田義之			動 燃 側	大洗 基盤技術開発部 炉心技術開発室 若林利男		
大 学 側	北海道大学工学部量子エネルギー工学専攻 教授 鬼柳善明、助教授 加美山隆、 助手 平賀富士夫、博士課程 小川雪郎、修士課程 須田義之										
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	北海道大学 工学部 鬼柳研究室 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8年4月1日~ 平成9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>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。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>【研究内容（概要）】</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1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>【使用主要施設】</p> <p>北海道大学工学部45MeV電子線型加速器 性能 最大加速エネルギー 45MeV 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8年度は、照射視野の拡がりを実測するための、入射中性子の微小位置検出器系及び小規模なレンズ系の基本設計を行った。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度としては、最終年度として試作した中性子のレンズ系及び微小位置検出器系を荷電粒子加速器のビーム輸送系に実装して、本研究の実証試験を行う。

【研究成果】

①世の中にその例を見ない、集束された中性子の生成法（収束中性子源）について、先ず報告する。この新たに開発した中性子源は、軽い核（水素）を標的とする重イオンの2体吸熱核反応、例えば ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C}, n){}^{13}\text{N}$ を利用するもので、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るために、高い収束性を持つことになる¹⁾。また、生成中性子の強度も、中性子と1:1で生成される随伴重粒子を、双極電磁石と飛行時間式RFチョッパーによって1次ビームより分離計数するので、高い精度で実測することが出来る²⁾。この点も、従来の中性子源に見られない本研究の優れた特徴である。このような中性子源を標準中性子場の実現に使用すれば、中性子検出器の検出効率を実験的に更正することが初めて可能となり、中性子を利用する研究分野での「鶏が先か卵が先か」というパラドックスを、初めて解消することが出来る。

②収束中性子のビームを生成するための実験配置を、図1に示す。従来から中性子生成用のターゲットには、ガスセルが用いられている。しかし、ガスセルのターゲットでは、図2(a)に示すように、入射重イオンがガスセルの入射窓を通過する際に受けるストラグリングに起因する入射角度の拡がり避けることが出来ない。ガスセルの代わりに水素吸蔵金属ターゲットを使用すれば、この不必要な生成中性子の角度の拡がりを回避することが出来る³⁾。図3は、ガスセルと水素吸蔵ターゲットを使用した場合の、生成中性子の角度の拡がりの計算値を示したものである。水素吸蔵ターゲットの母材としては、各種の金属材料が考えられるが、重イオンビームの照射下における水素の挙動について、十分な知見が得られているものでなければならない⁴⁾。重イオンビームの照射による水素吸蔵ターゲットからの水素脱離の測定は、東北大学AVFサイクロトロンにより加速された62MeVの ${}^{12}\text{C}^{1+}$ ビームでターゲットを照射し、弾性衝突により反跳される水素原子を半導体検出器で計算することにより、水素吸蔵量の変化を調べた。測定される反跳水素原子の計数率は、その時点でのターゲット中の水素原子数に比例するので、ビームの照射量に対する吸蔵水素量の変化の関係を調べることが出来る。図4は、その結果を示したもので、照射領域の水素吸蔵量は、時間と共に減少して行くことが判る。しかし、連続照射の途中で数分程度の中断を設定すれば、水素吸蔵量の減少を避けることが出来る。図5に示すように、30~50nAのビーム電流で、0.4mCの照射量まで、水素原子の計数率はほぼ一定となる。このような性質を持つHfは、水素を吸蔵し易く且つ吸蔵した状態も安定であることから、収束中性子源ターゲット母材として最適である。

③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と言うことが出来る。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) PRODUCTION OF FOCUSED NEUTRON BEAM USING HEAVY ION REACTION ; K. Hasegawa, K. Kotajima, M. Kitamura, T. Yamaya, O. Satoh, T. Shinozuka and M. Fujioka, Proc. 11th Int. Conf. on Cyclotron and their Application, Tokyo, 1987
- 2) 収束中性子源を用いた高速中性子標準場の開発 ; 鈴木一行、1996年度東北大学工学部博士学位論文
- 3) 収束中性子源用水素吸蔵金属ターゲットの開発 ; 鈴木一行、山口貞衛、古田島久哉、Materia Japan 34 (1995) 74-76
- 4) 重イオンビーム照射下における水素吸蔵ターゲット中の水素の挙動に関する研究 ; 鈴木一行、1993年度東北大学工学部修士学位論文

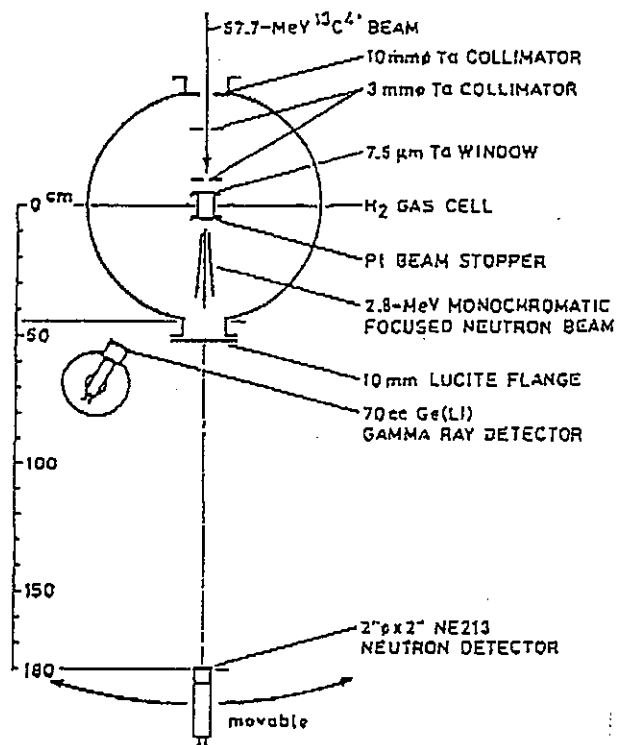


図1 収束中性子ビーム生成のための実験装置.

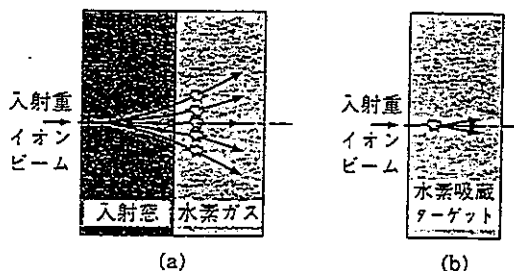


図2 中性子の放出角度に及ぼす入射重イオンビームのストラグリッド効果を示す説明図。(a) 水素ガスセル, (b) 水素吸蔵薄膜ターゲット.

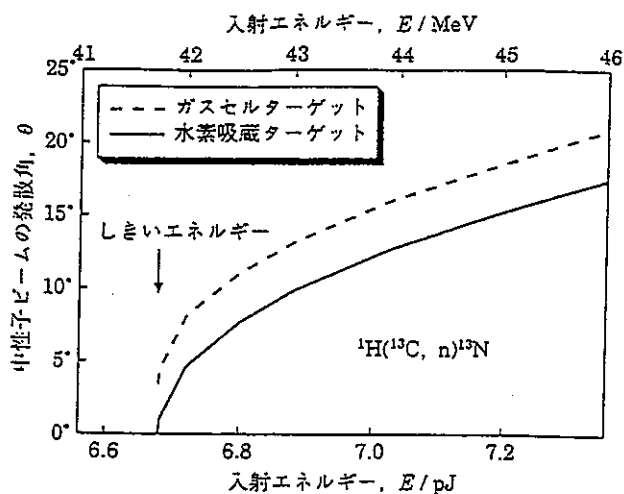


図3 7.5 μm 厚の Ta 入射窓をもつガスセルターゲットと水素吸蔵薄膜ターゲットを用いた場合の発生中性子の放出角度の広がり.

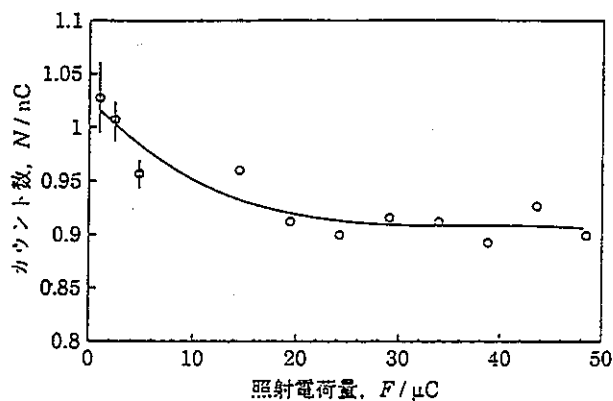


図4 25 μm 厚の HfH_{0.11} ターゲットにおける反跳水素原子計数率の照射量依存性. 重イオンビーム照射を継続しながら計数率を測定した結果を示している.

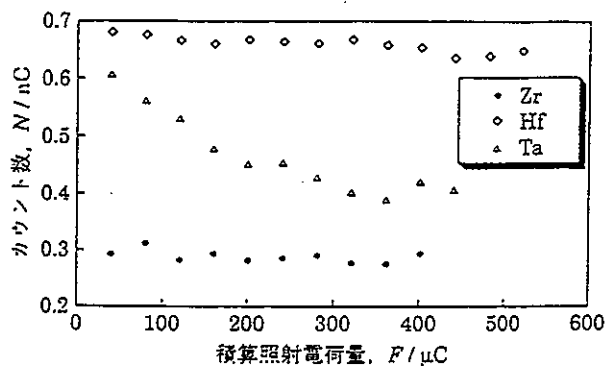


図5 ZrH_{0.15} (25 μm), HfH_{0.34} (8 μm) および TaH_{0.42} (25 μm) ターゲットにおける反跳水素原子計数率の積算照射量依存性. 重イオンビーム照射を 40 μC 行う毎に 180 s 間照射を中断しながら照射を繰り返し, 積算照射量に対する計数率の変化を示している.

先行基礎工学分野に関する平成8年度研究概要報告書

研究協力テーマ	「常陽」実機照射試料を用いたMA核種の燃焼特性に関する研究		
研究協力課題名	「常陽」照射MA試料の測定結果を用いたMA燃焼解析法の精度評価		
研究者所属、氏名			
大学側	大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻 教授 竹田敏一* 助教授 山本敏久*, 修士課程 横山賢治**, 修士課程 山根厚人** 〔*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		
研究協力実施場所	大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻 竹田研究室 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7年12月 ~ 平成9年3月	当該年度 研究期間	平成8年4月1日~ 平成9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>【研究目的】 動燃で進めているアクチニドリサイクル研究の一環として、高速炉炉心におけるマイナーアクチニド(MA)核種の燃焼特性を評価するため、高速実験炉「常陽」で照射したMA試料により、MAの燃焼解析法の精度評価を行い、高速炉を用いたMAの消滅処理研究に資する。</p>			
<p>【研究内容(概要)】 高速実験炉「常陽」で照射したMA試料を用いて、MAの燃焼解析法(核データ、燃焼チェーン、詳細中性子束分布計算法等)の精度評価を行う。 「常陽」炉中心や制御棒近傍で照射された特殊燃料集合体や炉心材料照射試験用反射体、また、高燃焼度の特殊燃料集合体に装荷された²³⁷Npドシメータを解析対象に選定し、試料が装荷された反射体や集合体内部の中性子束分布をモンテカルロ法により計算し、「常陽」の炉心管理や炉心解析に用いている拡散コードによる中性子束と比較して、これらの差が燃焼計算に与える影響を評価する。また、モンテカルロ法により得られた中性子束を用いて²³⁷Np変換率を計算し、測定値との比較により評価を行う。</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）】

^{237}Np 変換率の解析法を再検討した結果、平成7年度に解析した炉心材料照射試験用集合体CMIR-4について、MVP計算値の過大評価が約30%から約15~23%に改善された。

制御棒近傍で照射された特殊燃料集合体B6、B7については、集合体内部構造の非均質効果が中性子束分布へ与える影響は約1%であり、MVPによる中性子束を用いて計算した ^{237}Np 変換率は、測定値に比べてB6で約15%、B7で約30%過大評価であった。また、ドシメータによる実測反応率でアジャストした中性子束から求めた ^{237}Np 変換率のC/Eは、それぞれ約0.98、約1.25であった。

集合体平均燃焼度約10万Mwd/tまで照射された特殊燃料集合体C3Mについては、MVPによる中性子束を用いて ^{237}Np 変換率を評価中であるが、核分裂による変換率のC/Eは約1.16~1.24であった。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究協力は、平成8年度で終了する。

【研究成果】

1. ^{237}Np 変換率解析法の再評価

(1) 解析法の見直し

核分裂による ^{237}Np 変換率について、前年度の計算では、全変換率（照射前後の ^{237}Np 重量の差から算出）から中性子捕獲による変換率（ ^{238}Pu の生成量から算出）を差し引いて求めていたが、FP生成量の総和から算出することとした。測定においても、核分裂生成物である ^{137}Cs の生成量から核分裂率を求めており、この計算法により、核分裂による変換率を直接的に計算できる。

さらに、MVPの計算体系において、前年度の計算では燃料高さ55cmを1領域として取扱い、軸方向に平均化された断面積を用いていたが、今年度は軸方向にメッシュ分割し、 ^{237}Np 装荷位置のスペクトルのみで縮約した断面積を燃焼計算に用いることとした。

(2) CMIR-4の ^{237}Np 変換率の再評価

上記の解析法の見直しによる中性子束および ^{237}Np 変換率の測定値と計算値との比（C/E）を、前年度の結果とともに表1に示す。計算体系の見直しにより、全中性子束に大きな差は現れなかったが、スペクトルの違いにより ^{237}Np 中性子捕獲断面積について、前年の計算値は、約7%過大評価されていたことがわかった。これは、燃料高さ55cm領域で平均した中性子スペクトルが、 ^{237}Np 試料装荷位置でのスペクトルより軟らかいことが原因で、特に低エネルギー側の中性子束の差が大きく、中性子捕獲断面積を過大評価していたためと考えられる。

これらの解析法の見直しにより、 ^{237}Np 変換率の計算値と測定値の差は、前年度の評価結果である約30%の過大評価が、約15~23%に改善された。

2. B 6、B 7の燃焼解析

(1) MVPコードによる詳細中性子束分布およびスペクトル計算

MVPコードを用いて中性子束分布およびスペクトルを計算した結果、B 6、B 7ともに、集合体内部の非均質構造を考慮することにより、均質モデルに比べて、全中性子束で約1%小さくなった。また、非均質モデルと均質モデルでMVPのスペクトルを用いて縮約した断面積を比較すると非均質モデルでは、中性子捕獲断面積は約5~13%大きくなり、核分裂断面積は約7~9%小さくなった。これは、非均質モデルでは ^{237}Np ドシメータが装荷された軸心管位置での中性子スペクトルが構造材等による散乱の影響で軟化したためと考えられる。

次に、MVPコードにより、制御棒挿入効果について検討した結果、B 6、B 7ともに制御棒挿入による ^{237}Np ドシメータが装荷された炉中心レベルでの中性子束の変動は1%程度であった。

(2) ^{237}Np 変換率計算

B 6、B 7の ^{237}Np 変換率の計算値と測定値の比較を表2、3に示す。MAGIで規格化したMVPの中性子束を用いて計算した ^{237}Np 変換率のC/Eは、B 6では、中性子捕獲による変換率：1.17、核分裂による変換率：1.17であり、B 7では、中性子捕獲による変換率：1.42、核分裂による変換率：1.11であった。一方、ドシメータセットの実測反応率でNEUPACコードにより調整した中性子束を用いた場合のC/Eは、B 6では、中性子捕獲による変換率：0.99、核分裂による変換率：0.96であり、B 7では、中性子捕獲による変換率：1.34、核分裂による変換率：1.05であり、より1に近い結果となった。

3. C 3 Mの燃焼解析

C 3 Mは、集合体平均燃焼度約10万MWD/tの高燃焼度まで照射されており、照射期間中に炉心装荷アドレスが変更された(第3列→第2列)ことや、ウラン濃縮度を1.5倍に増加したドライバー燃料を炉内に装荷していき、炉心平均燃焼度を増加させたことに伴い、この間の中性子スペクトルの変化が大きかったことにより、照射期間を3つに分割し、それぞれについてMVPにより中性子束を計算した。

MVPによる中性子束を用いて ^{237}Np 変換率を評価した結果、核分裂による変換率のC/Eは、約1.16~1.24であった。また、ドシメータセットの実測反応率で調整した中性子束を用いた場合のC/Eは約0.99~1.03となり、他の集合体と同様に、より1に近い結果となった。

上記の結果から、MAGIの中性子束は過大評価であることが考えられ、今後、燃焼度や燃焼反応度損失等の中性子束の絶対値に依存する核特性との整合性を取りながら検討していく必要がある。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) T. AOYAMA and S. SUZUKI, "The Transmutation of Neptunium in the Experimental Fast Reactor "JOYO", Proc. of the International Conference on the Physics of Reactors (PHYSOR96), M 07 (1996)

表1 CMIR-4の²³⁷Np変換率のC/E値

計算ケース		1群断面積(barn) (MVP実効断面積)	全中性子束 (n/cm ² s)	中性子捕獲 による変換率 のC/E値	核分裂 による変換率 のC/E値	全変換率 のC/E値
MVP (内部構造考慮)	平成7年度評価	$\sigma_c=1.33, \sigma_f=0.437$	MVP中性子束分布* $\phi=4.21 \times 10^{15}$	1.36	1.29	1.33
	平成8年度評価	$\sigma_c=1.23, \sigma_f=0.433$	MVP中性子束分布* $\phi=4.15 \times 10^{15}$	1.23	1.15	1.21

*MAGIの炉心中心の全中性子束を用いてMVPの中性子束を規格化

表2 B6の²³⁷Np変換率のC/E値

計算ケース		1群断面積 (barn)	全中性子束 (n/cm ² s)	中性子捕獲 による変換率 のC/E値	核分裂 による変換率 のC/E値	全変換率 のC/E値
MVP (内部構造考慮)		$\sigma_c=1.30, \sigma_f=0.437$	MVP中性子束分布* $\phi=3.27 \times 10^{15}$	1.17	1.17	1.17
MVP+NEUPAC (内部構造考慮)		$\sigma_c=1.30, \sigma_f=0.437$	NEUPAC全中性子束 $\phi=2.80 \times 10^{15}$	0.99	0.96	0.98

