

先行基礎工学分野に関する  
平成10年度研究協力概要報告

1999年8月

核燃料サイクル開発機構

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,

Japan

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

1999

## 先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告

報告者課 Gr リスト参照  
編集 技術展開部技術協力課

### 要 旨

機構は、大学及び研究機関（以下「大学等」という。）との研究協力の推進を図るため、平成7年度から先行基礎工学研究協力制度を発足させた。同制度は、平成10年度で4年目を迎え、研究協力テーマが増加し、順調に推移している。

同制度は、機構の施設及び設備を主に利用し、機構が取り組むプロジェクト研究に先行した基礎・基盤的研究を大学等との研究協力により推進することを目的とする。

同制度は、機構が設定した研究協力テーマに対して、大学等からの研究協力課題及び研究協力者の応募をもとに、研究協力課題及び研究協力者を選考し、大学等との共同研究の実施、客員研究員あるいは研究生の受け入れ、もしくはこれらの組み合わせにより研究協力を実施している。

本報告書は、平成10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34件の研究協力課題の実施結果についてその概要をまとめたものである。

なお、34件の研究協力課題のうち、高速増殖炉関係の9件及び環境技術関係の3件の合計12件については、平成10年度で終了した。

— 目 次 —

1. 先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力課題	i
2. 先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力概要	
(1)高速増殖炉関係	
① ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束	1
② 中性子ラジオグラフィによる高密度比気液二相流の可視化と計測	7
③ 高解像度陽子線ラジオグラフィ法による液体金属-ガス二相流及び気泡挙動の研究	17
④ マルテンサイト系耐熱鋼の損傷組織の定量化技術の研究	26
⑤ 溶接部の高温損傷の定量化技術	30
⑥ 中性子ビーム制御システムの開発	33
⑦ 高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価	37
⑧ レーザ共鳴イオン化分光を用いたFPガスマニピュレーションの基礎研究	44
⑨ 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究-液面下の流れによる不安定現象-	49
⑩ 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究-流れ込みに対する液面応答-	53
⑪ 非均一温度場における流速分布計測及び物理モデルの開発・構築	58
⑫ 融体固化・閉塞基礎試験とその解析	64
⑬ 高純度鉄基合金開発に関する研究-高純度試料作製・極微量分析・特性試験-	69
⑭ ULOF事象における金属燃料高速炉の挙動に関する基礎的研究	73
⑮ レーザ超音波による非接触非破壊評価手法の検討	77
⑯ ODSフェライト鋼の電子線照射による評価	81
⑰ ラマン散乱型光ファイバー温度分布センサーの常陽への適用	85
⑱ 物質変態を伴う現象の数値解析法	89
⑲ 燃焼エアロゾル挙動解析手法の開発	95
⑳ 粒子法を用いたナトリウム漏洩燃焼解析手法の開発	99
㉑ 弥生炉を用いたTRU核種の崩壊熱の測定・評価	102
㉒ TRU崩壊熱測定値を用いた包括的な崩壊熱評価手法の確立	105
㉓ 模擬燃焼燃料を用いた高燃焼度燃料の熱物性及び機械的性質に関する基礎的研究	108
(2)環境技術関係	
① 不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究-巨視的分散現象に関する検討	113
② 地下水流動の総合調査・解析システムの開発	117
③ 計算機を用いた連続電磁波のシミュレーション及び解析手法の研究	121
④ クロスホール試験の解析法の開発に関する研究	126
⑤ 緑泥石化に関する実験的研究	129
⑥ 放射性物質のシロイヌナズナへの移行と影響に関する研究	142
⑦ 岩盤内の浸透特性の計測法に関する研究	148
⑧ コロイド-イオン-岩石3相系相互作用メカニズムの解明と定量化	156
⑨ 我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究 -亀裂モデルの信頼性評価手法の開発	162
⑩ 深部地質環境における微生物生態系の多様性と機能に関する研究	166
⑪ 深部地下における微生物生態系とその物質循環系の解析	169



先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力の課題一覧(1/5)

【高速増殖炉関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
1. 液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究 ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束	大洗システム部熱流体Gr	堺 公明	共同研究	塩津 正博 教授 京都大学大学院エネルギー科学研究科 他	平成7年度より実施し平成10年度で終了
2-(1) 高密度比気液二相流に関する基礎研究 中性子リタガフーによる高密度比気液二相流の可視化と計測	大洗安工部炉安Gr	飛田吉春 小西賢介	共同研究	三島 嘉一郎 教授 京都大学原子炉実験所 他	平成7年度より
2-(2) 高密度比気液二相流に関する基礎研究 高解像度陽子線リタガフー法による液体金属-ガス二相流及び気泡挙動の研究			共同研究	芹澤 昭示 教授 京都大学大学院工学研究科 原子核工学専攻 他	平成9年度より実施し平成10年度で終了
3-(1) 損傷組織の定量化技術の研究 マルテンサイト系耐熱鋼の損傷組織の定量化技術の研究	大洗安工部機安Gr	永江勇二	客員研究員	丸山 公一 教授 東北大学工学研究科 材料物性学専攻	平成7年度より実施し平成10年度で終了
3-(2) 損傷組織の定量化技術の研究 溶接部の高温損傷の定量化技術			客員研究員	門馬 義雄 教授 高知工科大学工学部 他	平成8年度より
4. 中性子ビームクローブに関する研究(Ⅱ) 中性子ビーム制御システムの開発	大洗システム部炉心Gr	大川内 靖	共同研究	鬼柳 善明 教授 北海道大学工学部 量子制御工学専攻 他	平成7年度より
5. 高燃焼度燃料の燃焼評価 高燃焼度燃料内の固体F-Pの挙動評価	大洗照射センター燃材部AGS	山本一也 滑川卓志	共同研究 研究生	出光 一哉 助教授 九州大学工学部 他	平成7年度より実施し平成10年度で終了
6. レーザを用いた高速炉の燃料破損検出法に関する研究 レーザ共鳴イオン化分光を用いたFPガスモニタリングの基礎研究	大洗照射センター実験炉部技術課	青山卓史 野瀬正一	客員研究員	井口 哲夫 教授 名古屋大学大学院工学研究科 原子核工学専攻 他	平成8年度より
7-(1) 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究 同上 液面下の流れによる不安定現象	大洗システム部熱流体Gr	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	平成8年度より実施し平成10年度で終了
7-(2) 液面の非線型不安定現象に関する基礎研究 同上 流れ込みに対する液面応答			共同研究	神永 文人 教授 茨城大学工学部機械工学科 他	平成8年度より実施し平成10年度で終了

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力の課題一覧(2/5)

【高速増速炉関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
8. 炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価 非均一温度場における流速分布計測及び物理モデルの開発・構築	大洗 安工部 炉工Gr	上出英樹 A. Tokuhiro 木村暢之	客員研究員	菱田 公一 教授 慶応大学理工学部 システム工学科	平成8年度より
9. 相変化する融体移行挙動に関する基礎研究 融体固化・閉塞基礎試験とその解析	大洗 安工部 炉安Gr	近藤 悟 小西賢介 神山健司	共同研究	齊藤 正樹 助教授 東京工業大学 原子炉工学研究所 他	平成8年度より実施し 平成9年度で終了
10. 高純度鉄合金開発に関する研究 同上 -高純度試料作製・極微量分析・特性試験-	大洗 安工部 機安Gr	青砥紀身 加藤章一	客員研究員	安彦 兼次 助教授 東北大学 金属材料研究所 他	平成8年度より
11. 金属燃料の過渡時挙動に関する基礎的研究 U.L.O.P事象における金属燃料高速炉の挙動に関する基礎的研究	大洗 システム部 炉材評価Gr	丹羽 元 川田賢一	共同研究 研究生	馬場 護 助教授 東北大学 工学研究科 量子材料工学専攻 他	平成9年度より実施し 平成10年度で終了
12. き裂進展のモニタリング技術開発に係る基礎研究 レーザー超音波による非接触非破壊評価手法の検討	大洗 安工部 機安Gr	青砥紀身 川崎弘嗣	共同研究	岸 輝雄 教授 東京大学 先端科学技術研究センター 他	平成9年度より
13. ODSフェライト鋼の照射特性に関する研究 ODSフェライト鋼の電子線照射による評価	大洗 照射センター 燃材部 MMS	赤坂尚昭 吉武庸光	共同研究	大貫 惣明 教授 北海道大学大学院 工学研究科 物質工学専攻 他	平成9年度より
14. 光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定法に関する研究 ラマン散乱型光ファイバー温度分布センサーの常陽への適用	大洗 照射センター 実験炉部 技術課	市毛 聡	共同研究	中澤 正治 教授 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 他	平成9年度より
15. 減肉と熱荷重を伴う力学解析手法に関する研究 物質変態を伴う現象の数値解析法	大洗 システム部 プラ工Gr	一宮正和	共同研究	酒井 謙 教授 横浜国立大学 教育・人間科学部	平成10年度より
16. ナトリウム燃焼時のエアロゾル挙動に関する研究 燃焼エアロゾル挙動解析手法の開発	大洗 システム部 熱流体Gr	岡野 靖	共同研究	二ノ方 壽 教授 東京工業大学 原子炉工学研究所 他	平成10年度より

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力の課題一覧(3/5)

【高速増殖炉関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
17. ナトリウム漏洩燃焼形態の予測手法に関する研究 粒子法を用いたナトリウム漏洩燃焼解析手法の開発	大洗システム部 熱流体Gr	飯田将雄	共同研究	岡 芳明 教授 東京大学 工学部附属 原子力工学研究施設 他	平成10年度より
18-(1)TRU核種の崩壊熱の測定・評価 弥生炉を用いたTRU核種の崩壊熱の測定・評価	大洗システム部 炉心Gr	大川内 靖	共同研究	岡 芳明 教授 東京大学 工学部附属 原子力工学研究施設	平成10年度より
18-(2)TRU核種の崩壊熱の測定・評価 TRU崩壊熱測定値を用いた包括的な崩壊熱評価手法の確立			客員研究員	吉田 正 教授 武蔵工業大学 工学部自然科学系 他	平成10年度より実施し 平成10年度で終了
19. 高燃焼度燃料の物性に関する基礎的研究 模擬燃焼燃料を用いた高燃焼度燃料の熱物性及び機械的性質に関する基礎的研究	大洗照射センター 燃材部 AGS	阿部和幸	共同研究	山中 伸介 教授 大阪大学大学院 工学研究科 原子力工学専攻 他	平成10年度より

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力の課題一覧(4/5)

【環境技術関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
1. 不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究 同上 一 巨視的分散現象に関する検討	東海 環境センター 処分研究部 3/1行4研研Gr	内田雄大 畑中耕一郎 井尻裕二	共同研究	神野 健二 教授 九州大学 工学部 建設都市工学科 他	平成8年度より実施し平成10年度で終了
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	東濃 科学研究Gr	中野勝志 三枝博光	客員研究員	渡辺 邦夫 教授 埼玉大学 理工学研究科 生物環境科学専攻	平成8年度より
3. 精密周波数帯域連続電磁波調査法の研究 計算機を用いた連続電磁波のシミュレーション及び解析手法の研究	東濃 調査技術Gr	藪内 隆 茂田直孝	客員研究員 研究生	渡辺 俊樹 助手 京都大学大学院 工学研究科 資源工学専攻 他	平成8年度より実施し平成10年度で終了
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 クロスホール試験の解析法の開発に関する研究	東濃 科学研究Gr	竹内竜史 中野勝志	共同研究 研究生	西垣 誠 教授 岡山大学 環境理工学部 環境アライ工学科 他	平成8年度より
5. 岩石及び鉱物と地下水との反応に関する研究 緑泥石化に関する実験的研究	人形峠 環境保全部 環境研究Gr	時澤孝之 鶴留浩二	客員研究員	池江 靖弘 助教授 兵庫教育大学 地学教室	平成9年度より実施し平成10年度で終了
6. 放射性物質の植物への移行と影響に関する研究 放射性物質のシロイヌナズナへの移行と影響に関する研究	人形峠 環境保全部 環境研究Gr	時澤孝之 鶴留浩二	共同研究	山田 哲治 教授 岡山大学 農学部 総合農業科学科 他	平成9年度より
7. 岩盤内の不飽和領域のメカニズムに関する研究 岩盤内の浸透特性の計測法に関する研究	東海 環境センター 処分研究部 処分研7 Gr	藤田朝雄 千々松正和 菊池広人	共同研究 研究生	西垣 誠 教授 岡山大学 環境理工学部 環境アライ工学科 他	平成10年度より
8. 亀裂岩石中でのコロイド及び溶質の移行研究 コロイド-イオン-岩石3相系相互作用メカニズムの解明と定量化	東海 環境センター 処分研究部 処分研7 Gr	亀井玄人 久野義夫	客員研究員 研究生	田中 知 教授 東京大学大学院 工学系研究科 3/14量子工学専攻 他	平成10年度より

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力の課題一覧(5/5)

【環境技術関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	機構側 受入箇所	機構側 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	備考
9. 我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究 同上 - 亀裂モデルの信頼性評価手法の開発	東海環境センター 処分研究部 システム解析Gr	井尻裕二 澤田 淳	共同研究	田中 誠 助手 京都大学大学院 工学研究科 土木システム工学専攻 他	平成10年度より
10-(1) 深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究 深部地質環境における微生物生態系の多様性と機能に関する研究	東濃 科学研究Gr	岩月輝希	共同研究	長沼 毅 助教授 広島大学 生物生産学部 生物生産学科 他	平成10年度より
- (2) 深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究 深部地下における微生物生態系とその物質循環系の解析			共同研究	今中 忠行 教授 京都大学大学院 工学研究科 合成・生物化学専攻 他	平成10年度より

## 2. 先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力概要報告

### (1) 高速増殖炉関係

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究											
研究協力課題	ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束											
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>京都大学エネルギー科学研究科</td> <td>塩津正博教授、白井康之助教授</td> </tr> <tr> <td></td> <td>京都大学エネルギー理工学研究所</td> <td>畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td>大洗工学センターシステム技術開発部</td> <td>熱流体技術開発G r 塚 公明 (副主研)</td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学エネルギー科学研究科	塩津正博教授、白井康之助教授		京都大学エネルギー理工学研究所	畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官	機 構 側	大洗工学センターシステム技術開発部	熱流体技術開発G r 塚 公明 (副主研)
大 学 側	京都大学エネルギー科学研究科	塩津正博教授、白井康之助教授										
	京都大学エネルギー理工学研究所	畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官										
機 構 側	大洗工学センターシステム技術開発部	熱流体技術開発G r 塚 公明 (副主研)										
研究協力実施場所	京都大学エネルギー科学研究科 京都府宇治市五ヶ庄											
通算研究期間 (予定)	平成7年4月1日 ~ 平成11年3月31日	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年12月16日~ 平成11年3月31日									
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究											
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>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、液单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><b>【研究内容（概要）】</b></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><b>【使用主要施設】</b></p> <p>京都大学エネルギー科学研究科 高温ナトリウム熱伝達実験装置 〔最高ナトリウム温度900℃（沸騰条件）、カバーガス：Ar、プール容積41ℓ〕</p>												

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

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

## 【研究成果】

### 1. 緒言

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

平成10年度は、平成9年度までに実施した系圧力、試験体予圧条件、コールドトラップ温度の依存性に関する試験結果の分析を行うとともに、これまでの成果を取りまとめ、外部発表を実施する。

### 2. 従来の研究

本共同研究に着手する以前に、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の理論値より大きい値になることを示した。その理由として、蒸発の寄与以外に対流の寄与を含むことを実験的に明らかにするとともに、発熱体近傍の二相境界層からの上昇蒸気に伴う過熱液流出による顕熱輸送考慮した新しい理論モデルを提案した。

一連の実験の際に、沸騰開始過熱度が次第に大きくなり、過熱度が100Kを越えても沸騰が開始しないような現象が観察された。沸騰開始過熱度が大きくなった原因として、液体金属ナトリウムは、カバ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. 実験装置及び試験体

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

図3に平成10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。共同研究初期に開発した手法によって、発熱体表面温度は、発熱リボンの電気抵抗と温度の関係から求めることが可能であり、限界熱流束到達時の急激な温度変化に対しても耐久性の高い試験体を用いている。

### 4. 実験結果及び考察

#### (1) 代表的熱伝達経過

試験発熱体の加熱電流をゆっくり連続的に上昇させて得られた代表的な熱伝達経過は、図4のA～D及びA'～C'に示すように大きく2つに分類される。AB, A'B'は、共に自然対流熱伝達評価式と一致して



いる。沸騰開始点は、図中B 及びB' である。経過BDでは、沸騰開始後表面温度が一旦核沸騰曲線上の対応点まで下降した後、熱流束が核沸騰曲線上を上昇して限界熱流束点D に至ると表面温度が膜沸騰域の対応点に向かって急上昇している。一方、B' 点のように沸騰開始沸騰開始過熱度が70K よりも高い場合沸騰開始以後表面温度が下降することなく膜沸騰へ移行する。この場合には、沸騰開始熱流束が同時に限界熱流束である。沸騰開始過熱度が100Kの場合、この直接遷移の限界熱流束は同一条件での核沸騰限界熱流束と同じであり、250Kでは、約2.5 倍になる。

## (2) 沸騰開始過熱度

ナトリウム中の酸素濃度を制御するコールドトラップ(CT)温度を378Kから433Kまで種々変えて沸騰開始過熱度を測定した。図5 は系圧力3kPa, バルク液温863Kの場合の沸騰開始過熱度 $\Delta T_i$ とCT温度の関係を示す。CT温度が398 K 以上の場合、 $\Delta T_i$ は3Kから40K の範囲であるが、CT温度が388Kから398Kの間では、10K から250Kまで大きくばらついている。CT温度が低くなるに従い $\Delta T_i$ が大きくなる傾向にあり、CT温度383K以下では殆どのデータが100K以上である。

図6 は系圧力14Pa, バルク液温973Kの場合の沸騰開始過熱度 $\Delta T_i$ とCT温度の関係を示す。この場合には、系圧力3Pa のような系統的なCT温度の影響は見られず、CT温度が400K以上となっても3kPaの場合に見られたような40K 以下の結果は一つも得られていない。

キャビティーモデルに従えば、沸騰が発熱体表面の気体を捕捉したキャビティーから開始しているのであれば、加熱を開始する前に予圧を与えてやると $\Delta T_i$ が上昇すると推測される。沸騰開始機構を考察するため、予め大気圧近傍まで加圧して5 分間保持した後、それぞれ3kPa及び14Paまで減圧してから加熱を開始した実験を実施した。実験結果を比較のため、それぞれ図2 及び図3 に▲で示す。バルク温度863KにおけるCT温度の系統的影響も同様に観察され、予圧の影響が全く見られないことは注目すべきである。こうしたことから、沸騰は活性なキャビティーから開始しているのではなくCT温度に依存する別の機構で開始していると推測される。

ナトリウムの表面張力は、液温863K~973Kで大気圧飽和状態の液体窒素の約100 倍、水の約10倍大きい。従って、他の液体に比較して伝熱面上のキャビティーに気体を捕捉しやすいが、同一の特性半径 $r_c$ を持つ活性なキャビティーからの沸騰には、はるかに大きな過熱度を要することが推測される。図7 は沸騰開始過熱度を式 $\Delta P = 2\sigma / r_c$  で求めたものを水と比較して示す。図示するように、水と同程度の $\Delta T_i$ となるには、水よりはるかに大きな活性キャビティーを必要とすることが分かる。このような大きな径のキャビティーが伝熱面に存在しないか、存在しても気体を捕捉出来ないことが考えられる。

## (3) 沸騰開始時熱流束及び限界熱流束

これまで、発熱試験体外周の温度境界層の外側においては、ナトリウム温度の垂直方向温度分布は実験中飽和温度でほぼ一定であることを確認しており、従って、試験体位置でのサブクール度は、系圧力に液位によるヘッドを加えた圧力での飽和温度に対して定義される。図8, 9 は、系圧力3Pa 及び14Pa について、それぞれ、発熱試験体位置での圧力から求めたサブクール度( $\Delta T_{sub}(P_L)$ )に対する沸騰開始時の熱流束 $q_i$ を示している。また、核沸騰の限界熱流束 $q_{cr}$ も合わせて示している。

沸騰開始過熱度 $\Delta T_i$ が約60°C以下の場合には、沸騰開始後、キャビティーの活性化によって温度が一旦下降して発達した核沸騰が実現し、以後熱流束は上昇し、限界熱流束に至る。沸騰開始過熱度 $\Delta T_i$ が60°C以上となると、沸騰開始と同時に膜沸騰へ遷移する直接遷移が発生した。直接遷移が発生する場合、 $q_i = q_{cr}$  であり、図8, 9 に△で示している。直線遷移時の熱流束は広く分布しており、核沸騰の限界熱流束の2 倍以上の熱流束に達していることが分かった。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

H10年度にて終了。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 「先行基礎工学分野に関する平成7年度研究協力概要報告」, PNC TN1430 97-001(1997)
- (2) 「先行基礎工学分野に関する平成8年度研究協力概要報告」, PNC TN1430 97-004(1997)
- (3) 塩津正博, 畑幸一, 竹内右人, 濱勝彦, 塚公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束」, 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究成果報告書, (1997.5)
- (4) 塩津正博, 白井康之, 畑幸一, 竹内右人, 濱勝彦, 塚公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束に関する研究」, 動燃事業団成果報告書, PNC TY9604 97-003(1997)
- (5) 塩津正博, 畑幸一, 竹内右人, 白井康之, 濱勝彦, 塚公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束」, 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究成果報告書 (1998.4)
- (6) 塩津正博, 畑幸一, 竹内右人, 白井康之, 濱勝彦, 塚公明, 「液体ナトリウム中の水平円柱における沸騰開始過熱度」, 第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1998.5)
- (7) M. Shiotsu, K. Hata, Y. Takeuchi, K. Hama and T. Sakai, "INCIPIENT BOILING SUPERHEAT IN LIQUID SODIUM", Proc. of 11th-International Heat Transfer Conference, Taylor & Francis, USA(1998)pp. 401-412
- (8) 「先行基礎工学分野に関する平成9年度研究協力概要報告」, PNC TN1430 98-001(1998)
- (9) 塩津正博, 白井康之, 畑幸一, 竹内右人, 濱勝彦, 塚公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束に関する研究- 伝熱面予圧縮の影響」, 動燃事業団成果報告書, PNC TY9604 98-002(1998)

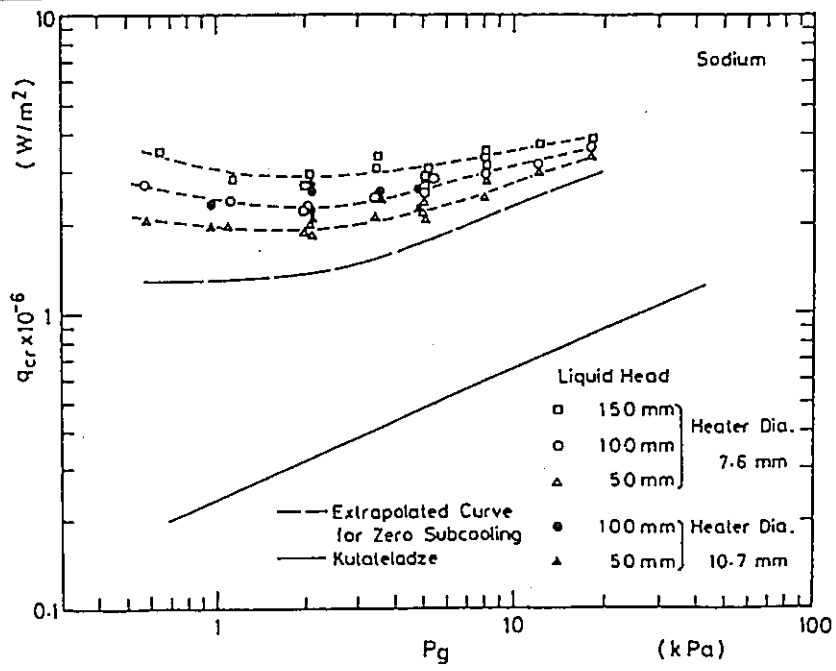


図1 従来研究

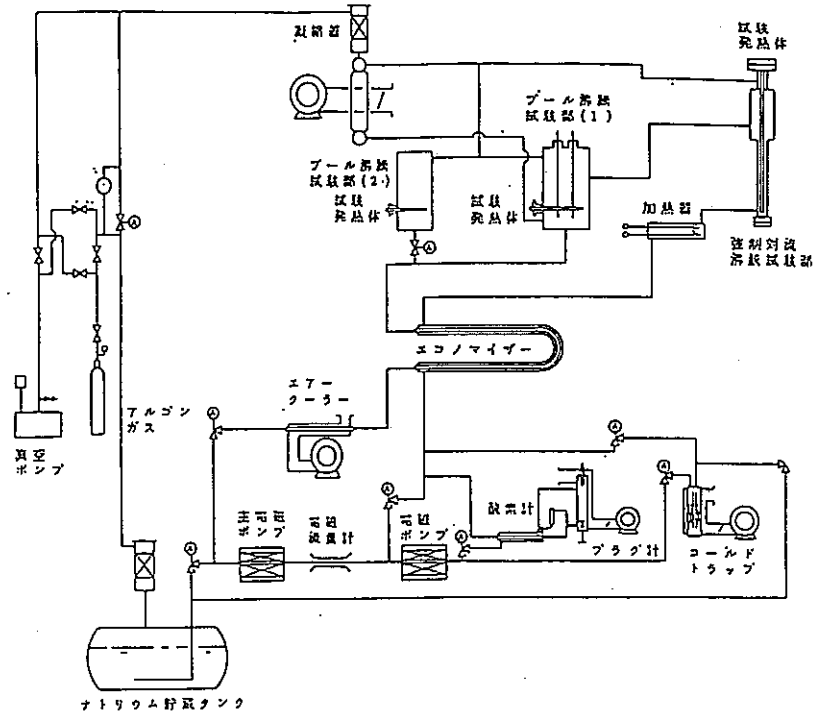


図2 試験装置

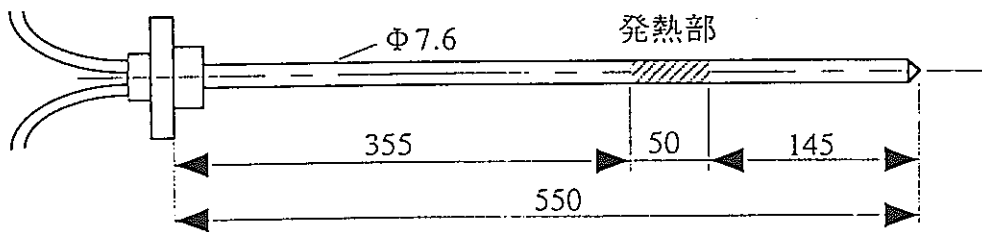


図3 発熱体構造図

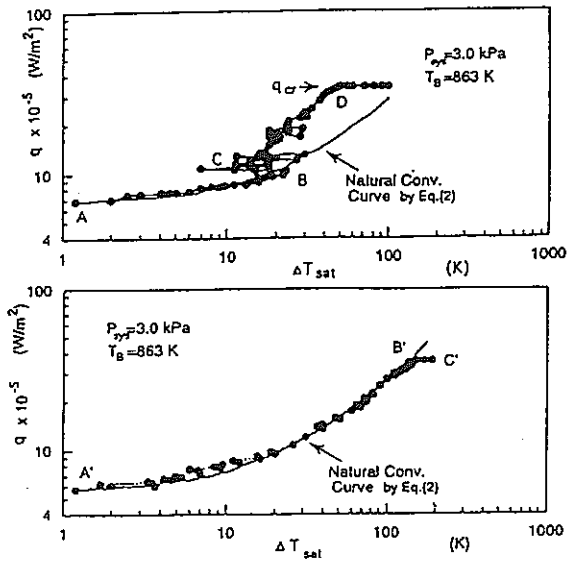


Fig.4 Typical Heat Transfer Processes in Liquid Sodium. CHF of Nucleate Boiling (Upper), and Direct Transition to Film Boiling (Lower).

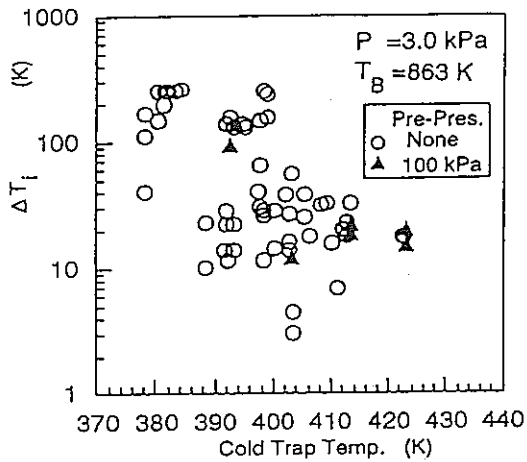


Fig.5 Incipient Boiling Superheat versus Cold Trap Temperature for  $T_B=863$  K.

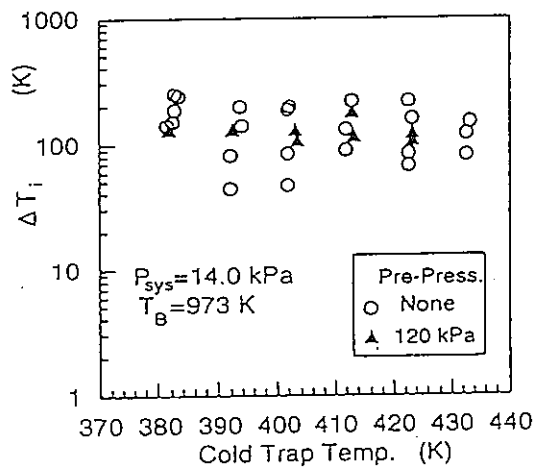


Fig.6 Incipient Boiling Superheat versus Cold Trap Temperature for  $T_B=973$  K

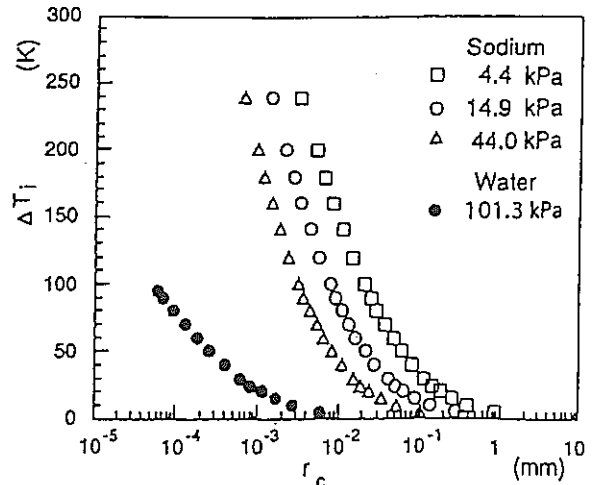


Fig.7 Estimated Surface Superheats for the Initiation of Boiling from Various Sized Active Cavities in Liquid Sodium. Comparison with Those in Water.

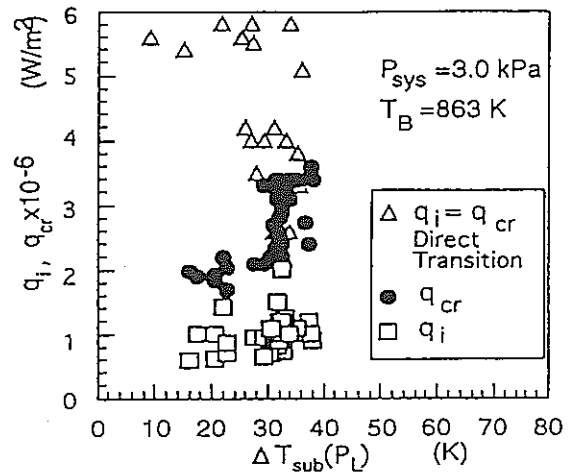


Fig.8 Incipient Boiling Heat Flux and Critical Heat Flux versus Subcooling for  $P_L$  at  $T_B=863$  K.

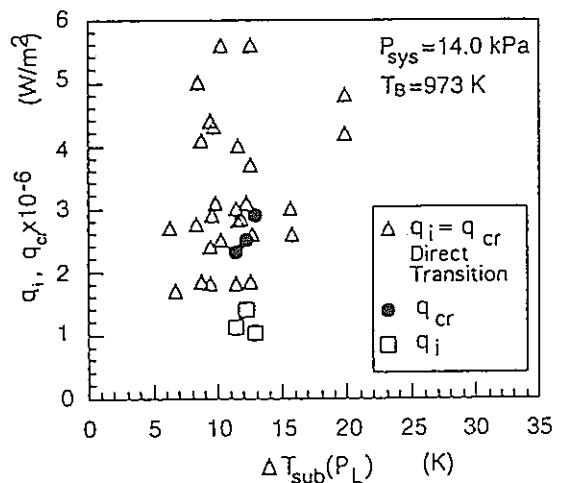


Fig.9 Incipient Boiling Heat Flux and Critical Heat Flux versus Subcooling for  $P_L$  at  $T_B=973$  K.

# 先行基礎工学分野に関する平成 11 年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高密度比気液二相流に関する基礎研究		
研究協力課題	中性子ラジオグラフィによる高密度比気液二相流の可視化と計測		
研究者所属、氏名			
大 学 側	京都大学原子炉実験所 教授 三島嘉一郎、 助教授 日引 俊、 助手 齊藤泰司  [ * 客員研究員 ** 研究生 ]		
機 構 側	大洗 高速炉安全工学 Gr. 飛田吉春		
研究協力 実施場所	京都大学原子炉実験所、機構 大洗工学センター 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 11 月～ 平成 12 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 10 年 12 月 25 日～ 平成 11 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		
<b>【研究目的】</b> 本研究は、高速炉の炉心損傷事故時に炉心に形成される燃料とスチールの混合プールの沸騰挙動の解明に関する基礎研究であり、炉心プールを模擬した高密度流体（熔融金属）の二相流を可視化測定することで、その流動特性を解明することを目的とする。			
<b>【研究内容（概要）】</b> 熔融低融点合金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、ボイド率、液相内速度分布などの基礎データを取得するとともに、同データを用いて機構の SIMMER-III コードのモデル検証・改良等を行うものである。			
<b>【使用主要施設】</b> 日本原子力研究所 東海研究所 JRR-3M			

## 【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年度は実際に溶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、ボイド率などの流動特性の計測を行った。平成9年度は、ボイド率などの物理量の計測をより詳細に系統的に行い、高密度比気液二相流の特性を明らかにするとともに、既存のドリフトフラックスモデル相関式等との比較検討を行った。平成10年度は、前年度までの実験結果に基づき、SIMMER-IIIコードで使用しているモデルの検証を行うとともに、ダウンカマー付きの試験部を用いて、主流部のボイド率相関に及ぼす2次流れの影響を調べるとともに、トレーサとしてAgCd3合金を用いた液相速度計測の予備実験を行い、測定性能を確認した。

## 【研究成果】

平成10年度には、平成9年度までに得られた結果をまとめ、空気-水系、ガリウム-窒素ガス系などの実験データと比較を行い、Kataoka-Ishiiの式の適用限界などについて評価を行った。さらに気泡の抵抗係数を求め、解析解との比較を行った。昨年度までの結果から、Kataoka-Ishiiの式が最もよく実験結果を予測するが、この相関式はプール体系の実験相関式であるため、流動様式と循環流の影響を分離して評価することが出来ない。すなわち、Kataoka-Ishiiの式をSIMMER-IIIコードに適用した場合、構成式自身が循環流の影響を含んでいるため、実際のシミュレーション結果においては、循環流の影響を過大評価する可能性がある。したがって、平成10年度は、流路内にダウンカマを設けた実験を行い、循環流の影響を調べた。さらに、コードの検証に必要な液相速度および気相速度を計測するために、溶融金属中にトレーサを入れて実験を行い、測定性能を確認した。

### 1. 実験装置

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

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

## 2. 実験結果と考察

### 2. 1 流動様式

Fig.2 は、中性子ラジオグラフィ高速度撮像法によって得られた鉛ビスマス-窒素ガス二相流プール内における気泡挙動一例である。このような可視化から、 $j_g^+ > 0.5$  では、変形した巨大スラグ気泡あるいはキャップ状気泡が観察された。同様な傾向は空気-水系の実験でも報告されている (Sudo, 1980; Yamaguchi & Yamazaki, 1982)。さらにこれまでの研究から (Mishima et al., 1998)、高密度比気液二相流の気泡形状と気泡速度の関係は、Clift らの線図とよく一致することが分かっている。

Fig.3 は中性子ラジオグラフィによって得られた気泡の抵抗係数を気泡レイノルズ数に対してプロットしたものであり、ガス-水銀系の実験結果も同時に示した (Shwerdtfeger, 1968; Hijikata et al., 1976)。図から実験値は推算値とよく一致しており、気泡の抵抗係数に対する気液密度比の影響はあまり大きくないことが分かる。

Fig.4 にプール内二次元ボイド率分布の一例として初期液高が 29cm の場合の計測結果を示した。気相流量が比較的低い場合 ( $j_g^+=0.0761$ ) には、幅方向 ( $x$  方向) ボイド率分布は流れ方向 ( $z$  方向) に対してほぼ一様であるが、気相流量が増加するに従って ( $j_g^+=0.276, 0.791$ )、ボイド率分布は  $z$  方向に沿って変化し、 $x$  方向中心にピークを有するようになる。これは気相流量の増加によりプール内に液相の循環流れが発生し、その流れに沿って  $x$  方向の中心近傍で気泡同士が衝突して大気泡となるもののその気泡径が安定限界を越えているため、すぐに分裂、再分散されて管壁方向に移動することによると考えられる。なお、中性子ラジオグラフィおよび液面高さ  $H$  から計測されるプール内平均ボイド率 ( $= (H-H_0)/H$ ) は低ボイド域を除いてほぼ 10% 以内で一致した。

### 2. 2 ドリフトフラックス相関

計測された見かけの気相速度  $j_g$  とボイド率  $\alpha$  は式(4)で表されるドリフトフラックス式により相関した。

$$v_g = \frac{j_g}{\alpha} = C_0(j_g + j_f) + V_{gi}, \quad \alpha = \frac{j_g}{C_0 j_g + V_{gi}} \quad (\because j_f = 0) \quad (4)$$

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

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\rho_g / \rho_f} \quad \text{for rectangular duct} \quad (5)$$

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

$$V_{gi} = \sqrt{2} \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4} \quad \text{for churn - turbulent flow} \quad (6)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 V_{gj}^+ &= V_{gj} / \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{1/4} = 0.0019 D_H^*{}^{0.809} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \quad \text{for } D_H^* \leq 30 \text{ and } N_{\mu f} \leq 2.2 \times 10^{-3} \\
 V_{gj}^+ &= 0.030 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0.157} N_{\mu f}^{-0.562} \quad \text{for } D_H^* \geq 30 \text{ and } N_{\mu f} \leq 2.2 \times 10^{-3} \\
 D_H^* &= D_H / \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}, \quad N_{\mu f} \equiv \frac{\mu_f}{\left( \rho_f \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \right)^{1/2}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

また、最近、Saito ら(1998) は、本研究と同様に FBR の安全解析を目的として二相流実験を行っている。実験条件を Table 2 に示す。

Fig.5, 6 は様々な系に対するドリフト速度と水力相当直径との関係を示す。実験値と推算値はよく一致しているが、ガス-熔融金属系、ガス-シリコンオイル系について過大評価あるいは、過小評価する傾向がある。これは、Kataoka-Ishii の式が主に空気-水系あるいは空気-グリセリン系のデータを用いて求められているからと考えられる。従って、今後、さらに広い条件のデータベースを用いて、式(7)を修正する必要があると考えられる。

Kataoka and Ishii (1987) は、 $j_g^+ < 0.5$  では Ishii (1977) によるドリフトフラックス相関式が適用できることを指摘している。これは、プール内の循環流の影響が相対的に小さくなるためであると考えられる。このことから、以下の式によって、広い範囲の気相速度に対して推算出来ると考えられる。

$$V_{gj}^+ = V_{gj, Ishii}^+ \exp(A j_g^+) + V_{gj, Kataoka \& Ishii}^+ \{ -\exp(A j_g^+) \} \tag{8}$$

係数 A は  $j_g^+ = 0.5$  において  $\exp(A j_g^+) = 0.5$  となる条件から、 $-1.39$  と見積もられる。Fig.5 からわかるようにドリフト速度は容器径の減少と共に減少し、式(6)の値に漸近する。これは、小口径の容器では、循環流の影響が相対的に小さくなるためであると考えられる。チャーン・タービュレント流の場合、式(6)は式(6)(7)から得られる限界径よりも小さい場合にプール体系に適用できると考えられる。

$$744 \left( \rho_g / \rho_f \right)^{1/4} N_{\mu f}^{0.695} \geq D_H^* \tag{9}$$

これは、式(9)から計算される径よりも大きい容器の二相流に対しては、循環流の影響を無視できないことを意味する。式(9)から計算される限界径は鉛-ビスマス、ガリウム、水の各系に対して、8, 10 および 40mm と計算できる。