*MAGIの炉心中心の全中性子束を用いてMVPの中性子束を規格化

表3 B7の²³⁷Np変換率のC/E値

計算ケース		1群断面積 (barn)	全中性子束 (n/cm ² s)	中性子捕獲 による変換率 のC/E値	核分裂 による変換率 のC/E値	全変換率 のC/E値
MVP (内部構造考慮)		$\sigma_c=1.29, \sigma_f=0.396$	MVP中性子束分布* $\phi=3.23 \times 10^{15}$	1.42	1.11	1.32
MVP+NEUPAC (内部構造考慮)		$\sigma_c=1.29, \sigma_f=0.396$	NEUPAC全中性子束 $\phi=3.03 \times 10^{15}$	1.34	1.05	1.25

*MAGIの炉心中心の全中性子束を用いてMVPの中性子束を規格化

先行基礎工学分野に関する平成 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										
研究協力課題名	(同上)										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3"> 的場 優 (九州大学工学部応用原子核工学科教授)、榮武二 (同、助教授)、 納富昭弘 (同、助手)、北村康則 (同、大学院修士課程) [*客員研究員 **研究生] </td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3"> 大谷暢夫 (大洗・実験炉部・臨界工学試験室) 羽様 平 (同上) </td> </tr> </table>			大 学 側	的場 優 (九州大学工学部応用原子核工学科教授)、榮武二 (同、助教授)、 納富昭弘 (同、助手)、北村康則 (同、大学院修士課程) [*客員研究員 **研究生]			動 燃 側	大谷暢夫 (大洗・実験炉部・臨界工学試験室) 羽様 平 (同上)		
大 学 側	的場 優 (九州大学工学部応用原子核工学科教授)、榮武二 (同、助教授)、 納富昭弘 (同、助手)、北村康則 (同、大学院修士課程) [*客員研究員 **研究生]										
動 燃 側	大谷暢夫 (大洗・実験炉部・臨界工学試験室) 羽様 平 (同上)										
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 8年 4月 1日~ 平成 9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>【研究内容 (概要)】</p> <p>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。</p> <p>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>【使用主要施設】</p> <p>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中性子寿命の短い軽水減速体系の炉雑音測定実験を行い、マルチチャンネルスケーラー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たファインマン- α 法による未臨界度モニターの開発を行い、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を開発した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

新しいデータ処理手法についての検討を継続するとともに、開発した未臨界度モニターの性能向上のために、不感時間を短縮した測定システムの実験による評価、検出器の多チャンネル化の検討を行う。

【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、及びファインマン- α 法による未臨界度モニターの開発及び性能評価を行った。

(1) 軽水減速試験体の測定試験

昨年度実施した重水減速体系における試験に引き続いて、今年度はATR 規格のウラン燃料を装荷した軽水減速の試験体について計算機直接入力システムによる炉雑音測定を行った。実効増倍率は0.7 から0.85の範囲であり、ファインマン- α 法によるデータ処理の他、ロッシ- α 法を参考として時間分布を直接評価するデータ処理を試みた。ファインマン- α 法については、中性子寿命の短い軽水減速体系においても安定した評価が得られる事が確認されたが、時間分布の直接評価では有意な相関成分を取り出せない事が明らかとなった。ファインマン- α 法以外のデータ処理手法については、今後も検討を継続する。

(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 μ 秒程度の時間を必要とするため、これが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-1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。このよう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 μ 秒以下となると予想される。

バッファメモリーを使用した場合の処理回路の計数特性をモンテカルロ法によって評価した。図-2は、モンテカルロ法により模擬した時間間隔分布の評価結果である。バッファの深さが増すにつれて、時間間隔分布が不感時間のないポアソン分布に近づいていく様子がわかる。本評価によって、コンピューターの平均計数率に対する最大計数能力を超えない限り、FIFOメモリーによって計数損失を非常に小さくできることが確かめられた。又、バッファの深さについても、10段程度で十分な効果が得られることが明らかとなった。開発中の回路は1000段のバッファメモリーを持っており、不感時間の短縮効果が充分期待できる。

(3) ファインマン-アルファ法による未臨界度モニターの開発と性能の評価

1 系統の中性子検出器の信号を入力とする計算機直接入力システムを用いて、ファインマン- α 法による未臨界度モニターを開発した。本システムでは、時系列データの入力された計算機メモリー上に仮想的なマルチチャンネルスケラーを構成し、マルチチャンネルスケラーのデータをファインマン- α 法によって統計処理することによって体系の未臨界度（実効増倍率）を算定する。システムの概念を図-3に示す。本システムについて標準線源を用いた基本特性試験を行い、分解時間として約16マイクロ秒の値を得た。

開発した未臨界度モニターの性能を評価する為にATR規格のウラン燃料を装荷した重水減速体系について炉雑音測定を行った。まず、実効増倍率を0.90に設定し、所定の測定時間に対する精度を評価した。120秒の測定で $\pm 10\%$ 、90秒の測定で $\pm 20\%$ 、60秒の測定で $\pm 50\%$ の範囲で即発中性子減衰定数が得られることが分かった。次に、測定時間が90秒、120秒のそれぞれについて、実効増倍率を0.90、0.95、0.98の3通りに変化させ分離の精度を評価した。図-4に測定結果を示す。120秒の測定では十分に3種類の実効増倍率を分離できるが、90秒の測定では実効増倍率0.90と0.95で誤差棒が重なり、分離が不十分であることが分かった。モニターとしての応答時間（測定時間+解析時間）は、測定時間が120秒の場合で240秒であり、現時点でのモニターの性能としては、応答時間4分で実効増倍率0.90までを $\pm 20\%$ 以内の精度で検出可能という結果となる。

(4) 今後の計画

モニターの性能を上げるには、応答時間と測定精度を向上させる必要がある。応答時間については、測定と解析を並行して行えるようシステムをマルチタスク化することにより半減できると考えられる。測定精度については、検出器の検出効率を上げて統計精度を改善させることが有効であるが、検出効率を上げると実効増倍率が高い場合に不感時間の影響が問題になるため、前述のFIFOメモリーを利用した計測システムを実用化する必要がある。

計算機に転送されたデータの統計計算処理においても、現状のファインマン- α 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。時間データそのものを利用した新しい統計計算処理手法の開発が必要有効である。本システムでは、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。記憶容量の観点からも演算装置の作動の観点からも、将来性のある興味深い測定システムである。

【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ーの開発(1)、日本原子力学会「1996年秋の大会」A20

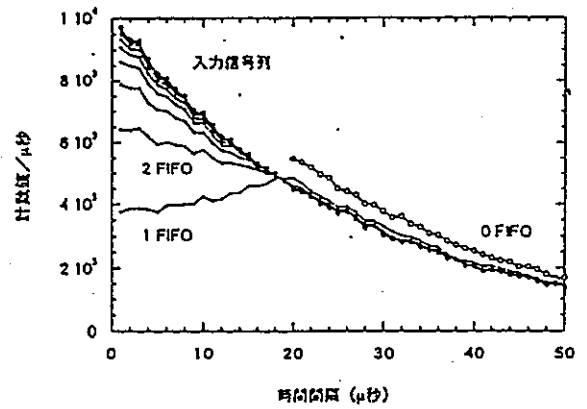
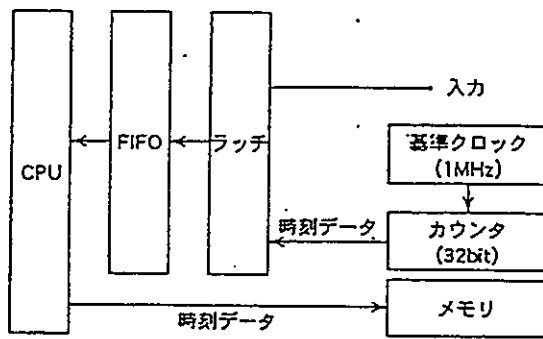


図-1 FIFOバッファを搭載したパルス時系列測定システム 図-2 FIFOバッファによる計数特性の変化

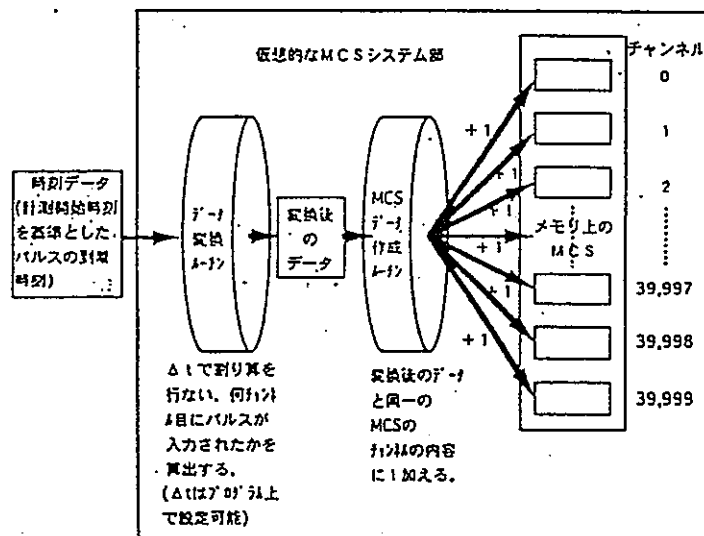


図-3 直接入力システムによる未臨界面度モニターの概念

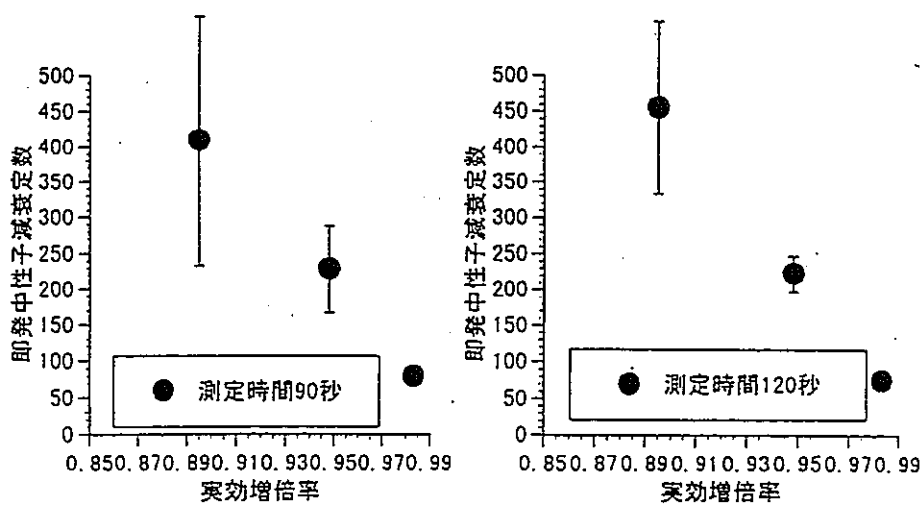


図-4 測定時間に対する即発中性子減衰定数 α

先行基礎工学分野に関する平成8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, 梶谷幹男		
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8年12月26日～ 平成9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		
[研究目的]	<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>		
[研究内容(概要)]	<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>		
[使用主要施設]	<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。

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に関する検討、Mo再分布挙動に関係していることが判明した白色金属相の燃料中の分布の調査、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腐食試験を実施した。また、平成9年度で実施する照射済燃料を用いた金相試験ならびに機器分析について、試験計画を策定した。

[今後の予定（翌年度以降の概要）]

9年度では、照射済燃料を用いた金相試験ならびに機器分析によるMoやCs、白色金属相及びBa化合物析出相等FP元素再分布のデータ取得、金相写真の画像解析、被覆管材の炉外腐食試験による酸素ポテンシャル評価のための基礎データ取得を継続実施し、平成10年度は、これらのデータと熱力学解析から、固体FPの再分布と酸素ポテンシャルの照射挙動について理論的なアプローチを試みる。

[研究成果]

[平成7年度における研究成果の概要]

固体FP元素の中でもMoは、燃料内では温度と酸素ポテンシャルに応じて金属状態(白色金属析出相)と酸化物状態の両方で存在することが知られている。また、Moの燃料中の拡散係数は小さいため、燃料中のMoはほとんど移動しないと考えられていた。そこで、白色金属と酸化物、両相に存在するMoの濃度分布を各々測定することにより、燃料内のO/M比分布を評価することができる。平成7年度の本研究において、この手法を「常陽」の高燃焼度照射済試験燃料に適用し、高燃焼度燃料の固体FP元素とO/M比のふるまいについて調べたところ、以下の結果を得た。

- ・酸化物として存在するMoの濃度分布は、従来からの熱拡散モデルとほぼ一致しており、明確な燃焼度依存性はない。
- ・一方、白色金属析出物中のMo濃度分布は、10～13at.%の燃料において顕著な低下が見られる。（図1参照）
- ・さらに、10～13at.%の燃料においては、燃料-被覆管ギャップに大量のMoとCsの析出物が存在することが、EPMA分析より明らかになった。

以上の結果から、高燃焼度燃料においては、従来からの熱拡散モデルでは説明できない機構によって、Moが燃料中を移動し、燃料ペレット外部に放出されることが示唆された。

[8年度の研究成果]

1. 照射済燃料中のFP再分布評価

高燃焼度燃料における、Moの移動機構を解明するために、Mo及びこれに係わっていると考えられるCs、白色金属析出相について、照射済燃料の析出挙動や再分布についてのデータを取得する必要がある。これまで取得しているEPMAの分析データを調査した。しかしながら、これまで取得している分析データが5at.%以下と10～13at.%の燃焼度範囲に偏在していたため、高燃焼度燃料で観察されるMoの移動の初期の挙動については不明であった。そのため、燃焼度が5at.%～10at.%の「常陽」で照射された照射済燃料について、平成9年度末までに実施する金相試験ならびに機器分析の試験計画を策定した。8年度の試験は、燃焼度が約9at.%の燃料についてEPMAの分析に着手したところである。

また、白色金属析出相がMo移動機構の中間段階の状態として考えられることから、その成分

分析及び体積・個数分布に着目し、その評価に着手している。成分分析については上述したEPMA分析により行い、分布に関しては、照射済燃料の金相写真を画像解析することにより評価している。白色金属析出相の分布については、燃料の温度に依存した形状を示すことが判明してきたが、現在データをさらに拡充し、確認しているところである。

2. 固体FPの化学形に関する熱力学的解析評価

高燃焼度燃料で観察されるMoの熱拡散モデルでは説明できない再分布について、その移動機構の解明において最も大きな課題は、Moの移動時の化学形である。燃料-被覆管ギャップにMoとともに析出しているCsは、気相もしくは液相の状態では燃料中を移動することが知られているため、Moの気相移動を予想し、熱力学的解析コードSOLGASMIXコードを用いて、燃料中におけるMoを含む気相化学種の存在について熱力学的解析を行った。その結果を図2に示す。Csは燃料内においてはMoとともに存在していないことをEPMA分析により確認しているため、燃料内ではMoO₃が気体の形で存在し得るということが示唆された。この結果から、高燃焼度燃料におけるMoの移動は、白色金属析出相に析出したMoの一部が、MoO₃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のものと考えている。これについては、さらに平成9年度に実施する照射済燃料のEPMA分析により確認してゆく計画である。

3. 炉外腐食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、平成7年度の本研究において燃料内の酸素ポテンシャル評価に使用した公開文献等で報告されているSUS316鋼の酸化特性データは適切ではなかった可能性がある。このことから、この被覆管の炉外腐食(酸化)試験を実施し、以下の結果を得た。

- ・本研究の被覆管の酸化はほぼ放物線則に従って進行した(図3)。また、酸化膜は二層を形成し、外層はFe系、内層は主にFeCr₂O₄スピネルであった。
- ・反応の活性化エネルギーは約140~168 kJ/molであり、従来のSUS316鋼と差は見られなかった。これは、平成8年度の腐食試験では明確な酸化を発生させるため、比較的高い酸素ポテンシャルで行っていることによるものと考えられる。

実際の燃料ピン内では、本腐食試験よりも酸素ポテンシャルが低く、長時間に及ぶ腐食条件であるため、平成9年度において腐食試験を改造し、酸素ポテンシャルの低い条件で酸化特性データを取得する計画である。

[レポート、学会誌・国際会議への発表論文等]

1. I. Sato, et al., "Distribution of Molybdenum in FBR Fuel Irradiated to High Burnup"
第14回化学熱力学国際会議—大阪 (1996)
2. I. Sato, et al., "Distribution of Molybdenum in FBR Fuel Irradiated to High Burnup"
J. Nucl. Mater. To be published.

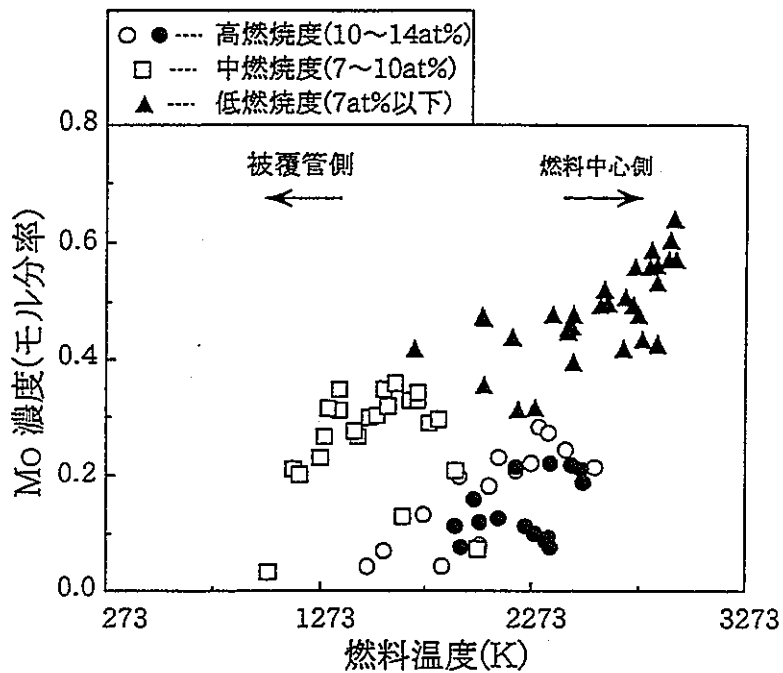


図1 白色金属析出相中のMo濃度分布
 (中空シンボルは本研究、中実シンボルはJohnsonらによるデータ)

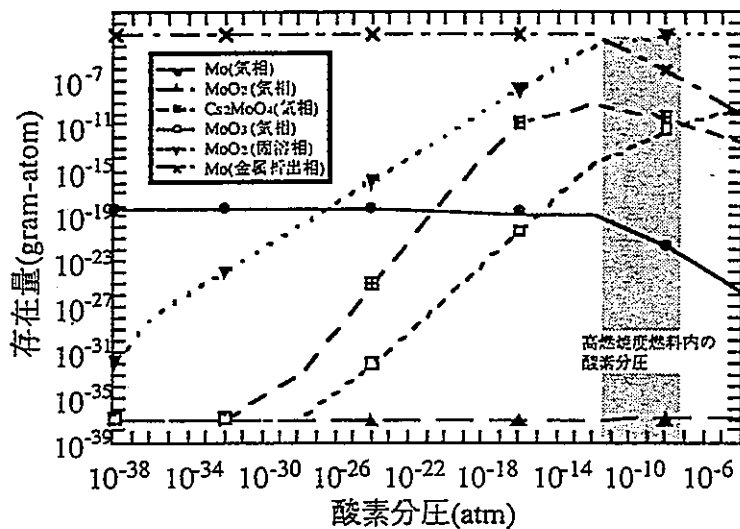


図2 Moを含む化学種の燃焼内部(13at%燃焼度)における存在量の酸素分圧依存性(1600K)

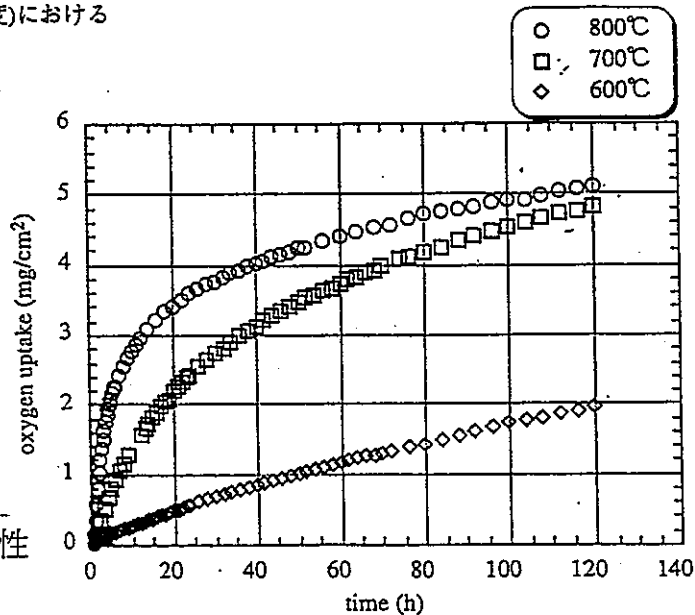


図3 被覆管反応酸化量の時間依存性 (CO/CO₂)

先行基礎工学分野に関する平成8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										
研究協力課題名	レーザー共鳴イオン化分光を用いたF Pガスモニタリングの基礎研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>名古屋大学工学部原子核工学科 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻</td> <td>教授 井口哲夫* 教授 中沢正治*</td> <td>〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="3">大洗工学センター実験炉部技術課 青山卓史、伊藤主税</td> </tr> </table>			大 学 側	名古屋大学工学部原子核工学科 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 井口哲夫* 教授 中沢正治*	〔*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		
大 学 側	名古屋大学工学部原子核工学科 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 井口哲夫* 教授 中沢正治*	〔*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	名古屋大学工学部原子核工学科 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 中沢研究室 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11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成8年4月1日～ 平成9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>燃料破損時や照射試験において、燃料ピン等の破損検知および同定の高精度化を図るため、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、燃料破損検出および位置決めのためのF P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などの先端技術として脚光を浴びており、レーザー性能の向上と相まって、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) を使い、従来のXe、Kr等のF Pガスモニタリングによる破損燃料検出法 (Failed Fuel Detection and Location; FFDL) の高精度化と感度向上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ー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されていない。</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。このシステムにより、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る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）】

東京大学工学部附属原子力工学研究施設に設置された高速中性子科学研究設備（共同利用設備）のレーザー共鳴イオン化質量分析システムをXeガス検出用に整備・調整し、本手法の原理確認と検出感度、S/N比等の基本性能を評価した。また、東大「弥生」炉で照射した天然組成Xeガスの同位体組成比変化測定の前準備実験を試みた。さらに、検出感度向上のためのシステム改良として、液体窒素を用いた希ガスコールドトラップ系の導入と共鳴レーザーアブレーションの前準備実験を行った。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度は、平成8年度の実験結果を踏まえて、Xeガス検出に対し、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。また、天然同位体組成比と異なる標準的なXeガス試料を分析し、これらの同位体の検出性能を評価する予定である。

平成10年度は、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る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予定である。

【研究成果】

1. 実験

本研究では、東京大学工学部附属原子力工学研究施設に併設された高速中性子科学研究設備のRIMSシステムを用いている。図1に実験装置を示す。本装置は、共鳴イオン化用レーザーとして、パルスNd:YAGレーザー励起色素レーザーを用いており、飛行時間型質量分析器により特定イオンが検出される。分析試料をXeガスとすると、このように色素レーザー1本（256nmの2光子吸収）のみで共鳴励起とイオン化が行えるため、比較的簡単な装置構成となって、工学的に有利である。また、同位体シフトが僅少のため、核変換後の同位体組成比変化の測定にも適している。

予備的な照射実験では、とりあえず、天然組成のXeガスを高速中性子源炉「弥生」のファーストコラムで校正照射し、未照射および照射後のXe同位体組成比の変化を測定し、ORIGEN2コードによる燃焼計算との比較を試みた。また、感度向上の1つの方策として、固体表面上にコールドトラップされたXe原子を共鳴レーザーアブレーションにより検出するための前準備実験を行った。

2. 実験結果と考察

まず、FFDL適用に必要なRIMSの基本特性を定量的に評価するため、未照射の天然組成Xeガスの質量スペクトル分析を行った。分析例を図2に示す。同位体組成比は、 10^{16} atom/m³以下の濃度において文献値と良い一致を示し、再現性も確認された。また、検出限界（感度）を¹²⁴Xe（天然存在比0.096%）ピーク検出とノイズレベルから評価すると、56 [atoms/有感体積] と見積もられた。一方、¹²⁹Xeのピーク面積から本システムの検出効率を推定すると～0.12となり、共鳴イオン化率がまだ飽

和していないことから、レーザー出力（現在、最大0.7mJ/pulse, $\sim 8 \times 10^8 \text{W/cm}^2$ 相当）を上げたり、集光条件の最適調整等によって、さらに感度が改善されると考えられる。

「弥生」炉ファーストコラムで約6カ月照射したXeガス（5気圧 $\times 10 \text{l}$ ）の分析結果については、115kWh（ $\sim 1.1 \times 10^{15} \text{n/cm}^2$ の中性子フルエンス相当）積算照射時点では検出可能な同位体組成比変化をもたらす中性子フルエンスに至っていないため、ORIGEN 2の燃焼計算で予測されたとおり未照射のXe同位体組成比と有意な差はみられなかった。ただし、照射直後に生成される短半減期核種の ^{127}Xe (36.4d)、 ^{133}Xe (5.24d)、 ^{135}Xe (9.14h)を検出できる可能性が示された。

また、共鳴レーザーアブレーションの予備実験では、Xe原子吸着用のターゲット金属であるCuに関して、レーザーアブレーションと共鳴イオン化が同時に起こるという現象を確認し、定量的評価モデルの検討を進めている。

3. まとめ

以上の実験結果をもとに、RIMSのFFDLへの適用性を従来と比較して表1にまとめる。これから明らかのように、RIMSを用いたFFDLは、感度、S/N比、迅速検出の基本的な要求性能を同時に満たしており、さらにタギング法や放射化タグガスによるFFDLならびに安定Xe、Krの同位体分析による燃焼度測定等と組み合わせることにより、優れた破損燃料位置決めシステムの構築が期待される。

ただし、今後、従来法との併用および実機への適用性を念頭に、計測システムの最適化や信頼性向上のための技術開発を進める必要がある。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 井口哲夫、「放射線センシングの発展と将来展望」V.放射線センシングと先端技術の融合、3.レーザーによる放射能検出、日本原子力学会誌、Vol. 38, No. 9 (1996) 727-729
- 2) 佐藤 泰、井口哲夫、中沢正治他、「共鳴イオン化質量分析法を用いた破損燃料検出システムの開発」、日本原子力学会1996年秋の大会、東北大、B60 (1996)
- 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(1)」、日本原子力学会1997年春の年会、東大、B22 (1997)

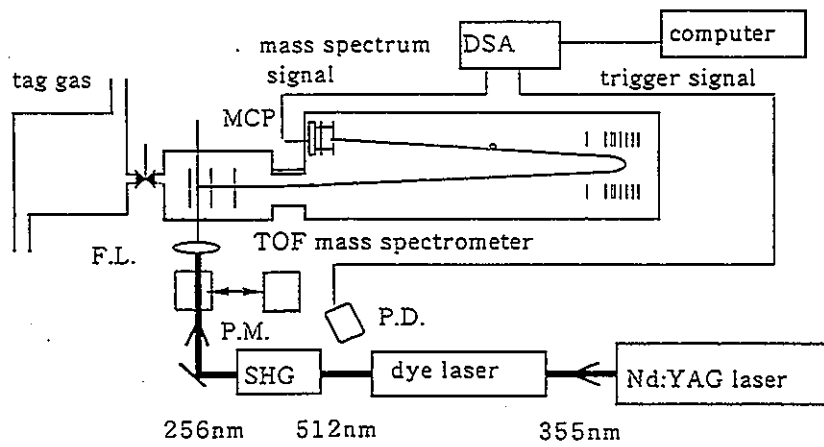
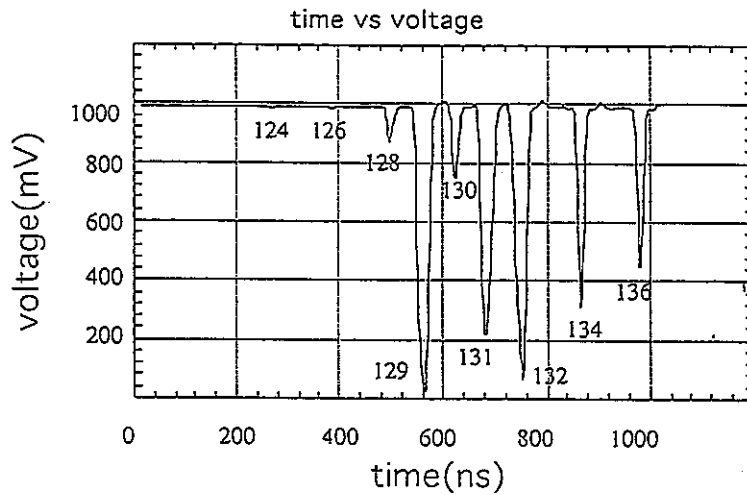


図1 実験装置



- ・質量分解能は331 (Xe^{129}) ~ 800 (Xe^{136})
- ・検出感度は56.3[個/有感体積]

図2 天然組成Xeガスの質量スペクトル

表1 各FFDL法の性能比較

検出法	検出感度 [個/有感体積]	S/N比	時間遅れ
RIMS	56.3	270~	0.1~10sec
プレビシテ ータ法	$\sim 10^8$	5~10	数~数10min
遅発 中性子法	$\sim 10^{12}$	5	~30sec
β 、 γ 線 測定	$\sim 10^{13}$	2	~0

他のFFDL法との性能比較

- ・イオン化室を100cm³と設計するとRIMSの検出感度は 5.3×10^8 [個/有感体積]となる
- ・RIMSの利点としてFFDとFFLが同時にできる

先行基礎工学分野に関する平成8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	液面の非線型不安定現象に関する基礎研究		
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 工学部附属原子力工学研究施設 原子炉設計工学部門 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11月 ~ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成8年11月18日 ~ 平成9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>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】

平成8年度は、以下の項目を実施した。

- ・自由液面における乱流抑制効果の検討
- ・液面に衝突する噴流の自励振動の発生機構の検討

【今後の予定】

平成9年度以降は、以下の項目を実施する。

- ・新規の流動実験装置を用いた、液面と流れの相互作用に関する基礎実験
- ・自由液面を扱う流動解析コードの改良と、実験データを用いたコード検証解析

【研究成果】

1. 自由液面における乱流抑制効果の検討

本研究では、鎖状高分子希釈溶液による乱流抑制効果（Toms 効果）が、自由液面下の流れによって誘起される界面乱流に対して与える影響を調査した。

これまでの実験的研究から、Toms 効果が発生するための条件として強い剪断力が流れのなかに存在することが挙げられる。そこで界面乱流を誘起するために、容器内流体の自由液面下で液面と平行に噴流を噴出させ、液面の応答と自由液面近傍の乱れ強度分布を求めた。流体には水道水と鎖状高分子の希釈溶液（ポリアクリルアミド：平均分子量 1000 万、濃度 100wppm）を用い、噴流流入流速 $1.8\sim 2.1$ [m/s] ($Re=6000\sim 7000$) という条件で実験を行なった。計測した項目は、拡散光による液面形状の可視化、液位計を用いた液面形状の測定、レーザーシートを用いた流れ場の可視化、LDV を用いた溶液噴流周辺の世界場の測定である。

図1に、拡散光による自由液面の波立ちの可視化画像を示す。水道水の方が高分子に比べて波立ちが大きく、波長も短い事が判る。液位変動の測定結果にも同じ傾向が見られた。

図2は、噴流の可視化画像である。水噴流の場合は乱流拡散が大きく、自由液面近傍にも大きな影響を与えている事がわかる。これに対し、高分子噴流の場合は、噴流があまり拡散せずかたまりとなって流れている。すなわち、乱流拡散が抑制されている。このため、自由液面近傍に与える影響も比較的少なく、波立ちも抑えられているものと考えられる。また、噴流の乱流拡散が抑制されている事から、減衰の遅い、かつ、液面に寄った流れとなっている事が推測できるが、噴流周辺の速度場も、これを裏付ける測定結果となっている。

水道水と鎖状高分子希釈溶液を用いて、噴流を液面下に噴出する実験を行ない、高分子溶液の場合、液面近傍の乱れが抑えられることを確認した。高分子による乱れの緩和効果が噴流に働くとともに、自由液面に対しても同様に作用していることが、可視化および流速計測から明らかとなった。

2. 噴流自励振動の振動機構の検討

本研究では、液面に衝突する上向き噴流の自励振動現象について、噴流の可視化画像に基づく振動機構の検討を行った。

矩形容器内において、容器底面から上向きに平面噴流が流入して液面に衝突している体系（図3）においては、容器内水深と噴流流入速度を条件として、平面噴流がその厚さ方向に自励振動することがこれまでの実験的研究でわかっている。噴流の振動現象に関しては、噴流を弾性壁のように振舞うものと見做して周囲の圧力差によって噴流の蛇行が起きるとする Nyborg によるモデルが

ある。これは、噴流の変位 ρ は、位置と時刻に関して、

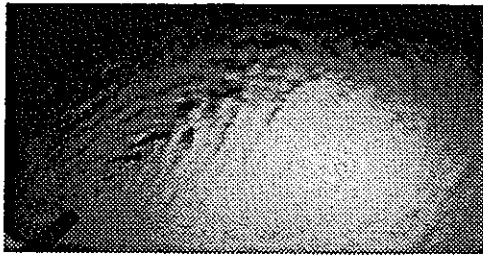
$$\eta(x,t) = -\int_{t-\tau}^t (t-t') \frac{\Delta p(t')}{\rho B(x)} dt' \quad \text{ただし } \tau(x) = \int_0^x \frac{dx'}{U(x')} \text{ は噴流の流入口から位置 } x \text{ までの所要時間}$$

Δp : 噴流厚さ方向の圧力差 ρ : 流体の密度 B : 噴流の厚さ U : 噴流の軸方向速度
のように与えられるとするものである。

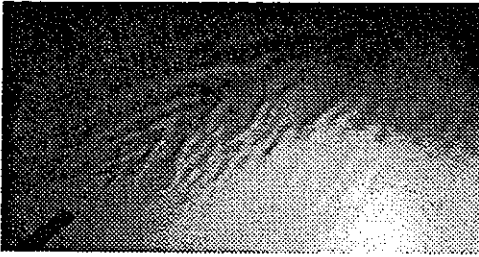
ここで、噴流両側の圧力差が、噴流両側の微小液位差振動によって生じると考え(図4)、実験で得られた振動数を用いて容器底面からの高さに対する噴流振動の振幅と位相を計算した。また、容器内にインクを投入して噴流を可視化した画像(図5)を時系列的に画像処理し、容器底面からの高さに対する噴流の振幅と位相を得た。計算結果を実験結果とともに図6に示す。ここで、振幅は1/2水深での振幅に対する相対振幅、位相は微小液位差振幅に対する位相差として示してある。実験と計算は良く一致しており、この自励振動の発生機構を検討する際に Nyborg による噴流モデルが有効である事が確認できた。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・ 石崎, 岡本, 班目. 「鎖状高分子希釈溶液による気液界面乱流の抑制」
日本原子力学会春の大会予稿集, (1996), C54.
- ・ Ishizaki, Y., Okamoto, K., Madarame, H., "Turbulence Reduction at Free Surface with Polymer-Solution,"
FED-Vol. 237, 1996 Fluids Engineering Division Conference, Volume 2, ASME 1996, pp.137-142.
- ・ 石崎, 岡本, 班目. 「鎖状高分子による自由液面乱流の抑制」
日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 1996-7.23~26 沖縄 [No.96-9], pp.363-364.
- ・ 班目, 飯田. 「液面衝突上向き平面噴流自励振動—ジェットフラッタの振動機構(第1報, 噴流蛇行の測定)」, 日本機械学会論文集, 63-612, B(1997)(掲載予定)
- ・ 班目, 飯田. 「液面衝突上向き平面噴流自励振動—ジェットフラッタの振動機構(第2報, 振動系の構成とエネルギー供給機構)」, 日本機械学会論文集, 63-612, B(1997)(掲載予定)