Fig.7 に鉛ビスマス系の実験値を式(2)-(7)からの推算値と比較したものを示す。本実験では、プールの初期液深を変化させて実験を行ったが、実験値に与える初期液深の影響は顕著ではなかった。チャーン流に対するドリフト速度を用いた場合、低いボイド率において、実験値とよく一致していることがわかる。Fig.8 および Fig.9 は Saito ら(1998) および Baily ら(1956)の実験値を示している。この図から式(4)(8)を用いた推算値と良く一致していることが分かる。

Fig.10 に実験値と推算値との比較を示す。図から、実験値はほぼ 30%以内の精度で、予測できていることがわかる。



### 2.3 ダウンカマの影響

Fig.11 にダウンカマを設置した流路の概略図を示す。ダウンカマは厚さ 1mm のアルミニウム製で、長さが 133mm である。実験は初期液深  $H_0=20\text{cm}$  のみについて行った。実験方法および計測方法は、ダウンカマなしの実験と同様である。

Fig.12 に二次元ボイド率分布の一例を示す。ダウンカマなしの実験と同様、比較的低い気相速度の場合には、主流路内において、幅方向 ( $x$  方向) ボイド率分布は流れ方向 ( $z$  方向) に対してほぼ一様であるが、気相流量が増加するに従って、ボイド率分布は主流路下部に  $x$  方向に二つのピークを有するようになる。これはダウンカマからの流れがノズルからのガスの流れとぶつかるために生ずるものと考えられる。さらに、ダウンカマ上部にもピーク現れるが、これは、下向きの流れによって、停滞した気泡によるものである。

Fig.13 に中性子ラジオグラフィから求めたプール平均ボイド率と気相の見かけ速度との関係を示す。図から、ダウンカマを設置した場合においても、Kataoka-Ishii の式による推算値と良く一致していることが分かる。これは、二次元ボイド率分布からも分かるように、主流路では全体として、上向きの液相速度があるものの、ノズルとダウンカマの設置状態が最適ではないために、主流路内に循環流の影響が大きく、結果としてプール体系に対する式で予測できたものと考えられる。

### 2.4 液相速度計測の予備実験結果

液相速度を測定するために、鉛ビスマス溶融金属中に  $\text{AgCd}_3$  合金のトレーサを入れて、予備的な実験を行った。 $\text{AgCd}_3$  粒子は平均粒径が約 1mm であり、カドミウムを含むために、中性子をほぼ完全に吸収するため、中性子ラジオグラフィにおいては、黒い点として識別できる。

Fig.14 図に中性子ラジオグラフィによって、得られた画像の一例を示す。画像内の明るい部分が気泡を表し、黒い点が  $\text{AgCd}_3$  トレーサを表している。その他の領域は、鉛ビスマス溶融金属である。図から、トレーサを明瞭に識別することができ、 $\text{AgCd}_3$  トレーサを用いて、液相速度を計測できることが分かった。

### 3. まとめ

溶融金属-窒素ガス二相流を中性子ラジオグラフィにより可視化し、気泡挙動の計測および、ボイド率の計測を行った。さらにこれまでの実験結果を様々の実験値、実験相関式と比較検討し、SIMMER-III コードに適用可能な相関式を提案した。さらに、ダウンカマを設けた実験を行い、循環流の影響を考察した。また、基礎的データとして必要な液相速度計測に関連して、 $\text{AgCd}_3$  トレーサを用いた可視化実験を行い、トレーサ法により、液相速度計測が可能であることを示した。

これらの経過を踏まえ、平成 11 年度にはトレーサ法による液相速度の計測及び、ダウンカマを設けた実験を行い、より詳細なデータを取得する予定である。

中性子ラジオグラフィ実験は、日本原子力研究所 JRR-3M を利用して実施したものであり、同研究所研究炉技術開発室松林政仁氏に協力していただいた。ここに記して謝意を表したい。

使用記号		ギリシャ文字	
$A$	定数	$\alpha$	ボイド率
$C_0$	分布パラメータ	$\rho$	密度
$C_D$	抵抗係数	$\Delta\rho$	気液密度差
$d_c$	球相当直径	$\mu$	粘度
$D_H$	水力相当直径	$\sigma$	表面張力
$g$	重力加速度		
$H$	液位	上付文字	
$H_0$	初期液位	+	無次元
$j_g$	気相見かけ速度	*	無次元
$j_l$	液相見かけ速度		
$M$	Morton 数	下付文字	
$N_{\mu f}$	粘性数	area	空間平均
$Re$	Reynolds 数	exp	実験値
$V_c$	検査体積	P	プール平均
$V_{gi}$	ドリフト速度	pred	推算値
$x$	幅方向距離		
$z$	鉛直方向距離		

### 参考文献

- 1) Baily, R. V., Zmola, P. C., Taylor, F. M., and Planchet, R. J., 1956, "Transport of Gases through Liquid-Gas Mixture," AIChE New Orleans Meeting, New Orleans, USA.
- 2) Clift, R., Grace, J. R., Weber, M. E., 1978, Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, New York, USA.
- 3) Hibiki, T., Mishima, K., Yoneda, K., Fujine, Tsuruno, A., and Matsubayashi, M., 1994, "Visualization of Fluid Phenomena Using a High Frame-Rate Neutron Radiography with a Steady Thermal Neutron Beam," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. A351, pp. 423-435.
- 4) Hibiki, T., Mishima, K., and Matsubayashi, M., 1995, "Application of High-Frame-Rate Neutron Radiography with a Steady Thermal Neutron Beam to Two-Phase Flow Measurements in a Metallic Rectangular Duct," Nuclear Technology, Vol. 110, pp. 422-435.
- 5) Hibiki, T., Mishima, K., and Nishihara, H., 1997, "Influence of Scattered Neutrons on Void Fraction Measurement of Two-Phase Flow Using Thermal Neutron Radioscopy," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 34, pp. 996-1005.
- 6) Hijikata, K., Mori, Y., and Watabe, M., 1976, "Hydrodynamic Behavior of Bubble in Mercury," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. B., Vol. 42-359, pp. 2133-2140 (in Japanese).
- 7) Hirao, Y., Kawanishi, K., and Tsuge, A., 1986, "Experimental Study on Drift Flux Correlation Formulas for Two-Phase Flow in Large Diameter Tubes," Proceedings of 2nd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, 1-88, Tokyo, Japan
- 8) Ishii, M., 1977, "One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Flow Regimes," Argonne National Laboratory Report, ANL-77-47.
- 9) Ishii, M., and Chawla, T. C., 1979, "Local Drag Laws in Dispersed Two-Phase Flow," Argonne National Laboratory Report, ANL-79-105.
- 10) Ishii, M., and Kocamustafaogullari, G., 1985, "Maximum Fluid Particle Size for Bubbles and Drops," ASME Winter Annual Meeting, Proceedings of Fundamental Aspects of Gas-Liquid Flow, FED-Vol. 29, pp. 99, Florida, USA.
- 11) Kataoka, I., and Ishii, M., 1987, "Drift Flux Model for Large Diameter Pipe and New Correlation for Pool Void Fraction," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, pp. 1927-1939.

- 12) Kondo, Sa., Tobita, Y., Morita, K., and Shirakawa, N., 1992, "SIMMER-III: An Advanced Computer Program for LMFBR Severe Accident Analysis," Proceedings of International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant, IV, 40.5-1, Tokyo, Japan.
- 13) Matsubayashi, M., and Tsuruno, A., Neutron Radiography (4), (Ed. J.P. Barton),
- 14) Gordon & Breach Science Publ., Yverdon, Switzerland (1994) 415.
- 15) Mishima, K., and Hibiki, T., 1996, "Quantitative Method to Measure Void Fraction of Two-Phase Flow Using Electronic Imaging with Neutrons," Nuclear Science and Engineering, Vol. 124, pp. 327-338.
- 16) Mishima, K., Hibiki, T., Saito, Y., Tobita, Y., Konishi, K., and Matsubayashi, M., 1998, "Visualization and Measurement of Gas-Liquid Metal Two-Phase Flow with Large Density Difference Using Thermal Neutrons as Microscopic Probes," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (in print).
- 17) Nonaka, N., Miyake, O., and Kondo, Sa., 1992, "Characterization of LMFBR Severe Accident Progression," Proceedings of International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant, Tokyo, Japan.
- 18) Saito, M., Sawada, T., Teraoka, Y., and Nezu, A., 1998, "Dispersion Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Pools," Proceedings of 6th International Conference of Nuclear Engineering, ICONE-6, San Diego, California, USA.
- 19) Sawi, M. EL., 1974, "Distorted Gas Bubbles at Large Reynolds Number," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 62, pp. 163-183.
- 20) Sudo, Y., 1980, "Estimation of Average Void Fraction in Vertical Two-Phase Flow Channel Under Low Liquid Velocity," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 17, pp. 1-15.
- 21) Schwerdtfeger, K., 1968, "Velocity of Rise of Argon Bubbles in Mercury," Chemical Engineering Science, Vol. 23, pp. 937-938.
- 22) Yamaguchi, K., and Yamazaki, Y., 1982, "Characteristics of Countercurrent Gas-Liquid
- 23) Two-Phase Flow in Vertical Tubes," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.
- 24) 19, pp. 985-996.
- 25) von der Hardt, P., and H. Rottger, eds., Neutron Radiography Handbook, D. Reidel,
- 26) Dordrecht, Holland (1981).
- 27) 三島, 日引, 原子力工業, 41 (1995) 46-53.
- 28) 三島, 日引, 他, 日本機械学会論文集 (B編), 61[591] (1995) 161-168.
- 29) 日引, 三島, 放射線, 22[1] (1996) 35-42.

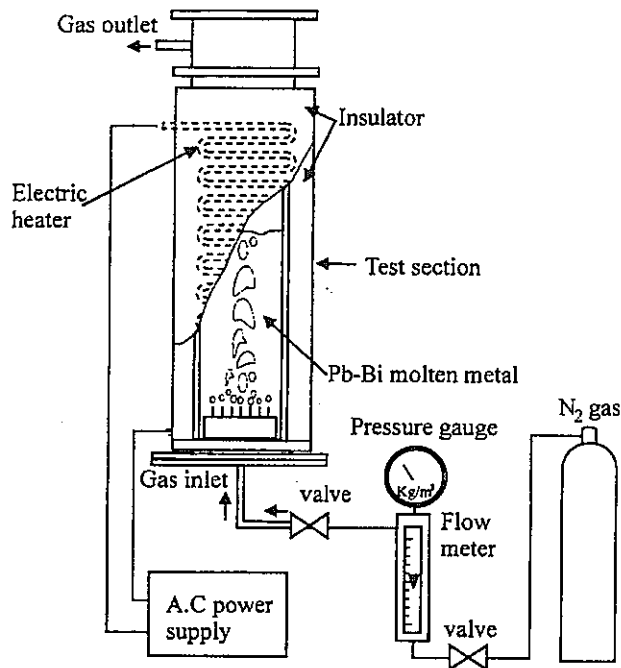


Fig.1 Schematic diagram of test rig.

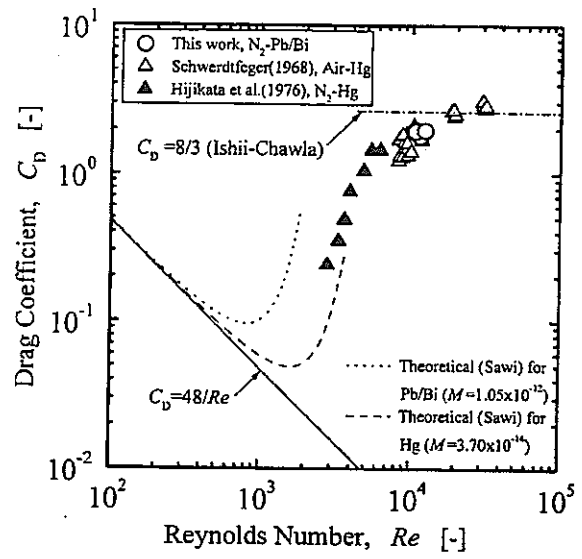


Fig.3 Drag coefficients of bubbles.

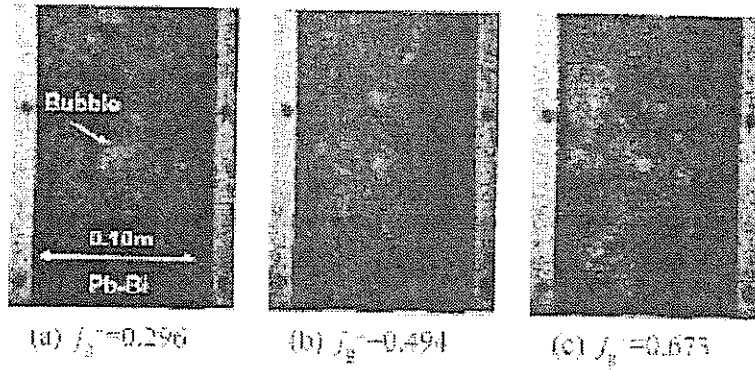


Fig.2 Original images obtained by high frame-rate neutron radiography (frame rate:500 frames/s).

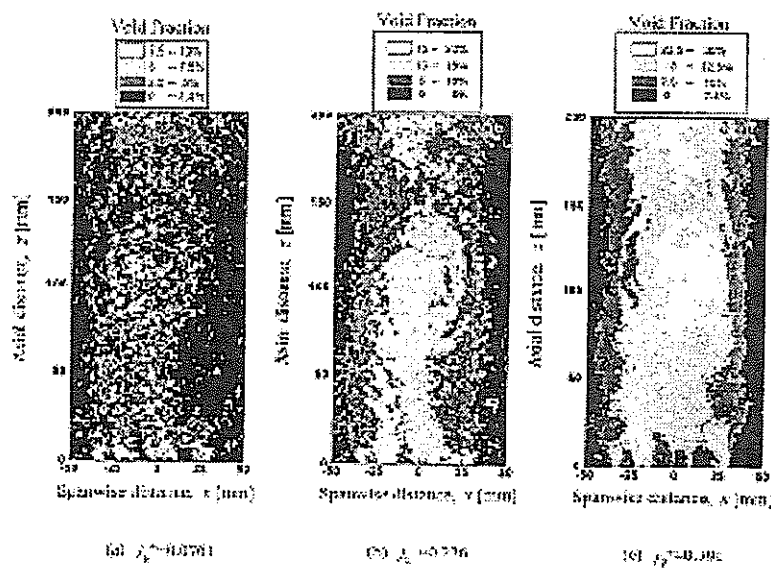


Fig.4 Two-dimensional void distribution in a pool.

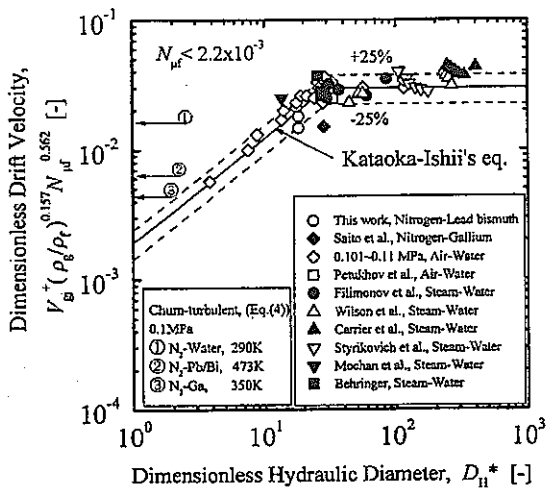


Fig.5 Dependence of dimensionless drift velocity on dimensionless hydraulic diameter.

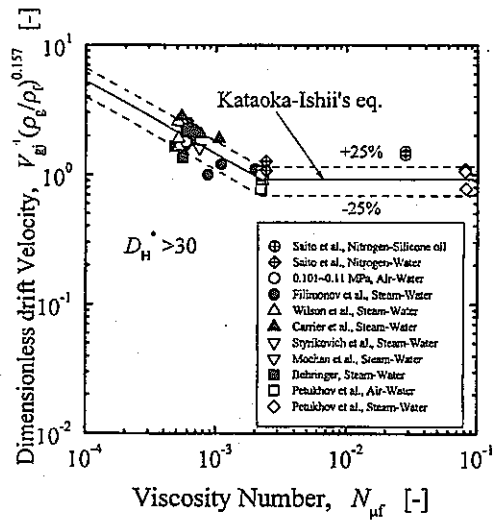


Fig.6 Dependence of dimensionless drift velocity on viscosity number.

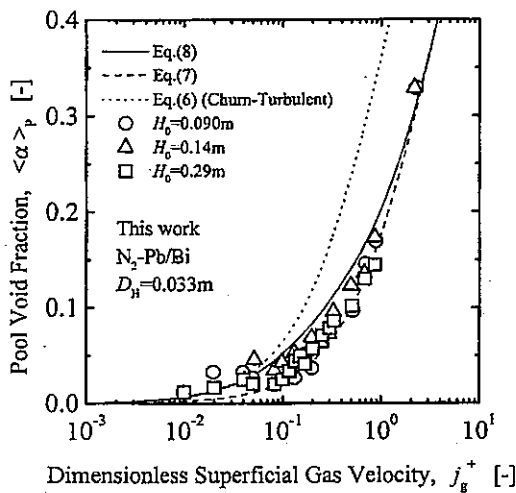


Fig.7 Variation of pool void fraction with superficial gas velocity.

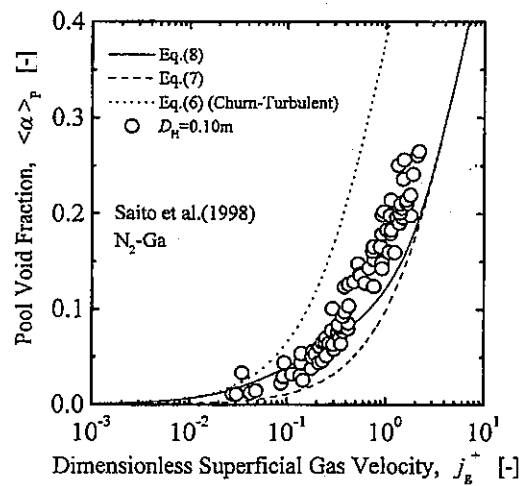


Fig.8 Variation of pool void fraction with superficial gas velocity.

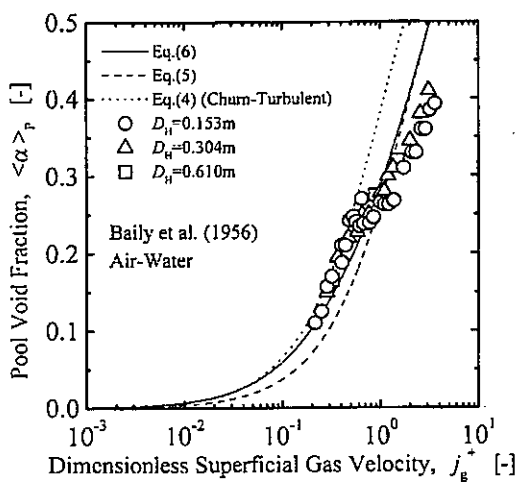


Fig.9 Variation of pool void fraction with superficial gas velocity.

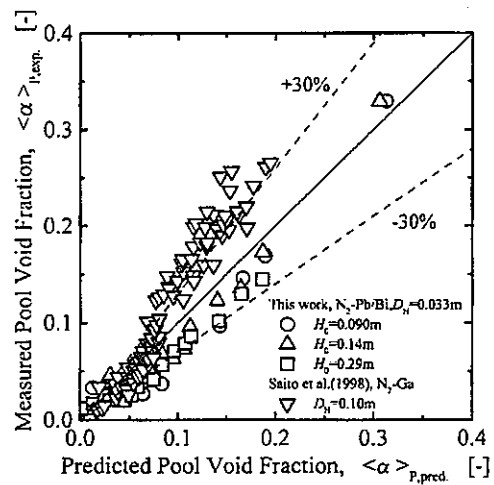


Fig.11 Comparison of measured pool void fraction with predicted value.

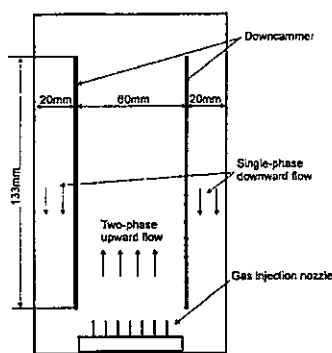


Fig.11 Schematic of diagram of test rig. diameter.

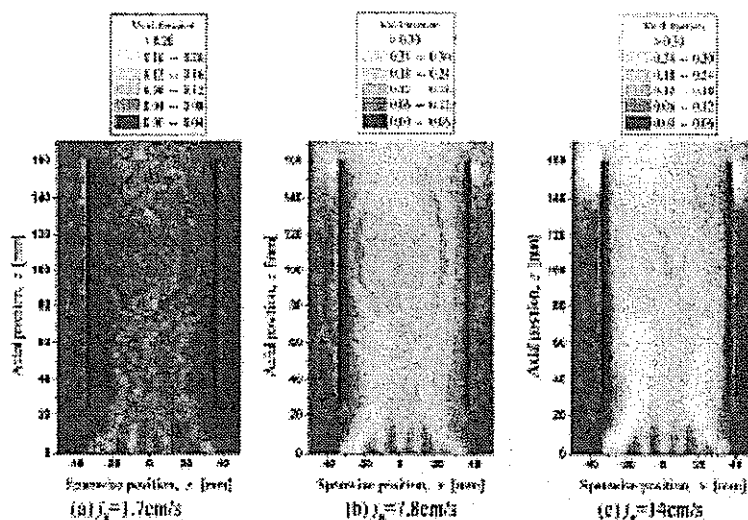


Fig.12 Two-dimensional void distribution in a pool.

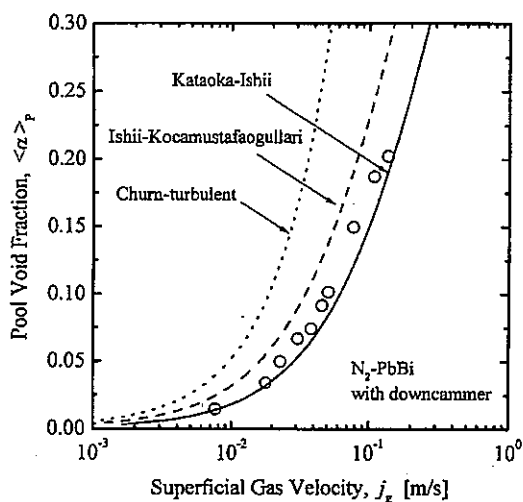


Fig.13 Variation of pool void fraction with superficial gas velocity.

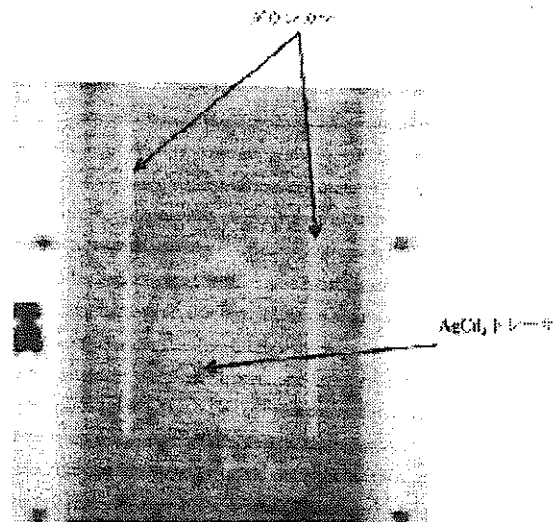


Fig.14 Original image obtained by high frame-rate neutron radiography (frame rate: 500 frames/s).

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成11年度には、トレーサ法による液相速度の計測及び、ダウンカメラを設けた実験を行い、データを取得するとともに、SIMMER-IIIのモデル検証を行う。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

K. Mishima, T. Hibiki, Y. Saito, H. Nishihara, Y. Tobita, K. Konishi, M. Matsubayashi, "Visualization and measurement of gas-liquid two-phase flow with large density difference using thermal neutrons as microscopic probes," Nuclear Instruments and Methods in Physic Research A, 424 (1999) 229-234.  
 T. Hibiki, K. Mishima, Y. Saito, Y. Tobita, K. Konishi, M. Matsubayashi, "Study on flow characteristics in gas-molten metal mixture pool simulating core disruptive accident of FBR," Prof. of the 5<sup>th</sup> ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conf., March 15-19, 1999, Sandiego, California.

# 先行基礎工学分野に関する平成 10 年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高密度比気液二相流に関する基礎研究		
研究協力課題	高解像度陽子線ラジオグラフィー法による液体金属-ガス二相流及び気泡挙動の研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	京都大学大学院 工学研究科原子核工学専攻 芹澤 昭示 教授、高橋 修 助手、河原 全作 助手 [ * 客員研究員 ** 研究生 ]		
機 構 側	大洗工学センター 安工部 炉安Gr 飛田 吉春、小西 賢介		
研究協力実施場所	大洗工学センター安全工学部 高速炉安全工学室		
通算研究期間 (予定)	平成 9 年 4 月～ 平成 1 1 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 2 月 4 日～ 平成 11 年 3 月 31 日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>                      炉心損傷時の熔融炉心物質多相流に関する基礎的な知見を得ることを目的とする。特に、高密度比気液二相流のボイド率に関する相関式の評価、気泡径上、動態などを種々の可視化技術を駆使して実験的に解析し、通常流体気液二相流特性との比較検討から、気液密度比の影響を探る。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b>                      本研究グループが開発した陽子線ラジオグラフィー（加速器により加速された陽子線）を用いて液体金属-ガス二相流のマクロ及びミクロ構造についての基礎研究を展開する。陽子線は中性子と異なり荷電粒子であるためビームの制御・収束性は格段に優れており、従来の中性子ラジオグラフィー法に比べ陽子線ラジオグラフィー法は高解像度のみならず、高速現象への適用性で勝る。このため、液体金属のような不透明流体中での気泡挙動についてもより一層鮮明な画像が得られる。本研究では時に、液体金属系気液二相流のボイド率相関式の改良とデータベースの構築、陽子線ラジオグラフィー法による気泡径上及び動態・拡散挙動の可視観察並びに数値シミュレーションを行う。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>                      京都大学理学部タンデム型加速器、東京大学原子核研究所サイクロトロン X線発生装置（京都大学）</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

ボイド相関式の評価、陽子線ラジオグラフィ法の適用性、NaK 中での気泡挙動の測定などを行った。

### 【研究成果】

#### 1. NaK 中における単一気泡上昇速度の測定

気泡挙動の定量的測定については高エネルギー研究所サイクロトロンのマシントイムを申請し、磁性流体を用いて行ったが、実験途中で試験部観察部を構成する薄膜部が破損し、放射化された磁性流体の一部が漏洩したため、十分なデータを取ることができなかった。そこで、マシントイムの関係から、陽子線ラジオグラフィ法の代わりに、X線法による可視化手法を用いて、室温で液体状態にあるナック（NaK-78）中でのヘリウムガス気泡の上昇運動とその抗力係数を測定した。なお、X線を用いた可視化では陽子線ラジオグラフィ法と比べると、画像の解像度は非常に悪いため、得られた画像をコンピュータで画像解析し、そのイメージから必要な情報を定量化して求めた。

実験装置は図1に示すように、X線発生装置、試験容器、蛍光板、ビデオカメラからなる。使用したX線発生装置の管電圧は最高で90kV、電流値は最大で50mAである。試験装置はステンレス製矩形容器で、観測窓には厚さ20ミクロンのステンレス箔を用いた。使用した流体は液体金属のナック（NaK-78）で、ヘリウムガス気泡は容器下部のノズルから注入した。蛍光板は化成オプトニクス希土類蛍光板（ $Cd_2O_2S:Tb$ ）を用いた。この蛍光板の10%残光時間は1.2ミリ秒で、ビデオカメラで撮影した映像を画像処理して、気泡界面の位置、大きさ、形状、速度などを測定した。気泡は注入後、約20mm～30mm上昇した後、終端速度に達した。

図2は流体層厚さ $d=10mm$ の場合の気泡径 $d_b$ と気泡の上昇速度の関係を、また、図3は流体層厚さと気泡速度の関係を示した物である。図2中の実線は水の場合の参考値の一例である。後述の気泡プリュームによる容器内循環のシミュレーションで用いられた富山らによる抗力係数から計算される気泡終端速度の値は実験値と定量的にも定性的にも良く一致する。このことから、NaK系における気泡挙動には通常流体に対する知見がほぼ適用できると言える。

#### 2. 液体金属系気液二相流の流動様式とボイド率相関式

液体金属系気液二相流の流動様式及びボイド率に関するデータベースについて調査研究を行い、各種相関式の比較・検討を行った。液体金属系気液二相流の流動様式に関する系統的な実験結果の報告例は極めて少なく、筆者らのNaK-窒素ガス系垂直上昇二相流における測定例以外には見あたらなかった。図4は常温・常圧下における測定結果である。図中に通常流体に対する三島-石井の相関式を示した。この比較から、NaK系気液二相流の流動様式もほぼ通常流体と大差ない特性を示していると言える。



一方、液体金属系二相流のボイド率については 1960 年代からカリウム、ナトリウムなどにおける実験データの蓄積がなされるようになり、その後水銀系気液二相流データも報告されるようになった。ただ、初期の頃の実験では測定精度に問題点があり、信頼性に乏しい物が少なくない。図5及び図6はそれぞれナトリウム及びカリウム二相流のホールドアップ(液相体積率)の実測値である。ほぼ Lockhart-Martinelli 相関で表される。また、表1は筆者らの式を除いて液体金属系気液二相流を対象に提案されたボイド率相関式の一覧である。

図7は表1に示すボイド率相関式を圧力  $1 \text{ata}$ 、 $J_L=1 \text{m/s}$ 、 $D_c=10 \text{mm}$  の条件に対して計算し、比較した物である。このように相関式は相互に大きく異なり、それぞれの適用性、信頼性を十分検討する必要がある。1986年に Unger らは液体金属 MHD 発電機開発の基礎データとして、水銀系での実験を行うとともに、多くの実験データベースを用いて相関式の信頼性のチェックを行っている。その結果、既存の相関式の中では筆者らの相関式が最も予測精度が高いと結論し、そこで用いられている物理量を参考に表1中の実験式を導出している。

図8は Unger らの水銀系二相流データといくつかの相関式との比較である。また、図9は筆者らの相関式と代表的なカリウム系二相流データとの比較である。筆者らの相関式は元々水-蒸気系をベースに求めた通常流体一般に対する相関式であるが、液体金属系への適用性にも優れていること、液体金属系二相流と通常流体二相流とで本質的な相違が認められないこと、などが結論として挙げられる。

以上は流動系液体金属二相流のボイド率に関する考察であるが、静止液系については、従来からその適用性の広さと簡便さから、ドリフトフラックス・モデルが通常流体に対して有効であることが知られている。斎藤らは、最近中性子ラジオグラフィーを用いて、鉛ビスマス溶融金属-窒素ガス二相流のボイド率測定を行い、通常流体同様、ドリフトフラックス・モデルが適用できることを示した。

### 3. 気泡プリュームによる容器内液体金属循環流とボイド挙動のシミュレーション

ボイド率や気泡の効力係数などの静的特性については、液体金属・通常流体との相違は顕著でないことが判明した。次に動的特性を調べるため、気泡プリュームによって容器内に誘起される気液二相循環流の揺動特性を調べるため、異なる4種類の流体特性について数値シミュレーションを行った。これは神戸大学富山教授、大学院生島田直樹氏の支援を受けて行った。計算体系を図10に示す。計算は3次元の二流体モデルとし、直径3mmの気泡について行った。仮想質量係数は0.5とした。

図11にシミュレーション結果を示す。この結果から、NaK-アルゴンガス系及びナトリウム-ナトリウム系ではプリュームの揺動が顕著に見られたのに対して、水-空気系、水銀-アルゴン系ではあまり見られない。これは終端速度が大きいときに見られることから、その影響と考えられる。

#### 4. 陽子線ラジオグラフィー方による二相流及び沸騰挙動の可視化観察

不透明管内の流れや液体金属のような不透明流体二相流挙動の可視化観測に中性子ラジオグラフィー法がしばしば用いられるが、鮮明な画像を求めるのが困難であり、また、沸騰現象のような高速現象の観察には必ずしも最適とは言えない。筆者らが開発した陽子線ラジオグラフィー法は、加速器で加速された陽子線が荷電粒子であるため、電磁場を用いることによりビームの収束性を高めることが可能であり ( $\sim 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>s)、粒子の直進性も良好であるため、解像度が高く、不透明管内の微細気泡も鮮明に検出できる。

図12に原理図を示す。加速器からの陽子線ビームはQレンズ及びスリットで約3mm径にした後、金箔での弾性散乱を行い、スリットを通して平行性を高める。陽子線のエネルギーが3MeV以下ではカプトン膜(7.5ミクロン)を、それ以上のエネルギーではハーバー箔(5ミクロン)を介してビームを大気中に取り出し、試験容器に入射させる。容器を透過したビームは蛍光板を用いて可視光に変換し、ビデオカメラで撮影する。大気中での陽子の減衰を軽減するため、ヘリウム雰囲気とした。蛍光板は10%残光時間が1.2msのGd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tbを用いた。加速器は京都大学理学部タンデム型加速器(14MeV)または高エネルギー研究所サイクロトロンのマシントイムを利用して行った。陽子線による可視化の有効視野は20mmである。なお、陽子線エネルギーの減衰は媒質の原子を取り巻く電子とのクーロン相互作用であり、その減衰特性はBetheの式によって与えられ、図13に示す通りである。14MeVの陽子線を用いても数mm程度の流体層しか用いられないのでマイクロチャンネル内流動の観察に適している。また、中性子の場合と異なり、いわゆるグレイレベルを求めることができない欠点がある。

まず、従来の中性子ラジオグラフィー法との比較を行うため、図14に示す容器内の磁性流体中にヘリウムガス気泡を吹き込み、可視化実験を行った。中性子ラジオグラフィー法による観察は同じ容器で他の研究者に依頼して行った。陽子線ラジオグラフィー法では一つの気泡が鮮明に観測できたが、中性子ラジオグラフィー法では大量の気泡を吹き込んだ場合のみ、プリュームが観測された。また、磁性流体中の白金線からの沸騰及び自然循環系における細管内沸騰特性の可視観察も行った(図15, 16)。

#### 5. 結論

以上、現在までに得られた研究成果と現在進行中の課題についてまとめた。まだ、未完成の部分も多いが、現在までの知見から、通常流体と異なる液体金属系特有の特性は見あたらないと考えられる。

研究者	相関式	備考
Smissaert (1963)	$S=0.815 \left[ \left( \frac{x}{1-x} \right) \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \left( \frac{\sigma_s}{\mu_L j_L} \right) \left( \frac{j_L^2}{gD} \right)^{-A} \right]^{0.416}$ $A=0.420-0.135 \log \left( \frac{x}{1-x} \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)$	窒素ガス-水銀垂直上昇流 円管流路 (内径 50.8mm, ニッケル皮膜ステンレススチール製), 水銀系加表面活性剤 (ナトリウム 0.1%, マグネシウム 0.02%, タタン 0.0001%)
Baroczy (1965)	Diagrammatically given	物性値インデックス $(\mu_L/\mu_G)^{0.5}(\rho_L/\rho_G)$
Balzhiser ら (1965)	$\alpha=1-0.574 X_{ii}^{0.312}$	カリウム蒸気-カリウム水平流, 円管流路 (内径 12.75mm, ハイネス 25 製), 圧力 $P=0.004-0.11\text{MPa}$ , 温度 $T=460-775^\circ\text{C}$
Lurie (1965)	$S=\frac{75}{X_{ii}}$	ナトリウム蒸気-ナトリウム垂直上昇流, 二重管流路 (内管外径 1/4 インチ, 外管内径 1/2 インチ), 圧力 $P=1.5-10\text{psia}$ , 温度 $T=657-844^\circ\text{C}$
Chen & Kalish (1970)	$\ln(1-\alpha)=-1.59+0.518[\ln X_{ii}]$ $-0.0867[\ln X_{ii}]^2$	カリウム蒸気-カリウム垂直上昇流, 円管流路 (内径 15.7mm), 最高温度 $1000^\circ\text{C}$ ボイド率 $\alpha$ は測定されず, 環状モデル $\phi_L^2=1/(1-\alpha)^2$ で計算
Serizawa & Michiyoshi (1973)	$\alpha=1-[(1-x)^2(1+Kx)]^{1/2}$ $K=c \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) (j_L)^{1/2} \quad (j_L: \text{m/s})$ $c=1.3 \text{ (bubbly flow)}$ $1.0 \text{ (slug, churn, annular flows)}$	質点速度の効果を考慮
Yamazaki & Yamaguchi (1980)	$\frac{\alpha}{(1-\alpha)(1-K\alpha)} = \frac{\beta}{1-\beta} = \frac{\rho_L}{\rho_G} \frac{x}{1-x}$ $K=1 \quad (E_0\lambda(\mu_L/\mu_G)(\rho_G/\rho_L) \geq 0.00002)$ $0.57 \quad (E_0\lambda(\mu_L/\mu_G)(\rho_G/\rho_L) < 0.00002)$	使用実験データ Aladyev ら (1969) <sup>(1)</sup> カリウム蒸気-カリウム Milliot ら (1967) <sup>(2)</sup> アルゴンガス-ナック Ochiai ら (1972) <sup>(3)</sup> アルゴンガス-ナトリウム ガス-水銀系には適用不可
Grolmes & Fauske (1982)	$\frac{(1-\alpha)^2 [1+75(1-\alpha)]}{\alpha^{1.5}} = X_{ii}^2$	Wallis によるナトリウム蒸気-ナトリウム水平管フラッシング系に依拠
Unger ら	$\alpha=0.402(\rho_L/\rho_G)^{0.300} (j_L/gD)^{0.04} x/(1-x)^{0.228}$	水銀-R113 $j_L=0.48-0.84\text{m/s}$ , $350-360\text{K}$ 水銀-窒素 $j_L=0.66-2.58\text{m/s}$ , $\sim 300\text{K}$

$$X_{ii} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.5} (\rho_L/\rho_G)^{0.5} (\mu_L/\mu_G)^{0.1}, \quad E_0 = (\rho_L - \rho_G) g D, \quad \sigma_s = \nu_L^2 \rho_L / D, \quad \sigma_s, \quad D: \text{管径}$$

表1 液体金属系気液二相流のボイド率相関式

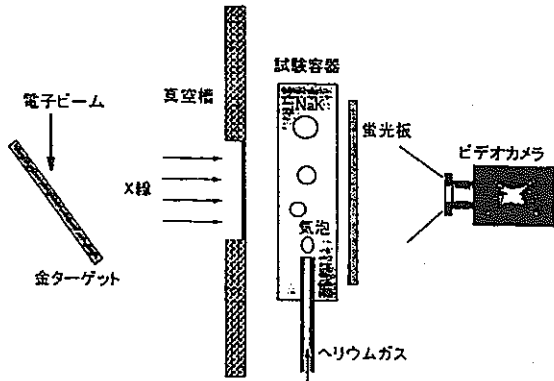


図1 X先による可視化

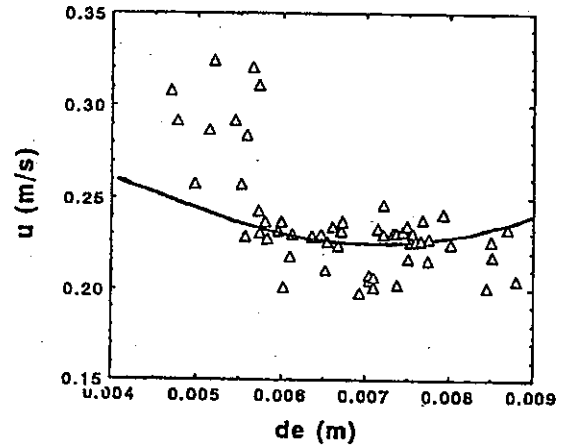


図2 気泡径と上昇速度 (NaK 厚さ 19mm)