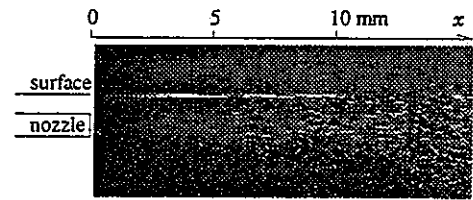


(a) 水道水

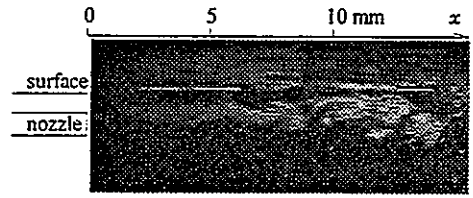


(b) 鎖状高分子希釈溶液

図 1 : 液面形状の可視化画像



(a) 水道水



(b) 鎖状高分子希釈溶液

図 2 : 噴流の可視化画像

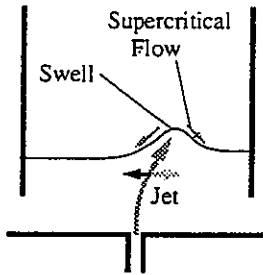


図 3 : 平面噴流の自励振動

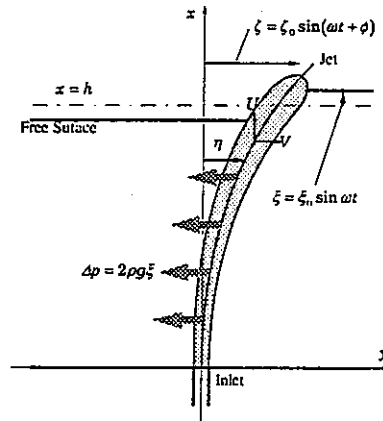


図 4 : Nyborg のモデル

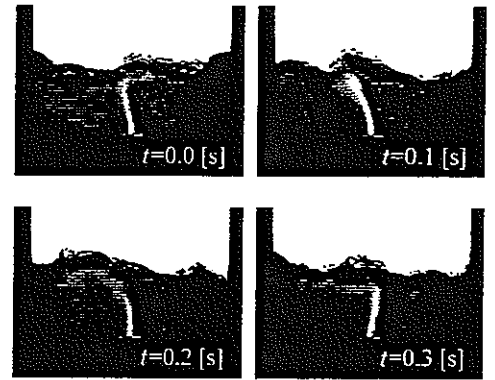


図 5 : 振動する噴流の可視化画像

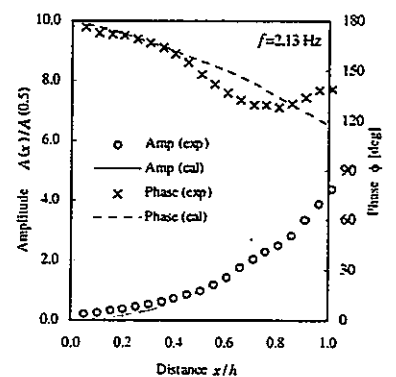
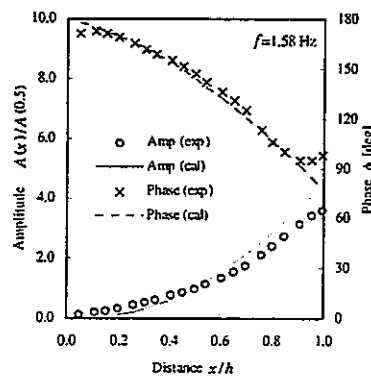
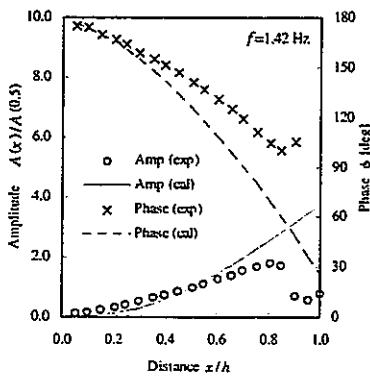


図 6 : 噴流の相対振幅と位相差

先行基礎工学分野に関する平成8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	液面の非線型不安定現象に関する基礎研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	茨城大学工学部機械工学科 教授 神永 文人*		[* 客員研究員]
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	茨城大学工学部機械工学科 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8年4月1日~ 平成9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>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>【研究内容（概要）】</p> <p>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>【使用主要施設】</p> <p>なし</p>			

【進捗状況】

本年度は、次年度の実験のための大まかな実験計画の作成と、揺動実験で得られた自由液面高さの測定データの統計的性質を調べた。実験装置については寸法や細部の検討事項が残っている。特に、境界条件は今回対象とした現象を決定してしまう可能性があるため、十分検討する必要がある。データの統計的解析については、流れと液面の相互作用による自励振動現象について測定時系列データの解析を行い、データの統計的性質に関する定性的知見を得た。

【今後の予定】

平成9年度以降は、バックステップを持つ流路での液面への流れ込みに際して、自由液面に発生する跳水あるいは表面波と内部流れの相関を調べる。新規に作成する実験装置のサイズと境界条件、および自由液面高さを計測する手法を検討する。液面高さ計測にはレーザ計測が最良と考えているが、透明な自由界面で測定できるか否かを調べる必要がある。

データの統計解析については、出来れば流量条件が異なるデータについても解析し、揺動特性変化と統計的性質の変化の相関を調べる。

【研究成果】

1. 次年度に実施する実験の研究計画を検討し、以下の計画案をまとめた。

流れが射流から常流に移るときには、射流側の水面形は上流端の条件から決まり、常流側の水面形は反対に下流端の条件から決まるために、2つの水面曲線は連続的に繋がらず、跳水現象を起こす。この時表面渦を伴って大きなエネルギー損失を起こし、この渦のため空気の巻き込みが起こることもあり、また表面渦を伴わない場合でも水面に一定した波長の波形を形成する。この跳水現象に関しては、主に土木関連の研究として、開水路跳水についてはダムやせきの下流での減勢工、管路内跳水については放流管内のゲートによる流量調整などの実際上の問題に関連して数多くの理論的並びに実験的研究が行われており、その平均流としての挙動については現在までに解明がなされている。また、内部流れに関してもダムの下流放流口からの放水によって生じる跳水に関しては、乱流モデルを用いて、速度や乱れ分布や表面形状の解析が行われ、自由ジェットにおける速度と乱れ分布との比較もなされている。

次年度の研究では比較的研究例が少ない、図1のように流路断面積が変化することによる跳水および表面波現象を調べることを目的としている。特に流路が垂直方向にステップ状に大きくなる場合（単相流ではバックステップ問題と呼ばれている場合）で、ステップ幅が比較的大きい場合について、内部の速度分布と表面形状の計測を行い、跳水および表面波と内部流れの関係を調べることを共同研究の主な内容とすることを計画した。測定項目としては、流量、プール内での2次元速度分布、表面形状を予定している。研究で得られる知見としては跳水と内部流れの関係、自由表面形状と内部流れの関係、水位変化、流入流量と跳水発生位置の関係が上げられる。また、ステップ幅をいくらにすべきか、下流端の条件をどのようにセットするかなどの流路の具体的形状や境界条件については予備実験も含めて、今後さらに検討が必要である。

2. 揺動実験データの統計的解析

本年度動燃と東大の共同研究で得られた揺動実験において測定された液面の高さの時系列データに関して、以下のような統計的解析を行った。(1)パワースペクトル分布。(2)自己相関係数。(3)確率密度分布。(4)相互情報量。(5)相関次元。(6)ウェーブレット変換。図2はパワースペクトル分布を示

す。界面の固有振動数である 1.44Hz に卓越した成分があり、同時にその 2 倍と 3 倍のモードの存在が計算されている。また低周波（周期 90 秒程度）に大きなパワーの存在が示されており、時系列データとの比較から、卓越周波数成分の振動がこの長い周期の振動に付加されているモードとなっていることが分かった。さらに、その低周波領域を除くと卓越周波数成分以外の成分が無いことが特徴として上げられる。図 3 は確率密度分布を示す。平均値を 0 に分散を 1 に正規化してプロットしてある。また図中には比較のためガウス分布を示した。一般に波面の確率密度分布はガウス分布に近い分布となることが知られているが、今回の実験では χ^2 分布に近い形となり、限られた容器内の液面の揺動は表面波と異なる性質を持ち、比較的規則正しい振動現象であることが分かった。図 4 は相関次元を求めるために作成した相関積分と距離との関係である。ここで測定値である時系列データより埋め込み次元 m を用いてデータの再構築を行った。再構築を行うときに必要なずらし時間は、相互情報量の計算結果から 15 秒とした。埋め込み次元は 2~10 まで変化させており、図には合計 9 本の関係曲線をプロットした。相関次元はこれらの曲線の傾きで定義され、今回の計算では約 5 程度となったが、今回のデータではこの値は十分には収束しておらず、今後他のデータによる結果とも比較する必要がある。図 5 はウェーブレット変換結果を示している。今回の計算ではアナライジングウェーブレットとしてガボール関数を用いた。z 軸はウェーブレット変換係数の絶対値を示している。1.44Hz の卓越周波数は時刻によらずほぼ同じ値を示すが、低周波はある時刻のみに集中した分布となり、時系列データとの類似性が示されている。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

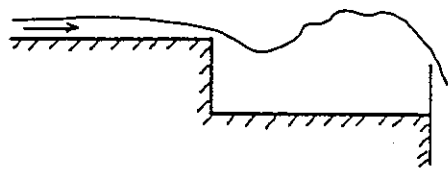


図 1 : 次年度の実験体系の概要

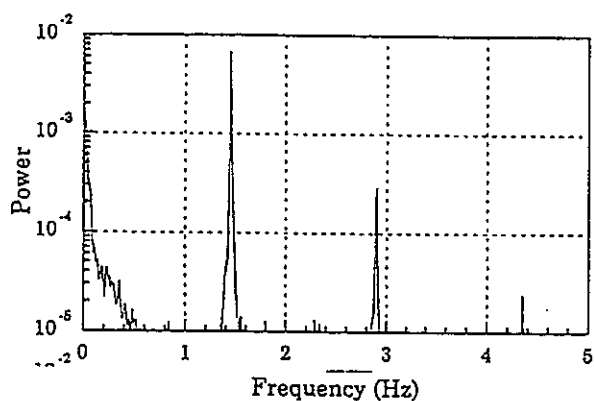


図 2 : パワースペクトル分布

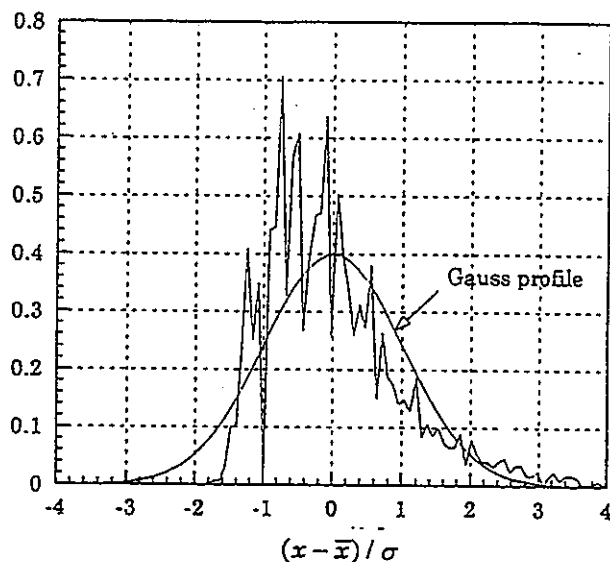


図 3 : 確立密度分布

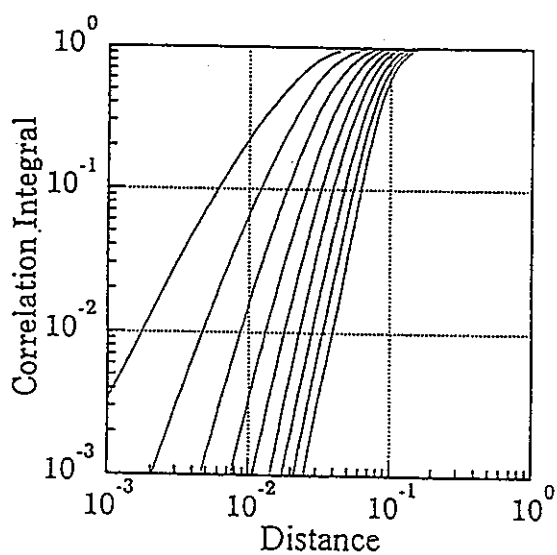


図 4 : 相関積分と距離の関係

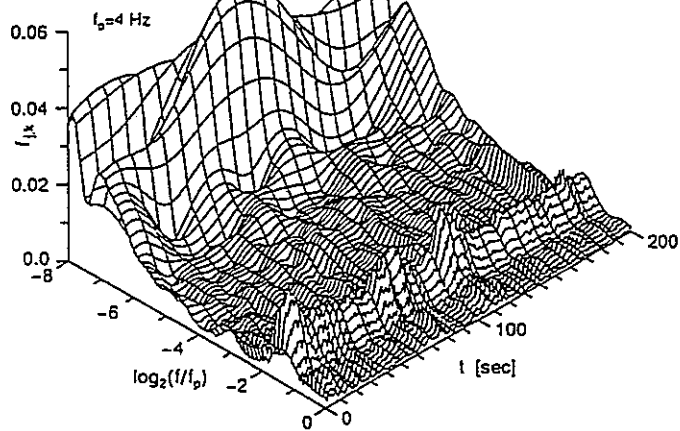


図 5 : ウェーブレット変換

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														
研究協力課題名	炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価														
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td> <td colspan="2">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="2">大学院修士課程 前川 宗則、藤原 暁子</td> </tr> <tr> <td></td> <td>教授 前田 昌信</td> <td>(*客員研究員)</td> </tr> <tr> <td>動燃側</td> <td colspan="2">大洗 原子炉工学室 上出 英樹、A.Tokuhiro</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*			大学院修士課程 前川 宗則、藤原 暁子			教授 前田 昌信	(*客員研究員)	動燃側	大洗 原子炉工学室 上出 英樹、A.Tokuhiro	
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*														
	大学院修士課程 前川 宗則、藤原 暁子														
	教授 前田 昌信	(*客員研究員)													
動燃側	大洗 原子炉工学室 上出 英樹、A.Tokuhiro														
研究協力実施場所	慶應大学 前田・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1日～ 平成11年3月31日	当該年度 研究期間	平成8年4月1日～ 平成9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】 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研究開発における必達テーマである。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>【研究内容（概要）】 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。 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>【使用主要施設】 サーマルストライピング試験装置（水流動） 気泡計測装置（慶應大学）</p>															

【進捗状況（当該年度までの概要）】

本研究を通して得られた知見は、炉心槽内の流速分布測定試験装置の設計検討および試験装置製作後の検査に反映させた。また試験に関してはUVP計測における気泡含有流れ場計測での留意点などが明確になった。本研究はほぼ当初の計画通り進捗している。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

今後は、実際の炉心を模擬した試験装置を用いた試験で、炉心槽内での流速分布計測の適用性を評価する。

【研究成果】

1. 実験装置

図1に実験装置概略図及び計測装置構成図を示す。実験流路は一辺100mmの正方形チャンネルで、流路入り口より280mm下方にテストセクションを設ける。作動流体として水道水を用い、一様流速0.245m/sでテストセクション部を流下させる。テストセクションにはピアノ線で固定された直径2mmのディスクが2mm間隔で設けられ、気泡発生装置から生成された体積等価直径9.1mmの気泡が支持される。図1に示すように、速度測定用のCCDカメラの直前に配置した赤外線LED群からテストセクションへ照射した透過光を、対面に置かれた気泡形状測定用のCCDカメラで撮影し、形状を記録した。

2. 気泡の平均形状及び平均速度ベクトル図、渦度分布、乱流エネルギー分布

図2に気泡周りの平均ベクトル図、渦度分布、乱流エネルギー分布をしめす。気泡の平均形状はお互いが外側を向き合うような形で、それぞれの気泡の後流には一対の渦が確認できるがその大きさは非対称である。これは、平均渦度分布が気泡間で狭く、それに対してそれぞれの気泡の外側に向かって大きく張り出しているように分布していることから確認できる。また、平均乱流エネルギー分布は下流に進むにつれ一様な分布を示していることがわかる。

3. 主流及び垂直流の平均速度分布

DPIVを用いて計測した、主流方向と流路に垂直な方向の流速分布を図3、4に示す。主流の速度分布図に現れているように、主流の流速分布見るとき2個の気泡間の流速は気泡の近傍より下流側に僅かに離れた領域では加速し、その後気泡からの距離が離れるほど流路内での流速は平均化する傾向を示している。流路に垂直な方向の流れでは、気泡間より気泡の外側の方が流速の絶対値が大きく、又左右の流速値は主流流れのように左右対称ではないことがわかった。

4. 瞬間の速度ベクトル、渦度分布及び乱流エネルギー分布

図2のベースとなる瞬間の速度ベクトル、渦度分布及び乱流エネルギー分布を図5に示す。瞬間の速度ベクトル分布及び渦度分布に現れているように、気泡の後流側で合流が生じることにより気泡の間に発生する渦は、気泡の外側に発生する渦に比べ高乱流エネルギー領域が狭い隙間に集中する傾向が見られた。Cantwell and Colesによれば乱流エネルギーは同じ成分の渦度を持つ境界付近で生成されると言っている。この説から、今回の試験結果で現れた気泡間渦による高乱流エネルギー傾向が説明できる。

5. UVP(Ultrasonic Velocity Profile monitor)による計測

UVPを用いて流路に垂直な流れの速度分布計測結果を図6に示す。図4に示すDP IVの測定結果と比較すると、気泡から比較的離れた領域ではUVPとDP IVの計測結果はほぼ一致していることが認められUVPによる計測の妥当性が示されたが、気泡近傍域ではDP IVの計測結果と差異が見られた。これは使用した超音波プローブのビームの広がりによるものと推測される。使用した超音波プローブの指向角から、気泡位置でのビームが気泡と干渉する限界位置を計算すると、計測位置換算で $x/D=1.1$ である。従って x/D が1.1以下の領域ではUVPの結果とDP IVの結果に差異があることと一致する。一方、 x/D が1.1より大きい領域ではUVPの結果とDP IVの結果が一致している。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

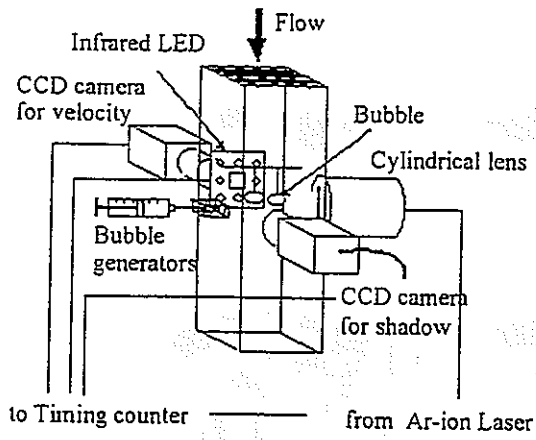


図1 計測システム概略図

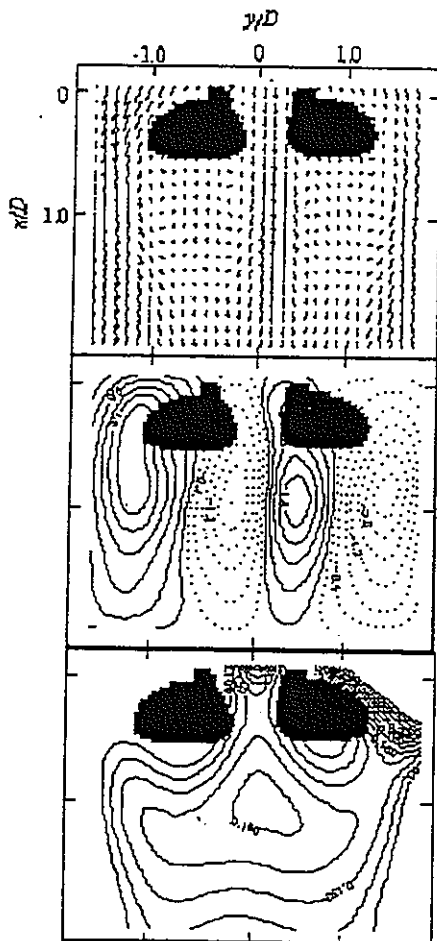


図2 平均ベクトル図(上)、
渦度分布(中)、
乱流エネルギー分布(下)

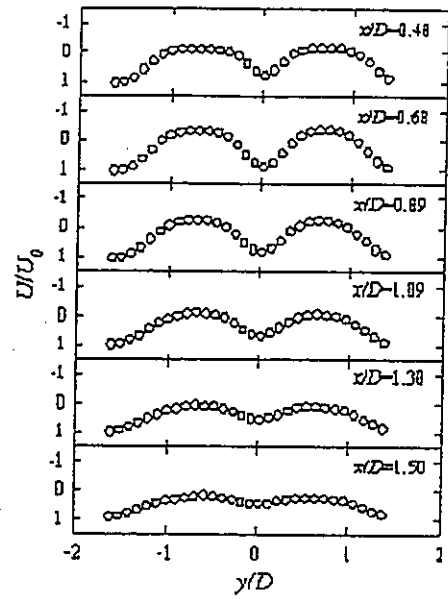


図3 平均速度分布(主流方向)

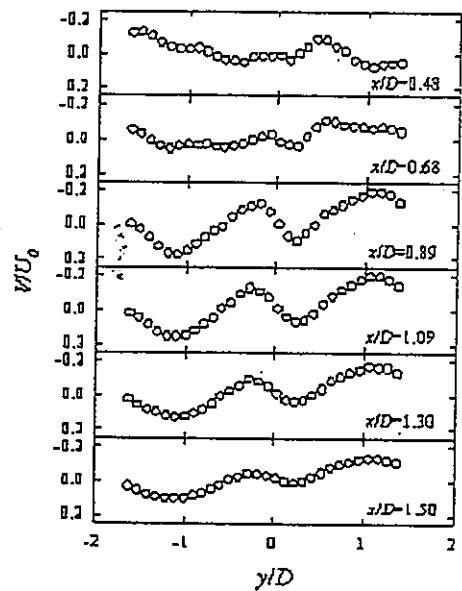


図4 平均速度分布(垂直方向)

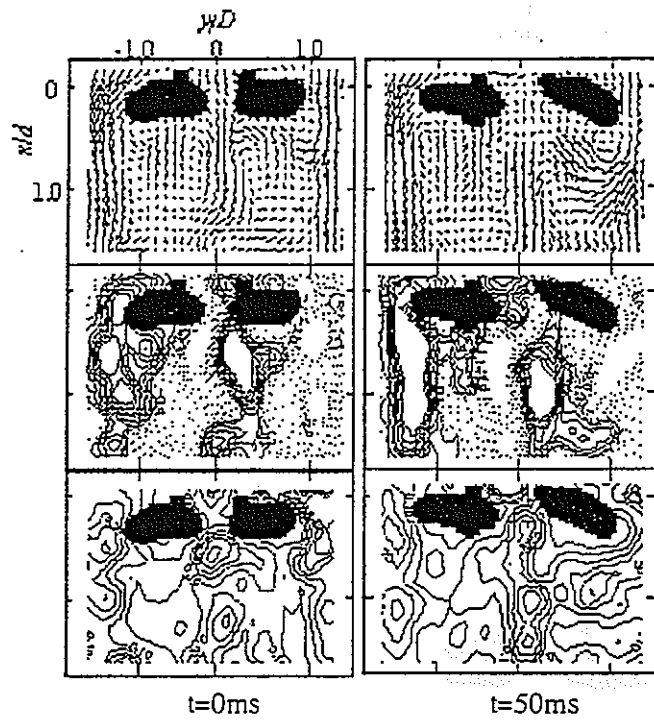


図5 瞬時のベクトル図(上)、渦度分布(中)、乱流エネルギー分布(下)

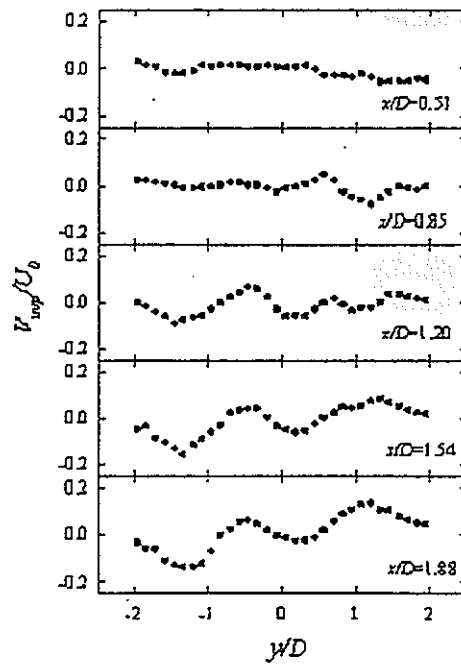


図6 UVPで得られた垂直方向平均速度分布

先行基礎工学分野に関する平成8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						
研究協力課題名	相変化を伴う融体移行挙動に関する基礎研究						
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td> <td>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 大学院修士課程 福重貴浩** [*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>動燃側</td> <td>大洗 高速炉安全工学室 池野勉、神山健司、小西賢介</td> </tr> </table>			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 大学院修士課程 福重貴浩** [*客員研究員 **研究生]	動燃側	大洗 高速炉安全工学室 池野勉、神山健司、小西賢介
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 大学院修士課程 福重貴浩** [*客員研究員 **研究生]						
動燃側	大洗 高速炉安全工学室 池野勉、神山健司、小西賢介						
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8年4月1日～ 平成9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>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、溶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、溶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、安全解析コードSIMMER-Ⅲのモデル改良および検証に反映する。</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> <p>(1)固化熱伝達時のクラスト形成条件 (2)固体粒子混入時の溶融燃料の固化挙動 (3)構造材の溶融を伴う溶融燃料の固化挙動</p> <p>である。</p> <p>本研究では、固体粒子、構造材、溶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おき、そのために必要な計測技術の高度化も目指す。</p>							
<p>【使用主要施設】</p> <p>大洗工学センター高速炉安全工学室F安第2試験室（融体侵入固化試験装置）</p>							

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度は、従来研究の調査、試験装置の設計・製作、および予備試験を行った。予備試験では、溶融すずを模擬溶融炉心物質とした固化試験を実施し、従来手法である熱電対応答による流速測定、固化体の縦横断面の観察を行い、データの整理、評価を実施した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度には、予備試験結果の詳細な分析・評価をするとともに、計測精度の向上を目指した検討を実施する。平成10年度には、構造材の溶融を伴う溶融燃料の固化を模擬した試験を実施する予定である。

【研究成果】

(1)従来研究の調査（固化形態のモデル）

融体の固化形態は、試験条件に応じて様々であるが、Bulk FreezingモデルとConduction Freezingモデルとに大別されている。しかし、これらの固化形態が現れるか否かは、Re数の大小でおおまかに判断できることがわかっているのみで、両者を十分にカテゴライズしているとはいえない。また特に、Bulk Freezingモデルは、融体が伝熱面との乱流対流熱伝達によりバルク状に固化して流路閉塞が起こるとされるものであり、伝熱面からの固化クラストの成長により流路閉塞が起こるとされるConduction Freezingモデルに比べて、融体と伝熱面との間の熱伝達係数の感度が高い。

(2)試験装置の設計・製作（装置概要）

今年度製作した試験装置の概略図を図-1に示す。本装置は、溶融炉心物質を模擬した試料をヒーター容器内で溶融した後、加圧容器内に充填した不活性ガス圧を駆動圧として、計測チャンネルおよび非計測チャンネル内へ融体を侵入させるものである。各チャンネルは、分散経路を模擬したものであり、この中へ侵入した融体は、乱流熱伝達により冷却されて固化閉塞する。

(3)侵入速度および侵入距離の測定

溶融すずを模擬溶融炉心物質とした固化試験を実施し、従来手法である熱電対応答による流速測定、固化体の縦横断面の観察を行った。この結果、侵入速度は、駆動圧が高くなるほど大きくなること、また、侵入距離は、管径の増加、また侵入速度の増加に伴い増加することが確認できた。

(4)試験結果と熱伝達相関式

図-2に今回のすずの固化実験で得られたNu数を、液体金属管内強制対流の代表的な熱伝達相関式である、SubbotinのおよびLubarskyの式から得られるNu数と比較して示す。またこの図に、UO₂を用いた固化実験で得られたNu数を、代表的な管内強制対流熱伝達相関式であるDittus-Boelterの式から得られるNu数と比較して示す。いずれの場合も、これらの熱伝達相関式が、実験で得られたNu数（熱伝達率）を過大に評価することが確認できた。さらに、この図より、実験で得られたNu数のRe数依存性は、今回のすずの固化実験の場合も、UO₂の固化実験の場合も類似しており、共にReにほぼ比例することがわかった。

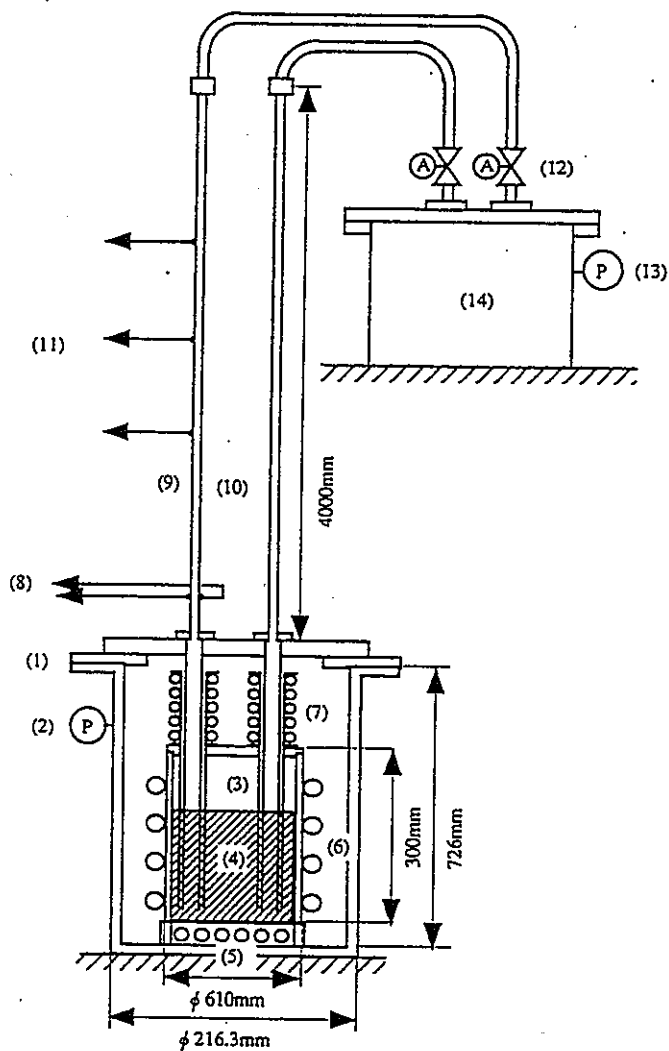
(5) 固化熱伝達相関式の導出

上記(4)の知見により、固化熱伝達におけるNu数のPr数に対する依存性を図-3のように求め、以下の固化熱伝達相関式を導いた。

$$Nu = 3.5 \times 10^{-4} \cdot Re Pr^{0.56} \quad (0.01 < Pr < 0.8)$$

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし。



(1)加圧容器 (2)圧力計 (3)ヒーター容器 (4)溶融試料 (5)底面ヒータ (6)側面ヒータ (7)ライザ部ヒータ (8)電磁流量計 (9)計測チャンネル (10)非計測チャンネル (11)熱電対 (12)ボール弁 (13)圧力計 (14)ドレン容器

図1. 試験装置概略図

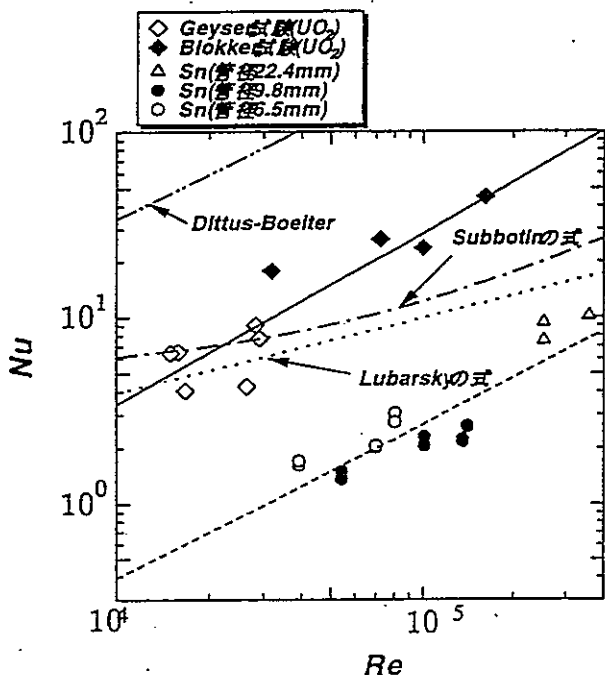


図2 Nu数とRe数の関係

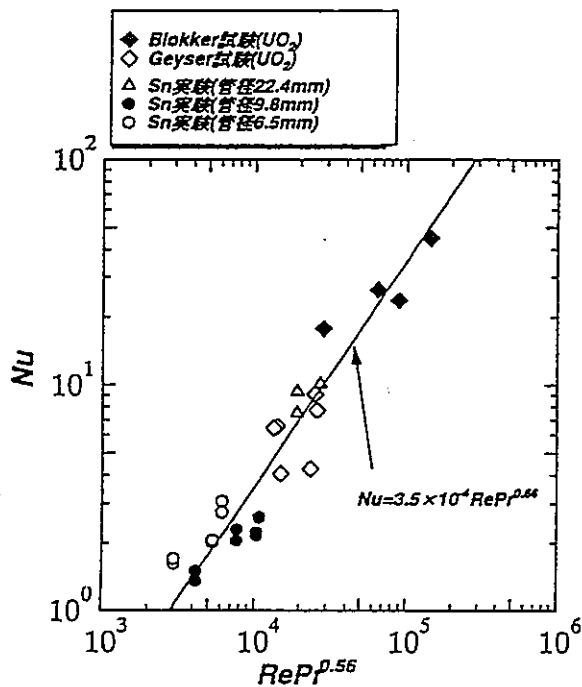


図3 Nuと $RePr^{0.56}$ の関係

先行基礎工学分野に関する平成 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														
研究協力課題名	高純度鉄基合金開発に関する研究														
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>東北大学 金属材料研究所 助教授 安彦 兼次*</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td></td> <td>東北大学 金属材料研究所 助手 高木 清一*</td> <td colspan="2">[*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 榊原 安英</td> </tr> </table>			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		
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 9年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 8年 4月 1日~ 平成 9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す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IPPING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8年度は、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の計画を作成した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度は、選択された材料の浸漬試験とその後に行う引張試験、クリープ試験を行い、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。