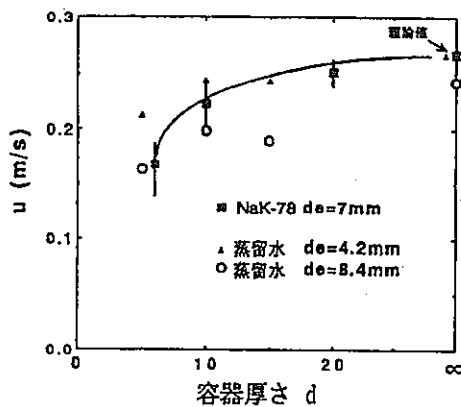


図3 上昇速度に与える壁面効果

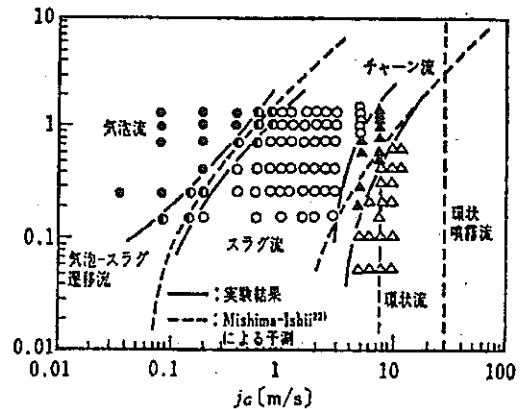


図4 NaK-窒素ガス垂直上昇二相流の流動様式

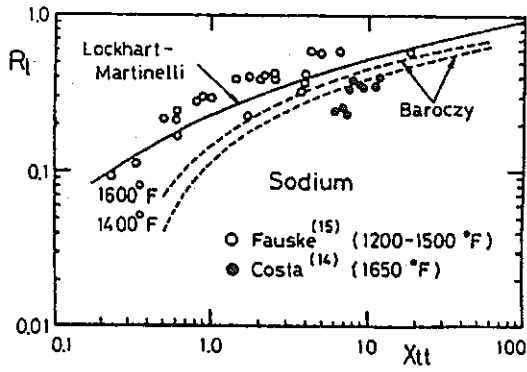


図5 ナトリウム系二相流のホールドアップ

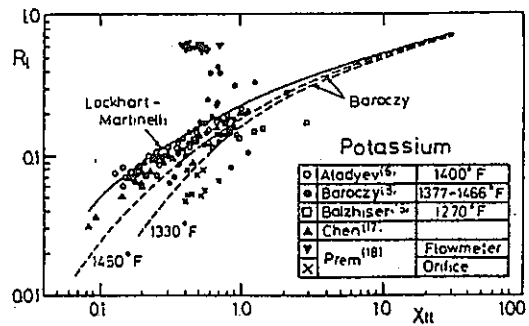
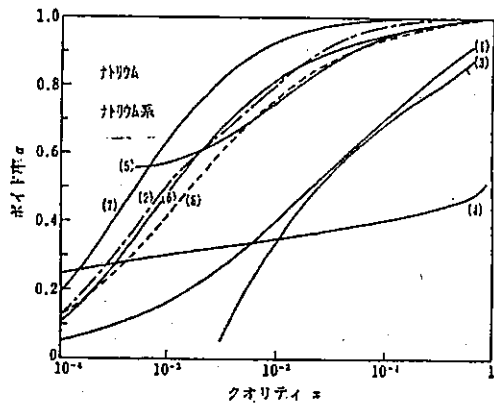


図6 カリウム系二相流のホールドアップ



- (1) Smissaert<sup>(7)</sup>
- (2) Baroczy<sup>(3)</sup>
- (3) Balzhiser et al.<sup>(2)</sup>
- (4) Lurie<sup>(8)</sup>
- (5) Chen & Kalish<sup>(6)</sup>
- (6) Serizawa & Michiyoshi<sup>(7)</sup>
- (7) Yamazaki & Yamaguchi<sup>(4)</sup>
- (8) Grolmes & Fauske<sup>(15)</sup>

図7 ボイド率相関式の比較

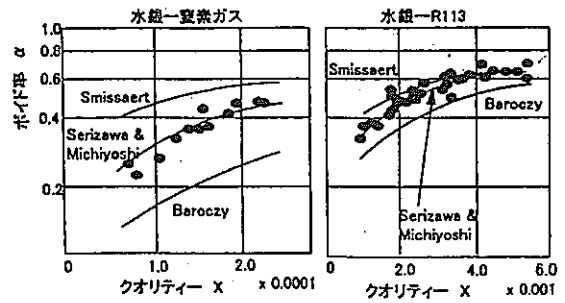


図8 Unger らの水銀系データとの比較

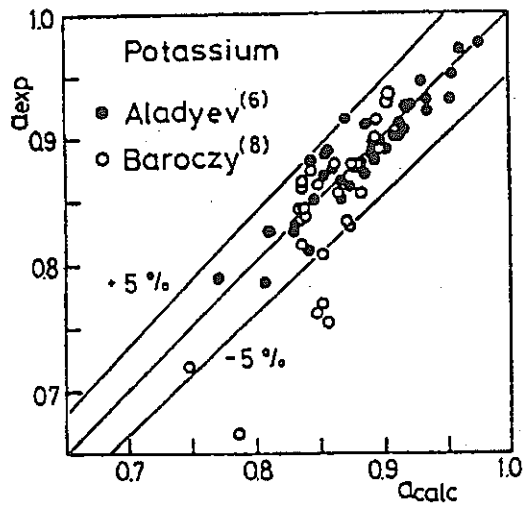


図9 カリウム系データと筆者らの式との比較

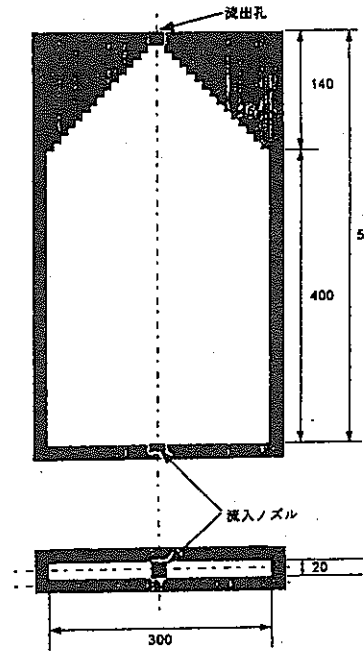
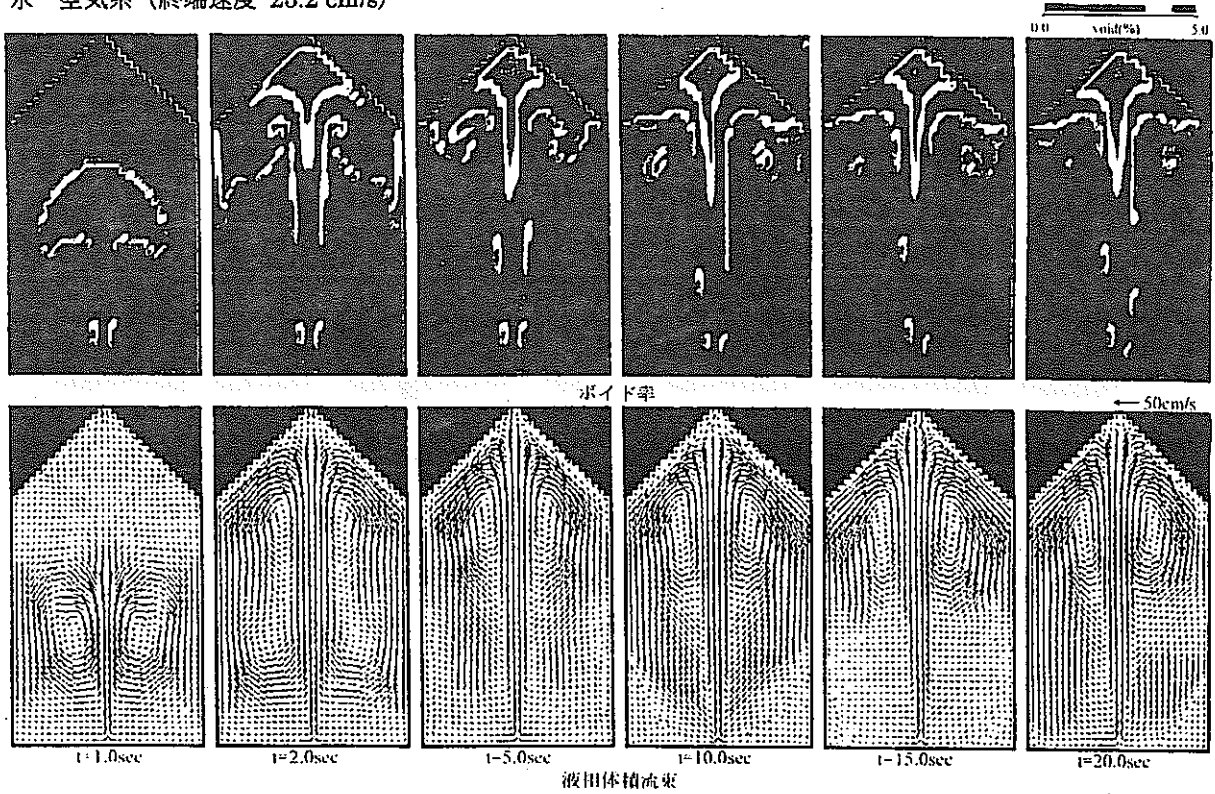


図10 3次元計算体系

水-空気系 (終端速度 25.2 cm/s)



NaK-アルゴンガス系 (終端速度 31.4 cm/s)

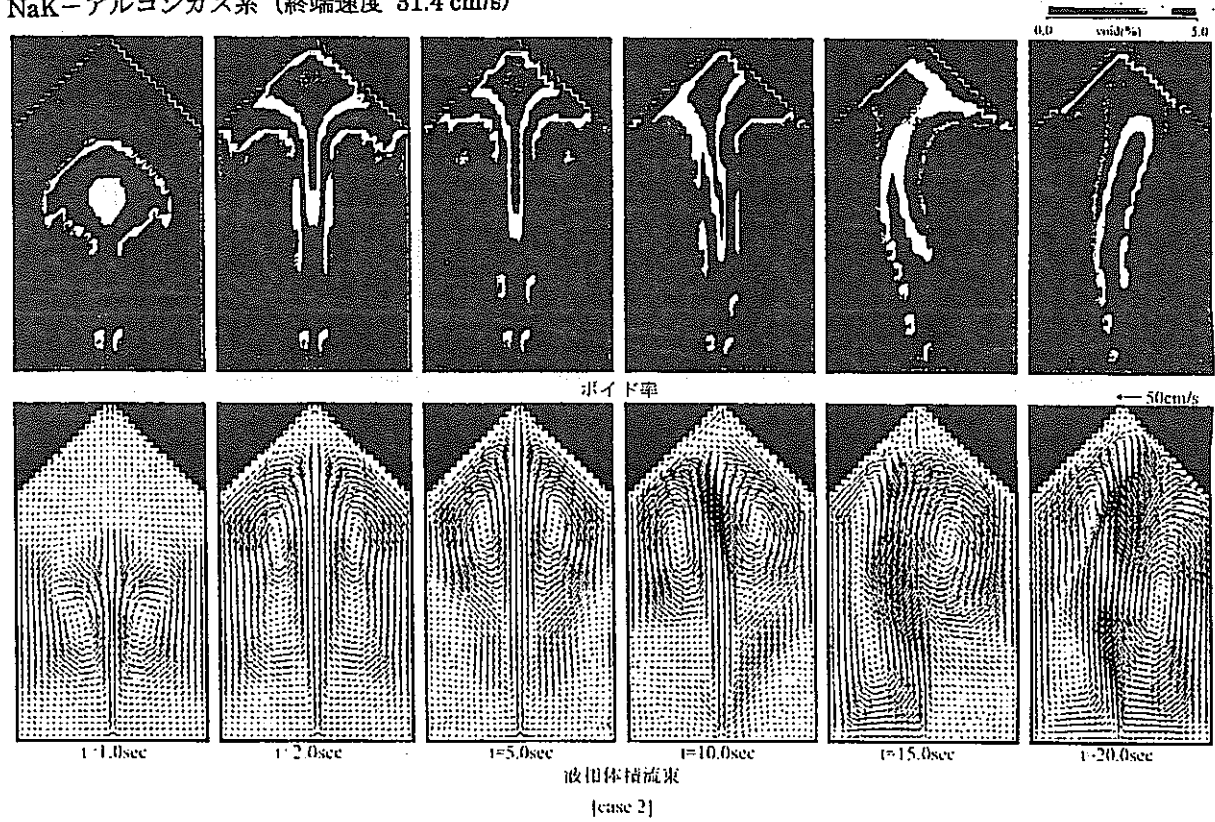
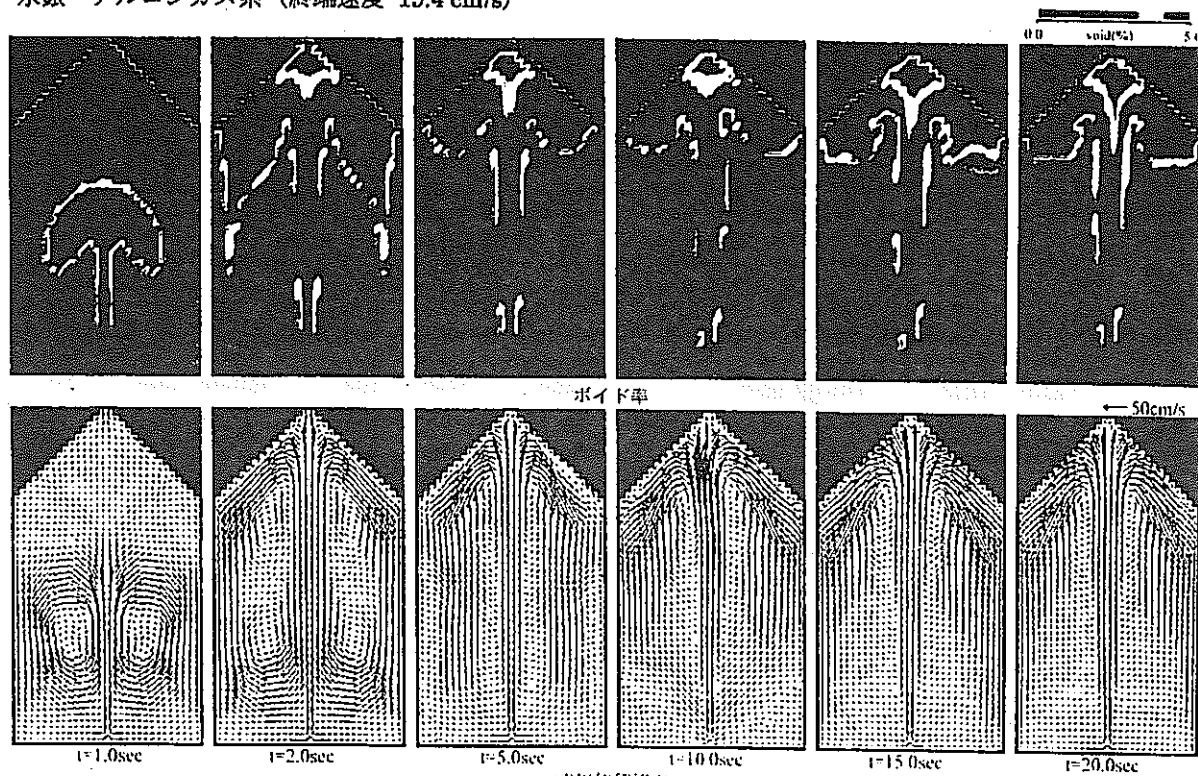


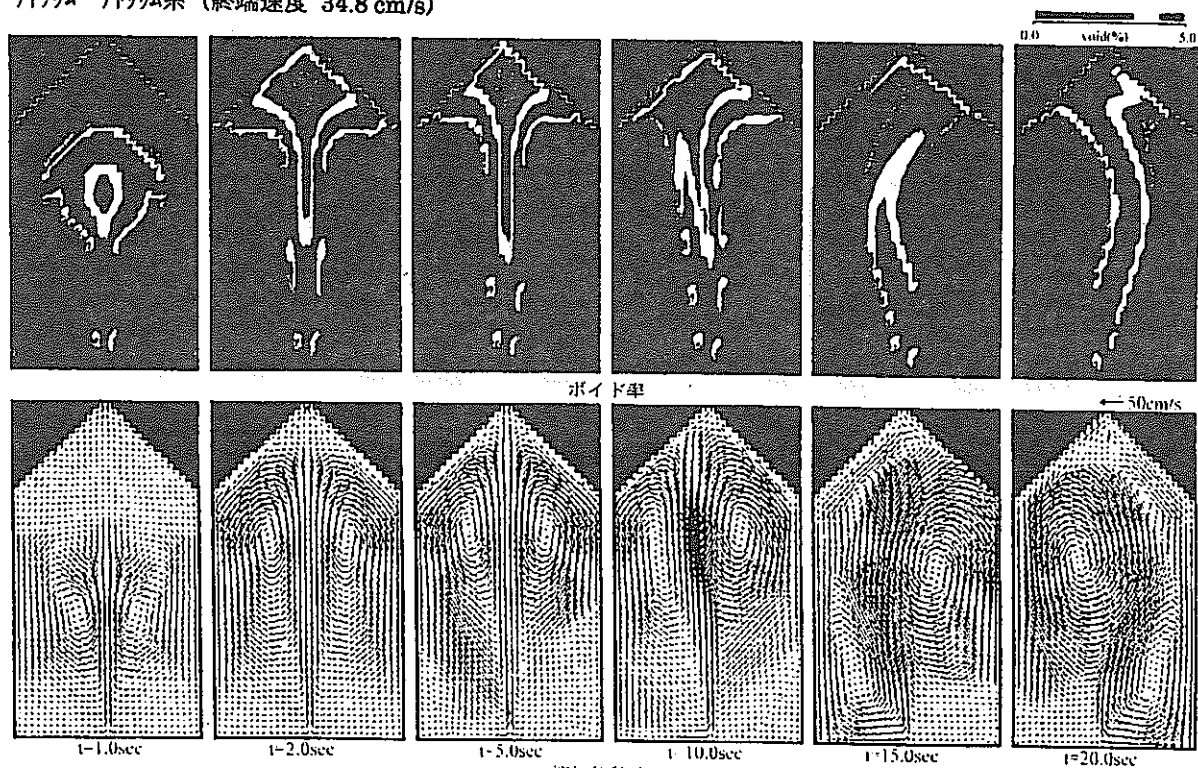
図11a 気泡プリュームの揺動特性

水銀—アルゴンガス系 (終端速度 19.4 cm/s)



[case 3]

ナトリウム—ナトリウム系 (終端速度 34.8 cm/s)



[case 4]

図 11 b 気泡プリュームの揺動特性

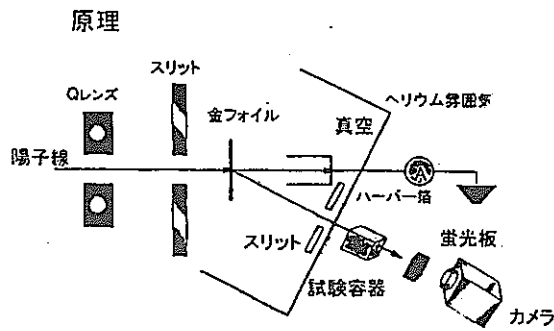


図12 陽子線ラジオグラフィー法の原理

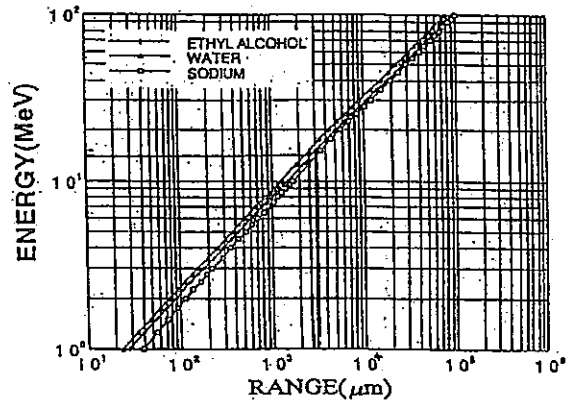


図13 陽子線エネルギーの減衰特性

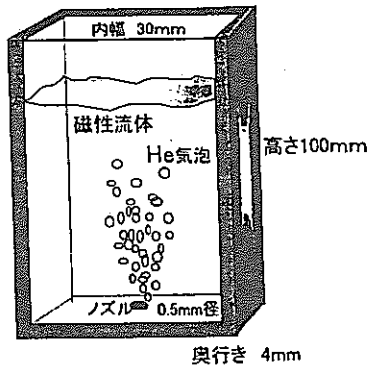


図14 磁性流体-Heによる比較実験

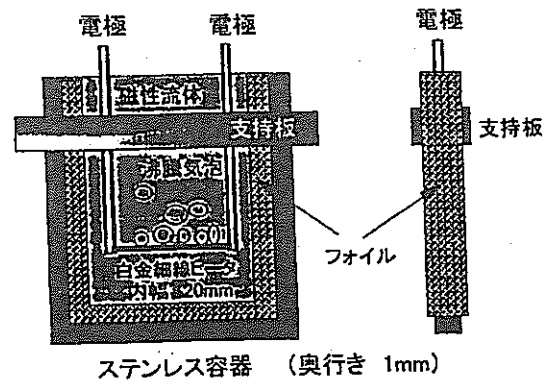


図15 磁性流体のプール沸騰の観察

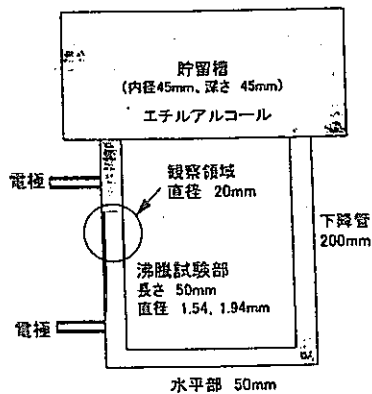


図16 細管内自然循環沸騰の観察

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

本研究は本年度で終了する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】



先行基礎工学分野に関する平成10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	マルテンサイト系耐熱鋼の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="2">東北大学工学部材料物性学科 教授 丸山 公一*</td> <td rowspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="2">大洗 機器・構造安全工学グループ 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*		〔*客員研究員 **研究生〕	機 構 側	大洗 機器・構造安全工学グループ 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*		〔*客員研究員 **研究生〕							
機 構 側	大洗 機器・構造安全工学グループ 永江 勇二									
研究協力実施場所	サイクル機構 大洗工学センター 機器・構造安全工学グループ									
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10年4月1日～ 平成11年3月31日							
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究									
<p><b>【研究目的】</b></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><b>【研究内容（概要）】</b></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><b>【使用主要施設】</b></p> <p>各種分析装置（電界放射型電子顕微鏡など）          損傷負荷試験機（単軸・多軸クリープ試験機、単軸・多軸疲労試験機）</p>										



### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度は、Mod.9Cr-1Mo 鋼においてマルテンサイト・ラス幅が、寿命・余寿命評価に有効な金属組織因子であることがわかった。平成9年度は、マルテンサイト・ラス幅のクリープ変形にともなう変化を調査した。

### 【研究成果】

平成8年度～平成9年度の研究において、Mod.9Cr-1Mo 鋼のクリープ変形組織観察を行い、マルテンサイト・ラス幅が、寿命・余寿命評価に有効な金属組織因子であることがわかった。平成10年度は、クリープ・疲労損傷においてマルテンサイト・ラス幅が寿命・余寿命評価に有効な金属組織因子であるかどうかについて検討した。

#### （1）クリープ・疲労破断後の金属組織観察

Mod.9Cr-1Mo 鋼の使用環境に近い温度域である550～600℃の範囲において、クリープ・疲労破断後の組織観察を行った。表1に組織観察を行った試験条件を示す。また、図1に、試験前および破断材の組織観察結果を示す。マルテンサイト・ラス幅は、クリープ・疲労損傷を受け広がっていることがわかる。また、細長であったマルテンサイト・ラスの形状が、球状になっていることが分かる。このような観察結果は、観察を行ったすべての試験条件で見られた。

#### （2）マルテンサイト・ラス幅と応力の関係

平成8年度～平成9年度の研究において、クリープ損傷を与えた試験材では、破断後のマルテンサイト・ラス幅は、温度に依存せず応力のみによって決まることが見いだされている。そこで、クリープ・疲労材においても、破断後のマルテンサイト・ラス幅と応力の関係を検討した。図2にマルテンサイト・ラス幅と応力の関係を示す。比較のためにクリープ損傷材の結果も示している（図中黒印）。なお、クリープ・疲労の結果では、応力に $N_f/2$ での最大応力を用いている。クリープ・疲労破断材においても、マルテンサイト・ラス幅は応力と一定の関係があることが分かる。しかし、クリープ損傷材の結果の同一直線では表現できない。これは、クリープ・疲労では、クリープ損傷材のように一定の応力を決定することができないためであると考えられる。

また、試験前のマルテンサイト・ラス幅は組織観察の結果から0.5 $\mu\text{m}$ であるので、クリープ・疲労損傷を受けた場合もマルテンサイト・ラス幅は大きくなることが分かる。

#### （3）まとめ

マルテンサイト・ラス幅は、クリープ・疲労損傷を受ける場合にも変化し、クリープ・疲労損傷の蓄積とともに大きくなることがわかった。マルテンサイト・ラス幅は、クリープ・疲労損傷を受ける場合にも、寿命・余寿命評価に有効な金属組織因子であると考えられる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成10年度をもって終了。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

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

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

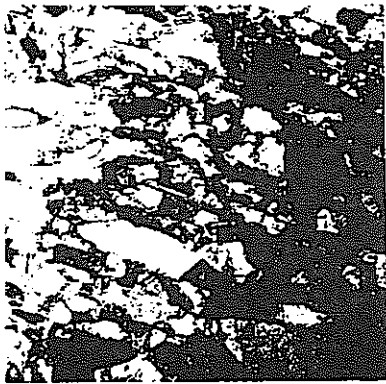
澤田他、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のクリープ寿命評価に関する研究（その2）、PNC TN9410 98-018.

澤田他、改良9Cr-1Mo 鋼のマルテンサイトラス組織変化による余寿命評価、鉄と鋼、84(1998), 40.

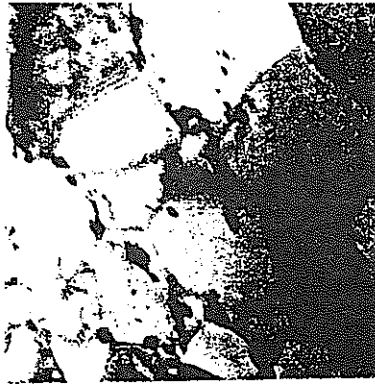
表1 組織観察を行ったクリープ・疲労試験条件

	T/K	ひずみ範囲 / %	ひずみ速度 / %/s	保持時間 / s	$\sigma_{max}$ / MPa	破断回数 Nf
1	823	0.361	0.002	3600	154	13012
2	823	0.494	0.1	3600	201	6453
3	823	1.003	0.1	3600	244	1266
4	873	0.518	0.1	3600	176	3630

$\sigma_{max}$  : Nf/2 での最大応力



試験前



試験条件No. 2



試験条件No. 4

1  $\mu$  m

図1 試験前とクリープ・疲労破断後の組織観察

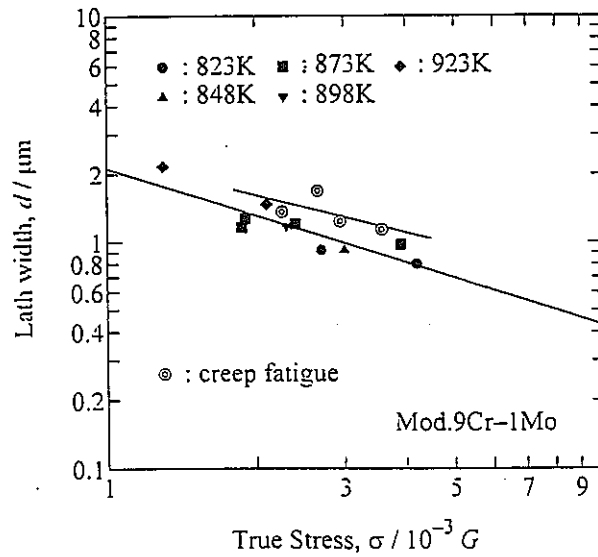


図2 マルテンサイト・ラス幅と応力の関係

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	損傷組織の定量化技術の研究																		
研究協力課題	溶接部の高温損傷の定量化技術																		
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄*</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義*</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3">[*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">大洗 機器・構造安全工学グループ 永江 勇二</td> </tr> </table>			大 学 側	高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄*				金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義*				[*客員研究員 **研究生]			機 構 側	大洗 機器・構造安全工学グループ 永江 勇二		
大 学 側	高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄*																		
	金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義*																		
	[*客員研究員 **研究生]																		
機 構 側	大洗 機器・構造安全工学グループ 永江 勇二																		
研究協力実施場所	サイクル機構 大洗工学センター 機器・構造安全工学グループ																		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年4月1日～ 平成11年3月31日																
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究																		
<p><b>【研究目的】</b> 溶接部の材料試験およ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・分析の定量化に関する基礎技術開発を行う。</p>																			
<p><b>【研究内容（概要）】</b> 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><b>【使用主要施設】</b> 金材研 力学機構損傷部 金属組織解析関連施設、材料試験施設 サイクル機構 損傷予診断技術開発施設（各種分析機器、損傷負荷試験機等）</p>																			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度 溶接積層全厚を含む溶接継手のクリープひずみは特定の分布を示すことを明らかにした。  
平成9年度 多層盛溶接継手について、クリープ特性と溶接部からの試験片採取位置との関係について検討を開始した。

### 【研究成果】

オーステナイトステンレス鋼の厚板は小入熱による多層盛溶接が行われるため溶接部は溶接施工による複雑な熱履歴を受けて微細組織が位置によって異なることが考えられる。そこで、SUS304鋼を母材としたサブマージアーク溶接法で突き合わせ溶接した試験片を用い、クリープ特性と溶接部からの試験採取位置との関係について検討した。

#### （1）試験片採取位置

図1に示すように、溶接線に平行な方向（WM-L）および溶接線に直角方向（WM-T）における板厚の1/4（F）および3/4（B）の位置から試験片を採取し、クリープ試験を行った。クリープ試験は823Kで行った。

#### （2）試験前の組織

多層溶接の場合にはせ積層順序により溶接金属の各ビードで熱履歴が異なり、溶接金属内部は組織が変化することが考えられる。そこで、多層溶接後の試験前の組織観察を行った。

溶接部の表裏表面の最終ビードは後続パスの熱の影響を受けていないので溶着金属と同じような微細組織となり、最初に溶接した内部のビードは後続パスの熱や拘束力の影響で析出物や転位が導入され微細組織が溶着金属とは異なっている。

#### （3）クリープ特性

2～11パスのビードで構成されている溶接金属部（WM-LF、WM-TF）、および12～16パスのビードの溶接金属部（WM-LB、WM-TB）から採取した試験片のクリープ曲線を図2に示す。WM-LFとWM-LBを比較すると、WM-LBが最小クリープ速度が約10倍大きく、破断時間は短い。一方、WM-TFとWM-TBを比較すると、最小クリープ速度はWM-TBのほうが大きい、破断時間は大きな差がみられない。試験片採取位置の違いによりクリープ特性に差が生じる。

#### （4）クリープ破断特性

図3にWM-LFおよびWM-LBの応力と破断時間の関係を示す。数万時間の破断強度でも採取位置による差はみられ、1万時間強度で先行ビードのWM-LFがWM-LBより約15MPa大きい。なお、短時間側では溶接金属のクリープ破断強度は母材よりも低い、長時間側では母材の強度に近づいている。

#### （5）今後の課題

試験片採取位置によりクリープ特性は異なることが分かった。クリープ特性が異なる要因について検討するために、短時間側および長時間側の試験片について金属組織観察を行う必要がある。

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

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

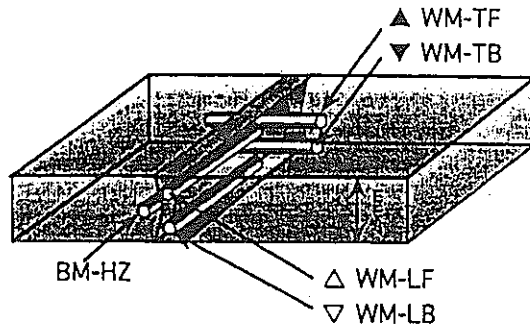


図1 溶接施工法と試験片採取位置

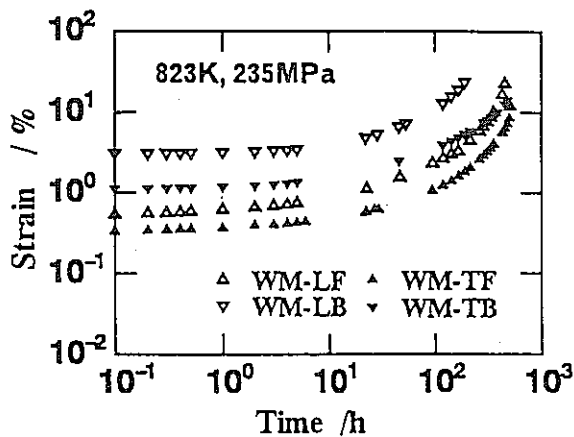


図2 クリープ曲線

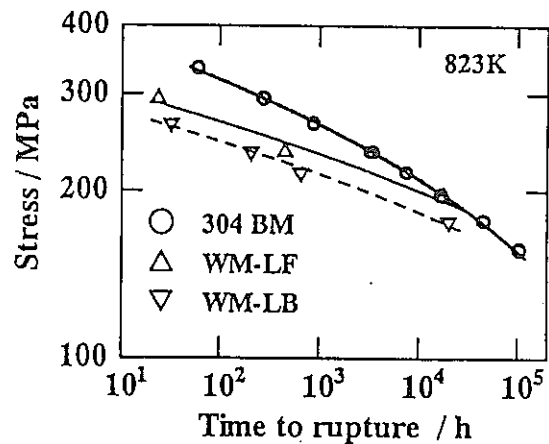


図3 クリープ破断曲線

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

多層盛溶接したSUS304を母材とした溶接継手について、短時間の試験から長時間の試験まで金属組織観察を行い、クリープ特性と試験片採取位置との関係について検討を進める。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 本郷他、第35回高温強度シンポジウム前刷集、(1997)164.
- 山崎他、第35回高温強度シンポジウム前刷集、(1997)169.
- 山崎他、材料、Vol. 48 No. 2(1999)110.
- 本郷他、材料、Vol. 48 No. 2(1999)116.

先行基礎工学分野に関する平成 10 年度研究概要報告書

研究協力分野	中性子ビームプローブに関する研究(Ⅱ)		
研究協力課題名	中性子ビーム制御システムの開発		
研究者氏名、所属	鬼柳善明、加美山隆、平賀富士夫、小川雪郎、中川晴子、廣田智章(北大・工) 大川内靖(核燃サイクル大洗工学センター)		
研究協力実施箇所	大洗工学センターシステム技術開発部 炉心技術グループ		
通算研究期間(予定)	平成 10 年 12 月～13 年 3 月 (平成12年3月で終了予定)	当該年度 研究期間	平成10年12月16日～ 平成11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		
<b>【研究目的】</b> 中性子ビームを制御(ビーム方向の変更、収束)することにより、工業、医療、基礎科学の分野で画期的な利用が可能になる。 本研究では、中性子のマイクロビーム化とその制御に関する基礎及び応用技術の研究を行ない、高速炉、燃料サイクル技術への適用として、非破壊検査、微量分析、材料評価などへ応用することを企図している。			
<b>【研究内容(概要)】</b> 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、三つ目はマルチキャピラリーファイバー(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、特に磁場とマルチキャピラリーファイバーによる輸送について調べる。 永久磁石を用いた 6 極マグネットを用いて、中性子ビームの収束、平行化(マイクロビーム)を行なう。この方法によって得られる中性子ビームは偏極化されている。このビームを中性子散乱実験に用いて、材料評価に使用する。 マルチキャピラリーファイバーの波長依存の中性子透過特性を調べ、ビームの 1mm 以下の点への収束または平行ビームとして遠方へ輸送することを行なう。これは、非破壊検査、微量分析に用いる。			
<b>【使用主要施設】</b> 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			
<b>【進捗状況(概要)】</b> 磁場による収束については、すでに昨年までの研究で実証済みである。この実験結果をもとに、磁石表面の影響やビーム孔の大きさによって、強度がどれだけ増えるかを数値計算によって調べた。また、磁場を用いたビームの平行化に関するシミュレーション計算も進めている。 マルチキャピラリーファイバーについては、波長依存の中性子透過率を測定しているところである。			

## 【研究成果】

### 1. 磁場による中性子の収束

これまで行ってきた、磁場による中性子収束実験では、約 40 倍の強度増が得られた。しかし、計算では結果が約 80 倍になった。これは、実験ではマグネットを Al ブロックに入れて六極磁石を構成しているが、その Al の表面からの全反射がある。それを抑えるために Cd パイプを所々に置いているが、その Cd の表面からの反射も無視できないことが考えられた。そこで Cd パイプ表面のあらさを調べ、反射率を計算して、それを補正した。その結果を図 1 に示すが、計算値は実験を非常によく再現した。従って、本実験装置で磁場の効果だけを考えた場合、約 80 倍の強度増が得られることが実証された。

さらに大きな強度増を得るためには、ビーム孔を大きくすることが必要となる。そのためには、今使っている永久磁石ではなく、超伝導マグネットを用いて磁場を強くすることが必要となる。そういうものが使用できると仮定した場合、どれだけ強度が増えるかを計算してみた。図 2 に孔径を拡げた場合の強度増加を示す。孔径が 20mm で 800 倍の強度増が得られることが分かる。

### 2. マルチキャピラリーファイバーの中性子透過特性

(はじめに)

マルチキャピラリーファイバーは外径が約 1mm で、それを収束するように束ねる。その場合、曲率によって透過してくる中性子のエネルギースペクトルが変化することが考えられる。これまでは、2Å 中性子に対するデータがあるだけで、中性子透過率のエネルギー依存性が分かっていない。それで、北大ライナックを用いてマルチキャピラリーファイバーの中性子透過率を測定した。

(実験)

ファイバー全体の直径は 1mm で、その内部は多数のキャピラリーによって構成されている。今回はキャピラリーの直径が 10 μm と 15 μm のものを用いた。材質の組成比から、臨界角  $\theta_c$  は  $1.14 \times 10^{-3} \times \lambda$  (rad) と求められた。

マルチキャピラリーファイバーの中性子透過特性を調べるために、この 2 種類について、それぞれ曲率半径が無限大(直管)、6m、2.5m のときの透過中性子スペクトルを測定した。測定体系を図 3 に示す。北大 45MeV 電子線型加速器を速中性子源、非結合型の液体水素-ポリエチレン減速材を冷中性子源として用いた。減速材の表面から飛行距離約 6300mm( $L_f$ )を経て、長さ 300mm( $L_c$ )のマルチキャピラリーファイバーによって輸送された場合と、飛行距離 6600mm( $L_f + L_c$ )を経て、直接検出器に入射した場合(ダイレクトビーム)の中性子強度を飛行時間法によって測定した。

(中性子反射率の計算方法)

中性子が全反射するときの 1 回あたりの反射率  $r(\lambda)$  は、波長に依存する値であるが、その正確な値は知られていない。本研究で用いたマルチキャピラリーファイバーの反射率  $r(\lambda)$  を求めるために、実測値をもとに 2 次元体系で計算を行なった。波長  $\lambda$  (Å) の中性子が臨界角  $\theta_c$  (rad) の物質に角度  $\theta$  (rad) で衝突したときの反射率  $R$  は、次式で与えられる。

$$R(\lambda, \theta) = r(\lambda) \quad (\theta < \theta_c)$$

$$R(\lambda, \theta) = \frac{\left| 1 - \left\{ 1 - \left( \frac{\theta_c}{\theta} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right|^2}{\left| 1 + \left\{ 1 - \left( \frac{\theta_c}{\theta} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right|^2} \times r(\lambda) \quad (\theta > \theta_c)$$



中性子がキャピラリー内でN回の衝突を繰り返して輸送されたとすると、そのときの輸送率Tはそれぞれの衝突角 $\theta$ から決まるRのN個の積になる。実験によって得られたキャピラリーファイバーの透過中性子スペクトルを $\Phi_{ON}$ 、ダイレクトビームの入射中性子スペクトルを $\Phi_0$ とすると、このふたつの間には次のような関係がある。

$$\Phi_{ON} = \Phi_0 \times \left( \frac{L_f + L_c}{L_f} \right)^2 \times K \times \int_{-50}^{50} p(x) T(\lambda, \theta) dx$$

ここで、Kは開口率で0.6、 $p(x)$ は減速材表面から放出される中性子の空間分布である。この式を用いて、中性子が全反射するときの1回あたりの反射率 $r(\lambda)$ を求めた。

#### (結果と考察)

ダイレクトビームに対し、 $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ のマルチキャピラリーファイバーの透過強度の比をとったものをそれぞれ図4、図5に示す。キャピラリー径が $10 \mu\text{m}$ の場合の波長中性子スペクトルを図6に示す。強度比を比べると、同じ曲率の場合ではキャピラリー径が大きいものを用いたほうが高い強度が得られるということがわかった。これは、キャピラリー径の大きいほうが内部での中性子の衝突回数が少なくてすむためだと考えられる。また、短波長領域では臨界角が小さいため、マルチキャピラリーファイバーによって輸送される中性子の強度は極めて低くなることが確認できた。

曲率ごとに求めた反射率 $r(\lambda)$ を図7に示す。この結果から求めた反射率 $r(\lambda)$ は、 $5 \text{\AA}$ 以上の長波長領域においては、キャピラリー径や曲率にあまり依存しないが、それ以下の波長領域では、直管に対する反射率 $r(\lambda)$ の値がほかの曲率について求めた値よりも小さいという結果になった。この原因としては、直管の測定の際に、ファイバーが $\mu\text{m}$ オーダーで曲がっていたということが考えられている。

#### 【今後の予定】

[平成11年度]