【研究成果】

高純度鉄の製造を行うとともに、製造装置の製作により新たに10キロ単位の高純度鉄の製造が出来るようになった。これを用いてナトリウム浸漬試験及び機械試験の計画を以下のように立てた。

(1) 材料

- ①純鉄（工業用純鉄、高純度鉄、超高純度鉄）
- ②9Cr 合金
- ③25Cr合金
- ④50Cr合金
- ⑤Mod9Cr鋼

(2) 試験の種類

- ①引張試験
- ②クリープ試験
- ③ナトリウム浸漬試験

材 料	分 析	引張試験	クリープ試験	ナトリウム浸漬試験
①工業用純鉄 高純度鉄 超高純度鉄	東北9 済 済	動燃9 東北9 東北9	動燃 動燃 動燃	動燃9 動燃9 動燃9
②9Cr 合金	東北9	東北9	動燃	動燃9
③25Cr合金	東北9	東北9	動燃	動燃9
④50Cr合金	東北9	東北9	動燃	動燃9
⑤Mod9Cr鋼	東北9	済	済	済

注記)

東北9 : 東北大学が9年度に実施予定

動燃9 : 動燃が9年度に実施予定

動燃 : 平成10年度移行に実施予定

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

〔環境技術關係〕

先行基礎工学分野に関する平成8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	不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究									
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="2">九州大学工学部建設都市工学科 教授 神野健二</td> <td rowspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="2">東海 地層処分開発室 畑中耕一郎、井尻裕二</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		〔*客員研究員 **研究生〕	動 燃 側	東海 地層処分開発室 畑中耕一郎、井尻裕二	
大 学 側	九州大学工学部建設都市工学科 教授 神野健二		〔*客員研究員 **研究生〕							
動 燃 側	東海 地層処分開発室 畑中耕一郎、井尻裕二									
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 地層処分開発室									
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 8年 9月 1日~ 平成 9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】 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)】 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形の異なる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伝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。 本試験を通じて、流速の変動により生じる分散現象を微視的観察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】 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年度においては、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、その試験結果のシュミレーションを九州大学神野教授が開発した物質移行解析コード及び動燃保有のコードを用いて実施した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

来年度以降は分散パラメータのスケール依存性に着目して解析を中心に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支援を併せて来年度以降の研究を実施する予定である。

【研究成果】

（1）多孔質媒体水理試験（MACRO試験）

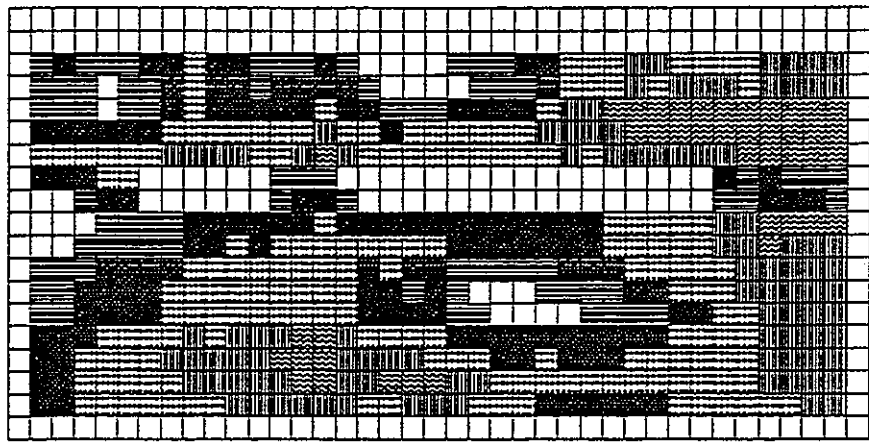
フラクタルスケール則にもとづき6種類の粒形の異なるガラスビーズを用いて図1に示すような不均質透水係数場を作成し、トレーサ試験を実施した。トレーサ試験を実施するときは、ガラスビーズ槽の左右境界に水頭差を与えて定常な流れ場を発生させガラスビーズ槽内1点からトレーサを注入した。試験ケースとしてはトレーサの注入圧力を変化させることにより3ケース実施した。試験結果は、トレーサの移動状態を写真により得た。また、濃度および圧力を、ガラスビーズ槽内のそれぞれ100点および25点において測定した。

（2）数値シュミレーション

動燃保有の水理物質移動解析コードと九州大学で開発した解析コードを用いてMACRO試験の数値シュミレーションを行い、結果を相互比較することによりこれらのコードの特性や適用性を検討した。動燃では、物質移動について粒子追跡法を適用した解析コードとしてMACRO-AFFINITYを用いた。オイリアン-ラグランジアン法を適用した解析コードとしてはDTRANSUを用いた。特性曲線法を適用したコードとしてはMT3Dを用いた。九州大学では特性曲線法を用いた。

MACRO試験および数値シュミレーションにより得られた破過曲線の結果を図2に示す。

本共同研究により、動燃保有の粒子追跡法（MACRO-AFFINITY）を適用した物質移動モデルはメッシュ分割および粒子数に解の精度が依存するために使用にあたっては注意が必要である事が分かった。特性曲線法を適用したモデル（九州大学、MT3D）については比較的良く物質移動を評価することができることを確認した。



$\phi 0.1\text{mm}$ $\phi 0.15\text{mm}$ $\phi 0.2\text{mm}$ $\phi 0.4\text{mm}$ $\phi 0.6\text{mm}$ $\phi 0.8\text{mm}$

図1 不均質透水係数場ガラスビーズ分布

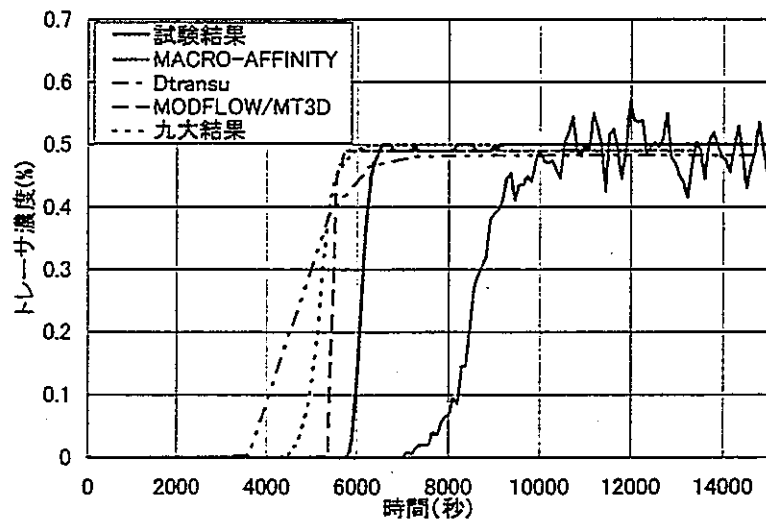


図2 MACRO 試験およびシミュレーションによる破過曲線結果

【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8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									
研究協力課題名	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="2">埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設 助教授 渡辺邦夫*</td> <td rowspan="2">[*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td colspan="2">東濃地科学センター 地質環境研究室 坪田浩二</td> </tr> </table>			大 学 側	埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設 助教授 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 坪田浩二	
大 学 側	埼玉大学工学部附属地盤水理実験施設 助教授 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 坪田浩二									
研究協力実施場所	動燃 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8年4月1日～ 平成9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】 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>【研究内容（概要）】 本研究では上記目的を受けて以下の研究を実施する。 ①亀裂性岩盤の割れ目系のモデル化に関する研究 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 ③飽和・不飽和領域の地下水解析法の高度化</p>										
<p>【使用主要施設】 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）】

平成8年度は、岩盤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った。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 の提案に結びつけた。また、地表付近の水分移動を解析するための土壌の不飽和特性計測を多数行い、従来より提案している計測法の精度の検証を行った。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

- ① 割れ目形成過程の把握に基づく水理地質構造モデル化法および解析法を発展させ、調査解析法の総合化を図る。
- 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 の技術開発を行う。

【研究成果】

1. 岩盤割れ目系のモデル化と解析法の改良に関する主な研究成果

- (1) 風化岩盤部の詳細割れ目系調査を通して、岩盤内の高透水部は、割れ目交差部、ステップ構造部であることを明らかにした。
- (2) 高透水部の透水係数を間隙率から推定する方法を提示した（図1）。
- (3) 風化岩盤における高透水部の大きさの分布が対数正規分布で近似しうることを明らかにした。
- (4) 神岡鉱山の活断層破碎帯の形態を詳細に調べ、大規模破碎帯の水理地質構造モデルを提案した。
- (5) 釜石鉱山550m坑道内の湧水点を調査し、ステップ構造が発達しており、それが水みちとなっていることを示した（図2, 3, 4）。
- (6) 釜石鉱山550m坑道内の割れ目交線方向分布を調べ、交線方向分布がステップ構造の把握に用いることができることを示した（図5）。

2. 簡易ベンチレーション型蒸発散計測装置、および土壌の原位置不飽和特性測定法の改良に関する主な研究結果

- (1) 本装置の計測精度の検証のため、顕熱移動、潜熱移動、放射収支量などの熱バランスを測定した。
- (2) 土壌飽和度が小さい範囲では、蒸発に与える地表抵抗が空気の動力的抵抗より大きく、高い精度で蒸発散計測ができることを示した。
- (3) 従来より提案している、原位置不飽和特性測定法は現実性の高い層状地盤にも適用できることを示した。
- (4) 土壌を用いた室内実験と解析の比較から、(3)における手法で得られた不飽和特性の妥当性を明らかにした。

3. Evaporation Logging の技術開発

蒸発量測定による難透水性軟岩の湧水量の把握、および透水係数の推定を目的とした新技術、Evaporation Logging に関する研究を行った。その結果、ボーリング孔内でベンチレーション試験と絶対湿度分布を計測する事により、軟岩の局所的な湧水量差、透水性の変化を評価できることを明らかにし、装置の設計を実施した(図6)。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・渡辺邦夫, 森田豊, 藤田元夫, Keita, M : 西アフリカ、マリ共和国における、雨季の蒸発散量の測定
応用地質, 37巻, 2号, pp.115-124, (1996.6) .
- ・志田原史子, 渡辺邦夫, 田中達也 : ボーリングデータに基づく割れ目系構造把握法の提案, 土木学会
年次講演会 3 部門, (1996.9) .
- ・森田豊, 三枝博光, 杉村淑人, 渡辺邦夫 : 亀裂性岩盤の水みちに関する基礎的研究, 土木学会年次講
演会 3 部門, (1996.9) .
- ・黒川潮, 小出馨, 渡辺邦夫, 田村由起子 : 自然林地の蒸発散測定法の提案と東濃鉾山での測定例, 土
木学会年次講演会 3 部門, (1996.9) .
- ・Mohamed, A. A. , Watanabe, K. , Abdel-Lah, A. K. : Effect of soil moisture conditions on the
evapotranspiration, 土木学会年次講演会 3 部門, (1996.9) .
- ・Abdel-Lah, A. K. , Watanabe, K. , Kurokawa, U. : Field determination of seasonal
evapotranspiration, 土木学会年次講演会 3 部門, (1996.9) .
- ・Abozeid, G. A. , Watanabe, K. , Ashor, M. A. , Ali, N. A. , Mohamed, A. A. : In situ determination
of the hydraulic properties of unsaturated soil, 土木学会年次講演会 3 部門, (1996.9) .
- ・濱田史郎, 小出馨, 池元康彦, 渡辺邦夫 : 自然林地における土壌不飽和特性の原位置測定を試み, 土
木学会年次講演会 3 部門, (1996.9) .

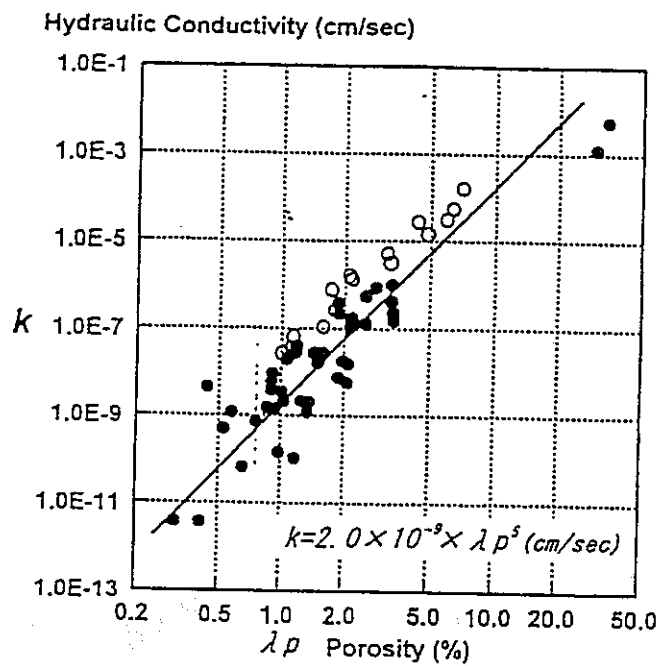


図1 風化花崗岩における、間隙率と透水係数の関係
(白丸は強熱資料)

この図と図中の近似式を用いて、透水係数の推定が可能となる。従って、東濃地域の風化花崗岩の透水係数分布（例えば、風化によって表層の透水係数がどの程度大きくなっているか、など）が推定しうる。

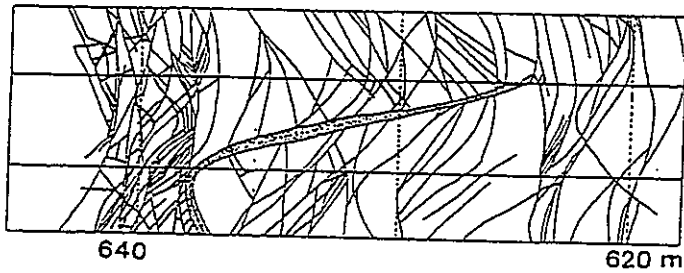


図2 釜石鉱山550m坑道640m地点の湧水位置付近の割れ目展開図

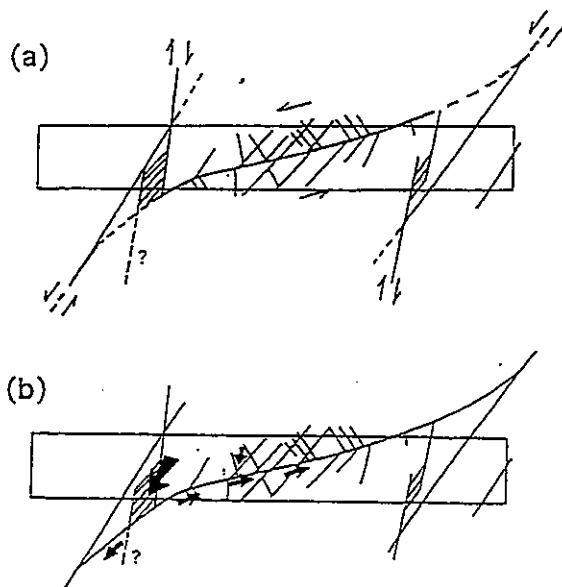


図4 640m地点の湧水位置付近の割れ目系のモデル化(a)と地下水流れ模式図(b)