1. 磁場を用いた中性子ビームの平行化
2. マルチキャピラリーファイバー束による中性子ビーム輸送
3. 物質レンズの開発
4. 位置敏感型中性子検出器の開発

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1. 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, Physica B, 241 - 243 (1998) 172 - 174.
2. Y. Kiyonagi, Y. Suda, H. Nakagawa, T. Kamiyama, Y. Ogawa, H. Iwasa, H. M. Shimizu, H. Kato, T. Oku, and T. Wakabayashi : EXPERIMENTAL STUDIES ON COLD NEUTRON BEAM FOCUSING BY MAGNETIC FIELD, Proc. ICANS-XIV(1998).
3. 中川晴子、加美山隆、鬼柳善明  
“キャピラリーファイバーを用いた中性子ビーム制御の研究”，日本原子力学会 1998 年秋の大会.
4. H.M. Shimizu, Y. Suda, T. Oku, H. Nakagawa, H. Kato, T. Kamiyama, C. Otani, H. Sato, T. Wakabayashi and Y. Kiyonagi : Measurement of Cold Neutron Beam Focusing Effect of a Permanent Sextupole Magnet, Nuclear Instrument and Methods. 印刷中

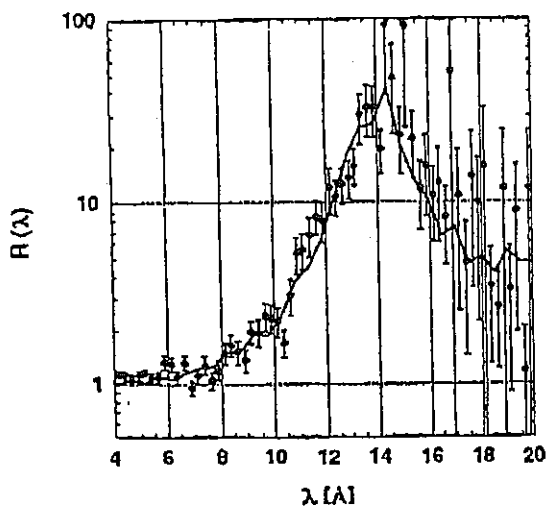


図1 波長依存の中性子利得

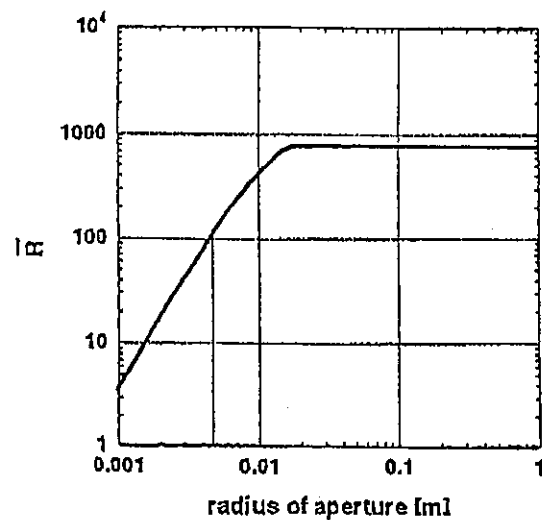


図2 ビーム孔径と平均利得

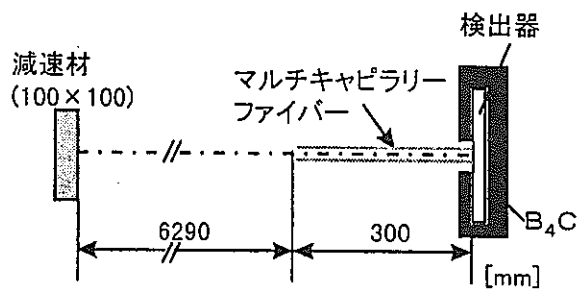


図3 実験体系

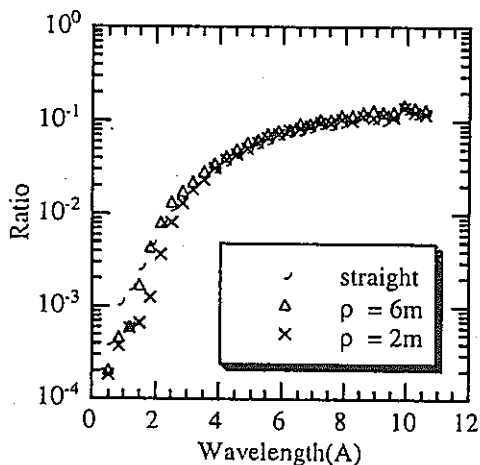


図4 強度比 ( $d_c = 10 \mu m$ )

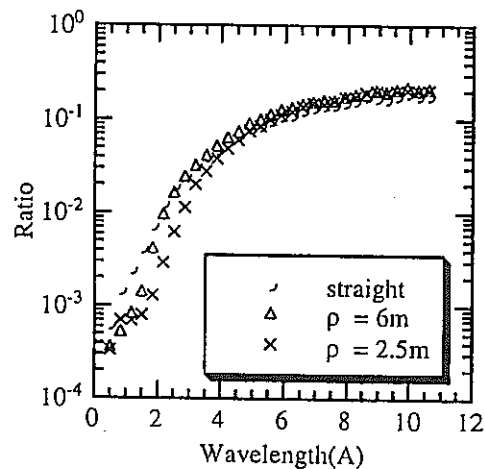


図5 強度比 ( $d_c = 15 \mu m$ )

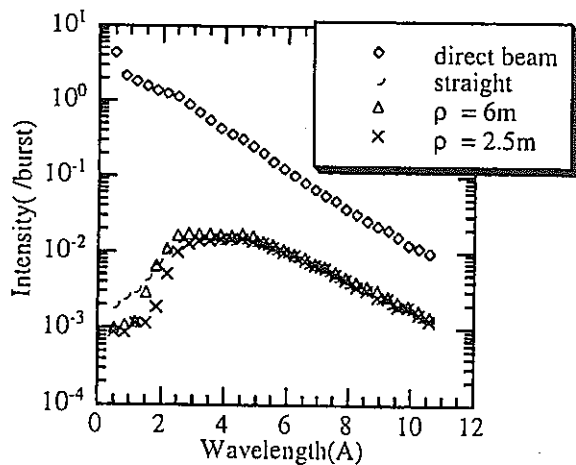


図6 中性子波長スペクトル ( $d_c = 10 \mu m$ )

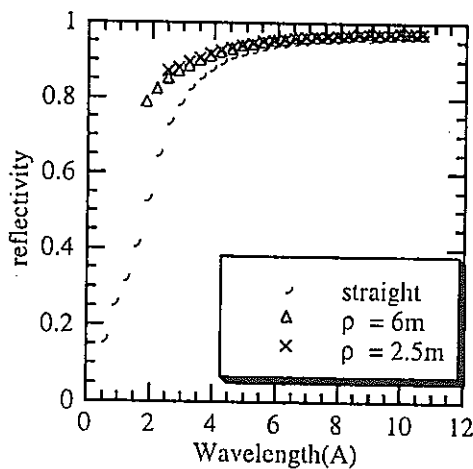


図7 反射率

先行基礎工学分野に関する平成10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			
大学側	九州大学工学部 助教授 出光一哉, 助手 有馬立身, 大学院博士課程 佐藤 勇** [*客員研究員 **研究生]		
機構側	大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室 山本一也, 滑川卓志		
研究協力実施場所	九州大学 工学部 出光研究室 サイクル機構 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10年12月14日～ 平成11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>照射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) は、燃料物性を変化させるとともに、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、実用化レベルの高速炉の燃料高燃焼度化を達成するためには、その固体FPの照射中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FBR燃料の分析を通して、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を実験的に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。</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、酸素ポテンシャルの変化で容易に化学的形態を変えるMo, Cs, 白色金属相及びBa・Zr化合物析出相等に着目して、これらの照射による再分布挙動等について試験評価を行っている。平成7年度に、照射済燃料のMo分布の測定結果と酸素ポテンシャルの関係について調べた。平成8年度から、3年間の大学との共同研究に移行し、「常陽」で照射された燃料中の固体FP元素の再分布挙動及び析出相の遮蔽型X線マイクロアナライザー(SXMA)による分析、金相写真の画像解析による析出相の粒径分布評価、被覆管材料の炉外酸化試験による酸化挙動と酸素吸収量の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行なうことにより、固体FPの照射挙動を把握する。</p>			
[使用主要施設]			
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 (サイクル機構) 酸化反応試験装置, 機器分析装置 (九州大学)			

[進捗状況(当該年度までの概要)]

平成7年度に、照射済燃料のMo再分布について分析評価を行ない、酸素ポテンシャルとの関係、O/M比分布への影響について調べた。平成8年度は、高燃焼度燃料におけるMoの燃料ペレット外への移行現象のメカニズムの提案、被覆管の酸化による酸素ポテンシャル変化を評価するための炉外酸化試験を実施した。平成9年度及び10年度で、Moの再分布挙動に関与し、固体FPスエリングの主要因でもある白色金属相、同じく固体FPスエリングの主要因となるZrとBaについて、燃料中の分布測定と解析評価を行なった。また低酸素ポテンシャル条件下での被覆管の酸化特性試験のための装置を製作し、試験評価を行なった。これらの成果をまとめ、最終報告書を作成した。

[研究成果]

高燃焼度の燃料ペレットにおけるスエリングの発生要因として問題となる固体FP元素の中でも、白色金属析出相を形成するものは、燃料内を容易に移動したり、ペレット外に放出されるなど複雑な挙動を示すことが知られているが、燃料温度や酸素ポテンシャルの影響が大きく、実際に高燃焼度燃料を用いて行われた研究はこれまで非常に限られている。同様に固体FP元素の中で酸化物として析出するものは、燃料スエリングへの寄与が大きいと考えられているが、実際に照射されている燃料中の析出条件等は必ずしも明らかではない。本研究では、「常陽」にて燃焼度約13 at.%FIMAまで照射された燃料を用いて、燃料中固体FP元素により形成される金属析出物(白色金属相)及び酸化析出物(多成分酸化析出物)の金相観察、微小元素分析を実施し、これらの挙動を調べた。さらに、燃料中の酸素ポテンシャルは、酸素が吸収される被覆管の腐食の影響が大きい。本研究の照射燃料の被覆管は改良型SUS316鋼を用いているが、この燃料ピンは従来のSUS316鋼被覆管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。そのため平行して、この改良型SUS316鋼の酸化特性について試験を実施した。

まず、燃焼度6~13at.%の高速炉燃料における白色金属析出相構成元素の濃度分布を測定し、移動メカニズムを検討した。白色金属析出相とはFPの中で燃料に固溶しにくい元素Mo, Ru, Rh, Tc, Pdで構成された析出物である。遮へい型X線マイクロアナライザー(SXMA)を用いて、約1 $\mu$ mに絞った電子ビームにより燃料中に分散している白色金属析出物の組成の変化を燃料ペレット径方向に測定した。図1にその各構成元素の濃度分布が燃焼度とともに変化する様子を示す。この結果から、Pd濃度は、比較的低い燃焼度においても、燃料外周付近の白色金属相において高く、高温である燃料中心付近の白色金属相において低いことが分かった。それに対して、Moは10at.%以上の燃焼度においてのみPdと同様の傾向を示すことが分かった。すなわち、Pdは低い燃焼度の燃料中でも高温部から低温部へ移動するが、Moは燃焼度が十分進んだところで初めて移動することを示唆するものである。このような移動のメカニズムに対して次のような蒸気圧の違いに着目したモデルを考えた。すなわち図2に示すように、Pdは燃料中の高温では構成元素に比べて常に高い蒸気圧を示す。一方、Moは、酸化物を形成するような高い酸素ポテンシャルの条件下で、そのひとつであるMoO<sub>3</sub>がPdと同等な高い蒸気圧となることが熱力学的解析により示された。図3にこの解析結果を示す。このことから、Pdは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と考えられ、また、酸素ポテンシャルが高く、生成量の高くなる高燃焼度燃料では、Moのように金属分子での蒸気圧が低い元素でも、蒸気圧の高い酸化物などの化学形に変化し、気相移動するようになると思われる。

次に、Zr、Baの析出物をSXMAにて分析した。Zr、Baは多成分酸化析出物の主な成分である。その結果、燃焼度6~13 at.%の燃料の中で、約13 at.%の燃料においてその燃料ペレット中心と外周の中間部位にZr、Ba系析出物が局在していた。図4にその分析結果を示す。この析出物の局在する領域は、燃料温度が約1000~1500°Cの範囲に相当している。一方、燃焼度6~10 at.%の燃料ではBaの酸化析出物のみが検出された。しかし、その析出物の数、サイズともに高燃焼度におけるZr、Ba系析出物より小さいものであった。これをGrimesらの燃料に対するZr、Baの固溶度の評価結果に基づき考察すると、ZrO<sub>2</sub>は51 mol% (1700°C) に対し、BaOは0.58 mol% (2000°C) とかなり小さく、Baがより容易に析出し得ることが分かり、この違いが低い燃焼度ではBaの酸化析出物だけが観察される原因であると考えられる。さらに、酸化物燃料とZrO<sub>2</sub>の状態図を調べてみると、図5に示すように、ZrO<sub>2</sub>の濃度がある程度高くなると1500°C前後を境にして低温側で二相状態となり、析出し得ることが分かる。これにより、Zr系析出物が高燃焼度で発生し始めること、さらに温度の高いペレット中心付近では析出しないことがほぼ説明できた。しかし、低温側のペレット外周部でも析出しないメカニズムは、現状では明らかではなく、より複雑なモデルが必要である。これらの酸化物の析出には燃料中の酸素ポテンシャルや拡散係数などが影響すると考えられ、炉内の燃料ペレット内の酸素ポテンシャル分布（いわゆるO/M比分布）や燃料温度分布が上記のような析出挙動を引き起こしている可能性がある。

改良型SUS316鋼の酸化試験は、一般的な腐食試験で行われるような比較的高い酸素ポテンシャル下ではなく、高速炉燃料内の雰囲気 considering して実施した。図6に改良型SUS316鋼の主要構成元素の酸化物生成自由エネルギーと高速炉燃料内の酸素ポテンシャル、本研究の酸化試験条件を示す。本研究では、低い酸素ポテンシャル下で試験を行なうため、図7に示すような実験装置を製作して行なった。その結果として、図8に改良型SUS316鋼の酸化反応速度定数の酸素分圧依存性を従来のSUS316鋼と比較して示す。改良型SUS316鋼は、比較的高い酸素ポテンシャル下では従来のSUS316鋼と酸化反応速度定数に差は見られないが、実際の燃料ピン内に相当する $10^{-27}$  atm以下の酸素ポテンシャルでは、改良型SUS316鋼の方が小さくなった。この酸素ポテンシャルは、Feは酸化せず、Crのみが酸化する領域と考えられること、改良型SUS316鋼の結晶粒径が3~5倍ほど大きいことなどがこのような酸化挙動の違いの原因となった可能性が考えられる。このころから、燃焼燃料中で予想される改良型SUS316被覆管の酸化量は、核分裂によって放出される酸素量の数%足らずと考えられ、さらにその酸化過程はCsやTe等の揮発性、腐食性FPの影響が大きいことが予想される。

本研究によって、高燃焼度燃料のスエリングの発生要因として問題となる白色金属析出相及び多成分酸化析出物の燃料中の挙動についてその特徴的な点を明らかにすることができた。さらに、改良型SUS316鋼被覆管の酸化特性についての新しいデータを取得し、燃料の熱力学的解析において問題となっていた酸素ポテンシャルのFCCIによる影響を評価するのに重要な知見を得ることができた。本研究によって得られたこれらの知見を、今後サイクル機構において行われる「常陽」にて照射された燃料の照射後試験の評価に反映していくとともに、高燃焼度燃料の燃料スエリングを評価する研究につなげていく予定である。

[今後の予定（翌年度以降の概要）]

本研究は、平成10年度で終了する。

[レポート、学会誌・国際会議への発表論文等]

1. PNC TY9606 98-003 高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価  
-先行基礎工学分野に関する平成9年度報告書（中間報告）-
2. I. Sato, et al., "Behavior of metallic fission products in uranium-plutonium mixed oxide fuel"  
第15回化学熱力学国際会議－ポルトガル（1998年7月）発表
3. Sato, et al., "Behavior of metallic fission products in uranium-plutonium mixed oxide fuel"  
J. Nucl. Mater. 投稿済
4. "改良型SUS316ステンレス鋼の低酸素分圧下における酸化挙動"  
日本金属学会1998年秋期大会（1998年9月）発表
5. Sato, et al., "Behavior of fission products, zirconium and barium, in fast reactor fuel irradiated to high burnup", J. Nucl. Sci. Technol. 投稿済
6. JNC TY9400 99-003 高燃焼度燃料内の固体FPの挙動評価  
-先行基礎工学分野に関する平成10年度報告書（最終報告）-

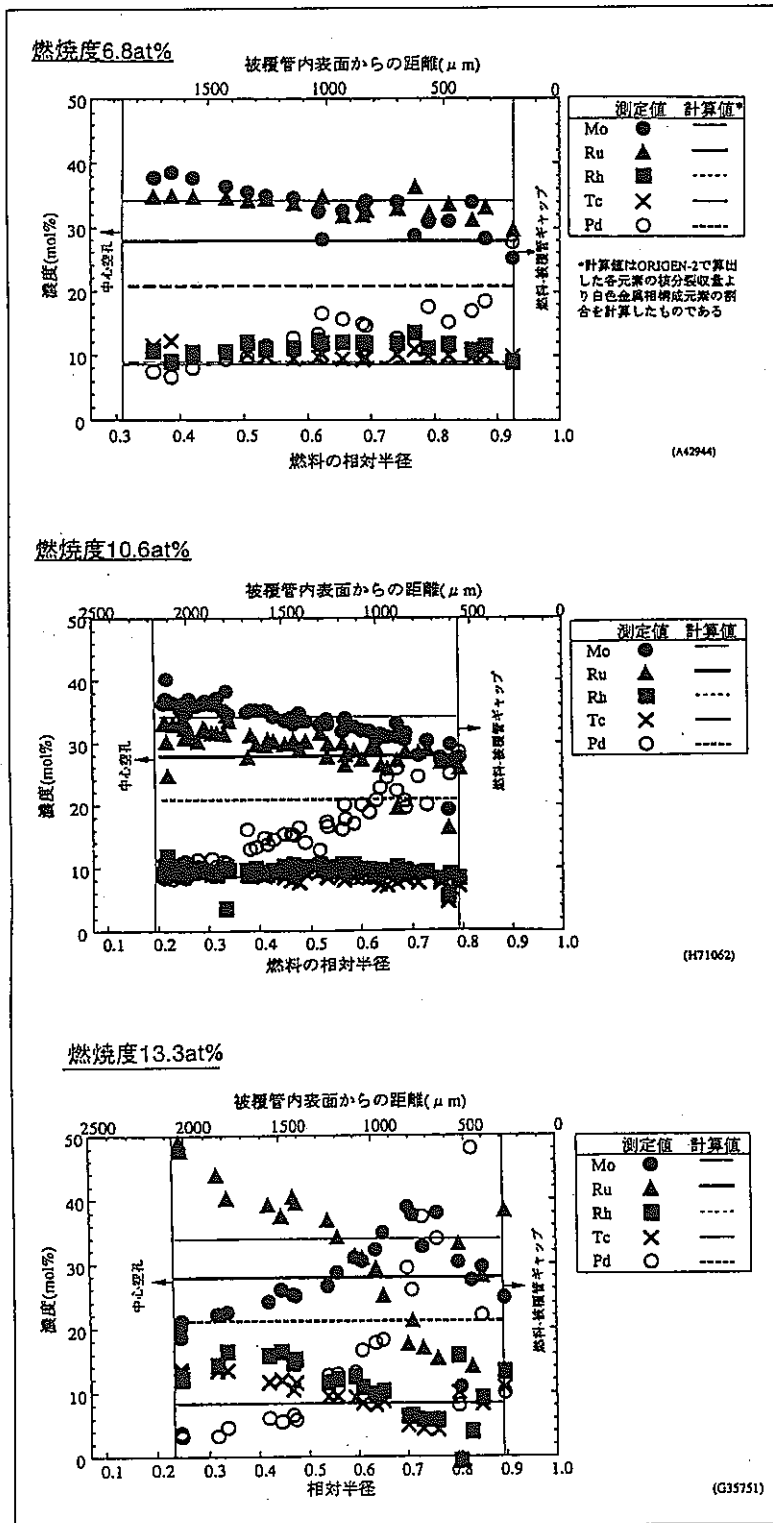


図1 白色金属析出物構成元素の径方向濃度分布の燃焼度による変化

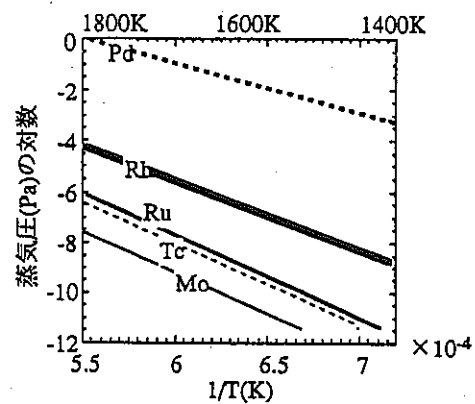


図2 白色金属析出物構成元素の金属蒸気圧の温度依存性

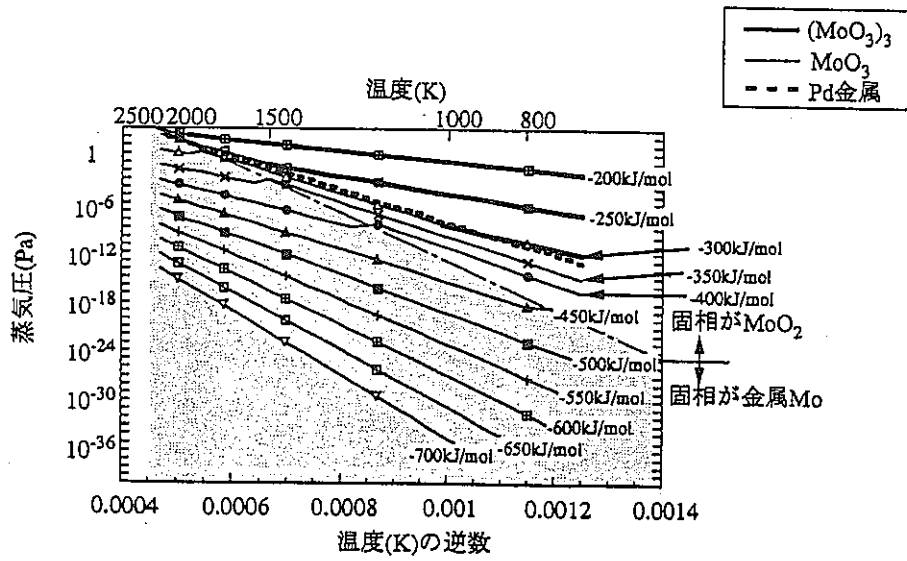


図3 Mo酸化物と金属Pdの蒸気圧温度依存性の比較

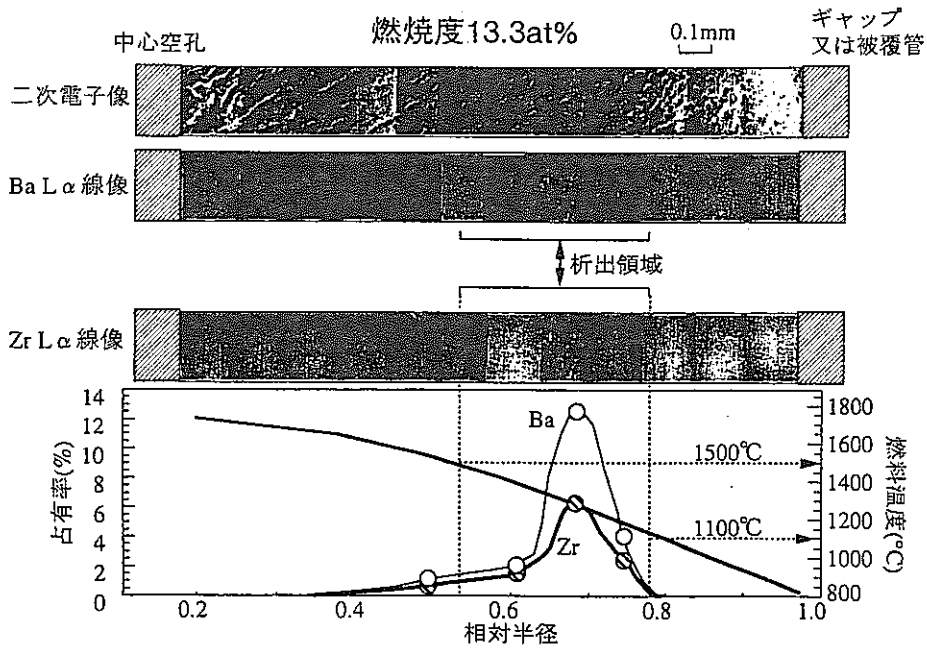


図4 燃焼度13.3at%の燃料におけるZr、Ba系酸化物の析出状態

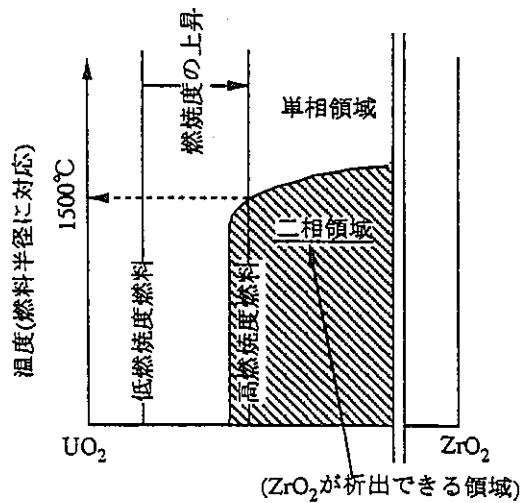


図5  $UO_2-ZrO_2$ 系の状態図 (模式図)



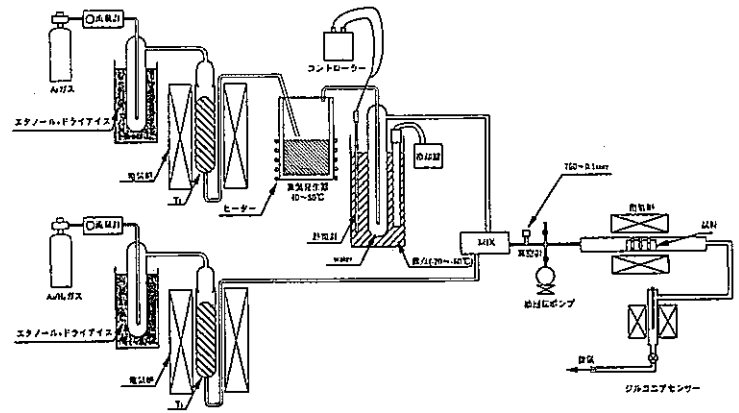
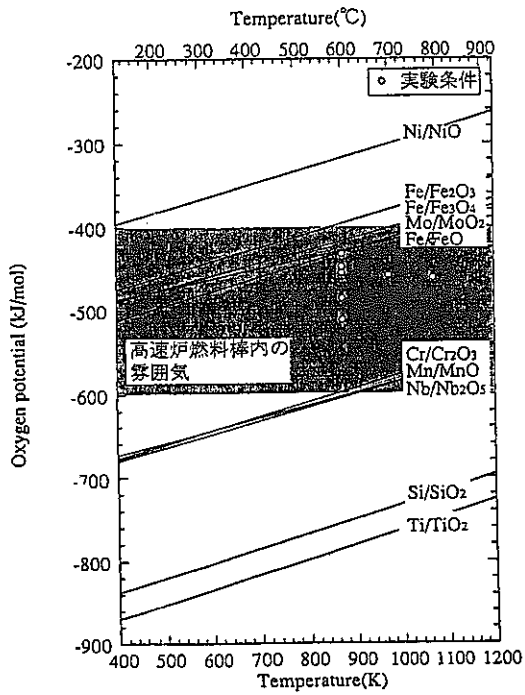


図7 低酸素ポテンシャル下酸化実験装置構成図

図6 高速炉被覆管構成元素の酸化物生成自由エネルギーと高速炉燃料内の酸素ポテンシャル及び本研究における実験点

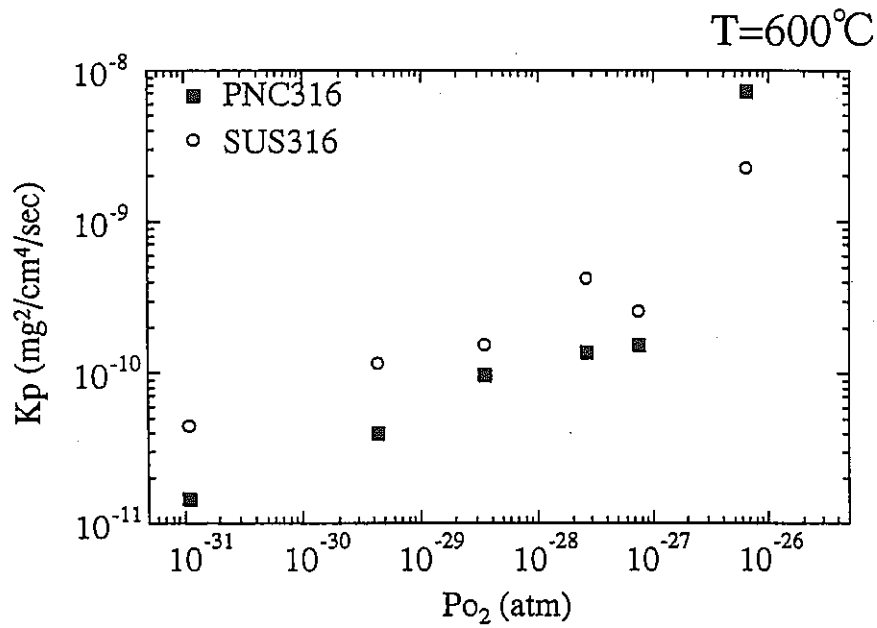


図8 酸化反応速度定数 $K_p$ の酸素分圧依存性の比較

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	レーザーを用いた高速炉の燃料破損検出法に関する研究																		
研究協力課題	レーザー共鳴イオン化分光を用いたFPガスモニタリングの基礎研究																		
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻</td> <td>教授</td> <td>井口哲夫*</td> </tr> <tr> <td></td> <td>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</td> <td>中沢正治*</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: right;">[*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課 青山卓史、野瀬正一</td> </tr> </table>			大 学 側	名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻	教授	井口哲夫*		東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻	教授	中沢正治*		[*客員研究員 **研究生]			機 構 側	大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課 青山卓史、野瀬正一		
大 学 側	名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻	教授	井口哲夫*																
	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻	教授	中沢正治*																
	[*客員研究員 **研究生]																		
機 構 側	大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課 青山卓史、野瀬正一																		
研究協力実施場所	名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻 井口研究室 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 中沢研究室 サイクル機構 大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課																		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年4月1日～ 平成11年3月31日																
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究																		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>燃料破損時や限界照射試験において、燃料ピン等の破損検知及び同定の精度と信頼性を向上させるため、感度良く高いS/N比でかつ迅速に検出できるレーザーを用いた超高感度の共鳴イオン化質量分析法を高速炉のカバーガス分析に適用して、燃料破損検出及び位置決めのためのFPガスモニタリングに関する基礎研究を行う。</p>																			
<p><b>【研究内容(概要)】</b></p> <p>レーザー共鳴イオン化分光法は、近年、超高感度の微量元素分析や効率的な同位体分離等の先端技術として脚光を浴びており、レーザーの性能向上と相まって、さらに広範な工学応用への展開が見込まれている。本研究は、このレーザー共鳴イオン化分光法と質量分析計からなるRIMS (Resonance Ionization Mass Spectrometry) を用い、従来のXe、Kr等のFPガスモニタリングによる破損燃料検出法(Failed Fuel Detection and Location:FFDL)の高精度化の可能性を検討するものである。Xe、Kr等の希ガス試料の分析はRIMSの得意とするところであり、これまでも環境ドシメトリ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できていない。</p> <p>本研究では、Xeガス検出を例題に、本手法の原理確認と検出感度やS/N比等の基本性能を明確にし、レーザー集光系の改善や希ガスコールドトラップとレーザーアブレーション併用による検出感度の向上を図る。このシステムを用いて、高速実験炉「常陽」で照射されたタグガスやカバーガス分析により本手法の性能実証試験を行うとともに、燃焼に伴う同位体組成比変化を評価する。また、Xe、Krガス同時検出を含む高速炉破損燃料検出に適した計測システムの設計検討を行う。</p>																			

## 【使用主要施設】

東京大学大学院工学系研究科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」  
東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設 高速中性子源炉「弥生」

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設のレーザー共鳴イオン化質量分析システムを用いて、高速実験炉「常陽」の炉容器内カバーガス分析のための基礎及び実証試験を進めている。平成9年度は、主として市販のXe混合ガス（N<sub>2</sub> 99%、Xe 1%）による性能確認試験と理論的評価を実施した。平成10年度の前半は、実際のカバーガスを模擬したArベースの低濃度Xe混合ガスを分析し、検出下限値の低減を図った。後半は、「常陽」から採取したカバーガス試料のXe検出とその同位体比の分析実験を実施した。また、検出感度を向上させるため、レーザーのイオン化領域内にXe原子を濃縮する方法として、平成9年度は希ガスコールドトラップによる吸着とレーザーアブレーションの併用（共鳴レーザーアブレーション法）を検討したが、平成10年度は現システムの電極構造でより実現の容易な超音速分子線バルブを用いた局所的高圧ガス注入法の適用性を検討した。

## 【研究成果】

### 1. 高速実験炉「常陽」カバーガス分析の実証試験

東大レーザー共鳴イオン化質量分析システムのXe検出限界について、「常陽」の炉容器内カバーガスを模擬したAr-Xe混合ガスによる詳細な追試実験結果をもとに再評価した結果、実際のカバーガス中のXe予想濃度に対しても、現システムで測定可能との結論を得た。そこで、この結果を実証すべく、昨年度に引き続き、「常陽」から採取されたカバーガス試料中のXeの検出及び同位体比分析実験を試みた。分析したカバーガス試料は、第31サイクルのタグガス放出実験時に採取されたものである。

測定結果の一例として、参照用の天然組成Xeと「常陽」で採取されたXeの質量スペクトルを図1に示す。図1(a)の天然組成Xeについては、<sup>128</sup>Xe (1.9%) より<sup>130</sup>Xe (4.1%) の同位体比が大きいが図1(b)では両者の関係が逆転している。これはタグガスの予想組成比の傾向と一致しており、現（東大）システムによって、実際のカバーガス試料のXe検出に成功したことを示している。

次に、測定された質量スペクトルから同位体比を求めるためには、各ピーク面積（P<sub>i</sub>）に相当するイオン個数（N<sub>i</sub>）を決定しなければならないが、その換算式は

$$N_i = P_i / G_{MCP} / R / e / N_0$$

で与えられる。ここで、G<sub>MCP</sub> はMCPの電荷増倍率、Rは測定回路系の抵抗、eは電気素量、N<sub>0</sub> は1個のイオンがMCPの壁と衝突したときに生じる初期二次電子数である。しかしながら、一般にG<sub>MCP</sub> や N<sub>0</sub> を厳密に求めることは困難である。また、今回の測定ではレーザー1000ショット

（1000秒間）の平均操作を行って質量スペクトルを得ているが、レーザー1ショットあたりに観測されるMCP信号ピークは0～2個の範囲であったので、それらのピーク電圧がある一定の弁別レベルを越えたときにイオン1個として計数する方法により、同位体比を算定した。ここで、弁別レベルはバックグラウンド成分の電圧揺らぎを1σとして、約10σに設定した。予想される組成（同位体）比と測定された結果の比較例を表1～3に示す。なお、表中のNo. は試料ガスの識別番号であり、測定結果の誤差は計数統計に基づいて算出されている。これらの比較表から、測定結果は実験誤差の範囲内で再現性のあることが分かる（表2、3参照）が予想組成比との整合性においては若干の食い違いが見られる。特に、濃度（組成比）の大きい同位体の測定結果は予想値より小さく評価される一方、濃度の小さい同位体では測定結果が予想値より大きく見積もられる傾向がある。この理由としては、今回の分析手順にお

いて、弁別レベルを越えたMCP信号パルス全てをイオン1個と仮定していることが挙げられる。実際濃度が大きい同位体では、レーザー1ショットで複数個のイオンが同時に検出される可能性があるため1つのMCP信号パルスでありながら、その電圧が整数倍高くなる現象が観測された。今回の同位体組成比分析では、このような同時検出される信号パルスのイオン個数を過小評価して(数え落として)しまうことで、高濃度側で小さく、低濃度側で大きく見積もられる結果になったと考えられる。従って、イオン1個に相当するMCP信号パルス電圧を正確に推定し、イオンの個数に相当する適切な弁別レベルを複数設けて、数え落としのない分析を行えば、予想組成比との一致度、さらには測定精度の改善が期待できる。

## 2. 検出感度の改善策の検討

カバーガス中のXe同位体分析を実用的かつ高精度で行うためには、レーザー性能の向上(レーザー出力、レーザーパルスの繰り返し率、出力安定性等の改善)が最も有効と考えられるが、現(東大)システムをベースにした具体的な改善策として、希ガスコールドトラップによる吸着とレーザーアブレーションを併用する(共鳴レーザーアブレーション)方式に引き続き、より実現の容易な超音速パルス分子線バルブを用いた局所的高圧ガス注入方式の適用性を検討中である。平成10年度は、現システムと類似のRIMSシステム(高エネルギー加速研究機構)において、技術移行のための予備的な性能評価試験を実施した。本試験では、 $N_2$  99%、Xe 1%(天然組成)の混合ガスを用いて、試料ガスパルスとレーザーパルスの打ち込み時間差に対する $^{129}Xe$ イオン収率の依存性を調べた。その結果を図2に示す。ここで、図の横軸は試料ガスパルスに対するレーザーパルスの打ち込み遅延時間である。遅延時間が170~220  $\mu sec$ の領域で、収率がおおよそピーク値を保持しており、試料ガスのパルス幅はFWHMにして~90  $\mu sec$ である。この結果は、分子線バルブのパルス幅仕様値(60  $\mu sec$ )をほぼ反映している。なお、イオン収率が試料パルスの消滅後、緩やかに減少しているが、これは残留試料ガスが徐々に排気されることによる。これらの結果から、容器内を真空(~ $10^{-6}$  torr)に保ちながら、共鳴イオン化領域内の試料ガス圧のみを、少なくとも3~6倍程度高く保てることが実証された。この他、 $^{129}Xe$ の質量スペクトルについては、分子線パルスを用いない場合に比べ~1.5倍の質量分解能の向上もみられた。これは、分子線パルスにより著しく分散の少ない並進速度分布が得られた結果、イオンの初期エネルギー分布に起因する飛行時間差変動が抑制されたためと思われる。

### 【今後の予定(翌年度以降の概要)】

平成10年度の実験結果を踏まえて、「常陽」におけるタグガス放出実験試料のXeの系統的分析を進め、結果の整合性の確認・評価とともに、燃焼に伴う同位体比変化の検出実証を試みる。また、超音速分子線バルブを用いた高感度化対策とともに、もう1つの希ガスであるKrについても、Xeと同様の検出性能評価のための基礎実験を行う。最終的に、以上の成果を統合して、Xe/Kr同時検出可能で、高速炉破損燃料検出に適した計測システムの設計提案を行う。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1. 荻田利幸、井口哲夫、青山卓史、伊藤主税 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(2)」、日本原子力学会1998年秋の大会、福井工大、B61、(1998)。
2. 渡辺賢一、井口哲夫、「共鳴レーザーアブレーションの基礎過程」、1998年秋季(第59回)応用物理学会学術講演会、広島大、16a-Z-1(1998)。
3. 荻田利幸、渡辺賢一、井口哲夫、青山卓史、伊藤主税、鈴木惣十「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」、放射線、Vol. 25 No. 2 (1999) 89-93。

表1 「常陽」採取カバーガス中のXe同位体組成比の測定結果(1)  
(予想される同位体組成比が1種類で、1回のサンプリング)