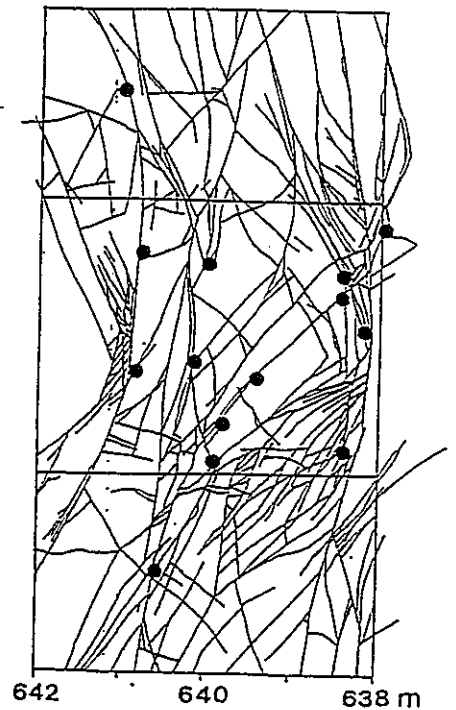


図3 640m地点付近の湧水箇所（黒丸位置）詳細スケッチ図

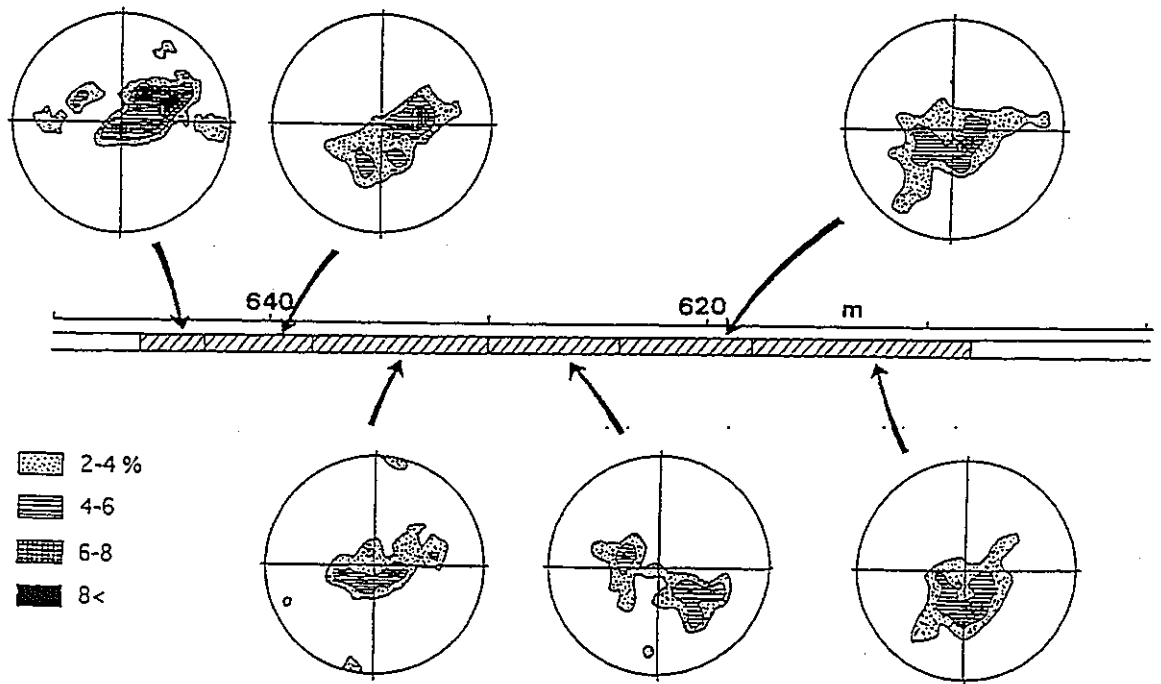


図5 割れ目交線分布の場所的变化

割れ目交線分布によって、場所毎の割れ目系の特性を把握しうる。

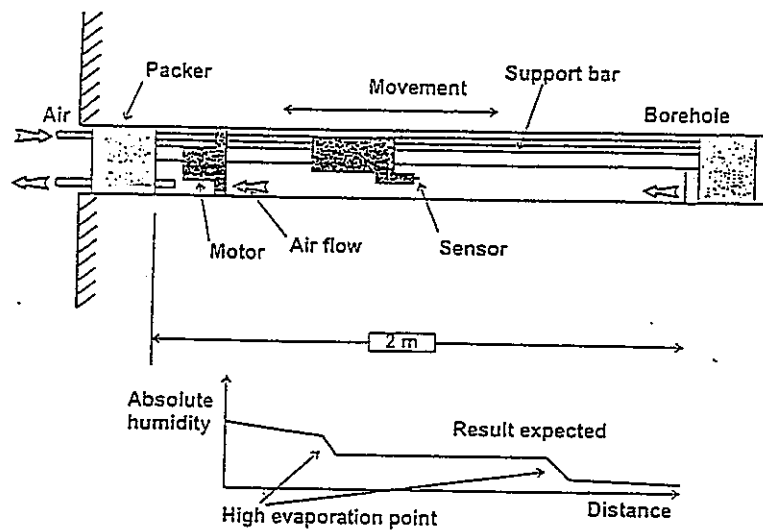


図6 Evaporation logging の概念図

先行基礎工学分野に関する平成8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										
研究協力課題名	精密周波数制御連続電磁波調査法の研究 (有限要素法を用いた電磁法シミュレーション)										
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</td> <td>助手 渡辺 俊樹 *</td> <td>課程 山田 弘三 *</td> </tr> <tr> <td>動 燃 側</td> <td>東濃 技術開発課 長谷川 健、藪内 聡</td> <td>修士 真田 佳一 *</td> <td>客員 研究員 ** (研究生)</td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学大学院工学研究科資源工学専攻	助手 渡辺 俊樹 *	課程 山田 弘三 *	動 燃 側	東濃 技術開発課 長谷川 健、藪内 聡	修士 真田 佳一 *	客員 研究員 ** (研究生)
大 学 側	京都大学大学院工学研究科資源工学専攻	助手 渡辺 俊樹 *	課程 山田 弘三 *								
動 燃 側	東濃 技術開発課 長谷川 健、藪内 聡	修士 真田 佳一 *	客員 研究員 ** (研究生)								
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8年8月12日~ 平成8年12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>【研究目的】</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作成する。</p>											
<p>【研究内容 (概要)】</p> <p>本研究は、精密に周波数を制御され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、5年間で実施する計画である。研究計画は、ハードウェア面では、まず実験機を製作し、室内および野外実験を経て実用機を製作する。ソフトウェア面では、電磁波のシミュレーションプログラムを作成し、実験の実施に役立てるとともに、取得された周波数制御連続波データを解析するアルゴリズムの構築を実施する。</p> <p>本研究の協力課題は主にソフトウェア面の研究開発に関するものである。</p>											
<p>【使用主要施設】</p> <p>ワークステーション COMPAQ Deskpro 5150 (東濃) 大型計算機 FACOM M1800 (情報センター)</p>											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度は低周波数および高周波数の電磁波を用いた調査法の研究を、計算機を用いたシミュレーションプログラムを開発することにより実施し、いくつかの有益な知見が得られた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成9年度は、精密周波数連続電磁波調査機器（実験機）の設計および製作を実施し、本実験機を用いた基礎実験を実施する予定である。

【研究成果】

(1)低周波送信源を用いた電磁法シミュレーション

シミュレーションに用いたプログラムは、積分方程式により、水平多層構造中に直方体状の比抵抗異常体が存在するような地下構造モデルに対して、低周波の電磁波を送信した時の地上での磁場応答を計算するものである。

送信周波数や比抵抗などのパラメータを変えてシミュレーションを行った結果、計算される垂直磁場成分の内、実数部よりも虚数部の方がパラメータの変化に対応する応答の変化の程度が大きいことや、その虚数部の値は送信周波数が高いほど大きくなるが、送信点と受信点の距離に対する減衰の程度も大きくなるのが現在までに明らかになっている。

第1図に、シミュレーションの例として、水平2層構造の第1層に比抵抗異常体が存在する地下構造モデル（モデルA）および第2層に異常体が存在するモデル（モデルB）に対する磁場応答（垂直磁場成分の虚数部）の計算結果を示す。

(2)高周波送信源を用いた電磁法（地下レーダー）シミュレーション

地下レーダーで用いられる電磁波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実施した。

第2図は、空気と岩盤の2媒質モデルにおいて、媒質境界の近傍（空気側）に電磁波送信源を置いた時の計算結果である。本プログラムの開発により、送信源からの電磁波の挙動を時間を追って把握する、つまり可視化することが可能となった。

次に、本プログラムを用いて、岩盤内に含水破碎帯を想定したモデルに対して電磁法のシミュレーションを実施し、含水破碎帯で反射する反射波や含水破碎帯を透過する透過波に着目することにより含水破碎帯を検出する方法に関して検討を行った¹⁾。

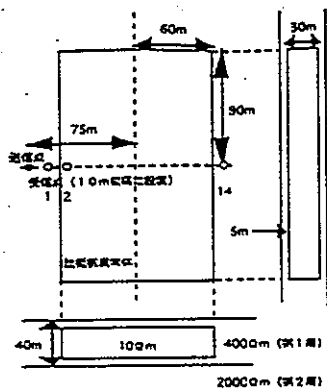
第3図は含水破碎帯モデル、送信波形、および計算により得られた反射波および透過波の観測波形である。観測波形の図中の数字は電磁波の到達時間であり、反射波の場合は、早い方から直接波、第1反射波（第1境界で反射する電磁波）、第2反射波（第2境界で反射する電磁波）の到達時間を表す。これらの結果から、減衰により振幅が小さくなっているものの透過波および第2反射波は認識可能であるのに対し、第1反射波については、直接波のリングングと重なるために認識が困難であることがわかる。

第4図は反射波の観測波形から直接波の観測波形を差し引いたものであり、反射波のみを抽出したものである。入力波形と比較して、逆位相の第1反射波および同位相の第2反射波が認識可能である。

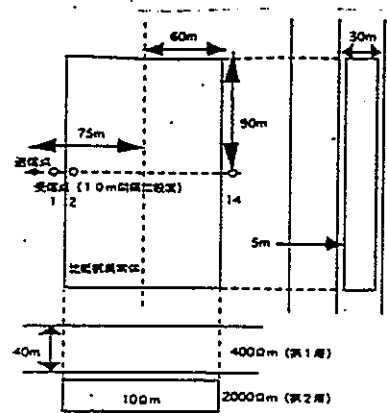
このように、含水破碎帯の影響が含水破碎帯における反射波および透過波の振幅や到達時間（電磁波速度）に現れ、これらを読み取ることにより、含水破碎帯の幅や物性を推定できる可能性があることが、本プログラムによるシミュレーションの結果明らかになった。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

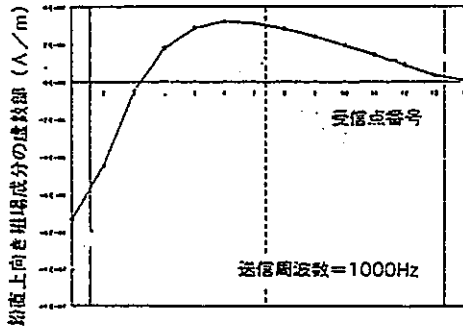
- 1) 真田 他 : 「ボアホールレーダーによる含水破碎帯検出の3次元数値モデリング」、物理探査学会第96回（平成9年度春季）学術講演会 講演予稿集 pp353-356



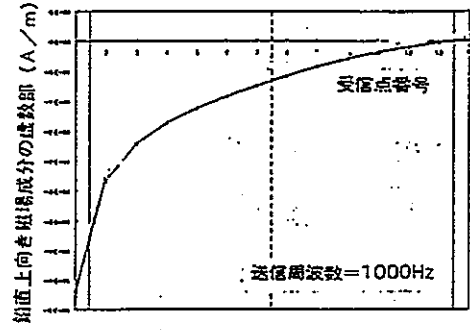
(a) - 1 地下構造モデルA



(b) - 1 地下構造モデルB

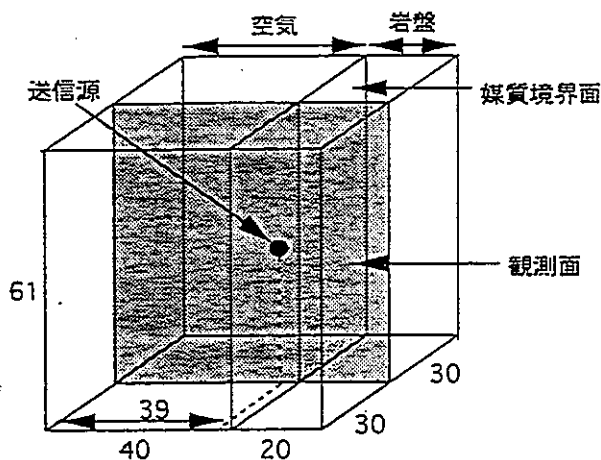


(a) - 2 計算結果 (モデルA)



(b) - 2 計算結果 (モデルB)

第1図 積分方程式を用いた電磁法シミュレーション

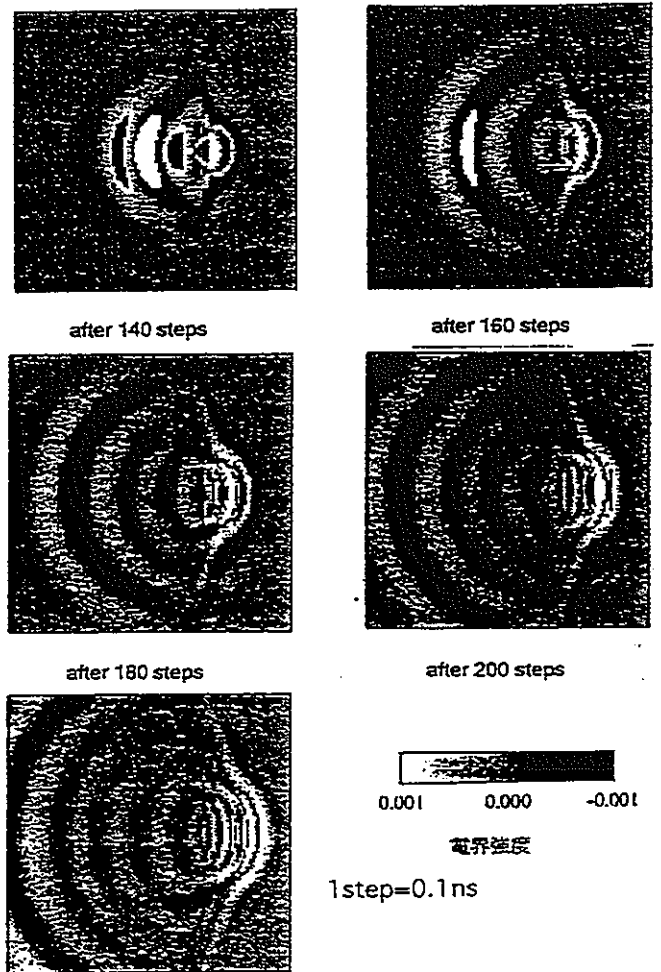


数字はブロック数を表す
(1ブロック長=6.25cm)

媒質のパラメーター

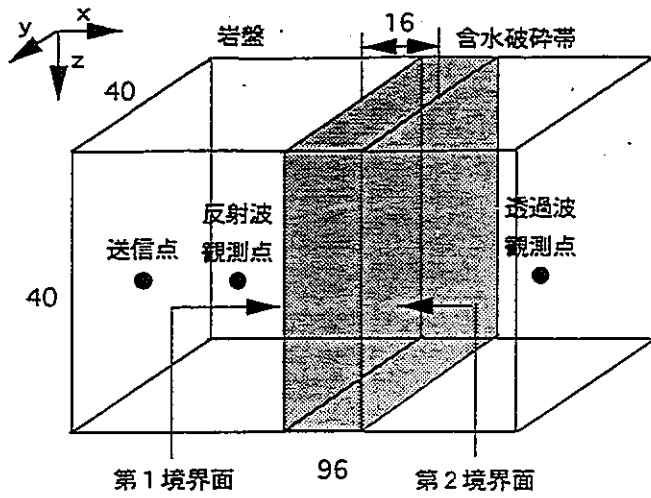
空気 比誘電率=1 比抵抗=∞ (絶縁体)	岩盤 比誘電率=8 比抵抗=1000Ωm
-----------------------------	----------------------------

(a) 空気と岩盤の2媒質モデル



(b) 計算結果

第2図 FDTD法による電磁波動シミュレーション



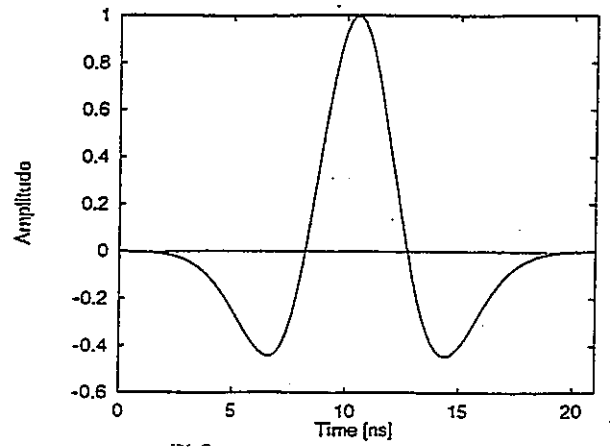
数字はブロック数を表す
(1ブロック長=6.25cm)

座標	送信点 (16+1/2, 20, 20+1/2)
	反射波観測点 (32+1/2, 20, 20+1/2)
	透過波観測点 (80+1/2, 20, 20+1/2)

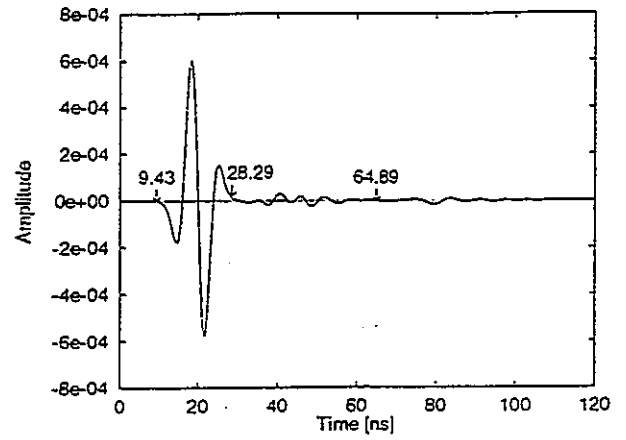
媒質のパラメーター

岩盤	含水破碎帯
比誘電率=8	比誘電率=30
比抵抗=1000Ωm	比抵抗=100Ωm

(a) 含水破碎帯モデル

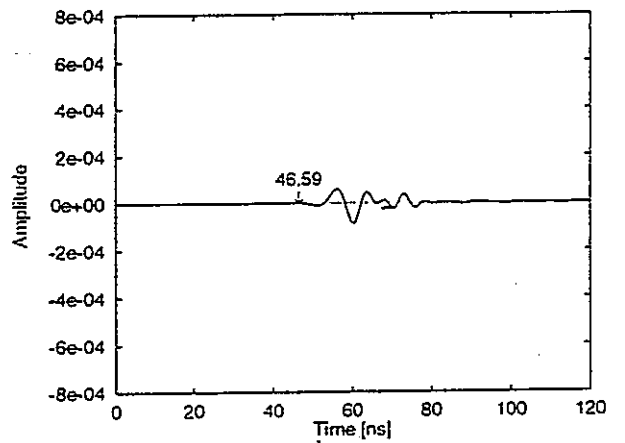


(b) 送信波形

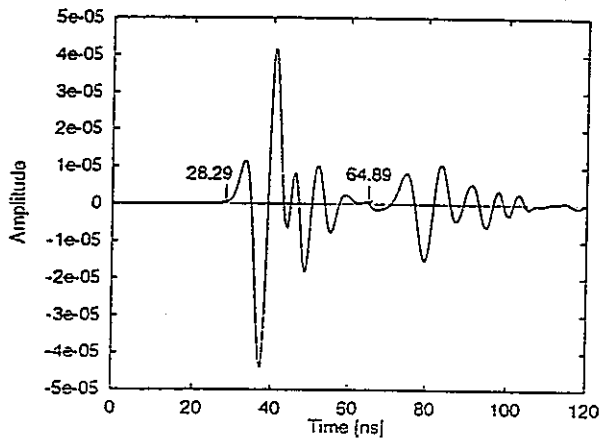


(c) 反射波観測波形

第3図 含水破碎帯モデルに対する電磁波動シミュレーション



(d) 透過波観測波形



第4図 反射波の抽出結果

先行基礎工学分野に関する平成8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		
研究協力課題名	高精度マルチチャンネル電磁波計測システムの開発		
研究者所属、氏名	九州大学工学部資源工学科 教授 牛島 恵輔*		
大学側	九州大学工学部資源工学科 教授 牛島 恵輔* 〔*客員研究員〕		
動燃側	東濃 技術開発課 長谷川 健、藪内 聡		
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9年3月	当該年度 研究期間	平成8年9月1日～ 平成9年3月21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、地下深部の地下水の流動を把握するために高精度マルチチャンネル電磁波計測システムを開発する。</p>			
<p>【研究内容(概要)】</p> <p>本研究は、電磁波を用いて地下深部の地下水の流動をリアルタイムでモニタリングする手法を開発するものである。具体的には、地下に送り込むエネルギーとして、ループなどに交流電流を流した時に発生する電磁界(電磁誘導現象)を利用した、高精度マルチチャンネル電磁波計測システムを開発する。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>(本年度は理論的検討を実施)</p>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

理論的検討を実施し、流体流動電位を計測することで、花崗岩中の地下水の動きをモニタリングできる可能性が見いだされた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

先行基礎工学分野での研究協力は本年度で終了する。

【研究成果】

地下深部の地下水の流動をリアルタイムでモニタリングするための手法について検討した。当初は、地下に送り込むエネルギーとして、ループ等に交流電流を流した時に発生する電磁界を用いることを考え、高精度マルチチャンネル電磁波計測システムを開発する予定であったが、東濃地科学センターが研究対象としている花崗岩のような透水性の極めて低い岩盤には、その適用に限界があることが明らかになった。一方、上記のような条件の地下水流動のモニタリングには、電磁波計測よりもイオンを含む流体が岩盤中を流れる時に発生する微小な電圧（流体流動電位）を計測する方法の適用が考えられた。

深部岩盤の地下水の流動状態を地表からの調査だけで把握するためには、従来の地表からの物理探査法では限界があり、地下深部に直接エネルギーを送信する必要がある。九州大学牛島教授は地下深部に直接エネルギーを送る方法として、試錐孔のケーシング（金属製のパイプ）を利用して地下深部へ直接電流を流したり、あるいは地下深部へ流体を圧入するなどの方法を採用し、人工的な電流で発生する電位（人工電位）と、流体の流動により発生する自然電位（流体流動電位）の空間分布を瞬時（1～2秒間隔）に連続計測できるシステムを開発した（図1）。次いで、図2に示すようにデータ処理のための種々のプログラムを研究開発した。すなわち、人工的な電位の測定値から地下の電気比抵抗分布を解析するために必要な3次元モデリングおよび3次元インバージョンのプログラムを開発した。さらに、自然電位データを解析するために、任意形状のき裂分布に対してもシミュレーションが可能な3次元シミュレータを開発するとともに、自然電位の実測値から直接き裂分布を解析可能な3次元インバージョンプログラムを開発した。開発されたシステムは、人工的な電位および自然電位のデータを解析することにより、圧入した地下水のフロントや流向および流量を画像として可視化することが可能である。このシステムの適用試験は、地熱発電の蒸気生産井を用いて行われており、地下深部のき裂の走向および傾斜をほぼ正確に推定できることがすでに確認されている。

このシステムの開発の当初目標は、地熱流体の様にかなり規模の大きな地下の流体の動きをモニタリングすることにあったが、地下深部に掘削された坑道の壁面と坑道から掘削された試錐孔を用いた調査にも利用可能である。さらに、坑道から掘削された試錐孔の内、孔口から湧水している試錐孔の孔口の蓋を開け閉めする際に発生する僅かな圧力差でも流体流動電位が発生し、実際にそれが計測可能なことが確認されたので、牛島教授が開発した計測システムを坑道壁面からの調査に利用することにより、坑道壁面奥の地下水の動きをリアルタイムで可視化できる見通しが得られた。

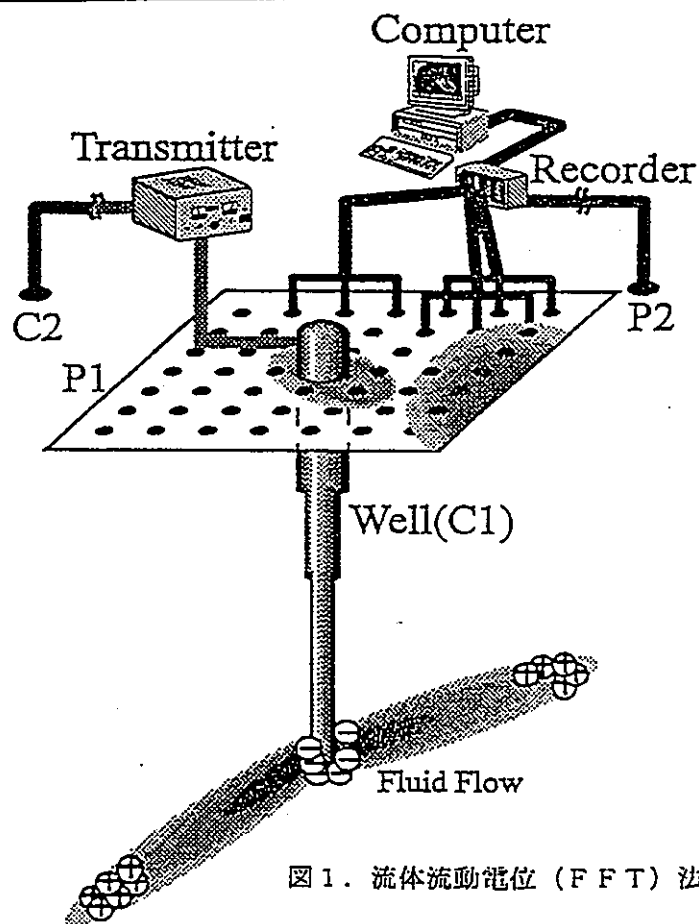


図1. 流体流動電位 (FFT) 法のシステム概念図

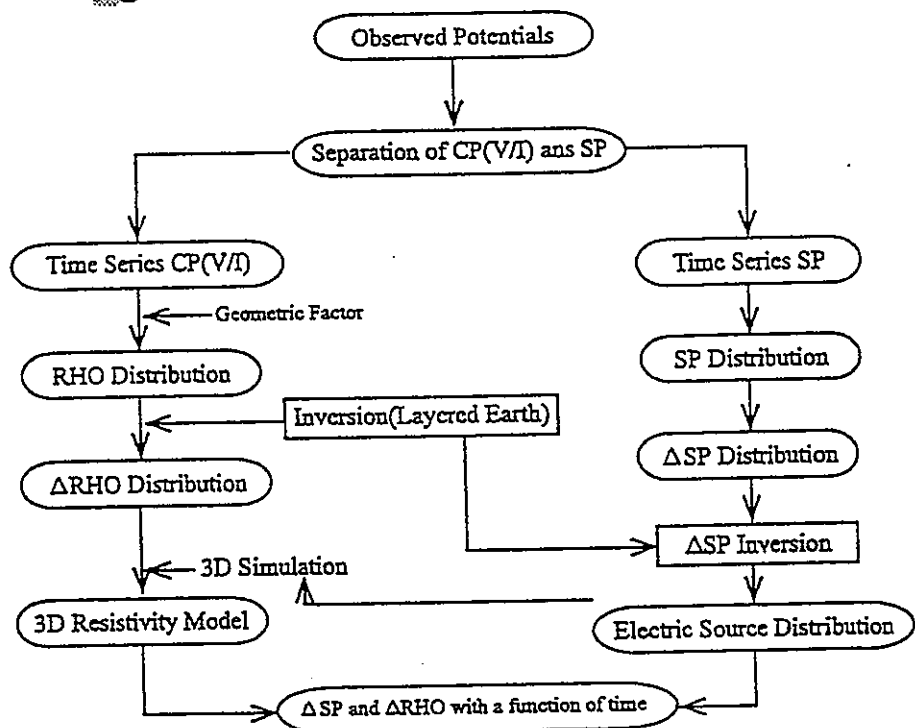


図2. 流体流動電位法のデータ処理の流れ図

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

Imaging of Geothermal Reservoir by the Mise-a-la-masse Measurements, *Proc. International Geophysical Conference and Exposition, Jakarta, Indonesia, GT-2, 91-95, Apr., 1996*

Fracture Monitoring by AE and Electrical Prospecting, *Proc. 3rd International Hot Dry Rock Forum, Santa Fe, New Mexico, 101-102, May, 1996.*

先行基礎工学分野に関する平成8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(I)		
研究協力課題名	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 岡山大学大学院工学研究科土木工学専攻 修士課程 松尾 雄一郎* [* 研究生]		
動燃側	東濃 技術開発課 長谷川 健、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		
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8年8月27日～ 平成9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> <p>(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、および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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>			
<p>【使用主要施設】 東濃地科学センターの施設(東濃鉱山、解析設備) 試験装置(試錐孔間水理試験装置、室内透水試験装置等) 釜石鉱山原位置試験場</p>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

本年度は、2次元での調査・解析手法の体系化を目的とした基礎的な研究を実施した。

- (1) 2孔間でのクロスホール水理試験装置を開発した。また、研究で必要となる実測データを取得するための現場試験を釜石原位置試験場で実施した。
- (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。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

<平成9年度の予定>

- (1) 2孔間による現場水理試験の実施と3次元的な現場試験を行うための孔内観測用装置の製作
- (2) 2次元逆解析コード（水理試験データを用いたトモグラフィ解析コード）の開発
- (3) 水理試験結果と地球物理学的手法の試験結果を組み合わせた調査・解析手法の基本部分の検討

【研究成果】

(1) クロスホール水理試験装置と試験手法に関する研究

① クロスホール水理試験装置の開発

本年度は、2孔間におけるクロスホール水理試験装置を開発した。試験装置は、坑道内に設置される注水制御装置、計測装置、流量測定装置、圧力パネルと試験孔内に設置される孔内装置（孔内注水用装置、孔内観測用装置）等から構成される。また、装置が備える試験手法は、クロスホール水理試験として正弦波圧力注水試験、単孔式水理試験として定圧・定流量注水試験の3種類である。図-1に試験装置の概念図を示す。

② 現場試験による試験データの取得

釜石鉱山原位置試験場550mレベル坑道において、試験装置が備える定圧・定流量・正弦波圧力注水試験を実施し、本研究に必要となる現場試験データを取得した。図-2、3に単孔式での定圧・定流量注水試験結果の一例を、図-4に2孔間での正弦波圧力注水試験結果の一例を示す。

また、表-1に定圧・定流量注水試験から算定された透水係数を、表-2に2孔間での正弦波圧力注水試験から算定された透水係数を示す。単孔式水理試験（定圧・定流量注水試験）は、試験区間近傍の岩盤の水理特性が反映されるのに対し、クロスホール水理試験（正弦波圧力注水試験）は岩盤内の水理的なパス（水みち）が反映されるため、一概に結果を比較できないものの、両試験法から算定された透水係数は、概ね一致した。

(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（LTG法を用いた浸透流解析コードの開発）

本研究で開発した浸透流解析コードには、LTG法(Laplace Transformation Galerkin Method)を採用した。LTG法とは、基礎方程式の時間項について数値ラプラス変換を導入し、ラプラス空間中で有限要素浸透流解析を実施後その結果を数値ラプラス逆変換することにより計算結果を得る方法である。LTG法は、従来の時間差分法による有限要素浸透流解析コードに比べ演算時間を短縮し、かつ、経時的变化を伴う複雑な境界条件を再現できる可能性がある。

上述したクロスホール水理試験装置が備える試験手法のうち、正弦波圧力注水試験の境界条件である正弦波曲線を数値ラプラス変換および数値ラプラス逆変換を用いたアルゴリズムで近似し、その妥当性について検討した。近似結果を図-5に示す。実線で示した正弦波曲線の真値と、○でプロットした計算結果は、特定の周期まで非常に良く一致し、アルゴリズムの妥当性が確認さ

れた。また、特定の周期回数以降は計算結果が一定値に収束する傾向が示されているが、この特定の周期回数は、計算回数を規定する入力パラメータの約1/2 であることが判明している。したがって、入力パラメータ値を大きくし特定の周期回数を増加することで、複雑な境界条件を近似することが可能となる。

ただし、計算回数が増加すると計算に要する時間も増加することから、他のアルゴリズムの開発を含め、次年度以降もアルゴリズムの検討を継続する。

②LTG法を用いた浸透流解析コードの検証

開発した浸透流解析コード(LTG) および従来から広く用いられている時間差分法による有限要素浸透流解析コード(FEM) を用いて、上述したクロスホール水理試験装置が備える定圧・定流量注水試験をシミュレーションし、その結果を比較することで開発した浸透流解析コード(LTG) の有効性を検証した。なお、時間差分法による有限要素浸透流解析コードは、岡山大学西垣教授により開発されたPC-UNSAFを用いた。

定圧注水試験のシミュレーション結果を図-6に、定流量注水試験のシミュレーション結果を図-7に示す。両試験のシミュレーション結果において、実線や点線で示した時間差分法による有限要素浸透流解析コード(FEM) の計算結果と、○や△などでプロットした開発した浸透流解析コード(LTG) の計算結果は良く一致している。この結果から、開発した浸透流解析コード(LTG) によって、時間差分法による有限要素浸透流解析コード(FEM) と同等の計算結果を得られることが確認されたと共に、開発した浸透流解析コード(LTG) の有効性が示された。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

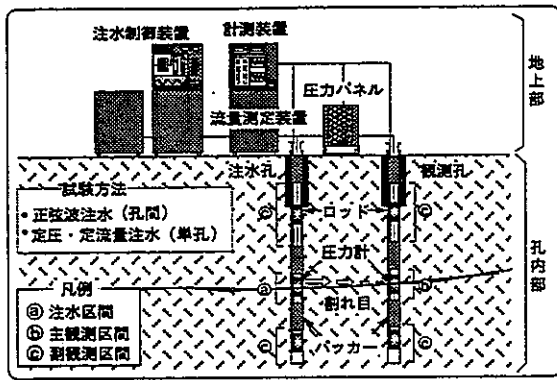


図-1 クロスホール水理試験装置の概念図

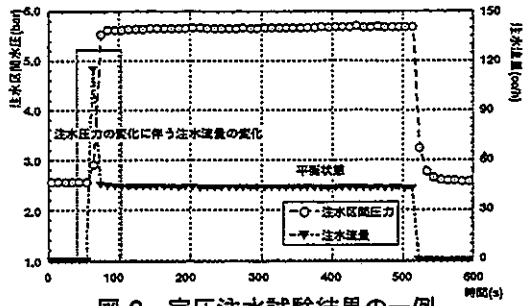


図-2 定圧注水試験結果の一例

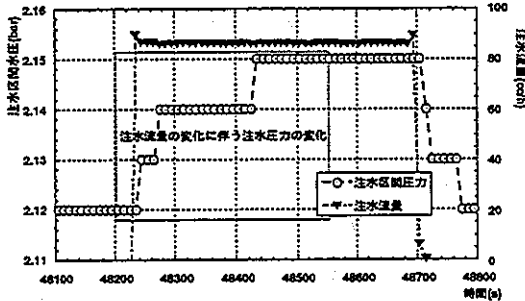


図-3 定流量注水試験結果の一例

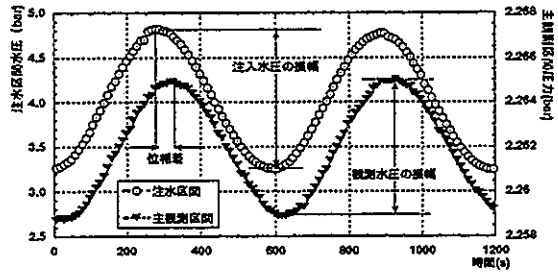


図-4 正弦波圧力注水試験結果の一例

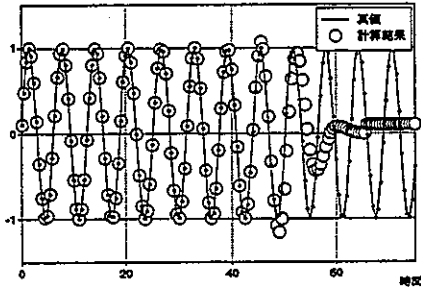


図-5 正弦波曲線の近似結果

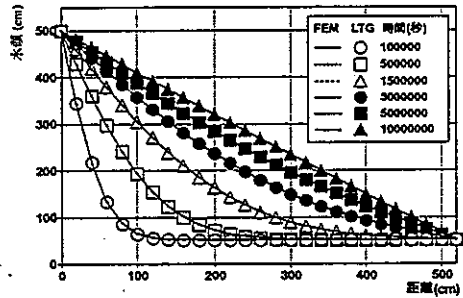


図-6 定圧注水試験のシミュレーション結果

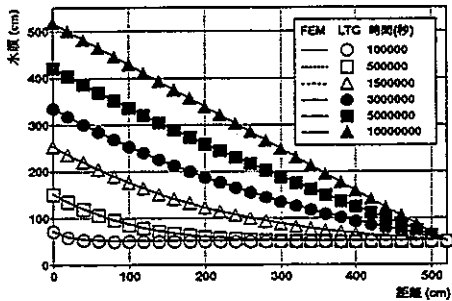


図-7 定流量注水試験のシミュレーション結果

表-1 定圧・定流量注水試験から算定された透水係数

試験深度 (G.L. - m)	試験方法	透水係数 (cm/s)
8.77-9.77	定圧注水試験	1.6×10^{-5}
	定流量注水試験	1.5×10^{-5}
14.94-15.96	定圧注水試験	1.0×10^{-5}
	定流量注水試験	9.6×10^{-6}

表-2 正弦波圧力注水試験から算定された透水係数および比貯留係数

試験深度 (G.L. - m)	観測区間	透水係数 (cm/s)	比貯留係数 (1/cm)
8.77-9.77	上部観測区間	2.9×10^{-5}	2.6×10^{-7}
	主観測区間	—	—
	下部観測区間	2.5×10^{-5}	3.4×10^{-8}
14.94-15.96	上部観測区間	2.3×10^{-5}	3.5×10^{-8}
	主観測区間	5.1×10^{-6}	1.4×10^{-7}
	下部観測区間	4.0×10^{-5}	4.8×10^{-8}