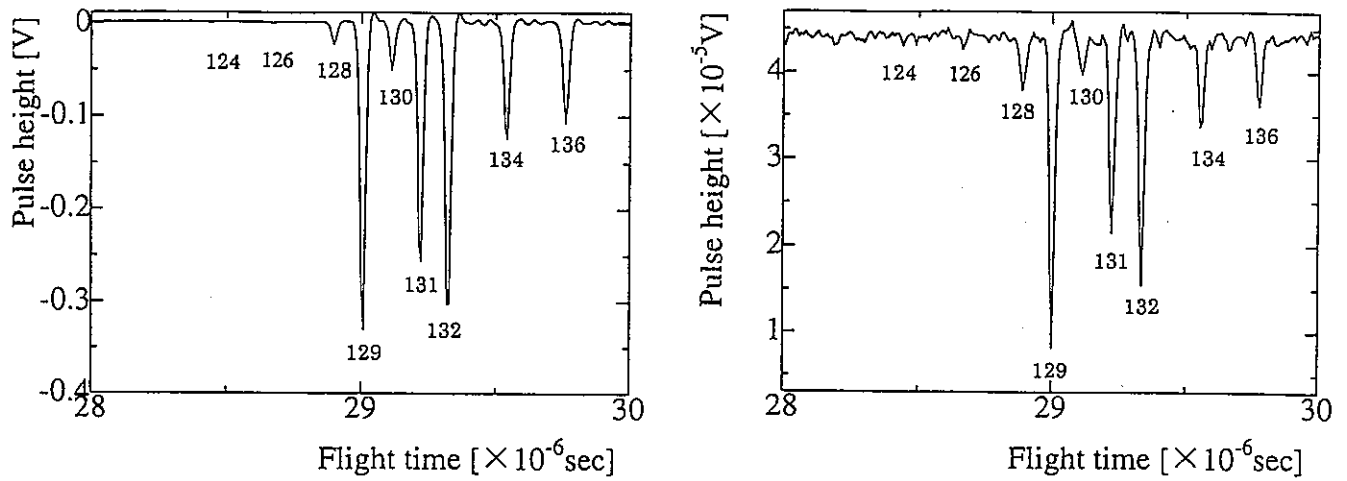
同位体	予想組成比	No. 7	
		組成比	相対誤差[%]
124	1.036	1.009	25.13
126	1.435	1.829	18.74
128	4.960	5.864	10.67
129	27.046	25.032	5.61
130	3.762	4.603	11.97
131	19.484	19.105	6.27
132	24.639	23.644	5.74
134	9.558	9.773	8.42
136	8.079	9.143	8.68

表2 「常陽」採取カバーガス中のXe同位体組成比の測定結果(2)  
(予想される同位体組成比が1種類で、2回のサンプリング)

同位体	予想組成比	No. 2		No. 9	
		組成比	相対誤差[%]	組成比	相対誤差[%]
124	1.074	1.990	19.085	1.528	20.15
126	1.501	1.848	19.790	1.773	18.74
128	5.349	6.254	10.989	6.540	9.98
129	28.299	26.226	5.849	27.812	5.30
130	3.752	4.549	12.782	5.379	10.94
131	19.198	18.053	6.817	17.910	6.34
132	24.170	22.601	6.209	22.188	5.80
134	9.233	9.950	8.862	9.536	8.38
136	7.434	8.529	9.510	7.335	9.46

表3 「常陽」採取カバーガス中のXe同位体組成比の測定結果(3)  
(予想される同位体組成比が2種類で、3回のサンプリング)

同位体	予想組成比		No. 3		No. 4		No. 0	
			組成比	相対誤差[%]	組成比	相対誤差[%]	組成比	相対誤差[%]
124	1.038	0.893	1.009	18.05	1.162	19.36	1.105	18.06
126	1.438	1.225	1.692	13.98	1.765	15.76	1.818	14.13
128	4.976	4.675	4.849	8.39	4.951	9.55	5.168	8.52
129	27.103	28.716	24.601	4.06	25.269	4.62	27.334	4.07
130	3.762	3.828	4.881	8.36	4.348	10.16	5.025	8.63
131	19.471	19.254	19.948	4.42	19.845	5.10	18.781	4.75
132	24.623	24.205	24.732	4.05	24.451	4.68	22.452	4.41
134	9.546	9.359	9.990	5.99	9.858	6.93	10.228	6.20
136	8.044	7.845	8.298	6.52	8.351	7.47	8.090	6.90



(a) 参照用試料(Ar)ガス中の天然組成Xe

(b) 「常陽」採取カバー(Ar)ガス中のXe

図1 Xe質量スペクトルの測定結果例

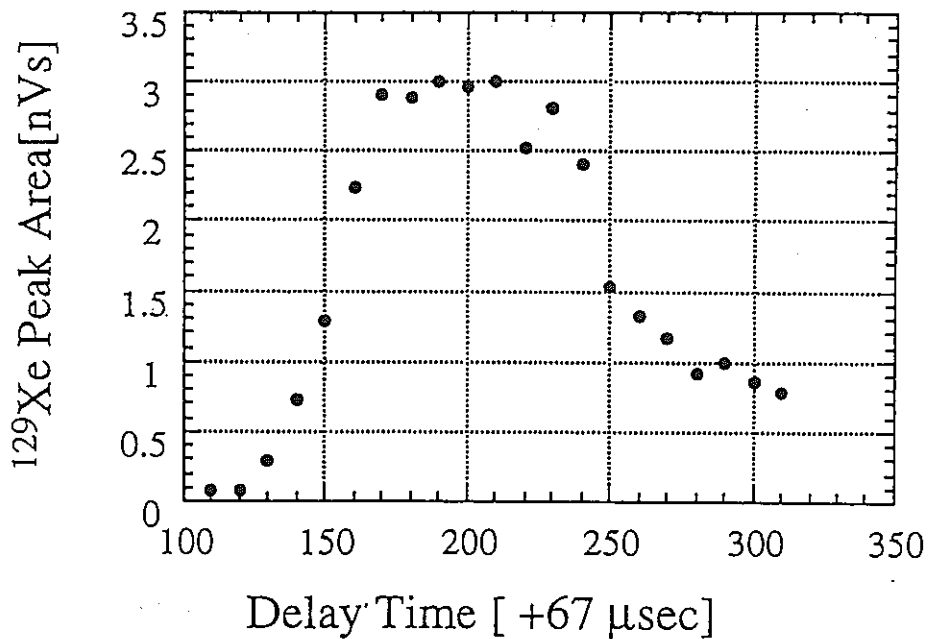


図2 試料ガス分子線パルスとレーザーパルスの打ち込み時間差に対する  $^{129}\text{Xe}$ イオン収率の依存性

先行基礎工学分野に関する平成10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		
研究協力課題	同上 - 液面下の流れによる不安定現象 -		
研究者所属、氏名			
大学側	東京大学大学院 工学系研究科 附属原子力工学研究施設 班目 春樹 教授, 岡本 孝司 助教授, 鶴 大悟 助手 [*客員研究員 **研究生]		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ 飯田 将雄		
研究協力実施場所	東京大学大学院 工学系研究科 附属原子力工学研究施設, 大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ		
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10年10月12日~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>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><b>【研究内容（概要）】</b></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><b>【使用主要施設】</b></p> <p>東大工学部原子力工学研究施設内 水ループ 高架水槽高さ 5m、最大流量 2000 l/min</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度には、液面に衝突する平面噴流の自励振動の発生機構の検討、および高分子溶液による自由液面乱流抑制効果の検討を実施した。

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

平成10年度は、上記の自由液面自励スロッシング解析の結果を援用した振動発生メカニズム解明、および自由液面と乱流の相互作用に関する実験的研究を実施した。

## 【研究成果】

### ○ 鉛直噴流による自由液面自励スロッシングメカニズム解明

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

図1に自励スロッシングの実験と計算を比較して示す。実験はインクにより噴流を可視化している。また解析では仮想トレーサにより噴流を可視化している。解析において、スロッシング状態における噴流のうねり(変動)と液面形状が正しく模擬できていることが判る。すなわち、シミュレーションで模擬されたスロッシング現象は実験で観測されたスロッシング現象と同じメカニズムで発生している事が判る。

この計算結果における自励振動発生機構を検討するため、計算結果を用いて、噴流から振動へのエネルギー変換機構に関して検討を実施した。スロッシングをポテンシャルフローによって近似し、数値計算で求まる流速分布に基づいて計算される流体力が、スロッシングポテンシャルに付与するエネルギーを解析する。流体力はコントロールボリューム内で代表して与える。この流体力とスロッシングポテンシャルから求まる流速への内積をとることで、流体力によるスロッシングエネルギーが計算できる。これを1周期に渡って積分すると、各コントロールボリュームのスロッシングへの寄与が算出できる。図2に、本手法によって解析した、スロッシングエネルギー分布を示す。ここでは、スロッシング発生時のエネルギー分布を示している。ここに示すように、噴流に添って、エネルギーの正負の領域が存在している。このエネルギーは、噴流変動の位相遅れと強い相関を持っている。このことにより、噴流の変動によってスロッシングにエネルギーが供給されている可能性を示すことが出来た。振動発生条件と非発生条件におけるエネルギー分布を考察し、非発生条件においては、負のエネルギー部分が大きくなることを確認した。

### ○ 自由液面と乱流との相互作用

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

微量の鎖状高分子を混入することにより、自由液面乱流の抑制に関して、実験的検討を実施し、これらの影響によって自由液面の乱れが減衰することを定性的に確認した。LIF (Laser Induced Fluorescence) を用い、液面下噴流を可視化することで、水噴流と高分子溶液噴流の定性的な挙動の違いを明確にした。従来の研究では、可視化による噴流挙動、液面挙動の定性的な把握が主であったが、本年度は定量的データの取得のための新手法の開発に取り組んだ。その結果、レーザースペックルを応用した、全く新しい手法の開発に成功した。この手法では、自由液面の下部からスペックルを含んだレーザー光を照射する。このスペックルパターンをスクリーンに写すと共にデジタルカメラに記録する。このスペックルパターンの平行移動は、液面の勾配の関数となっている。スペック



ルパターンはノイズ画像であり、その画像エンタルピーが大きいため画像解析に向いている。PIV で用いられる相互相関法によって、画像を解析し、パターン移動距離すなわち液面の勾配ベクトルを求める。この勾配ベクトルを、領域全体に渡って積分することで、液面の形状を算出することができる。図3に本手法によって求められた液面の微小な隆起を示す。1mm 以下の微小な変形を高精度で求めることが出来ている。さらに、PIV 手法によって液面下の噴流と自由液面との相互作用を可視化しすることにより、流れ場の特性を明らかにした。

#### ○ まとめ

本研究においては、自由液面の非線形不安定挙動に関するメカニズムの解明を目的として研究を推進して来た。その結果、ジェットフラッタ、自励スロッシングについてメカニズムをほぼ解明することが出来た。ジェットと自由液面との相互作用に起因するエネルギー付与機構を明らかとし、その特徴を明確化することができた。さらに、本研究で開発した新しい光学的手法を用いて、基礎的な自由液面乱流挙動の定量化を行った。本研究の目的を達成することが出来たと考える。

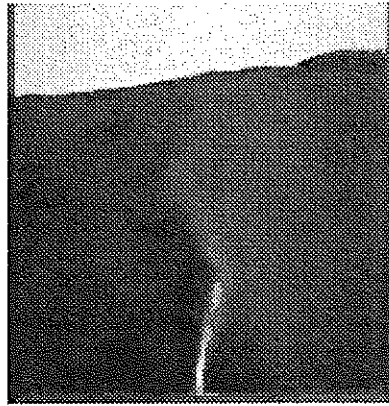
今後は、本研究で得られた成果を、実機への設計に反映する事が重要となる。実機においては、スケールの違いを考慮し、シミュレーションなどを援用しながら、本メカニズムで振動が発生するかどうかを評価していく事ができると考える。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

（本年度で終了）

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・ 班目春樹、飯田将雄、「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(B編)(1997), Vol.63, No.612, pp. 2732-2738.
- ・ 班目春樹、飯田将雄、「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(B編)(1997), Vol.63, No.612, pp. 2739-2744.
- ・ Okamoto, K. and Madarame, H., "Fluid dynamics of a free surface in liquid metal fast breeder reactors," Progress in Nuclear Energy, Vol.32, No.1/2, (1998), pp.195-207.
- ・ Bistriceanu, M., Okamoto, K., Madarame, H. and Iida M., "Numerical Prediction on Self-Induced Sloshing by Vertical Plane Jet," ASME Proc. ICONE-6, San Diego, (1998) ICONE-6123
- ・ Bistriceanu, M., Okamoto, K. and Madarame, H. "Numerical Analysis on Growth Mechanism of Self-induced Sloshing by Vertical Plane Jet," JSME Proc. ICONE-7, Tokyo, (1999) ICONE-7032
- ・ Okamoto, K., Tanaka, G. and Madarame, H., "Measurement of free surface inclination using specklegram," Proc. 9th Int. Symp. Application of Laser Tech. to Fluid Mech., Lisbon, (1998), pp.16.1.1



Experiment



Simulation

図1: 自励スロッシングの可視化とシミュレーション

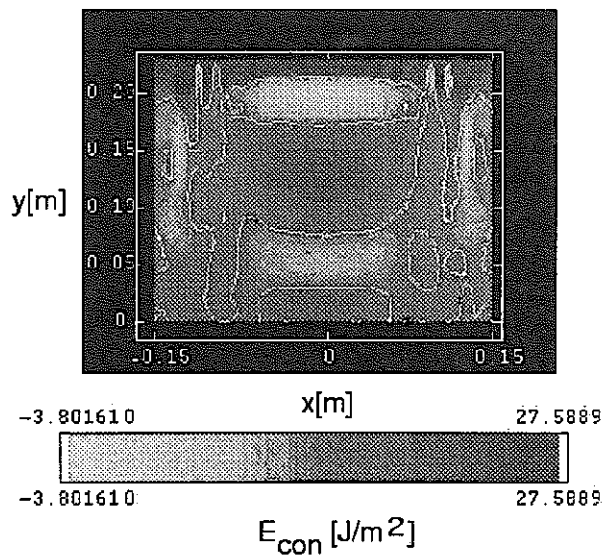
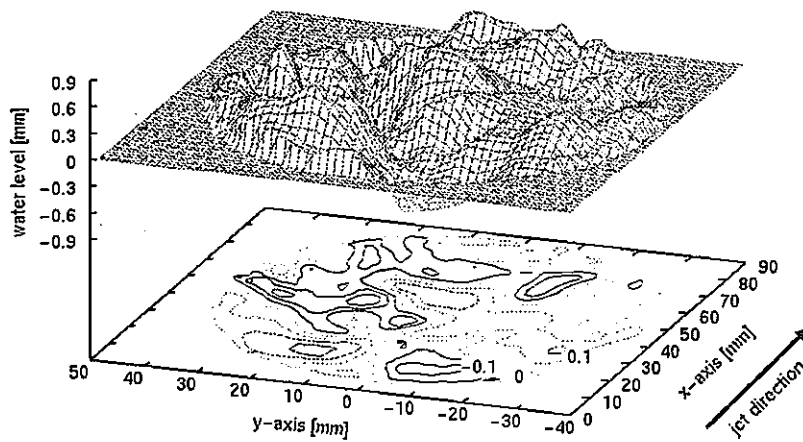


図2: スロッシングエネルギー分布(スロッシング時)



(a) Water surface

図3: 自由液面変形の定量化

先行基礎工学分野に関する平成10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		
研究協力課題	同上 -流れ込みに対する液面応答-		
研究者所属、氏名			
大学側	茨城大学工学部 機械工学科 神永 文人 教授, 松村 邦仁 助手, 中村 弘史 院生 [*客員研究員 **研究生]		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ 飯田 将雄		
研究協力実施場所	茨城大学 工学部 神永研究室 大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ		
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10年10月 1日~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>容器内流体の自由液面と液面へ流れ込む流れの相互作用に起因する非線型不安定現象について、現象の詳細な知見と、発生予測手法を得ることを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></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><b>【使用主要施設】</b></p> <p>茨大工学部機械工学科内 水ループ</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 9 年度には 2 次元体系の試験装置を製作し、容器内自由液面に生じる振動現象について種々の条件下で実験を行って代表的な液面振動の発生形態を調べた。平成 10 年度は、これらの結果を基に振動発生条件に及ぼす各パラメータの影響について、さらに詳細な実験を行った。その結果、主に容器長さ、深さ、流入時の気泡の巻き込みが振動発生条件に大きく影響していることが分かった。また、流入位置を変えることによって、自由液面上の振動モードが変化することと、液面振動が噴流の液中での蛇行に最も関連していることを明らかにした。

## 【研究成果】

平成 11 年 3 月までの研究成果の概要をまとめる。

本研究では、昨年度に引き続き自由液面上方から流体が流れ込む場合について、液面振動の発生条件を実験的に調べた。また、昨年度の結果を基に噴流への気泡巻き込みの影響についても新たに実験を行った。すなわち、噴流の流入口が自由液面よりも上部にある場合と下部にある場合の液面振動への影響についてそれぞれ調べた。

### (1)液面揺動実験装置

試験水槽部の概略図を図 1 に示す。本年度の実験では主に、液の水深(H)、容器長さ(L)、及び試験容器端部からの流入位置(l)を種々に変化させ、まず代表的な流動現象の分類を行った。液面揺動の計測には容器壁付近に設置した容量式波高計を使用した。各パラメータの変化範囲は  $H=300\sim 450[\text{mm}]$ 、 $L=500\sim 1740[\text{mm}]$ 、 $l=100\sim 900[\text{mm}]$  である。このうち、H と L については仕切り板の操作によって大きさを変化できるように設計されている。また、噴流の流入口位置は、液面上方については自由液面上 40mm、液面下方については自由液面下 20mm に流入口を設置した。これにより噴流への空気泡混入の影響を調べた。なお、水面流入時の噴流の流速は最大でおよそ 2.3m/s である。

### (2)液面振動現象の分類

図 2 に液面上部から流入させた際に観察された、代表的な液面振動のイラストを示す。本実験体系で見られた液面振動を分類すると、(1)定在波形液面振動(2)遷移振動(3)多重振動(4)壁面近傍での渦の付着(5)跳水現象(6)非振動に大別できる。安定した液面振動が発生する場合、噴流が大きく蛇行し、その噴流の振動によって自由液面も大きく揺動した。一方、噴流を自由液面下部から流入させた場合には、空気泡の混入はほとんど生じず、その場合の液面振動は図 2 とは大きく異なることが分かった。つまり気泡の巻き込みが液面を揺動しやすくする働きがあり、このことから、巻き込まれた気泡が噴流の安定性に何らかの影響を及ぼすことが推測できる。

### (3)液面振動の発生条件

定在波形液面振動が生じた際の振動波形を図 3 に、その周波数解析の結果を図 4 に示す。図中の(a)(b)(c)はそれぞれ 1 次、2 次、3 次モードの液面振動波形を表している。各振動モードにおいては、ほぼ周期的な定在波を形成する液面振動が生じており、その周波数解析の結果からも卓越したピークを持つ周波数成分のみが現れていることが判る。また、この定在波振動の場合、噴流の液面流入点が振動の node(節)となる特徴があることが分かった。各モードの間に見られる遷移振動域における代表的な振動波形とその周波数解析の結果を、図 5 及び図 6 に示す。遷移振動域においては、定在波と振動波が観察されるためやや乱れた液面振動波形が見られた。またその周波数解析の結果から、複数の周波数ピークを持つ振動形態であることも分かる。

図 7 は容器長さ(L)と、液面振動の周波数との関係を表している。図中の実線は、容器内流体について理論的に求められているスロッピング周波数である。本実験で得られた液面振動の周波数は、理論的に求められている周波数とほぼ良く一致することが分かる。また容器長さが大きくなると振動モードが変化し、各振動モードの遷移点付近では、主に二つの周波数ピークを持つ振動形態であることがこの図からも分かる。

図 8 は本実験で観察された液面振動の発生条件について、噴流の流入位置(l)と容器長さ(L)との関連から整理したもので、図中の各点はそれぞれ振動モードを表している。これによれば、同じ容器長さでも、流入位置 l が大きくなるにつれて液面の振動形態が異なることが分かる。また図中の点線は  $l/L=1/2\sim 1/6$  を示しており、各振動モードが l と L の比によっておよそ決定されていることが推測される。一方、図 9 は自由液面下から噴流を流入さ

せた際の液面振動発生条件を表している。この図より、自由液面下から流入させた場合には液面振動は非常に生じにくくなり、その振動モードも液面の上部から流入させる場合と異なることが分かる。この相違の原因として、液面上部からの流入の場合、気泡混入による流動抵抗の増加により液中での噴流の蛇行が容易になることを考え、液中での噴流の蛇行を容易にするため、噴流の下流側にくさび状の物体を設置した実験を行った。その結果、自由液面下から流入させた場合でも噴流の蛇行が生じやすい体系では液面振動が促進されることが明かとなった。

図 10 は、噴流の下流側にくさび状の物体を設置した場合の自由液面振動と、噴流の速度変動の関係を表している。ここで、噴流の速度変動は熱線流速計(線径  $152 \mu \phi$ )を用いて測定した。噴流は水中で大きく蛇行するため、測定位置によって観測される振動波形の位相が異なる。しかし、図 10 より判るように、液面の振動と噴流の速度変動はいずれの容器長さについても、ほぼ同一の周期で振動している。図 11 は図 10 に示される振動の周波数解析の結果を表しており、自由液面振動と噴流の変動はほぼ同じ卓越周波数で振動している。さらに、噴流下流に設置する物体位置を変えることにより、噴流の蛇行の様相が変化し、それにより液面の振動モードも変化することを実験的に確認した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

（本年度で終了）

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 中村弘史、他「流れ込みに伴う液面の自励振動に関する研究」、日本原子力学会 1998 秋の大会、福井、G26(1998)
- (2) H. Nakamura, et al., "Self-induced Sloshing of Free Surface Caused by Free Jet", ICONE-7208 (1999)

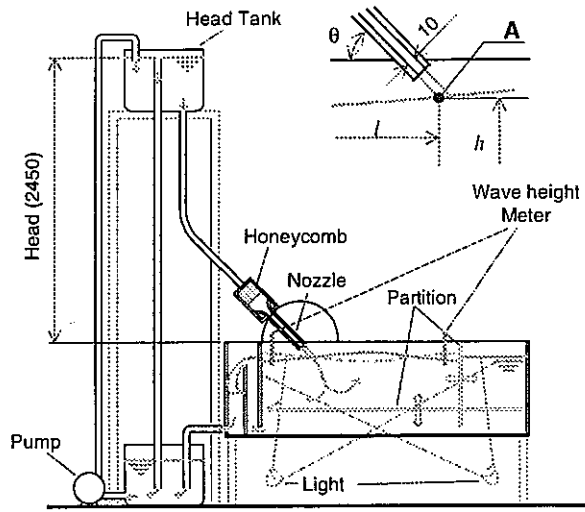
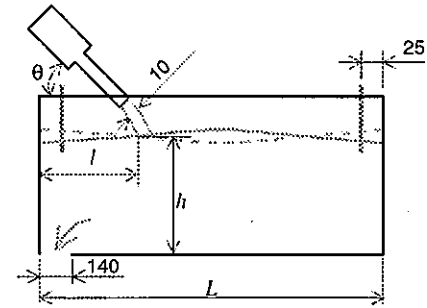
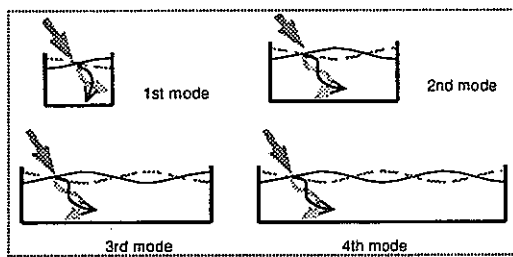


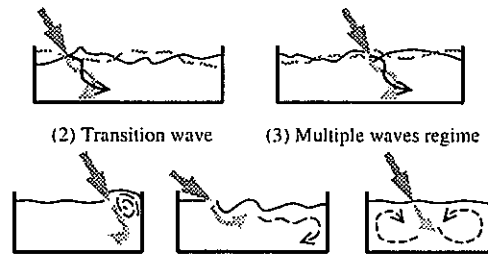
Fig.1 Experimental apparatus



Definition of experimental parameters



(1) Standing wave of n-th sloshing mode



(2) Transition wave (3) Multiple waves regime (4) Vortex (5) Hydraulic jump (6) Stable or ripples

Fig.2 Types of free surface oscillations

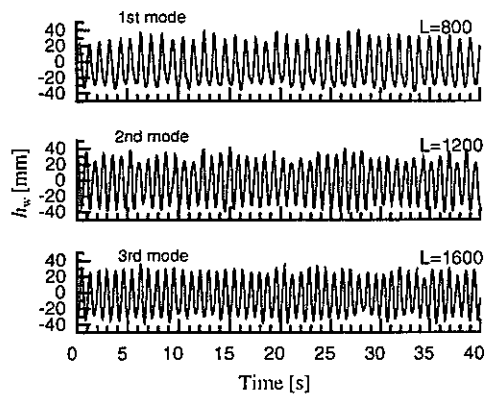


Fig.3 Variation of wave height with a lapse of time ( $l=400\text{mm}$ ,  $h=350\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

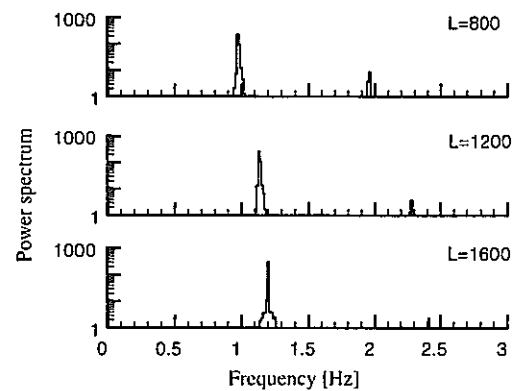


Fig.4 Power spectrum of frequency ( $l=400\text{mm}$ ,  $h=350\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

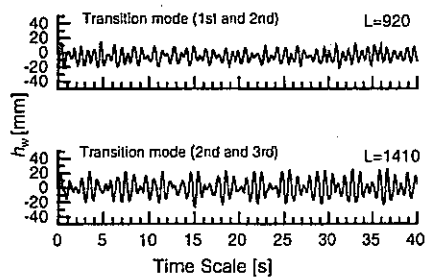


Fig.5 Variation of wave height with a lapse of time ( $l=400\text{mm}$ ,  $h=350\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

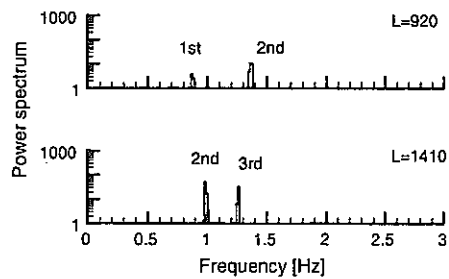


Fig.6 Power spectrum of frequency ( $l=400\text{mm}$ ,  $h=350\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

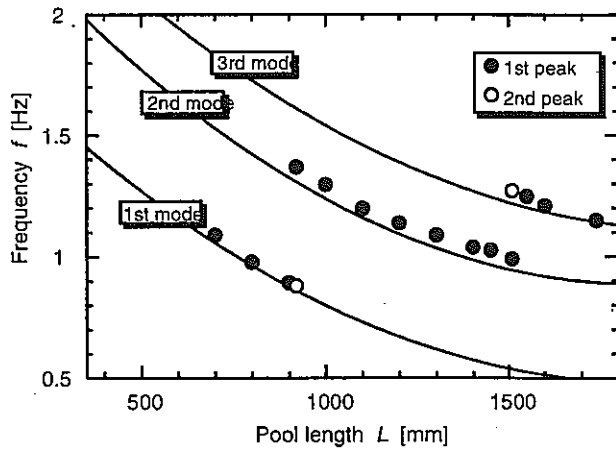


Fig.7 Relation between length of experimental range and frequency of free surface oscillation ( $l=400\text{mm}$ ,  $h=350\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

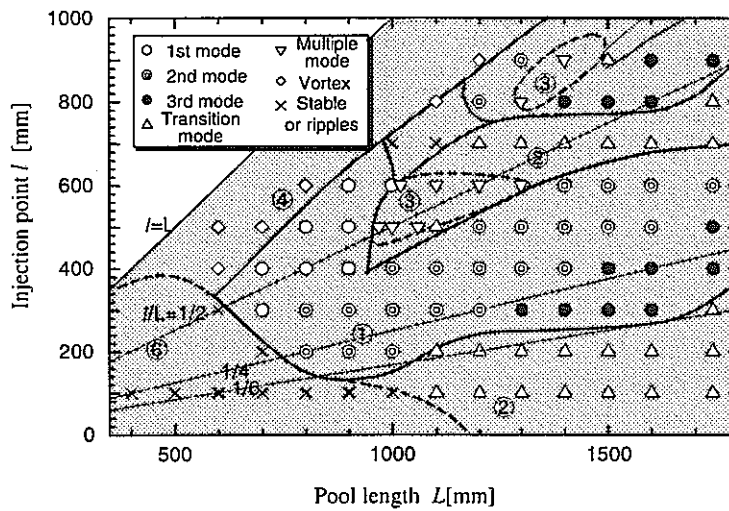


Fig. 8 Map of typical oscillation ( $h=350\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

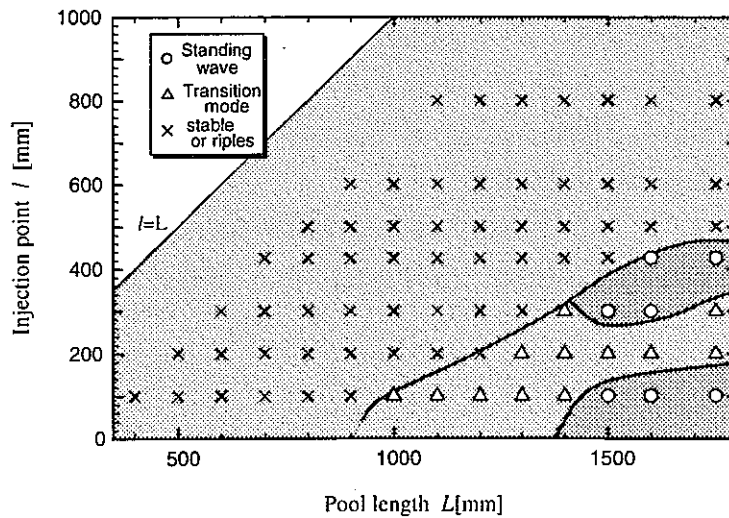


Fig. 9 Map of typical oscillation ( $h=530\text{mm}$ ,  $\theta=30^\circ$ )

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	炉心槽内流速分布測定への超音波流速計の適用性評価														
研究協力課題	非均一温度場における流速分布計測及び物理モデルの開発・構築														
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td> <td colspan="3">慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授 菱田公一*</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: right;">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>機構側</td> <td colspan="3">大洗 原子炉工学グループ 上出 英樹、A.Tokuhiro、木村 暢之</td> </tr> </table>			大学側	慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授 菱田公一*				〔*客員研究員 **研究生〕			機構側	大洗 原子炉工学グループ 上出 英樹、A.Tokuhiro、木村 暢之		
大学側	慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授 菱田公一*														
	〔*客員研究員 **研究生〕														
機構側	大洗 原子炉工学グループ 上出 英樹、A.Tokuhiro、木村 暢之														
研究協力実施場所	慶應大学 菱田研究室 サイクル機構 大洗工学センター 原子炉工学グループ														
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成10年4月1日～ 平成11年3月31日												
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究														
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>高速炉の受動的安全性向上において、自然循環による崩壊熱除去現象の把握とその評価手法の確立は重要なテーマである。近年崩壊熱除去時のラップ管の隙間部の流れによる炉心の冷却現象が着目されている。この流れはインターラップフロー（IWF）と呼ばれ、その熱流動挙動の解明および解析評価手法の確立を今後進める必要がある。</p>															
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>インターラップフローの現象解明のための基礎研究として炉心槽内及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を用いた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比較することにより隙間部の流れに対する適用性を評価する。粒子の画像処理から得られる瞬時2次元の速度場と超音波流速計から得られる瞬時1次元の速度場を比較するにあたり、基礎的試験も合わせて行う。</p> <p>試験で得られたデータは、インターラップフローの熱流動挙動の把握・解明、及び解析コードの検証に活用する。さらに試験での知見に基づき、解析評価に用いる流動分布抵抗などの物理モデルを開発・構築する。</p>															
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>サーマルストライピング試験装置（大洗 水流動） 炉心槽内熱流動現象試験装置（大洗 水流動）</p>															



## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度には、気泡の近傍の流れ場についてUVP（超音波流速分布測定装置）とPIV（粒子画像流速測定法）を用いて流速測定を実施し、複雑な形状に対して両者が適用できることを明らかにした。9年度には温度の異なる噴流間の混合過程に対して、UVPとPIVを適用し、非等温場における速度計測について両者の適用性を明らかにした。

10年度はPIVについて、構造物近傍での適用性を確認するとともに、炉心槽内の熱流動現象について、多次元解析コードによるモデル化手法の開発と予備解析を行った。

## 【研究成果】

### 1. はじめに

UVPによる速度場測定のカロスチェックとして用いるPIVの基礎試験として、PIVを本研究の体系であるラッパー管間の狭い隙間（6mm程度）に適用する上での課題である光の反射の影響を受けやすい壁近傍、ならびに、時間変動に対する計測を行い適用性を検討した。実験は水を作動流体とする平行3噴流体系で行った。また、本研究のテーマである炉心槽内の流れ場について、多次元熱流動解析手法を用いたモデル化手法の開発と予備解析を行った。

### 2. PIVの適用性に関する検討

#### 2.1 試験装置と計測手法

図1に示すように試験装置は3本の平行スリットから低温（中心スリット）と高温（両側のスリット）の噴流が鉛直に出る体系で、3本の噴流を横切るように鉛直に板（壁）を差し込んだものである。この板に沿った鉛直2次元平面における速度場をPIVにより計測した。

PIVでは試験容器の側面からレーザーライトシートを2ms間隔でパルス状に照射し、CCDカメラにより1対の画像を収録する。これを30Hzの周期で2秒間繰り返し、60対の画像データを得た。このデータから菱田研究室で開発された画像処理ソフトにより、2次元の流速ベクトルの時間変化を求めた。レーザーライトシートの位置を奥行き方向（図1参照、y方向）に動かし、壁近傍の流速場を測定した。

試験条件は、非等温場での適用性を確認する意味で、中央の噴流を外側の噴流より5℃だけ低温とし、突出流速は3本の噴流で一様（0.5m/s）とした。

#### 2.2 実験結果

PIVにより得られた壁から1mmと40mmの位置（それぞれ $y = 1, 40\text{mm}$ ）での速度場の代表例を図2に示す。測定結果には噴流の中での計測位置を示すため時間平均の温度計測データも合わせて示す。図から、 $y=1\text{mm}$ ならびに40mmのそれぞれの位置において中央の噴流と左側の噴流とが互いに混合する様子がよくわかる。また、主流（ $y=40\text{mm}$ ）に比べて壁近傍（ $y=1\text{mm}$ ）では全体に流速の絶対値が小さい傾向にある。

次に、図2の左上に示した点での奥行き方向3点（ $y=1, 10, 40\text{mm}$ ）の位置での各速度成分の時間変化を図3に示す。どの空間位置でも連続して（安定して）時間変動挙動が計測されていることがわかる。これらから、PIVが壁近傍の速度場測定、時間変動挙動の測定に十分な適用性をもつことがわかる。また、噴流間混合過程における壁近傍での速度変動減衰特性の評価に用いることも可能である。

### 3. 炉心槽内熱流動現象に関するモデル化手法の開発と予備解析

#### 3. 1 試験装置

炉心槽内の流れ、すなわち集合体間ギャップ部での自然対流の流動特性を把握する目的で、水を作動流体とする試験を実施している。図4に試験装置を示す。燃料集合体を模擬したアクリル製6角管（水平断面で実寸大）に透明の電気ヒータを張り付け、炉心槽部を加熱できるとともに、外部から可視化ができる。上部プレナムには崩壊熱除去用の炉内冷却器（DHX）を模擬した熱交換器が挿入され、低温の水を炉心槽に供給する。計測は熱電対を用いた温度計測、PIV、UVPを用いた流速測定が可能である。

#### 3. 2 解析手法

3次元熱流動解析コードCASCADEを用いた解析モデルを開発した。図5に示すように炉心槽をポラスボディ近似でモデル化し、上部プレナムと同一多次元領域とする。集合体は多チャンネルのネットワークモデルで模擬し、多次元領域と結ぶ。本試験体系では、集合体内の流れは模擬しておらず、多次元領域部のモデル化手法の検証を目的とする。

#### 3. 3 予備解析結果

模擬燃料集合体表面の熱流束 $2\text{kW}/\text{m}^2$ のケースについて図6に炉心槽内の流れ場を示す。DHXからの低温の水が炉心槽内で大きな循環流を形成し上部プレナムにもどる流れ場が形成されている。今後の試験で速度に関する検証データを得る予定である。

### 4. まとめ

UVPとのクロスチェックとして重要なPIVによる速度場測定について、壁近傍での測定、時間変動に関する測定について十分な適用性をもつことを確認した。また、炉心槽内の熱流動現象に関する解析モデルを開発し、予備解析を実施した。上部プレナムと炉心槽内の流れのカップリングを含めて流れ場を解析できることを示した。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

UVP、PIVによる速度場測定を炉心槽内熱流動現象試験に適用し、集合体間隙間部の自然対流の流動特性を明らかにする。これを受けて流動抵抗モデル等の解析物理モデルの構築を図るとともに解析評価手法の検証を行う。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

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

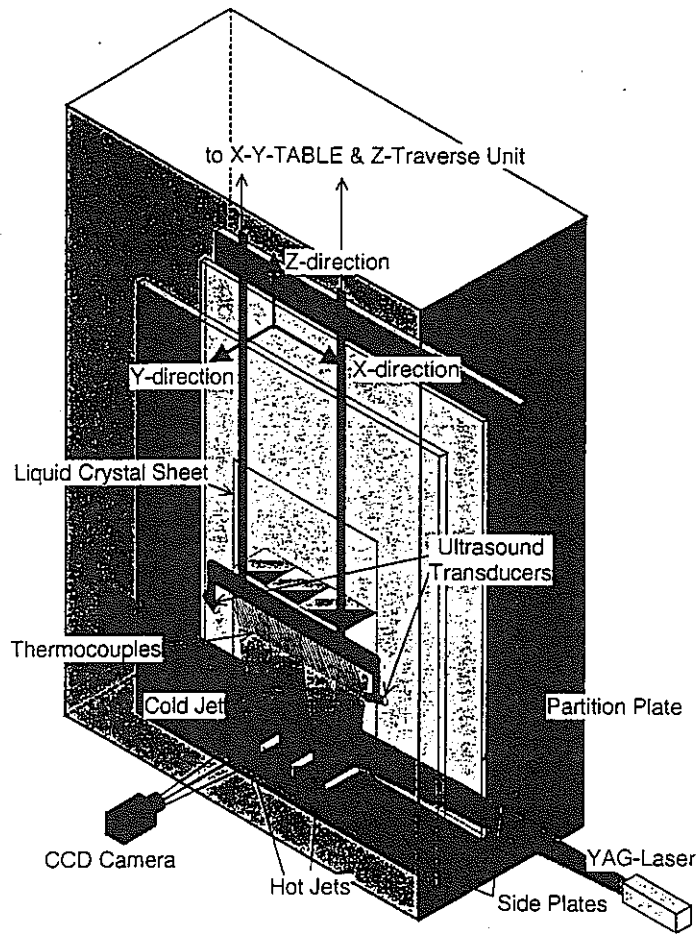


図1 平行3噴流試験装置

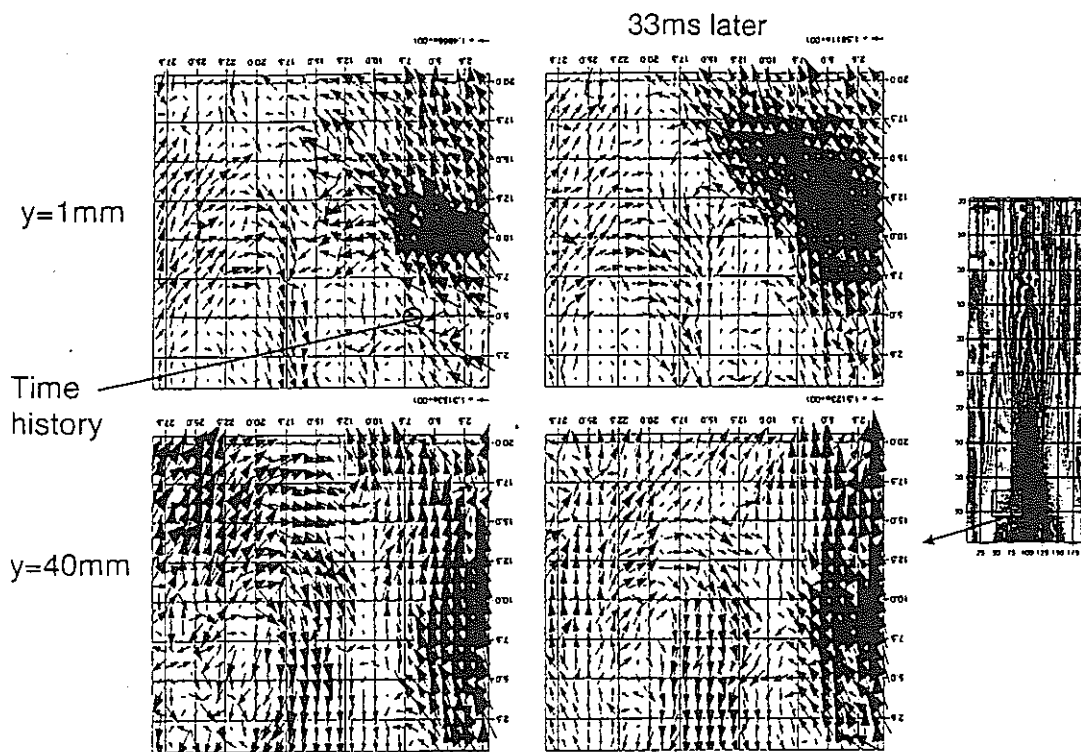


図2 PIVにより計測した瞬時2次元流速分布

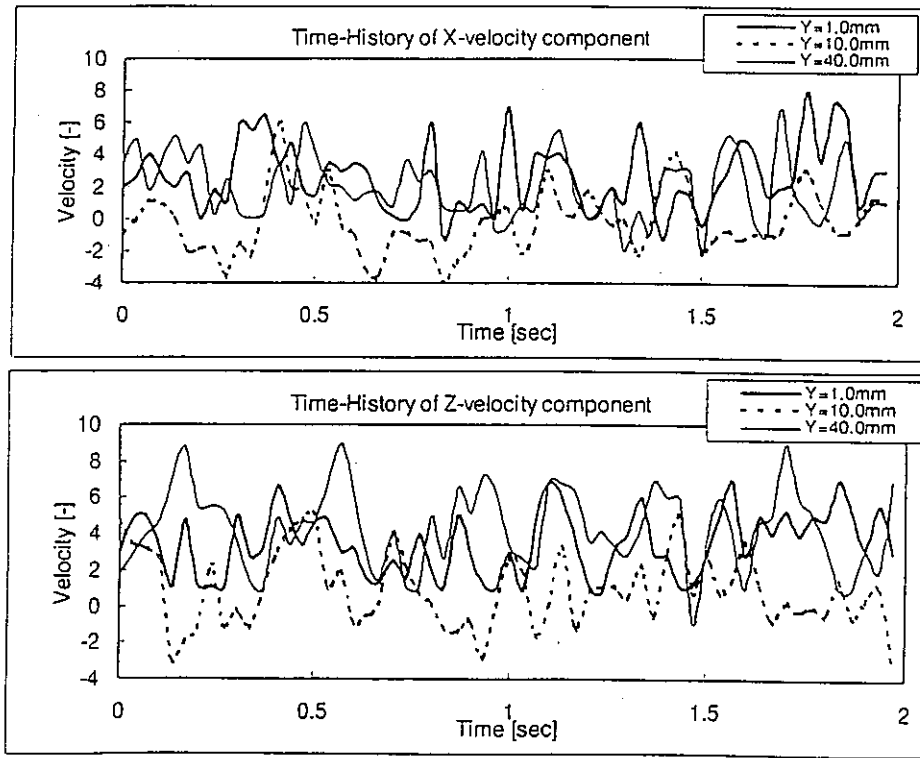


図3 PIVにより計測した速度成分の時間変化

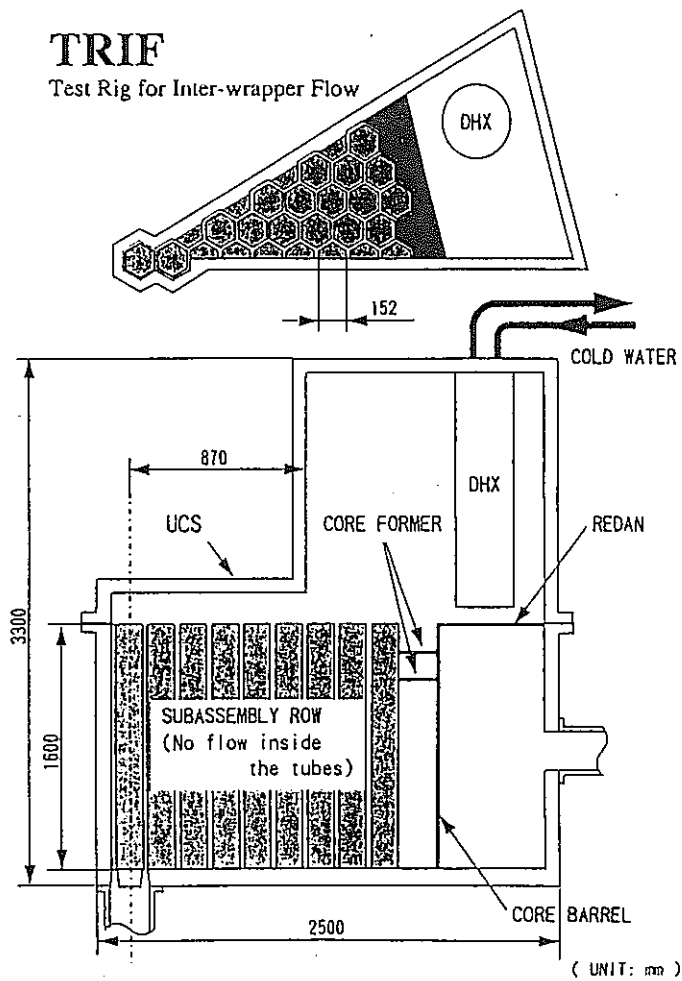


図4 炉心槽内自然循環水試験装置：TRIF

# Mesh Arrangement in the Horizontal Plane

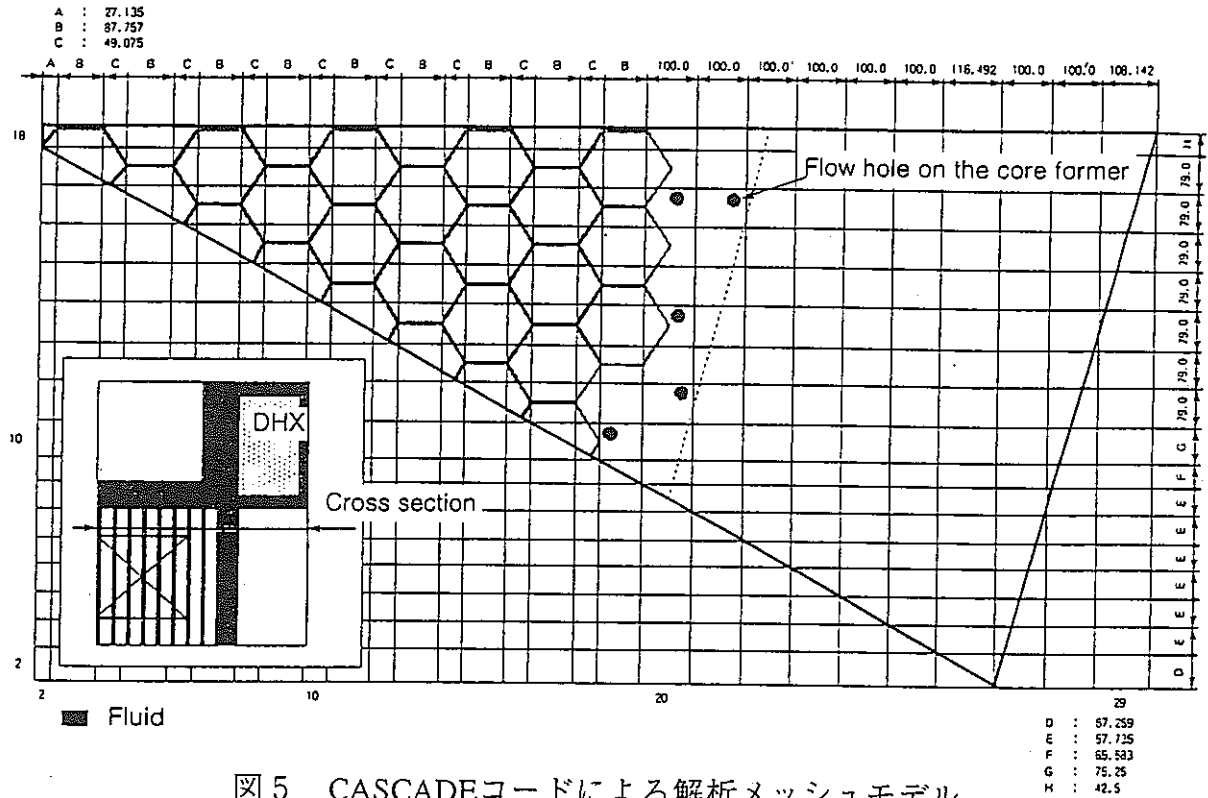


図5 CASCADEコードによる解析メッシュモデル

## Predicted Velocity Field

$q_w = 2,000 \text{ W/m}^2$

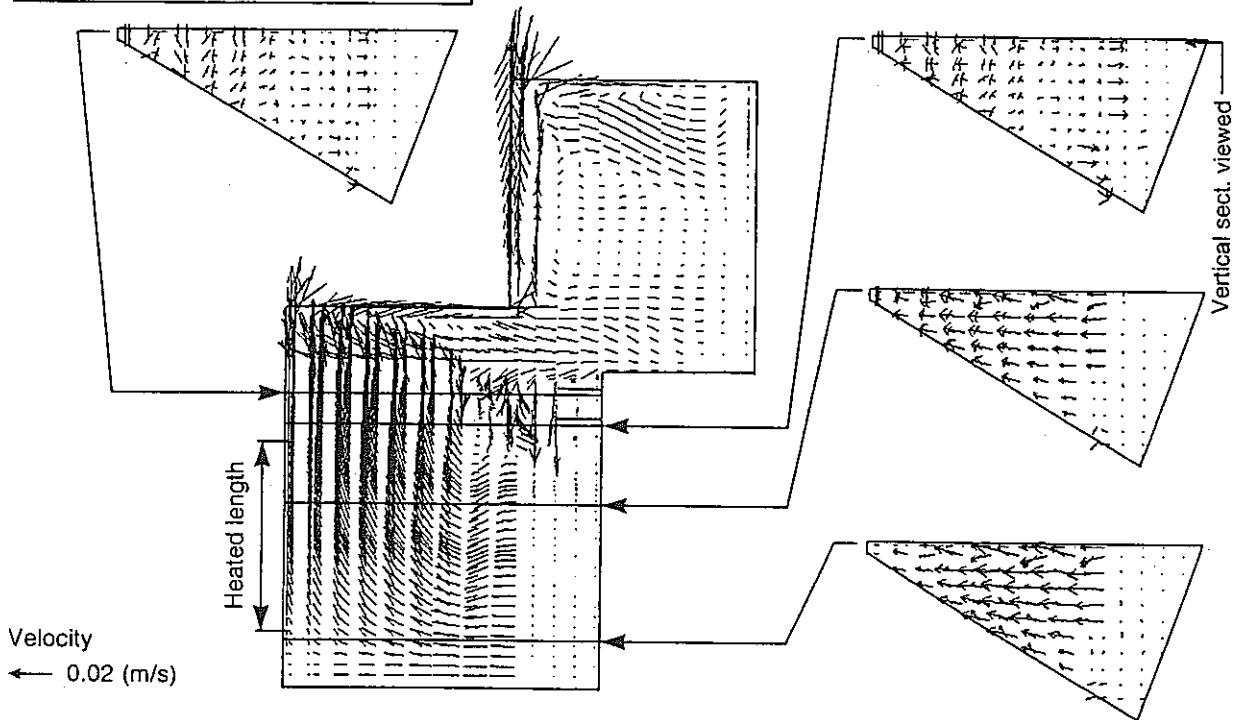


図6 TRIF内自然循環時流速分布の解析結果

# 先行基礎工学分野に関する平成10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	融体固化・閉塞基礎試験とその解析		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京工業大学原子炉工学研究所 齊藤 正樹 助教授、 澤田 哲生 助手、根津 篤 技官 <span style="float: right;">[* 客員研究員 ** 研究生]</span>		
機 構 側	近藤 悟、小西 賢介、神山 健司		
研究協力 実施場所	東京工業大学原子炉工学研究所 齊藤研究室 機構 大洗工学センター 高速炉安全工学グループ		
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10年9月9日～ 平成11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		
<b>【研究目的】</b> 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、多相多成分流体力学コード SIMMER-III のモデル改良及び検証に反映する。			
<b>【研究内容（概要）】</b> 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、固化熱伝達時のクラスト形成条件や固化過程における固体粒子生成の影響等に関する系統的な試験データが十分でなく、精度の良い評価モデルが存在していない現状である。 本研究では、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置くとともに、実験解析を通じ、SIMMER-III のモデル改良及び検証を行う。			
<b>【使用主要施設】</b> 大洗工学センター高速炉安全性第2試験室（融体侵入固化試験装置） 東京工業大学原子炉工学研究所（固化試験装置）			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

融体の固化閉塞挙動を調べる一連の基礎実験を実施してきており、昨年度までの液体金属を用いた実験に続いて、今年度は水及び溶融塩を用いた実験を行い、結果の一般性を拡張した。SIMMER-IIIコードのモデル改良及び検証に関しては、固化現象の微視的メカニズムをモデル化して組み込んだ上で実験解析を行い、モデルの妥当性検討を進めた。

### 【研究成果】

#### (1) 固化閉塞実験

##### <概要>

プラントル数の比較的大きな溶融  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ （混合比 50%-50%mol）及び水を模擬物質として固化閉塞実験を行い、その結果を  $\text{UO}_2$  及び以前実施した低プラントル数の液体金属を用いた実験結果と比較検討し、プラントル数の広い範囲での相変化を伴う融体の熱伝達特性に関する検討を行った。

##### <実験方法と条件>

図1に実験装置の概略図（ $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ の場合の例）を示す。装置下部の加圧タンクから融体を窒素ガスによって加圧し、試験部の融体冷却区間（室温）のステンレス管に侵入させ、固化・閉塞させた。管径、温度及び初速をパラメータとして閉塞するまでの侵入距離を計測した（水の場合は、液体窒素によりステンレス管を冷却した）。融体侵入速度は試験区間手前の熱電対の応答により求めた。実験条件及び実験に使用した物質の物性値を、過去の液体金属等のデータも含めて表1に示す。

##### <実験結果と考察>

図2に  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$  の場合のレイノルズ（Re）数と無次元侵入距離の関係を示す。これらの結果を過去の実験結果と併せて Bulk Freezing Model（式1）によって考察する。

$$\frac{L_p}{d} = \frac{Re \cdot Pr}{4Nu} \left\{ \ln \left( \frac{T_o - T_{mp}}{T_{mp} - T_w} \right) + \frac{L}{C_p(T_{mp} - T_w)} \right\} \quad \dots \text{(式1)}$$

$$Nu = 5 + 0.025 (Re \cdot Pr)^{0.8} \quad \dots \text{(式2)} \quad Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \quad \dots \text{(式3)}$$

図3に（式1）より求めた等価ヌッセルト（Nu）数とレイノルズ（Re）数との関係を示す。等価Nu数がRe数の0.8乗の関数である傾向が見られる。また従来の液相での代表的熱伝達相関式では、例えば液体金属の場合は Subbotin の式（式2）、非金属の場合は Dittus-Boelter の式（式3）より、Nu数は共にRe数の0.8乗に比例するため、これら全ての実験結果を  $Nu/Re^{0.8}$  とプラントル（Pr）数について整理した結果を図4に示す。この結果、Pr数の広い範囲で等価的熱伝達相関式として、次の相関式を得た。

$$Nu = 0.0089 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.65} \quad \dots \text{(式4)}$$

##### <結論>

高いPr数をもつ高温の融体が円管内に侵入したときの固化・閉塞挙動の解明のため、水及び  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$  を用いた固化実験を行い、その結果と過去の実験結果をあわせて Bulk Freezing Model に基づき分析した結果、広域のPr数において、相変化（固化）を伴う融体の熱伝達相関式として、上記の式4を得た。

## (2) 解析コードの検証・改良

昨年度までに、SIMMER-IIIコードに対して構造壁近傍の過冷却融体の存在、クラストと構造壁との間のギャップの存在等に係るモデル改良を行い、熔融  $UO_2$  を用いた炉外固化実験 (CEA の GEYSER 及び JRC の BLOKKER) への適用性を調べることにより、混合固化 (熱伝導支配型固化とバルク熱伝達支配型固化が同時に生じる現象) モードの取扱いの妥当性が検証できた。本年度は、同解析コードを用いて固化閉塞実験の解析を進めた。

Wood's Metal 及び錫を用いた固化閉塞実験に対して、融体と管壁との接触境界温度をパラメータとして解析を行った結果、接触境界温度に関して数十℃程度過冷却を仮定した場合にチャンネル壁温に依存せず実験で得た融体侵入長を適切に再現することがわかった。横軸に実験で得られた融体侵入長を、縦軸に解析コードによる計算結果をとったものを図5に示す。また、図6及び図7に、閉塞形成時の軸方向分布及び融体先頭位置の変化を示す。これらの図から、固化モードはバルク型で試験結果と一致しており、融体侵入長についても実験結果を±30%の精度で評価することがわかる。

表1 試料の物性値及び実験条件

試料物質	試料の物性値							試験条件				
	定圧比熱 [J/kg K]	溶融潜熱 [J/kg]	液体密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]	固体熱伝導率 [W/m K]	液体熱伝導率 [W/m K]	融点 [°C]	7チャンネル数	管内径 [mm]	流速 [m/s]	流体温度 [°C]	レイノルズ数
$UO_2$ [GEYSER実験]	457	277000	8.59	$4.66 \times 10^{-7}$	7.2	2.6	2700	0.69	4~10	1~8	3000	$8.6 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^6$
Sn [H8年度]	245	60600	6.93	$2.54 \times 10^{-7}$	66.6	33	232	0.01	6.5~22.4	1~4	280~320	$4 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$
低融点合金 [H9年度]	150	25300	10.5	$3.63 \times 10^{-7}$	10.7	11.1	124	0.05	4~10	1~3	150~200	$1.5 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$
$H_2O$ [H10年度]	4200	334000	0.997	$1.14 \times 10^{-6}$	2.2	0.61	0	7.8	4	1~3	15	$3.5 \times 10^3 \sim 2.1 \times 10^4$
$NaNO_3-KNO_3$ [H10年度]	1460	102000	1.911	$2.12 \times 10^{-6}$	0.58	0.46	222	12.9	4.6	7~30	250~300	$2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$

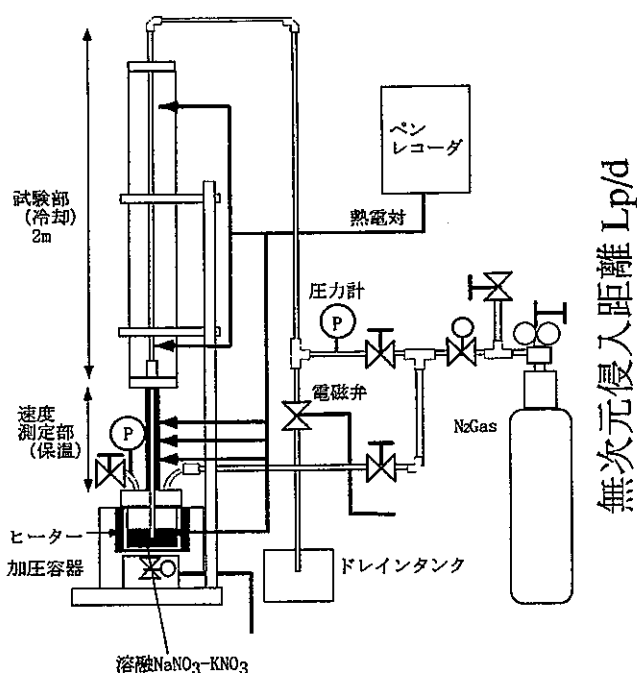


図1 実験装置概略図

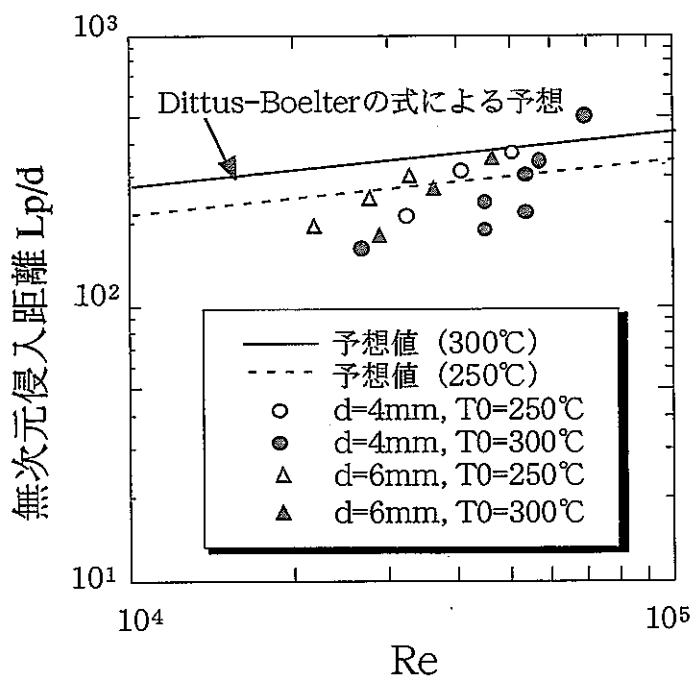


図2 Re数と無次元侵入距離  $L_p/d$  の関係 ( $NaNO_3-KNO_3$ )



- 水
- ▲  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3(50\%mol)$
- Sn (by Fukushige)
- ▼ Wood's Metal (by Kobayashi)
- ◆  $\text{UO}_2$  (GEYSER, BLOKKER)

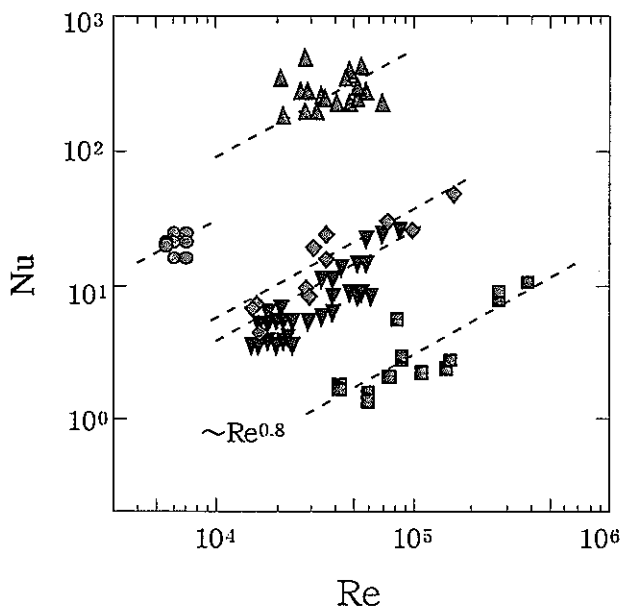


図3 Re数とNu数の関係

- 水
- ▲  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3(50\%mol)$
- Sn (by Fukushige)
- ▼ Wood's Metal (by Kobayashi)
- ◆  $\text{UO}_2$  (GEYSER, BLOKKER)
- Subbotin(Re=104,105,106)
- Dittus-Boelter

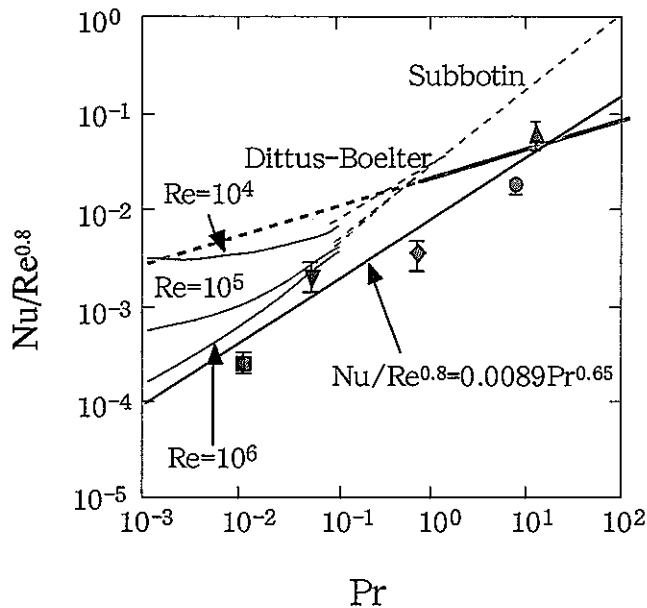


図4 Pr数とNu数の関係  
( $\text{Re}^{0.8}$ による整理)

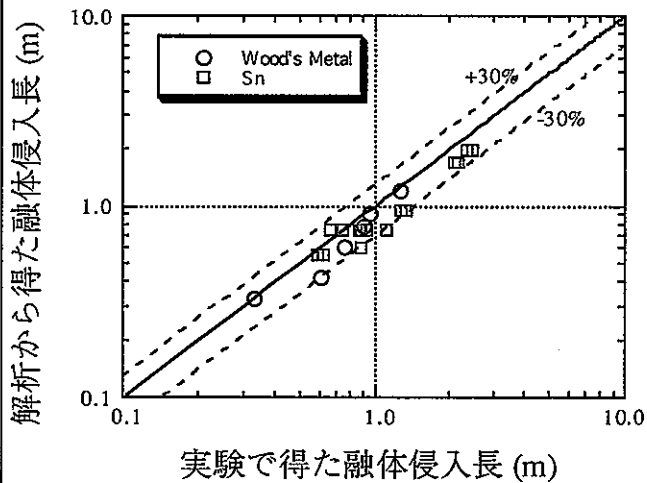


図5 融体侵入長の比較

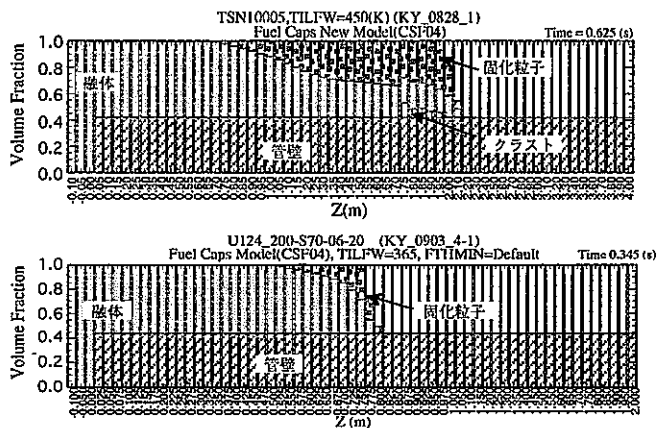


図6 閉塞形成時における物質軸方向分布  
(上：錫実験、下：Wood's Metal 実験)

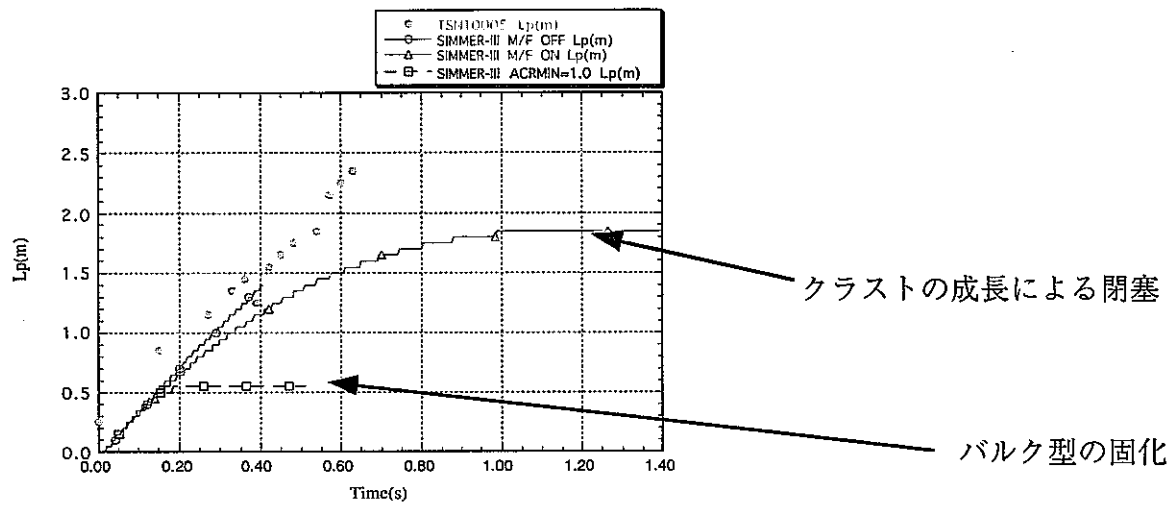


図7 融体先頭位置の時間変化に関する実験と解析の比較  
(錫実験に関する例)

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

本共同研究は今年度にて終了する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 福重貴浩、根津 篤、齊藤正樹「原子炉炉心溶融事故時の溶融炉心物質移行挙動に関する基礎研究、日本原子力学会 1997 年春の年会、東京大学、H51
- (2) 小林重継、根津 篤、齊藤正樹「溶融炉心物質の固化挙動に関する基礎研究」  
日本原子力学会 1998 年春の年会、近畿大学、I 29
- (3) David Brear、飛田吉春、守田幸路、神山健司、近藤 悟「Modelling of freezing for reactor safety analysis」、日本原子力学会 1997 年秋の大会、沖縄、H57
- (4) S. Kondo et.al. : "CURRENT STATUS AND VALIDATION OF THE SIMMER-III LMFR SAFETY ANALYSIS CODE", 7<sup>th</sup> Int. Conf. On Nucl. Eng., Tokyo, April 1999.

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高純度鉄基合金開発に関する研究		
研究協力課題	同上 — 高純度試料作製・極微量分析・特性試験 —		
研究者所属、氏名			
大学側	東北大学 金属材料研究所 助教授 安彦 兼次* 東北大学 金属材料研究所 助手 高木 清一* (*客員研究員 **研究生)		
機構側	大洗 沖州・安全工学試験部機器・構造安全工学Gr 青砥 紀身、加藤 章一		
研究協力実施場所	核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 沖州・安全工学試験部 機器・構造安全工学Gr		
通算研究期間 (予定)	平成8年4月～ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成10年4月1日～ 平成11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特性を把握し、サイクル機構が進める</p> <p>①先進的高速炉の構造材料開発</p> <p>②先進的高速炉の機能材料開発</p> <p>への適用見通しを得ることを目的とする。</p>			
<p>【研究内容(概要)】</p> <p>古くから各種産業を支える基盤材料として多種、多様、大量に利用されてきた鉄基合金は、徹底的に高純度化することにより、従来とは全く異なった特性を持ち、高温における強度の増加、靱性の改善が成されることが当該研究者らによって明らかとなってきた。この材料の性能を十分に活かせる適用分野として高速炉機器の構造材料を考えた場合、開発された材料が高速炉の使用条件、使用環境にも耐えられるものかどうか見通す事が重要な課題となる。本研究は、まず高速炉の特徴である高温流動ナトリウム環境と構造材料との共存性について検討を進めるため、高純度鉄基合金について、先進的高速炉の構造材料(高強度指向または熱応力低減材料)及び機能材料(耐サーマルストライピング材料等)として要望に合致する合金の成分系を選択し、高速炉適用性可否の判断材料となるナトリウム環境の影響について検討する。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>なし。</p> <p>※サイクル機構側の安全強化工事等のため当初予定の試験装置が利用できなかった。</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8～9年度は、試験研究計画の作成、各種高純度鉄基合金候補材料の製造、該当材料の大気中強度評価を実施した。

平成10年度は、引続き候補材の大気中強度評価を実施するとともに純静的Na中試験を行った。

### 【研究成果】

- (1) 水冷銅るつぼを採用した超高真空高周波加熱型溶解炉を設計、製作し、10kg級の高純度鉄インゴットの生産を達成した（図1参照）。従来研究では、高々100g規模の作製試料に基づいた純度評価や特性確認が行われてきたが、本成果により、商業規模高純度鉄についての性状確認に見通しを得た。試作した超高純度鉄は、ガス成分の不純物が総量で10.1massppm（原料中19.6massppm）、特に、最近問題となっている酸素の含有量については、原料中の14.1massppmが7.5massppmに半減しており、ほとんど現在の技術では検出限界程度にまで純化されていた。この分析結果は、製作した大型溶解炉の性能が、従来の実験室規模の生産炉以上であることを示すものである[1]。
- (2) 工業の多分野で利用が期待される高純度鉄-50%Cr合金の特性を評価した。引張強度や変形挙動の他縦弾性係数、密度、熱膨張係数、比熱、熱伝導率、電気抵抗率及び磁気特性を測定評価した。表1に同材の測定結果を一般的高温材料であるSUS304と比較して示す。また、引張強度及び延性（絞り）をそれぞれ図2(a)及び(b)に示す。これらの結果から、通常のSUS304と比較して、高純度鉄-50%Cr合金は293Kから1523Kの温度域で、高い強度を保ちつつ変形性に富み、熱膨張率が低く、熱伝導率が高い等高温材料としての良好な特性を持つことが示された[3]。
- (3) 鉄-50%Cr合金の高温引張変形機構を確認する目的で、上記高純度鉄-50%Cr鋼、並びに新たに設計・製作した超高真空対応の高周波浮遊帯溶融（floating-zone refining:FZ）装置により製作したFZ鉄-50%Cr鋼について、873Kから1073Kの温度域で引張試験を実施した。その結果、両材料とも降伏後応力低下を呈すること、この応力低下は組織観察結果から粒界滑りによって生じること、高純度鉄-50%Cr材は微細粒FZ鉄-50%Cr同様粒界破壊となること等の知見を得た[4]。
- (4) 高純度鉄-50%Cr合金の耐食性を評価する目的で、野外暴露試験、繰返し腐食試験及び隙間腐食試験を実施した。試料には、炭素(C)及び窒素(N)を所定量だけ含有させ、耐食性に関する両元素の影響を確認した。添加量は、C+N=30massppm、100massppm及び500massppmとした。腐食試験条件は、以下の通り。
  - ①野外暴露試験：埠頭から10m離れた位置に地面から36°南側に傾けて、試料を設置、3か月及び1年放置した。腐食程度は、ピットの深さと直径をレーザー顕微鏡で測定した。
  - ②繰返し腐食試験：試料表面に5mass%NaCl溶液を308Kで1hr噴霧、333Kで1hr乾かした後、313K-95%以上の湿度雰囲気中に1hr放置、を1サイクルとして230サイクル繰返した。
  - ③隙間腐食試験：プラスチックのボルト・ナットで締めた試料を323Kの6mass%FeCl<sub>3</sub>-1/2N HCl溶液に24hr浸漬した。

代表的な結果として、図3に野外暴露試験結果の1例を示す。図から明らかなように、耐食性は低炭素・窒素(C+N)含有試料程優れている。この事実は、ガス不純物成分をほとんど含まない高純度鉄合金の非常に優れた耐食性を裏付けるものである[6]。

(5) 鉄の高温ナトリウム中における腐食挙動に与える試料中の不純物、純度の効果を評価することを目的に、市販されている純鉄及び高純度鉄に関するナトリウム浸漬試験を実施した。両試料の化学組成を表2に示す。表から明らかなように市販純鉄は99.5mass%以上、高純度鉄は約99.99mass%の純度を有している。両試料を4.6ppmの酸素を含む873Kのナトリウム中に4000時間浸漬した。その後、質量を秤量し、光学顕微鏡、磁化顕微鏡、高精度走査型電子顕微鏡等により腐食表面の観察を実施した。図4に試料の質量変化の秤量結果を示す。同図から明らかなように、市販純鉄では減肉が生じ、高純度鉄では質量増加が生じた。また、表面観察の結果では、市販純鉄の粒界近傍に著しい腐食が観察されたことに対し、高純度鉄では粒界周辺にも腐食痕跡は認められなかった。市販純鉄の粒界にはナトリウムの浸透が検出されたうえ、不純物であるアルミ(Al)や珪素(Si)の濃化が認められたことから、腐食の進行は、ナトリウムと試料中の不純物元素との反応によって粒界の耐食性が低下したことによるものと推定された[2]。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成11年度には、これまで延期されてきたサイクル機構試験施設を用いた、各種材料特性確認試験を行い、候補材料の性状評価を実施する。具体的な材料試験としては、①純度管理下流動Na中共存性確認試験、②溶融Na化合物中耐腐食性確認試験、並びに③大気中クリープ試験、を計画している。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) K. Abiko, et al., phys. stat. sol. (a), Vol. 167(1998) 347-355.
- 2) K. Abiko, et al., phys. stat. sol. (a), Vol. 167(1998) 435-441.
- 3) K. Abiko and Y. Kato, phys. stat. sol. (a), Vol. 167(1998) 449-461.
- 4) S. Isozaki, et al., phys. stat. sol. (a), Vol. 167(1998) 471-480.
- 5) K. Kako, et al., phys. stat. sol. (a), Vol. 167(1998) 481-494.
- 6) T. Yokota, et al., phys. stat. sol. (a), Vol. 167(1998) 495-502.

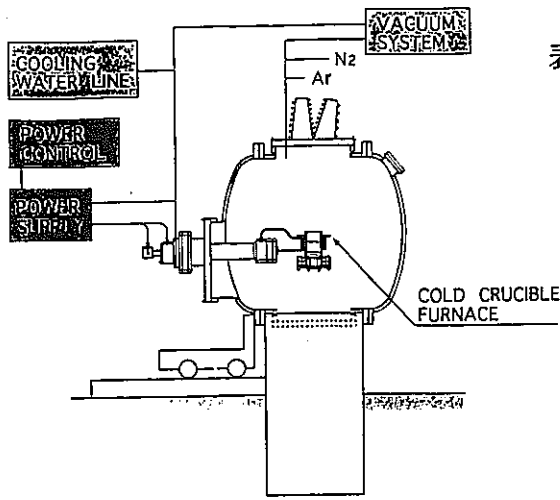
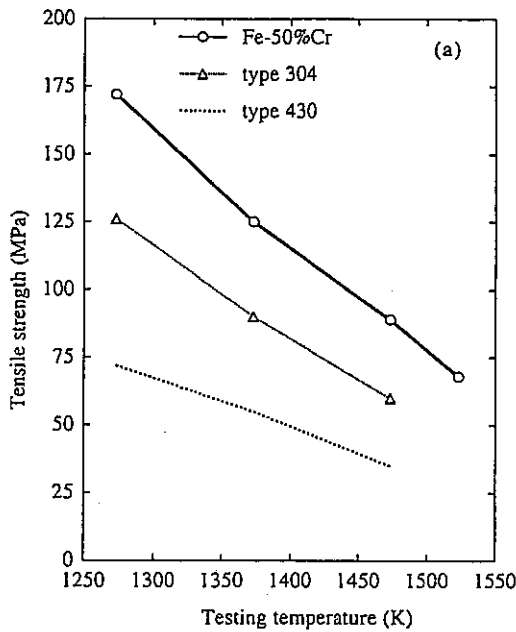


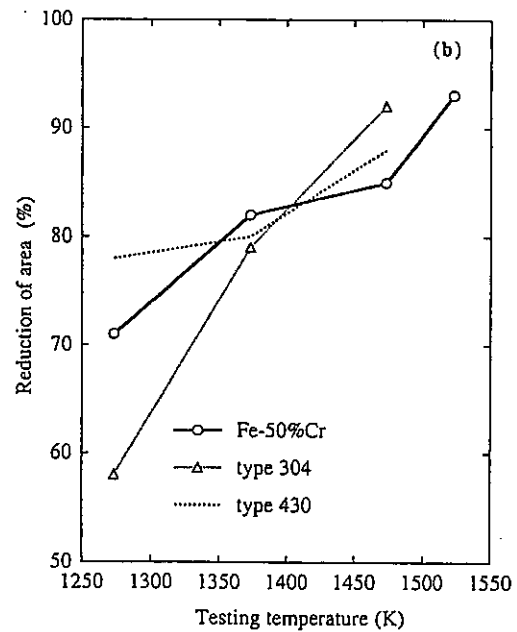
図1 新高周波加熱型溶解炉の概要

表1 高純度鉄-50%Cr合金とSUS304の高温における材料特性

	Cr50-II	Type 304
density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$7.53 \times 10^3$	$7.90 \times 10^3$
Young's modulus ( $\text{N m}^{-2}$ )	$2.36 \times 10^{11}$	$2.08 \times 10^{11}$
total thermal expansion (%)		
293 to 373 K	0.073	0.137
293 to 1273 K	1.230	1.926
thermal expansion coefficient ( $\text{K}^{-1}$ )		
293 to 373 K	$9.10 \times 10^{-6}$	$1.71 \times 10^{-5}$
293 to 1273 K	$1.26 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-5}$
specific heat ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$4.52 \times 10^2$	$4.44 \times 10^2$
thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	17.9	14.4
heat transfer rate ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	$5.27 \times 10^{-6}$	$4.02 \times 10^{-6}$
electrical resistivity ( $\Omega \text{m}$ )	$5.54 \times 10^{-3}$	$7.27 \times 10^{-3}$



(a)高温引張強度



(b)高温引張延性

図2 高純度鉄-50%Cr合金とSUS304及びSUS430の高温材料特性の比較

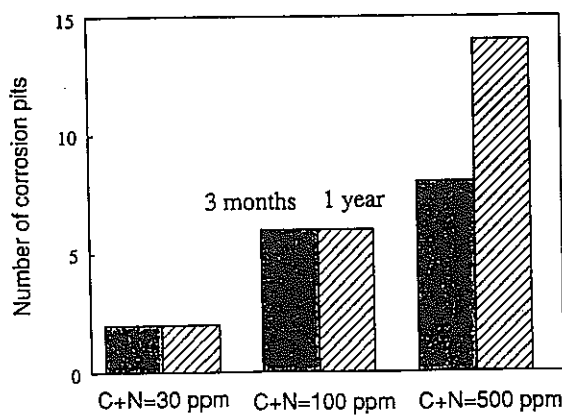


図3 野外暴露試験における腐食ピットの数

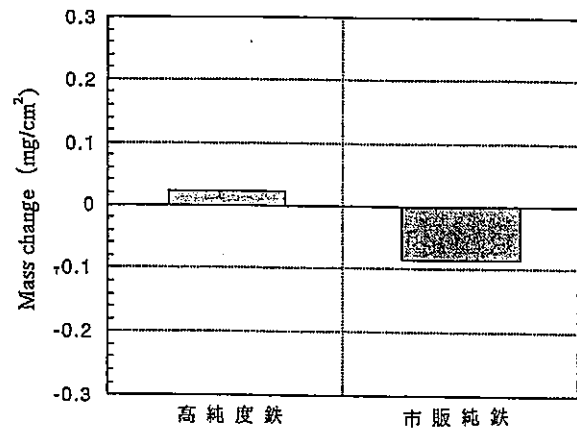


図4 873Kナトリウム中浸漬試験後の試料の質量変化

表2 ナトリウム浸漬試験に供した材料の化学組成

specimen	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	N	O
高純度鉄	bal.	0.9	1	0.025	1.1	5.2	<0.1	0.4	1.2	<0.1	2.0	90
市販純鉄	bal.	80	170	2800	130	112	720	320	140	230	36	17

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	金属燃料の過渡時挙動に関する基礎的研究										
研究協力課題	ULOF 事象における金属燃料高速炉の挙動に関する基礎的研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授 平川直弘、助教授 馬場護 助手 岩崎智彦、大学院博士課程 平野豪** [*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">サイクル機構 大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発 Gr 丹羽元、川田賢一</td> </tr> </table>			大 学 側	東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授 平川直弘、助教授 馬場護 助手 岩崎智彦、大学院博士課程 平野豪** [*客員研究員 **研究生]			機 構 側	サイクル機構 大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発 Gr 丹羽元、川田賢一		
大 学 側	東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授 平川直弘、助教授 馬場護 助手 岩崎智彦、大学院博士課程 平野豪** [*客員研究員 **研究生]										
機 構 側	サイクル機構 大洗工学センター システム技術開発部 リスク評価技術開発 Gr 丹羽元、川田賢一										
研究協力 実施場所	東北大学 平川研究室 サイクル機構 大洗工学センター リスク評価技術開発 Gr										
通算研究期間 (予定)	平成 9 年 4 月～ 平成 11 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年12月22日～ 平成11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>本研究では、将来の新型燃料の候補の一つである金属燃料を用いた高速炉炉心を対象とし、炉心損傷事故時の過渡時挙動の特徴、及び放出エネルギーに関わる基本的傾向を明らかにすることにより、新型燃料の採用検討に際しての基本的知見の整備を図る。</p>											
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>サイクル機構が所有する酸化物燃料炉心用の過渡時挙動安全解析コードを金属燃料炉心にも適用できるように改良し、物性値等の入力データを改訂する。大学側にて設計された金属燃料炉心に対して炉心損傷事故の代表的な事象である1次冷却系流量喪失時炉停止失敗事象について解析を行い過渡事象推移の特徴を検討し、金属燃料炉心における炉心安全上の基本的特徴を明らかにする。</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10年度においては、減速材を添加した金属燃料高速増殖炉心を対象として、冷却系流量喪失時炉停止失敗事象の起因過程の解析を行った。また、遷移過程解析に必要な物性値などの入力データの整備を行った。

### 【研究成果】

平成10年度の研究成果の概要は以下の通りである。

#### 1：炉心損傷事象起因過程解析コードの金属燃料への適用

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

この炉心の反応度係数を同出力の酸化物燃料炉心と比較したものを表1、破損条件をパラメータ解析した結果を表2に示す。この金属燃料炉心は、ボイド反応が酸化物燃料炉心の約1.4倍、ドブラー反応度は約半分設計されている。金属燃料の融点は冷却材の沸点と近いうえ、被覆管と共晶を起こすことから、冷却材の沸騰後まもなく燃料ピンは破損する。また、破損後は冷却材の蒸気圧が燃料分散を有効に生じさせる。この炉心は、電磁ポンプ使用時に全電源の喪失を想定した非常に厳しい事象において即発臨界に達するものの、基準となるLOF（流量半減時間5秒）であれば即発臨界に至ることなく、また、破損後の燃料分散による負の反応度効果は正のボイド反応度よりも絶対値が大きいため、その後再臨界に至ることはないことが明らかになった。

#### 2：炉心損傷時における減速材添加の影響

1で解析を行った金属燃料高速炉に、反応度係数の向上を目的として減速材を添加した炉心に対して冷却系流量喪失時炉停止失敗事象の起因過程の解析を行った。ただし、今回用いた減速材(ZrH)は、冷却材が沸騰するような高温時において減速材中の水素が解離するという問題があるが、本研究では、炉心損傷時における減速材添加の効果のみを目的に、減速材の解離は取り扱わないこととした。解析の結果、減速材を添加した炉心は、電磁ポンプ使用時に全電源が喪失するような非常に厳しいLOFにおいても即発臨界に至らないことが示された。また、この事象は、減速材のない金属燃料炉心の基準となるLOF（流量半減時間5秒）に相当し、減速材の添加により、事象が大幅に緩和されることが示された。

#### 3：減速材の添加による炉心損傷事象の回避の可能性

2において減速材の添加が大幅に事象を緩和することが示された。そこで、減速材の添加により、炉心損傷に至らない可能性について検討を行った。この検討において、炉心の径方向膨張の効果は無視した。解析範囲は流量半減時間は10秒、ポンプ流量は15%までとした。解析結果を図1に示す。この結果から、条件を選ぶことにより炉心の径方向膨張に頼ることなく減速材の添加により炉心損傷を回避できることが示された。

#### 4：炉心の核的变化に対応できるコードへの改良

近年の計算機の向上により、核計算部（動特性部）の空間依存化への改良が現実的なものとなった。空間依存の核計算部への改良により、今までのモデルでは考慮が困難であった減速材中の水素の解離現象や大規模な燃料分散による炉心の核的变化を正確に考慮できるようになる。

空間依存化は今までのモデルに空間依存の核計算モデルを組み込むことにより可能となる。本研究では、高速炉の炉心解析で実績のあるCITATION-FBRコードをくみこむこととした。核計算を行うには、断面積データが必要となる。しかし、計算機が向上したとはいえ各タイムステップ・各メッシュごとに断面積を算出するのは非常に時間がかかるため、適切でない。そこで、あらかじめ炉心損傷時に起こりうるメッシュ内の組成・温度状態に対していくつかの断面積セットを作成しておき、このセットから各ステップにおけるメッシュ内の状態に対応した断面積を内挿して求めることとした。この内挿法により計算時間は250分の1（1ステップあたり2時間が30秒未満）に短縮できた。



以上により、金属燃料炉心における炉心安全上の基本的特徴を把握することができ、所期の目的を達成した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究は計画通り本年度（H10年度）をもって終了する

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

報告書

「金属燃料高速炉における炉心損傷事象起因過程に関する基礎的研究」  
PNC TY9601 98-002

学会発表

平野他、「金属燃料高速炉の ULOF 事象起因過程の解析、  
日本原子力学会」 1997 年秋の年会  
平野他、「減速材添加金属燃料高速炉の ULOF 事象起因過程の解析、  
日本原子力学会」 1999 年春の年会

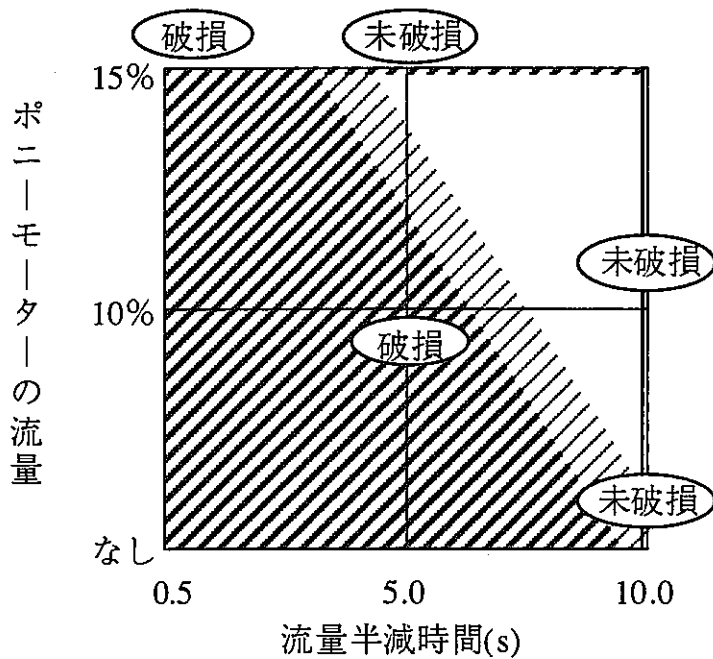
表1 反応度係数の比較

	金属燃料	酸化物燃料
ボイド反応度	2.32	1.69
ドップラー係数	$-5.06 \times 10^{-3}$	$-1.02 \times 10^{-2}$

ボイド反応度 :  $\% \Delta k/k$  ・ ドップラー係数 :  $T \Delta k / \Delta T$

表2 破損条件による反応度・出力の違い

破損温度 (°C)	1100	1110	1150
破損時刻 (秒)	16.30	16.34	16.37
ピーク出力(Po)	2.42	13.25	117.29
ピーク反応度(\$)	0.585	0.903	0.986



解析条件：基準となる LOF (流量半減時間 5 秒)

太線：破損

細線：冷却材沸騰

流量半減時間およびポンプモーター流量と炉心損傷事象の関係

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	き裂進展のモニタリング技術開発に係る基礎研究		
研究協力課題	レーザー超音波による非接触非破壊評価手法の検討		
研究者所属、氏名			
大学側	東京大学 先端科学技術研究センター 岸 輝雄 教授、 榎 学 助教授 〔*客員研究員 **研究生〕		
機構側	大洗 機器・構造安全工学Gr 青砥 紀身、 川崎 弘嗣		
研究協力実施場所	東京大学 先端科学技術研究センター 岸研究室 機構 大洗工学センター 機器・構造安全工学Gr		
通算研究期間 (予定)	平成 9年12月 ~ 平成12年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年12月17日~ 平成11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>FBRプラントの機器の異常振動の検出、およびき裂の発生・進展の検出を高感度・高精度に非破壊検出できるシステムを開発する。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>本研究は、FBRプラント機器の異常振動の発生を検出すること、及びこれに伴うき裂発生・進展を検出する基礎的方法を開発することである。異常振動の検出においては、数百Hz程度までの高サイクル振動を検出することができる非破壊検出システムを開発する。このため、非破壊検出法として非接触もしくは接触式の超音波センサー等を適用した検出システムを開発する。検出した超音波波動の散乱および乱れ等に注目して、高サイクル振動を高感度・高精度に検出する。また、振動（疲労）によるき裂発生・進展の検出においては、超音波センサーや微小硬さ計等も用いて、き裂発生・進展に伴うAEの検出や超音波信号変化、硬度特性値変化等から得られた信号を抽出評価する信号処理法を開発し、き裂のモニタリングを可能とする基礎的方法を開発する。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>レーザードップラ振動計 （東京大学） 微小硬さ計、超音波検出装置、疲労試験装置 （Na技術開発第3 試験室）</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

- 9年度：レーザー超音波装置の種類、照射出力及び計測感度を高める最適条件の検討を実施（東大）  
高サイクル振動を発生させる装置及び試験体の検討を実施（機構）
- 10年度：レーザー超音波装置による材料中のAEの検出を実施（東大）  
破壊・非破壊検出法によるき裂発生・進展を計測する方法の検討を実施（機構）

## 【研究成果】

### 1. レーザー超音波装置によるAEの検出

前年度までにレーザー干渉計を用いた超音波の検出が可能となった。本年度は、レーザー超音波装置の高性能化を図るとともに、実際の材料試験において材料中に生じるAEを本装置を用いて検出できるかを検討した。

まず、波形のシミュレーションを有限要素法ソフトを用いてワークステーションにて行った。芯圧折による入力インパルスを最大値5N、立ち上がり時間1  $\mu$ s のステップ関数と仮定した。解析は軸対象モデルによる三次元解析であり、メッシュは試料断面の1/2、25×5mm を560 要素に分割した。物性値として弾性率200GPa、ポアソン比0.3、密度7.8g/cm<sup>3</sup>を用いた。FEMにより導出された解析解は実測波形と非常に良い一致を示していた。測定に使用したレーザー干渉計はHe-Ne レーザーを用いたマイケルソン型干渉計であり、理論上0.3  $\mu$ m/s までの媒体表面速度変化をリアルタイムに測定することができる。レーザー干渉計の出力は外部フィルターを用いてハイパスフィルター（HPF）およびローパスフィルター（LPF）をかけた後、ウェーブメモリーで収録した。HPF は100Hz、LPF は1MHz、および100kHz、レーザー焦点径約10  $\mu$ m で検出を行った。LPF を変化させているのは、一般的にLPF が低いほど低ノイズでの測定が可能であるためである。

実際の引張り試験におけるAEの計測を行った。試料には振幅の大きなAEが期待できるクロスプライCFRP（100×12×2.5mm）を用い、レーザー測定面には受光を安定させるため反射テープ（5×5mm）を使用した。実験はクロスヘッドスピード0.1mm/minにて行い、比較のために共振型PZTセンサーによるAEの検出も併せて行った。図1はレーザー干渉計による検出波形である。縦軸はそれぞれ速度であり、レーザー干渉計により材料破壊時のAEの検出が可能であることが分かる。図2は累積AE事象数を引張り応力に対してプロットしたものである。局所的な変位を定量的にかつ非接触下において測定することのできるレーザー干渉計を用いて、炭素繊維強化複合材料の引張り試験時におけるアコースティック・エミッション（AE）事象の検出を試みることにより、レーザー干渉計によりAEの計測が可能であることが示された。ただし、PZTセンサーと比較するとその感度はおよそ30%であり、さらなる感度向上が望まれる。

### 2. 破壊・非破壊検出によるき裂発生・進展の検出

破壊・非破壊検出によるき裂発生・進展の検出として、今年度は微小硬さ計を用いたき裂化領域の硬さ変化による検討を行った。微小硬さ計は、通常のマイクロビッカース硬さ計と比べて数ミクロンの範囲の硬さを計測でき、比較的簡便に行える計測方法である。このため、微小硬さ計を用いて、微小なき裂発生の前兆を残留ひずみによる硬さ変化により捉えられるかを検討した。

試料として材料表面からナトリウムによる熱過渡の疲労を受けて、表面から深さ数十～数百ミクロン程度の微小き裂が結晶粒界に発生したSUS304を用い、板圧20mmの方向に対して微小硬さを測定した。その結果、図3に示すように、受入れ材と損傷材との微小硬さ値の比較において、き裂の存在する表面近傍で著しい微小硬さ値の低下が認められた。また、き裂の先端近傍では、微小硬さ値は板圧中央部よりもやや大きく、特に粒界近傍の測定値が大きい。

また、図4に示すように、き裂に沿って測定した微小硬さ値は、き裂化部分では小さく、き裂先端付近以降では母相の値に近づいている。

このようなき裂の発生に伴う微小硬さ値の変化は、損傷による残留ひずみの蓄積がき裂化により開放されるために認められるものである。したがって、結晶粒界近傍のひずみの増加を微小硬さによりモニタリングすることにより、き裂の発生・進展の前兆現象として推定が可能であることが示された。

**【今後の予定（翌年度以降の概要）】**

11年度：疲労によるき裂発生・進展を計測するため、レーザー超音波計測法によるAE計測の高性能化を図るとともに、微小硬さ特性や超音波計測によるき裂検出性能を高度化する。

**【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】**

1) 渡邊 誠、チワウィブル・ポーンテープ、森 久史、榎 学、岸 輝雄： レーザー干渉計による非接触AE計測手法の開発、非破壊検査学会（投稿中）

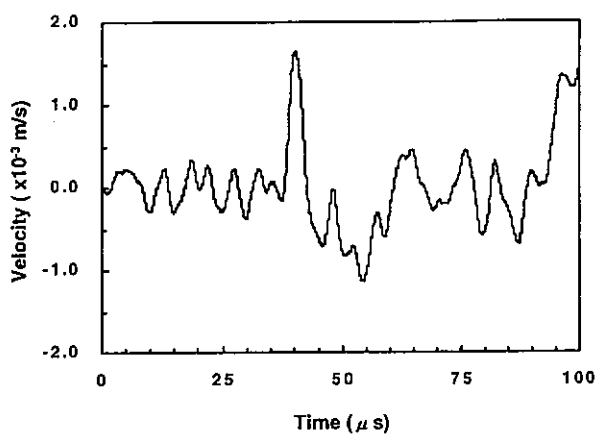


図1 レーザー干渉計により計測されたAE波形

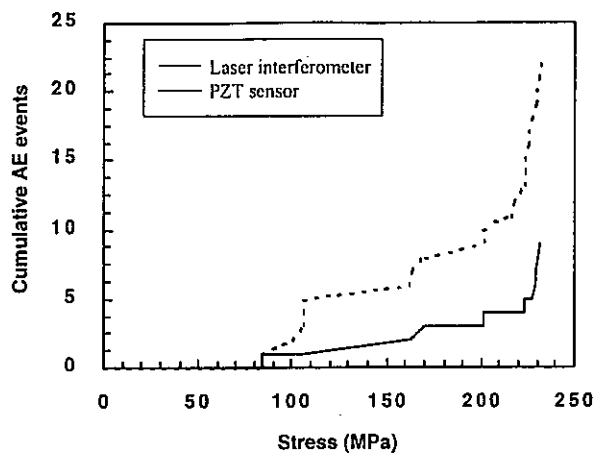


図2 レーザー干渉計と圧電素子により検出される累積AE事象数の比較

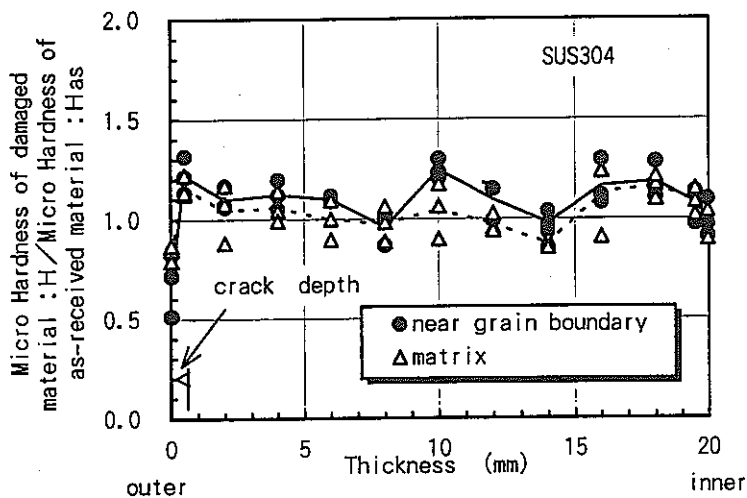


図3 受入材に対する損傷材の微小硬さの変化

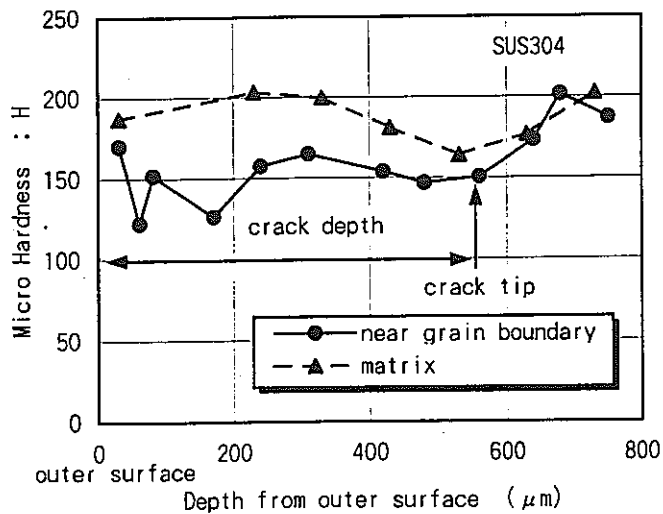


図4 き裂に沿った微小硬さの変化

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	ODSフェライト鋼の照射特性に関する研究										
研究協力課題	ODSフェライト鋼の電子線照射による評価										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻材料物性工学講座機能物性学分野 大貫功徳 須田 明一 教授 助教 技官 山田 住 豊 一郎 修士 2年 1年</td> <td colspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td>大洗工学センター照射施設 赤坂 尚昭</td> <td>運転管理センター 吉武 庸光</td> <td>燃料材料試験部照射材料試験室</td> </tr> </table>			大 学 側	北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻材料物性工学講座機能物性学分野 大貫功徳 須田 明一 教授 助教 技官 山田 住 豊 一郎 修士 2年 1年	〔*客員研究員 **研究生〕		機 構 側	大洗工学センター照射施設 赤坂 尚昭	運転管理センター 吉武 庸光	燃料材料試験部照射材料試験室
大 学 側	北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻材料物性工学講座機能物性学分野 大貫功徳 須田 明一 教授 助教 技官 山田 住 豊 一郎 修士 2年 1年	〔*客員研究員 **研究生〕									
機 構 側	大洗工学センター照射施設 赤坂 尚昭	運転管理センター 吉武 庸光	燃料材料試験部照射材料試験室								
研究協力実施場所	北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻材料物性工学講座機能物性学分野 大洗工学センター照射施設運転管理センター燃料材料試験部照射材料試験室										
通算研究期間 (予定)	平成9年12月 ~ 平成12年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年10月27日~ 平成11年 3月31日								
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究										
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>ODSフェライト鋼は優れた高温強度と耐照射特性から、高線量の照射を受ける炉内材料への使用が期待されている。本共同研究では種々の方法で製作したODS鋼の照射挙動を明らかにするために電子線照射を行い、ボイドスエリング等の照射挙動を、残留ガス、熱処理、冷間加工の影響の観点から検討評価する。</p>											
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>核燃料サイクル開発機構で製作した種々のODSフェライト鋼及びODSマルテンサイト鋼に対して電子線照射を行い、照射欠陥形成過程を検討する。研究に供するODS鋼の製作パラメータは、メカニカルアロイング（MA）処理時の雰囲気、熱処理条件、冷間加工方法及び冷間加工量である。また照射欠陥形成過程の検討では、特に二次欠陥形成（転位ループ、ボイド）に対する冷間加工と残留ガスの効果について着目する。</p>											
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>1 MeV超高压電子顕微鏡（北海道大学）</p>											

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度はAr及びHe雰囲気中でMA処理した再結晶ODSフェライト鋼の板材について電子線照射を行い、残留ガス及び冷間加工の影響を明らかにした。平成10年度は上記の材料及びODSマルテンサイト鋼製被覆管の電子線照射を実施した。

## 【研究成果】

平成10年度に得られた研究成果の概要をまとめる。

### (1) 供試材

平成10年度の研究に供したODS鋼を以下に示す。

- ・ ODSフェライト鋼再結晶材（4鋼種）

MA処理時の雰囲気（Ar, He）

冷間加工度（0%, 20%）

- ・ ODSマルテンサイト鋼（1鋼種）

また対照材として熔融法で製作したフェライト/マルテンサイト鋼（PNC-FMS）も合わせて試験に供した。なお、これら供試材はすべて被覆管の形状に加工されている。表1にこれら試料の化学成分を示す。

### (2) 照射前の組織

- ・ フェライト系ODS鋼

再結晶処理を施した4種のフェライトODS鋼の組織は、再結晶した領域と転位密度の高い未再結晶領域が存在した。また20%の冷間加工により結晶粒は圧延方向に伸び、高密度の加工転位が導入されている。この傾向は、Ar雰囲気とHe雰囲気での差は明確には認められなかった。炭化物粒子は、どの試料も粒内にほぼ均一に微細分散している。分散粒子径はHe-0CW材で数nm、その他の試料では数十nmであった。

- ・ マルテンサイト系ODS鋼

高密度の転位を有したラスマルテンサイト組織であり、粒内に炭化物が確認された。また、加工方向に伸びた結晶粒はほとんど認められない。分散粒子径は数十nmであった。

### (3) 照射による損傷組織

図1～図3に400℃、425℃、450℃、475℃で12dpaまで照射した各試料の微細組織を示す。

#### 1. 転位ループ形成挙動

0CWのODSフェライト鋼試料及びPNC-FMS試料では、各温度の電子線照射により、転位ループ形成、転位密度の増加が認められた。またMA雰囲気の違いにより、ループ形成挙動が異なることが明らかとなった。一方、20%CWのODSフェライト鋼及びODSマルテンサイト鋼試料では、ほとんど転位ループの形成は認められなかった。

#### 2. ボイド形成挙動

0CWのODSフェライト鋼試料では、各温度の電子線照射によりボイドの形成が認められ、スエリングピークは450℃前後であることが示唆された。また20%CWのODSフェライト鋼では、僅かではあるがボイドの形成が認められた。一方、ODSマルテンサイト鋼はボイドの形成が認められなかった。なお、PNC-FMSでは400℃、425℃及び450℃の照射でボイドが形成している。図4に各試料のボイドスエリングの照射温度依存性を示す。Ar-MA材に比べ、He-MA材でボイドスエリングが低くなっており、また加工転位が導入されているCW材もボイドスエリングが低く抑えられている。



#### (4) ボイド形成に対する転位の効果

上述のように、冷間加工若しくはマルテンサイト変態により照射前に高密度の転位を導入した試料では、ボイドの形成が抑制されている。これは高密度の転位が点欠陥のシンクとして作用し、組織中の点欠陥濃度が低下するため、ボイド形成が抑制されたものと考えられる。

#### (5) 耐スエリング性

図4に示すように、12dpaにおけるODSフェライト鋼のボイドスエリングは、最大で1.3%であった。一般的なオーステナイト鋼の場合、同様の照射条件におけるボイドスエリングは数%に達するため、本研究に用いたODSフェライト鋼の耐スエリング特性は比較的優れているものと判断できる。一方、ODSマルテンサイト鋼ではボイドの形成が認められず、更に耐スエリング性が良い材料と言える。

#### (6) メカニカルアロイング時の不活性ガスの影響

前述のようにHe-MA処理を行ったODSフェライト鋼はAr-MA処理を行ったODSフェライト鋼に比べボイドの形成が抑制されており、前年度の板材を用いた試験と同様な結果が得られた。この原因として組織中に残留する不活性ガスバブル量の差とMA処理時における不活性ガスの伝熱の差が考えられる。

##### 1. 不活性ガスバブル量

表1に示すように、組織中に残存するガス元素はHe-MA材の方が少ない。これはArに比べHeの方が原子サイズが小さく拡散しやすいため、材料中より抜けやすいためと考えられる。また両ガス元素はステンレスへの固溶限が低いいため、残存ガスは組織中にボイドの核となるガスバブルの状態が存在していると考えられる。これらのことから残留ガス量の少ないHe-MA材ではガスバブルの量が少ないものと推定でき、ボイド形成が少ない要因の一つと考えられる。

##### 2. 不活性ガスの伝熱

HeはArに比べ熱伝導度が大きく、He雰囲気で行った場合、粉末の温度上昇が小さくより均質な強制固溶体が形成されることが考えられる。この効果は照射前組織における分散粒子の微細化に現れており、この微細な分散粒子がより強力な点欠陥シンクとしての作用が、He-MA材でボイドの形成が抑制された要因の一つと推定される。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成11年度は、本年度でその傾向が認められた、ODSマルテンサイト鋼の耐照射特性の原因について詳細に検討し、ODS鋼全体の耐照射特性の総合評価を行う予定である。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

本年度の研究結果については、来年度以降の金属学会にて発表する予定である。

Elements	Ferritic-Ar	Ferritic-He	Martensite-Ar	F/M
C	0.065	0.058	0.130	0.180
Si	0.03	0.03	0.02	<0.01
Mn	0.046	0.049	0.036	0.510
P	0.004	0.004	0.004	0.005
Ni	0.028	0.025	0.022	0.450
Cr	11.82	11.78	9.00	11.40
W	1.93	1.93	1.94	2.77
Ti	0.22	0.30	0.20	-
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.24	0.30	-
Ex.O	0.09	0.04	0.04	-
N	0.012	0.010	0.010	0.016
Ar	0.0046	0.0003	0.0034	-
S	-	-	-	0.002
Mo	-	-	-	0.12
Co	-	-	-	<0.01
V	-	-	-	0.01
Nb	-	-	-	0.06

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=Y分析値×1.27      Ex.O=O分析値-(Y分析値×1.27)  
(mass%)

表-1 ODSフェライト鋼,ODSマルテンサイト鋼,F/M鋼の化学成分

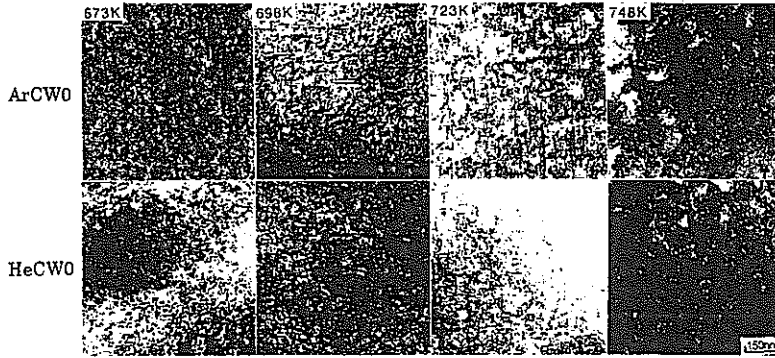


図-1 12dpa 照射後の ArCW0、HeCW0 におけるボイド組織

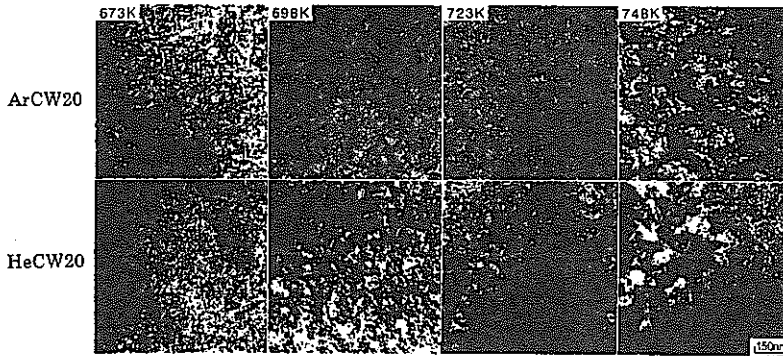


図-2 12dpa 照射後の ArCW20、HeCW20 におけるボイド組織

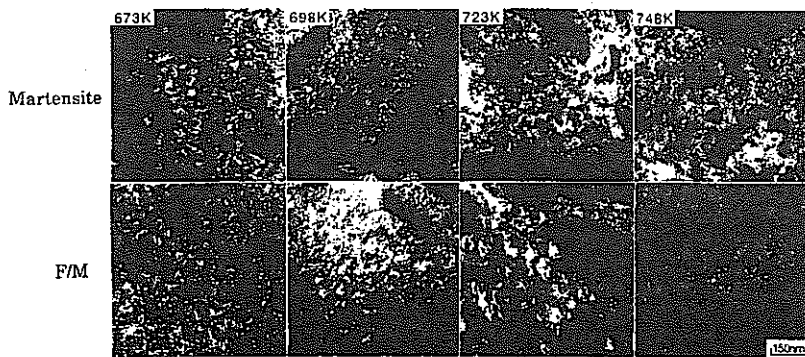


図-3 12dpa 照射後の F/M、Martensite におけるボイド組織

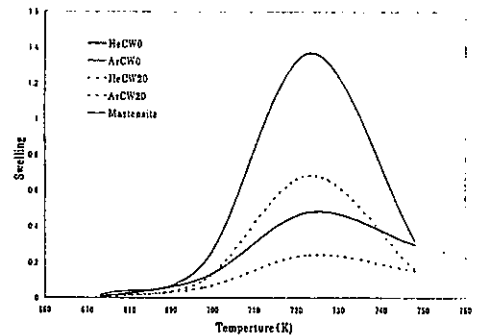


図-4 ArCW0,HeCW0,Martensite のスエリングの温度依存性

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定法に関する研究										
研究協力課題	ラマン散乱型光ファイバー温度分布センサーの「常陽」への適用										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td>東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 教授 中沢 治* 助手 高田 英治* 大学院修士過程 木村 敦</td> <td colspan="2">[*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課 市毛 聡</td> </tr> </table>			大 学 側	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 教授 中沢 治* 助手 高田 英治* 大学院修士過程 木村 敦	[*客員研究員 **研究生]		機 構 側	大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課 市毛 聡		
大 学 側	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 教授 中沢 治* 助手 高田 英治* 大学院修士過程 木村 敦	[*客員研究員 **研究生]									
機 構 側	大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課 市毛 聡										
研究協力実施場所	東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻 中沢研究室 核燃料サイクル開発機構大洗工学センター照射施設運転管理センター実験炉部技術課										
通算研究期間 (予定)	平成9年4月～ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年10月12日～ 平成11年3月19日								
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究										
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>サイクル機構で進めているプラント監視技術の高度化の一環として、光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定技術を開発する。</p>											
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>光ファイバに入射したレーザ光の後方散乱光のうち、2つのラマン散乱光の強度比が散乱位置の温度に依存する特性を利用して温度分布を測定する手法があり、これを高速炉プラントへ適用するための技術開発を高速実験炉「常陽」を用いて実施する。</p> <p>光ファイバを用いた温度分布測定では、放射線照射によって光ファイバの伝送損失が生じることが知られており、高速炉プラントの1次冷却系機器の温度測定に光ファイバを適用するためには、冷却材ナトリウムの放射化による<math>\gamma</math>線等の影響を確認することが不可欠である。このため、「常陽」の格納容器床下に設置されている1次主冷却系配管を対象に、その外装板表面にラマン散乱光ファイバ温度分布センサを一定方向に敷設し、校正用の2点の熱電対を用いてファイバの伝送損失を補正する方法、及び外装板表面に光ファイバを往復敷設し、往路と復路との同一計測点の信号比較によりファイバの伝送損失を補正する方法について、その適用性を検討する。</p> <p>また、光ファイバの設置条件による温度測定への影響評価と、光ファイバの往復敷設によるデータ処理法の検討のため、2次主冷却系配管の外装板表面に1次系で使用したファイバと同仕様の光ファイバを設置して測定を行う。</p> <p>さらに、光ファイバによる配管の変位モニタリングへの適用性評価のため、2次主冷却系配管の外装板表面でブリュアン散乱光ファイバ歪み分布センサを用いた測定を行う。</p>											

## 【使用主要施設】

高速実験炉「常陽」

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

—平成9年度—

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

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

—平成10年度—

平成9年度に実施した1次主冷却系配管外装板表面の光ファイバによる温度測定結果にみられた、周期性をもった温度分布の原因を検討するため、主に施行状況による温度測定への影響に着目した2次系での補助試験と、その結果に基づく1次系での施工状況調査を行った。

また、第32サイクル運転時に、2次系配管外層板表面に往復敷設したファイバを用いて採取した温度データから、光ファイバの同一測定点での信号比較による伝送損失補正方法の適用性を検討するとともに、その結果を踏まえて、1次系配管外装板表面にファイバを往復敷設した。

## 【研究成果】

### (1)温度測定への保温材施工の影響

1次系配管外装板表面の温度測定では、光ファイバの設置状態や配管保温材の施工の影響を受けることが考えられるため、先ずアクセスの容易な2次系で補助試験を行い、その影響を確認した。試験の結果、配管に取り付けられた保温材の境目となる部分やナトリウムの温度を測定する熱電対の引出口では、その隙間からの放熱により高い温度を示し、また、配管サポート部で保温材が厚く巻かれている部分で低い温度を示す等、1次系配管外装板表面でみられた結果と同様の周期性をもった温度分布が得られた（図1(a)）。また、光ファイバと配管外装板表面との隙間が広がるほど低い温度を示し、隙間が2mm程度でも約5℃の差が出ることを確認した（図1(b)）。

次に、1次系配管が設置されている格納容器床下への立入りが可能な時期（配管はコールド状態）に、1次系配管の保温材の施工状況に重点を置いた調査を実施した。その結果、光ファイバで測定した温度分布の高温部が、保温材の施工方法（保温材の材質）が異なる配管継手部や、熱がこもり易いと考えられる縦配管上部の位置とほぼ一致することより、これら施工条件の違いが周期性をもつ温度分布の原因であると推定した（図2）。なお、光ファイバと配管外装板表面との隙間が部分的にあったが、その隙間と温度分布に相関は見られなかった。

### (2)伝送損失の補正

光ファイバの伝送損失補正法の一つとして、往復して敷設した光ファイバの同一測定点での信号比較による補正方法が提案されている。本手法の実機適用にあたっては、非放射線環境下に光

ファイバを往復敷設した場合、往路、復路の同一点で同じ温度が得られることが必要であり、主に施工条件に着目して（往路、復路の施工条件を近づけるため束ねた光ファイバを使用）、2次主冷却系配管での温度測定試験を実施した。その結果、往路、復路とではほぼ同様な温度分布が得られることを確認した。但し、往路、復路間で部分的に若干の温度差がみられたため、1次系への適用にあたっては、往路、復路の光ファイバと配管外装板表面との隙間及び配管外装板上での位置等の施工条件を同じにするため、往復分の光ファイバを同一の保護管内に入れたセンサを新たに製作し、「常陽」第12回定期検査中に本センサを1次系配管外装板表面に設置した。

また、本補正手法の妥当性を確認するため、日本原子力研究所東海研究所のCo-60 照射装置を用いて、図3(a)に示す体系により $\gamma$ 線源を用いた実験を行い、放射線による伝送損失の補正が可能であることを確認した（図3(b)）。

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成11年度は、「常陽」1次系配管外装板表面に往復設置した光ファイバを用いて、放射線環境下における光ファイバの往復設置による伝送損失補正法の実機への適用性を検討する。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

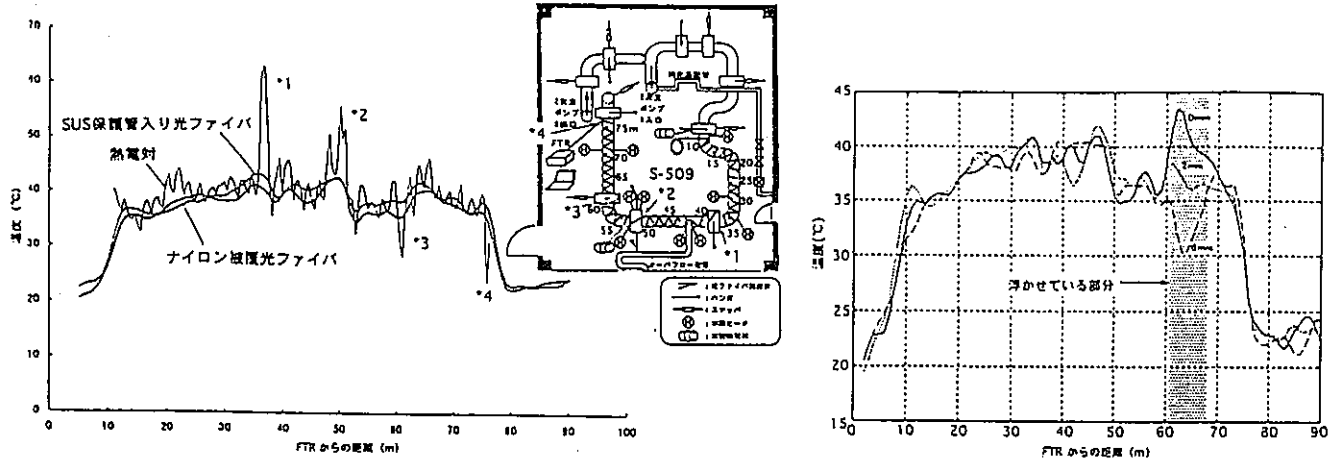
(1)木村、他「光ファイバーセンサーの原子力プラントへの適用」

日本原子力学会1997年秋の大会、F30 (1997/10/15)

(2)Eiji Takada, et al., "Correction Techniques of Radiation Induced Error for Raman Distributed Temperature Sensor and Experiment at the Experimental Fast Reactor :JOYO" Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 35, No. 8, pp547-553, August 1998.

(2)Eiji Takada, et al., "Applicability Study of Optical Fiber Distribution Sensing to Nuclear Facilities"

Proceedings of the Sixth Asian Symposium on Research Reactors, March 1999.



(a) 温度分布と周辺機器との位置関係 (b) ファイバ・配管間の隙間と温度の関係

図1 2次系での補助試験の結果

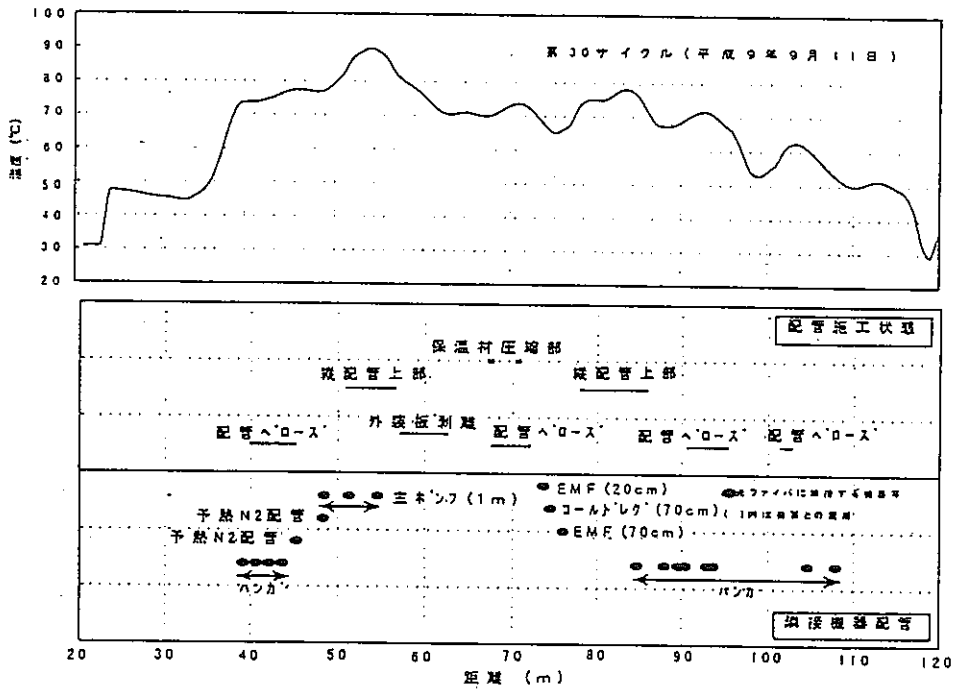
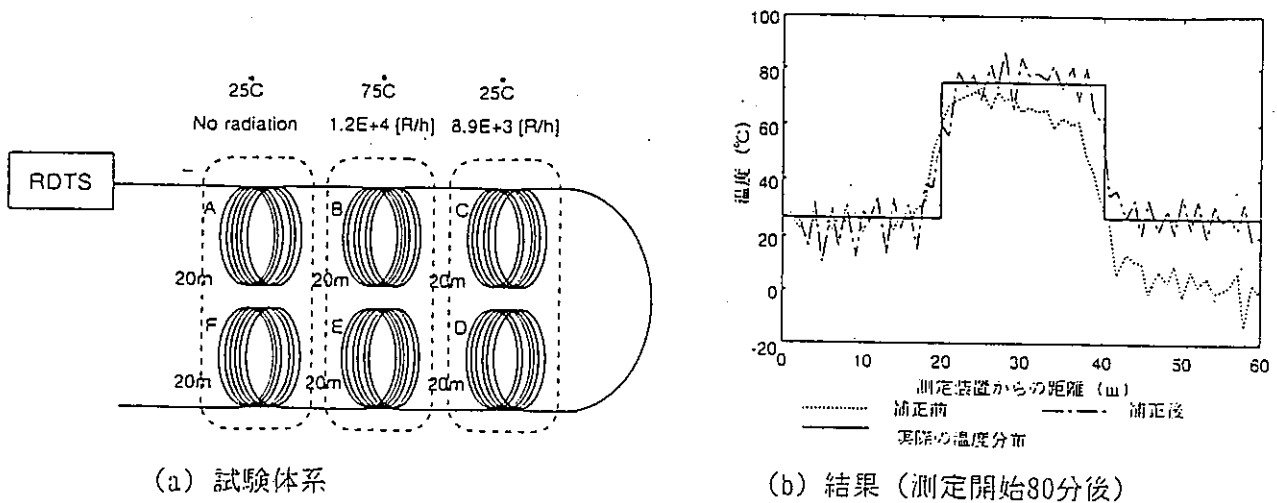


図2 1次系での温度分布と配管施工の関係



(a) 試験体系

(b) 結果 (測定開始80分後)

図3 光ファイバ往復設置による伝送損失補正の試験体系と結果

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	減肉と熱荷重を伴う力学解析手法に関する研究		
研究協力課題	物質変態を伴う現象の数値解析		
研究者所属、氏名			
大 学 側	横浜国立大学・教育人間科学部 教授 酒井諒 同 助教授 石塚鉄夫 〔*客員研究員 **研究生〕		
機 構 側	大洗工学センター プラント工学グループ 一宮正和		
研 究 協 力 実 施 場 所	横浜国立大学 教育人間科学部		
通 算 研 究 期 間 (予 定)	平成10年4月～ 平成12年3月31日	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年9月30日～ 平成11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		
<b>【研究目的】</b> 空気雰囲気下で漏洩 Na を受けるライナは、ある条件下では高い速度で減肉することが判明した。一方、減肉等質量を喪失しながら同時に熱荷重、熱変形を受ける状況下の解析手法は確立されていない。そこで極めて高い速度を有する腐食減肉と熱荷重、熱変形が同時に共存する場の応力、ひずみについて実現象に即して評価することを可能とする力学解析手法をレビューし、有望なものについて定式化、プログラム作成を行い、実際の現象との比較検討を行う。			
<b>【研究内容（概要）】</b> Na 漏洩事故として、ライナ床面上に漏洩 Na が燃焼落下し、Na 反応生成物が高湿度雰囲気等の条件下でライナ材（炭素鋼）と化学反応して、ライナーが次第に腐食減肉してゆき、さらに Na 化合物が場合によっては800℃という高温に達して、炭素鋼板に大きな熱応力を与えることが想定される。したがって、このような状態では、減肉と熱荷重（熱変形）という2つの現象が重畳している。従来、熱荷重単独の場を数値解析するには有限要素法を用いたが、減肉と熱荷重が同時に共存する場については、実現象に即して精度良く扱うには特別なコーディングが要求された。本研究では、最近進展をみせているメッシュレス解析手法などを考慮して、両者の現象をカップリングさせる新たな解析手法を確立し、実現象に即したより精度の良い解を得て、その実用性を検討する。			
<b>【使用主要施設】</b>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成10年度は以下の3点について研究をおこない、それぞれ次節に示す成果を得た。

- ① メッシュレス解析手法のサーベイ
- ② 従来法による解析の実行
- ③ メッシュレス解析モデルの構築

【研究成果】

(1) 力学解析手法のレビュー

メッシュレス解析手法については主として以下のような4種類の手法が提案されている。サーベイして得られた各の主要論文表は付表として添付する。ここでは文献調査により明らかとなったそれぞれの手法の特長および、それが本研究にどの程度有効となりうるかを簡明に記す。

・エレメント・フリー・ガラーキン法

構造問題におけるメッシュレス解析手法としては最も研究が盛んに行われている。解析理論はFEMに近く、互換性がかなりある。本研究のような減肉解析にも適合性は比較的良いと思われる。文献No.(1)~(12)

・PU法

物体を数学の単体分割理論により点集合として表現し、部分集合毎に偏微分方程式を適用して問題を解く。純数学的な側面が強く、実用化は遅れている。本研究には適用が難しい。文献番号No.(13)~(15)

・SPH法

連続体を微小粒子の集合体として表す。Kernel関数により、影響領域の内部の物理量を平均化する。この手法は流体解析においても、また固体解析においてもユニークな成果を収めつつある。本研究において、Na流体がライナー上に滴下し、流れて変形してゆくプロセス、あるいはライナーが徐々に減肉してゆくプロセスの表現には適していると思われる。文献番号No.(16)~(21)

・その他の方法

上記のほかにグリッドレス法、RKPM法などが提案されている。このうちグリッドレス法は流体解析で開発された手法であるが、領域全体を差分化しなくてはならず、本研究には向かない。文献番号No.(22)~(24)。またRKPM法は固体問題について提案された一種の粒子法であるが、解析理論が非常に数学的で扱いが難しいと思われ、これも本研究には不適と判断された。文献番号No.(25)~(27)

文献リスト

- (1) Belytschko,T.,L.Gu,and Y.Y.Lu, "Fracture and crack growth by element-free Galerkin methods", Modelling Simul. Matre. Sci. Eng. 2,(1994) p519
- (2) Belytschko,T., Y. Krongauz, M. Fleming,D.Organ, and W. K. Liu," Smoothing and accelerated computations in the element-free Galerkin method", Jounal of Computational and Applied Mathematics,(1994) p123
- (3) Belytschko,T. Y.Y.Lu, and L. Gu,"Element-free Galerkin methods", International Journal for Nuclear Methods in Engineering,37(1994),P229
- (4) Belytschko,T.,D.Organ and Y.Krongauz," A coupled finite element-free Galerkin Method", Computational Mechanics 17 (1995),p186
- (5) Belytschko,T., H. Stolarski, W. K .Liu , N .Carpenter, and J. S. Ong, "Stress projection for membrane and sher locking in shell finite elements", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 51,(1995),p221
- (6) Chu,Y.A. and B. Moran, "Computational model for nucleation of solid-solid phase transformations", Modelling Simul. Mater. Sci. Eng,3(1995)p455
- (7) Ciarlet,P.G. "Basic error estimates for elliptic problems", Handbook of numerical analysis, Vol 2, Finite element method Part1,Elsvier,North-Holland (1991)
- (8) Cordes,L.W. and B. Moran,"Treatment of material discontinuity in the element-Free Galerkin methods" Computer Methodsin Applied Mechanics and Engineering (1998),p221
- (9) Belytschko,T.,and P.Krysl "Modeling of 3D propagation cracks by the element-free Galerkin method",Proceeding of ICES97,(1997),p128
- (10)H.Noguchi" Application of element free Galerkin method to analysis of Mindlin type plate/shell problems", Proceeding of ICES97,(1997)p918



- (11) P. Krysl and Belytschko, "Analysis of thin plates by the element-free Galerkin method", Compute, Mech., 17 (1996), p26
- (12) 野口 "Patch および Mapping の概念にもとづく Enhanced EFGM について"  
日本機械学会第 9 回計算力学講演会講演論文集 (1996), p371
- (13) Babuska I., and Melenk J. M. "The Partition of Unity Finite Element Method." Technical Note EN-1185, Institute for Physical Science and Technology, University of Maryland (1995)
- (14) Duarte, C. A. and Oden J. T., "Hp-clouds - A meshless method to solve boundary-value problems", TICAM report 95-05, 1995
- (15) Babuska I. and Melenk, J. M., "The Partition of Unity Method", IJNME, 40 (1997) p727
- (16) J. J. Monaghan, "An introduction to SPH", Computer Physics Communications 48 (1988), p89
- (17) J. J. Monaghan, "Shock Simulation by the Particle Method SPH", Journal of Computational Physics 52 (1983), p374
- (18) R. A. Gingold and J. J. Monaghan, "Kernel estimates as a Basis for General Particle Methods in Hydrodynamics", Journal of Computational Physics 46, (1982), p429
- (19) Koshizuka S. Tamako, H. and Oka, Y., "A Particle Method for Incompressible viscous Flow with Fluid Fragmentation", Computational Fluid Dynamics Journal 4, 1, (1995), p29
- (20) Gingold, R. A. and Monaghan, J. J., "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-Spherical Stars", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 181 (1977), p375
- (21) Monaghan, J. J., "Why Particle Methods Work", SIAM, Journal of Scientific Statistics Computation 3, (1982), p. 422
- (22) Batina, J. T., "A Gridless Euler/Navier-Stokes Solution Algorithm for Complex Aircraft Applications", AIAA, 31 Aerospace Sciences Meeting (1993), p1
- (23) Liu, W. K., "Reproducing Kernel Particle Methods for Structural Dynamics" International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1994) submitted
- (24) Chui, C. K. "An Introduction to Wavelets", Academic Press
- (25) Libersky, L. D. and Petschek, A. G. "High Strain Lagrangian Hydrodynamics—a Three-Dimensional SPH Code for Dynamic Response," ASME (1993), p. 39
- (26) Belytschko, T. and Liu, W. K. "Meshless Methods", IV WCCM, (1998), p133
- (27) Chen, J. S. Pan, C., Wu, C. T. and Liu W. K. "Reproducing Kernel Particle Method for Large Deformation Analysis of Nonlinear Structures", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 139, (1996), p. 195

## (2) 有限要素解析による結果

メッシュレス解析手法を開発するうえで、その結果の妥当性を客観的に評価する必要がある。そこで、有限要素法により以下の解析を試みた。床ライナー上に高熱の Na 化合物が存在し、溶融塩型の腐食により床ライナーを減肉させつつ、熱応力を発生させる問題を考える。ここで必要なのは、熱伝導解析と熱応力解析である。まず変形量を一定とした非定常解析を行った。

解析のフロー・チャートを図 1 に示す。

### ① 減肉を考慮しない熱伝導—応力解析

付図 2 のようなメッシュ分割を用いた。材料は炭素鋼板とし、境界条件は図 3 に示すように、両端完全固定とした。温度境界条件はライナー上面の一部が温度 800°C を受けるものとする。この条件により、非定常熱伝導解析を行った。図 4-1~3 に温度分布変化図を示す。鋼板の板厚が 6 mm ほどであると、ライナー上面の温度は下面までおよそ 40 秒ほどで到達し、それ以降ほぼ定常状態が保たれる。熱応力解析は、各ステップ毎に、温度分布を応力解析用プログラムに送り、ひずみ、応力、変形量を求める。変形量は次の熱伝導解析用形状データにフィードバックする。求められた変形図を図 5, 6 に示す。ライナーは上面を加熱されたため、上向きに反り返る。その量は、中央面で最大 6 mm 程度となる。

### ② 減肉を考慮した熱伝導—応力解析

次に図 7 に示すように、鋼板が溶融塩 Na により次第に減肉してゆくプロセスを考慮した、解析を行った。このプロセスで上面温度は 800°C 一定に保たれている。各ステップごとに、熱伝導解析を行いその結果を熱応力解析に入力する。このとき、減肉している場合、その形状を入力するが、その方法としては、減肉部分のヤング率を非常に小さな量 ( $1.0 \text{ kg/mm}^2$ ) として、処理している。解析結果を図 8, 9 に示す。減肉を考慮した結果のほうが、考慮しない結果よりも変形量がやや大きく現れる。すなわち変形によるひずみ、応力も大きくなり、減肉する場合、鋼板の破壊への危険性はより大きくなり、その効果を更に定量的に求めることが必要とされる。

### (3) メッシュレス解析モデルの構築

減肉を考慮した床ライナ健全性解析では、粒子法によるメッシュレス解析が有望と判断された。すなわち、Na 反応生成物を粒子法で表現して流体としての運動を求め、鋼板は有限要素法で表現して、その変形状態を解析するいわゆるハイブリッド型の解析がモデルとして最適といえる。次年度研究では主としてこの粒子法—有限要素法のハイブリッド解法の開発を目指し、実際の床ライナーの変形挙動を、より現実に即した方法で求めることにする。

#### [今後の予定 (翌年度以降の概要)]

平成11年度では Na 反応生成物の流動による効果を粒子法—有限要素法ハイブリッド解法により、解析し、床ライナーの減肉変形過程を明らかにする。

#### [レポート、学会誌、国際会議への発表論文等]

なし

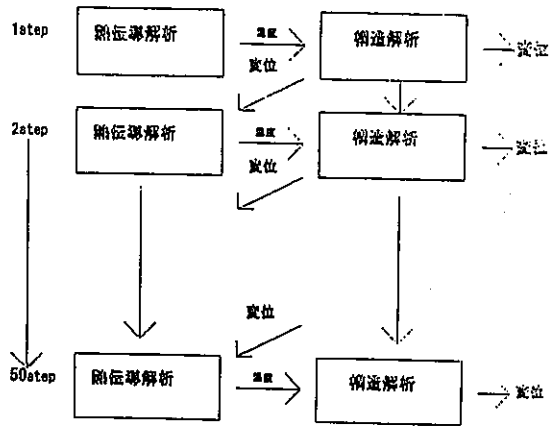


図 1 解析の主な流れ

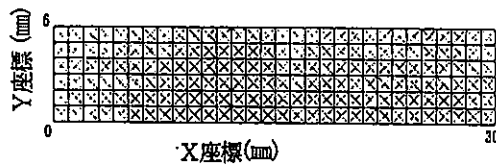


図 2 モデルの寸法とそのメッシュ分割図(構造解析)



図 3 モデルの拘束条件

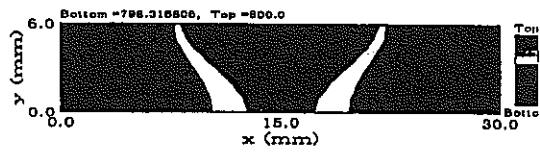


図4-1 40TH STEP (40.00E+00) SECOND

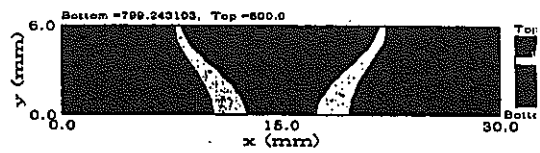


図4-2 45TH STEP (45.00E+00) SECOND

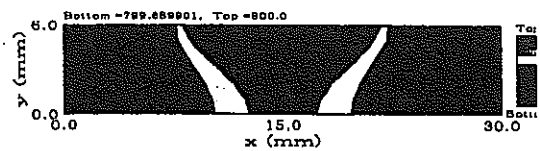


図4-3 50TH STEP (50.00E+00) SECOND

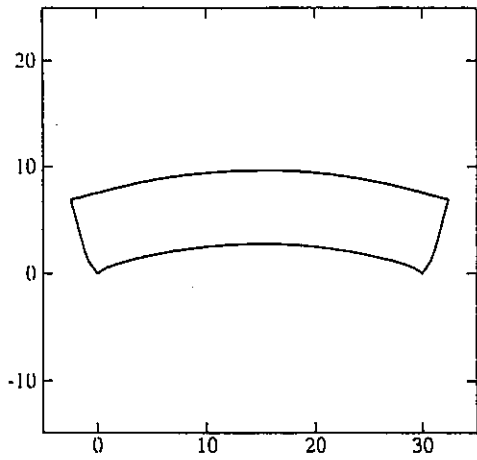


図 5 変形図 (15step)

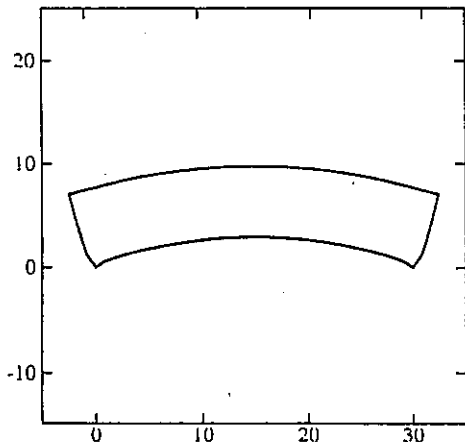


図 6 変形図 (20step)

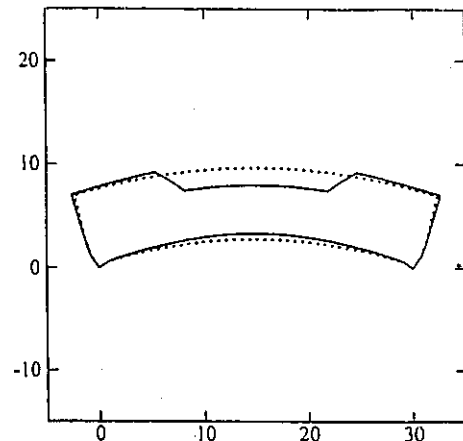


図 8 変形図 (15step)

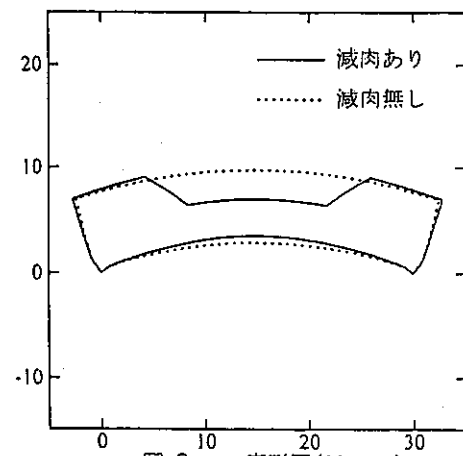
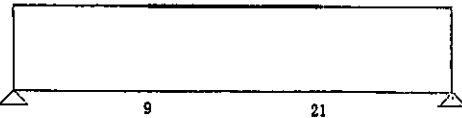
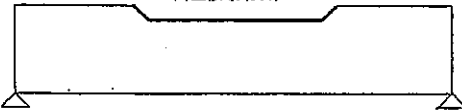


図 9 変形図 (20step)

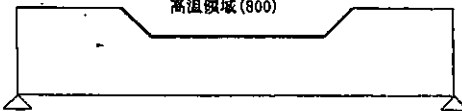
1~5step(減肉なし) : 高温領域(800)



6~10step(1mm減肉) : 高温領域(800)



11~15step(2mm減肉) : 高温領域(800)



16~20step(3mm減肉) : 高温領域(800)

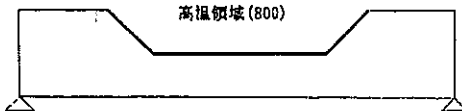


図 7 減肉の進行の様子

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	ナトリウム燃焼時のエアロゾル挙動に関する研究		
研究協力課題	燃焼エアロゾル挙動解析手法の開発		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京工業大学 原子炉工学研究所 二ノ方 寿 教授 澤田 哲生 助手 堂田 哲広 大学院生 [*客員研究員 **研究生]		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ 岡野 靖		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京工業大学 原子炉工学研究所 二ノ方研究室 サイクル機構 大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ		
通算研究期間 (予定)	平成10年 8月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年 11月 6日~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>ナトリウムプール燃焼時に生成したエアロゾルならびに反応熱の移行挙動は、安全評価において重要である。そこで、ナトリウム燃焼の機構論的解析評価手法を確立し、燃焼影響評価の精度向上に資するため、エアロゾルと反応エネルギーの生成・輸送メカニズムを解明することを本研究の目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>ナトリウムプール燃焼時にはプール表面において、ナトリウム蒸気と酸素並びに水蒸気が反応し、ナトリウム酸化物、ナトリウム水酸化物のエアロゾルが生成される。生成したエアロゾルならびに反応熱の移行挙動は、雰囲気やプール、ライナー温度に影響を及ぼすため、ナトリウム燃焼の安全評価において重要である。本研究では、化学反応と熱流動場を同時に解析する手法を開発し、エアロゾルと反応エネルギーの生成・輸送挙動を定量評価する。</p> <p>本件は先行基礎研究として平成10年度より3ヵ年計画で実施する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>情報センターおよび大洗工学センター内の計算機</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成10年度は化学反応モデルの開発とエアロゾル輸送挙動の簡易評価を目的とした。ナトリウムと酸素などの化学種が混在するプール表面における反応生成物組成を定量化する手法、および、簡略化した対流拡散場におけるエアロゾルの生成、輸送挙動などの数値解析手法の開発を行った。

## 【研究成果】

ナトリウムプール燃焼では、ナトリウム液面からナトリウム蒸気が対流・拡散し、雰囲気中の酸素と接触する事により、燃焼を含めた化学反応が生じる。この時、反応生成物として発生したエアロゾルは雰囲気ガスの対流により周囲環境へ輸送され、エアロゾル粒子の大きさによってはナトリウム液面へと沈降する。エアロゾルが雰囲気中へ輸送される量や沈降する量に関する知見、及び燃焼解析を行う際に入力値として与える飛散率に関する知見を得る事が重要である。本現象の概況と物理的・化学的現象を図1に模式的に示す。

プール燃焼は雰囲気の自然対流によって影響を受けるため、燃焼を評価するためには大きな長さスケールの自然対流と小さな長さスケールの燃焼領域内の流れ場を同時に考慮する必要がある。また、反応熱によるプール温度の上昇のために燃焼が促進されるが、一部の反応生成物がプール表面に沈降することによってナトリウムの蒸発量が減少し、燃焼が抑制される事が考えられる。そこで、本研究では次に示す仮定を用いることにより問題を簡略化した。

- (1) 図2に示すように、流れが定常的に循環している軸対称の体系とし、プール表面から上昇する流速とプール表面へ下降する流速が等しく、かつ境界層近似が成立つ。
- (2) ナトリウム蒸気と酸素が出会えば直ちに化学平衡に達する。
- (3) ナトリウムプール表面温度は既知である。
- (4) 反応生成物の沈降により抑制されるナトリウム蒸発の量は無視できる。

そして、反応生成物組成を定量化する化学平衡反応モデルを用いた、ナトリウムプール表面と燃焼領域近傍における数値解析モデルの開発を実施した。

まず、反応生成物組成を定量的に求める化学反応モデルとして、ギブス自由エネルギー極小化法に基づく化学平衡計算コード BISHOP の開発を行った。ナトリウムに関する化学反応のモデル化に際し、従来単相系に対して適用されてきたギブス自由エネルギー極小化法を気-凝縮 2 相系に拡張した点、化学反応系における各相での自由度を考慮した効率的な最小値検索手法を開発した点に特徴がある。BISHOP コードの検証例として、水素化ナトリウム (NaH) の分解温度-分解圧力関係の解析を行い実験値と比較した結果を図3に示す。広範囲の温度・圧力条件において、解析結果が実験値と定量的にほぼ一致していることが確認できた。

次に、燃焼特性やエアロゾルの雰囲気中への飛散率などを予測評価するために、対流拡散による物質移動、化学反応による発熱及び熱の拡散と輻射、そこで発生したエアロゾル挙動として対流による抗力、熱泳動力及び重力を考慮した解析コードを開発した。ここで、対流拡散場を解くために、対向拡散火炎の理論を適用した。プール温度を 1000K に設定した場合の評価結果を、濃度・温度分布、燃焼率及びエアロゾルの飛散率について、それぞれ図4、図5及び図6に示す。

解析の結果、次の結論が得られた。

- (1) 本解析モデルでは、境界層の厚さ及び生成物の割合をあらかじめ与えることなくナトリウムプール燃焼解析が実施でき、しかも妥当な温度分布、化学種濃度分布、及び流速分布が得られることがわかった。
- (2) 本解析モデルはフレームシートモデルと異なり有限の火炎厚さを持ち、しかも実際の燃焼特性を比較的良く説明することがわかった。
- (3) 従来の解析で用いられている飛散率は、プール温度が 1000K 程度かつエアロゾルの幾何平均半径が 5.0~10.0 $\mu\text{m}$  とした場合に妥当である事が分かった。

以上が、本年度における研究成果である。

**【今後の予定（翌年度以降の概要）】**

平成 11 年度は、エアロゾルの多次元移流拡散モデルの開発を実施する予定である。

平成 12 年度は、解析コードの実験検証並びに感度解析による総合評価を実施する予定である。

**【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】**

1) 岡野・山口、“ナトリウム燃焼解析手法の開発 (13) 化学平衡計算コード BISHOP の開発と検証”、日本原子力学会 1998 秋の大会、G14、9 月 28~30 日、福井工業大学

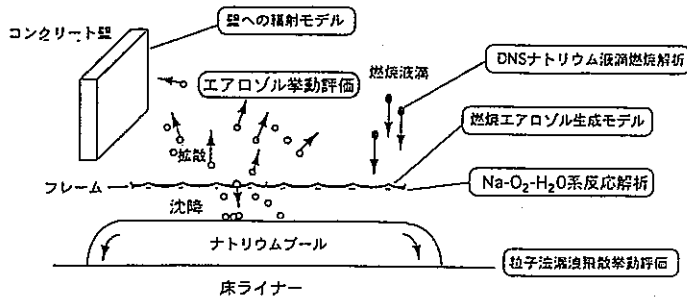


図1 ナトリウムプール燃焼の概況

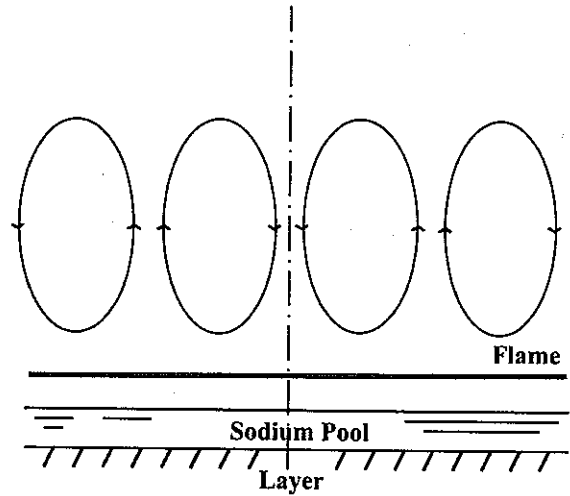


図2 仮定したプール表面近傍における流れ

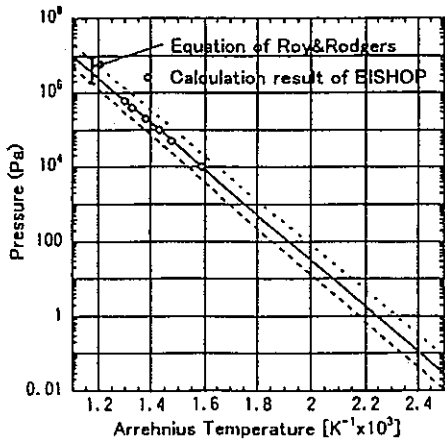


図3 水素化ナトリウム (NaH) の分解温度と分解圧力の関係

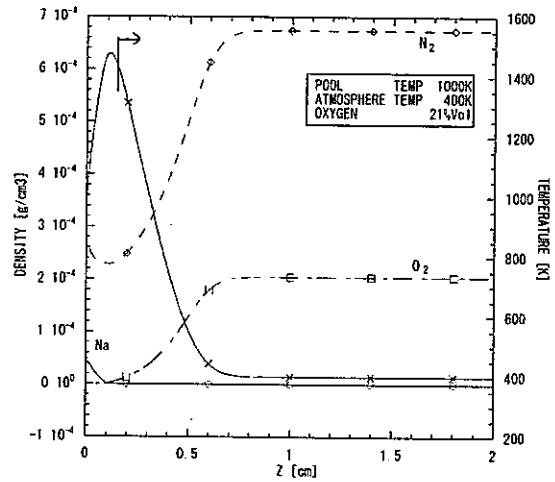


図4 プール温度 1000K における濃度・温度分布

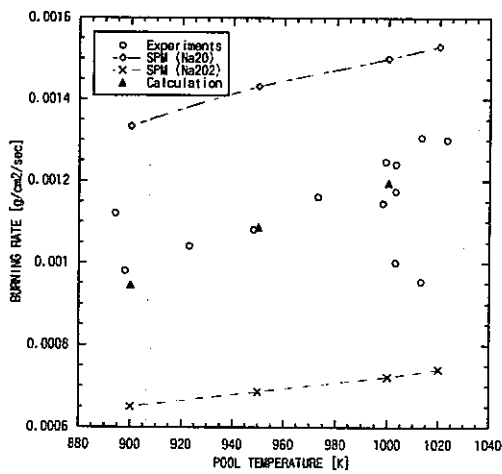


図5 プール温度と燃焼率の関係

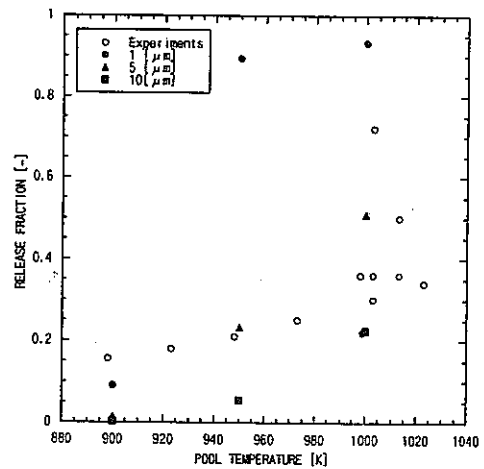


図6 プール温度とエアロゾルの飛散率の関係



先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	ナトリウム漏洩燃焼形態の予測手法に関する研究		
研究協力課題	粒子法を用いたナトリウム漏洩燃焼解析手法の開発		
研究者所属、氏名			
大学側	東京大学大学院 工学系研究科 附属原子力工学研究施設 岡 芳明 教授, 越塚 誠一 助教授, 向原 民 助手 [ *客員研究員 **研究生 ]		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ 飯田 将雄		
研究協力実施場所	東京大学大学院 工学系研究科 附属原子力工学研究施設, 大洗工学センター システム技術開発部 熱流体技術開発グループ		
通算研究期間 (予定)	平成 10年 4月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年 10月12日 ~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>比較的小規模なナトリウム漏洩の形態やライナーなどへの堆積状態を、3次元的に予測する解析的手法を開発し、種々の漏洩条件における事故影響の評価に反映することを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>小規模漏洩時のナトリウム流動・燃焼挙動を解析するため、サイクル機構では粒子法を用いた3次元ナトリウム漏洩燃焼挙動解析コードの開発を行っている。本コードには、現状では詳細な物性が不明なナトリウム酸化混合物の燃焼・流動挙動に関する簡易なモデルが組み込まれている。本研究では先ず、微小漏洩燃焼実験の結果に基づいてこのモデルの評価・検証を行う。次いで、その結果を踏まえたナトリウム挙動モデルの改良、および、本コードに採用した粒子法について非圧縮性モデルの安定性向上や機構論的な表面張力の考慮が可能となるような改良を行う。共同研究においては、ナトリウムの燃焼挙動に関する部分をサイクル機構側が、流動挙動に関する部分を主に共同研究相手側が担当して行う。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>大洗工学センターおよび共同研究相手側の計算機</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

サイクル機構ではナトリウム漏洩燃焼の評価手法の開発を進めており、粒子法による解析コードを開発している。本共同研究では、粒子法によるナトリウム漏洩燃焼解析に必要な基礎研究を行っている。平成10年度は数値安定性に優れたナトリウムの堆積挙動の解析モデルの開発が課題である。これまでの研究で堆積後の固相の計算モデルを開発した。さらに、このモデルをこれまでの熱流動解析法と組合せ、物性が良くわかっている凝固現象における堆積挙動の解析を行った。

### 【研究成果】

これまで東京大学において開発された粒子法は、主に熱流動解析にのみ適用されてきた。固相における構造解析は従来から有限要素法が用いられてきたが、最近では要素生成を必要としない方法も研究されつつある。構造物が大変形する場合、あるいは融解や凝固などにより固相自体が生成あるいは消滅するような場合には、要素を必要としない方法が有利であると考えられる。そこで、ナトリウム漏洩燃焼における燃焼生成物の堆積挙動の解析のための粒子計算モデルの開発を行う。

これまでの粒子法による熱流動解析では固相を壁境界条件として扱っていたが、これを構造物として解析できるようにする。具体的には、ヤング率とポアソン比を物性値とする厚肉弾性体の支配方程式に対する粒子計算モデルを新たに開発した。この計算モデルでは、粒子には回転の自由度があり、構造物の角運動量が保存される。ただし、陽的なアルゴリズムになっているために、柔らかい構造物しか現実的にはまだ扱うことができない。中間報告ではヤング率  $10^4$ 、ポアソン比 0.3 の弾性体同士の衝突の計算例を示した。この例では板が変形により折れる様子が計算されている。このように、粒子計算モデルでは構造物の大変形や切断のような現象も容易に解析することが可能である。

燃焼生成物による堆積では物性などに不確かさが残るが、凝固ではほぼ同様の現象でありながら物性値は明確である。そこで、凝固を伴うナトリウムの2次元熱流動解析を行った。初期に高さ 20cm、幅 10cm の高温のナトリウムが配置され、幅 1m、厚さ 1cm、初期温度 15℃のステンレス板上に流れ出す。この体系で通常の場合には、ナトリウムの挙動は凝固の影響を殆ど受けない。そのためナトリウムの初期温度を 98℃、粘性を仮想的に 1000 倍、熱伝導率を 10 倍として解析を行った。0 秒から 0.4 秒までの結果を図1に示す。冷たいステンレスと接している部分で凝固が生じ、ナトリウムの広がりが抑制されている。特に、0.3 秒と 0.4 秒では先端近くの凝固により床の近くに空洞部が生じていることがわかる。これは、先端で凝固が生じると、これを乗り越えるように流動するためである。図2に先端位置の変化を示す。凝固の影響の無い場合、粘性のみを 1000 倍にした場合、粘性を 1000 倍にするだけでなく熱伝導率も 10 倍にして凝固の影響が現れる場合、の3種類が比較されている。無次元時間で6までは粘性の影響によって先端位置の移動が遅くなっている。そして、無次元時間で6以上になると、凝固が生じる場合のみしばらく先端が停止し、12になってから再び広がりが始める。これは、先端の凝固によって広がりが完全に抑制された後、これを乗り越えるような流動が生じたためである。

以上より、凝固を伴う熱流動の粒子法による計算が可能になった。これはナトリウムの燃焼に伴う燃焼生成物の堆積にも適用できる。ただし、燃焼生成物の堆積を解析するためには、金属ナトリウムと酸化物の混合比によって物性値がどのようになるかという情報も必要である。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

ナトリウムの広がりは燃焼生成物による凝固だけでなく表面張力にも大きな影響を受けるので、表面張力の粒子計算モデルの開発を行う。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

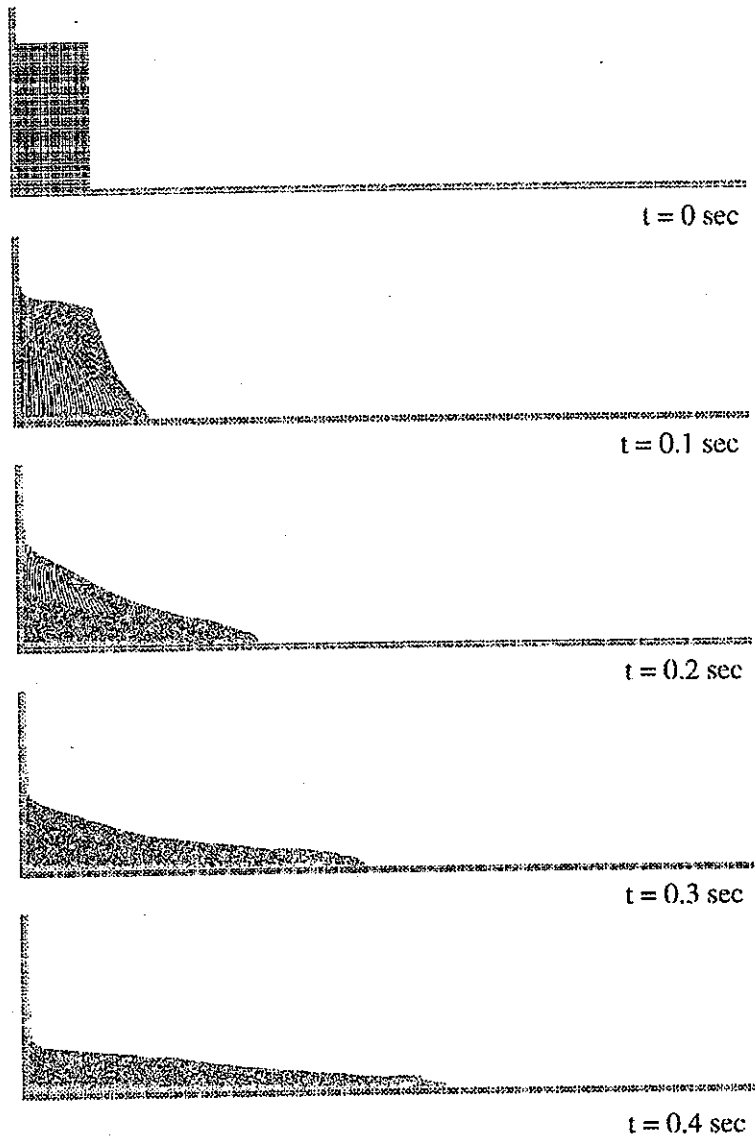


図1:凝固を伴う液体ナトリウムの広がりの解析  
 (ナトリウム初期温度: 98°C、ステンレス初期温度: 15°C、粘性:1000 倍、熱伝導率: 10 倍)

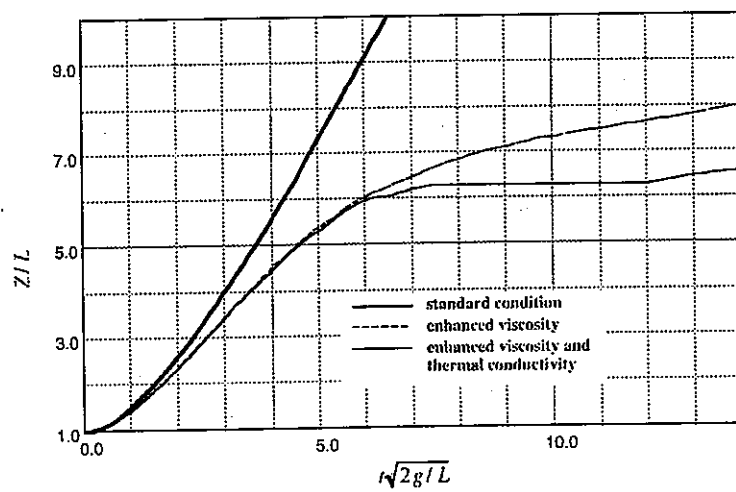


図2:先端位置の比較 (Z: 先端位置、L: 初期ナトリウム柱の幅=0.1m)

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要中間報告書

研究協力テーマ	TRU核種の崩壊熱の測定・評価		
研究協力課題	弥生炉を用いたTRU核種の崩壊熱の測定・評価		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設 教授 岡 芳明 〔*客員研究員 **研究生〕		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 炉心技術開発Gr 大川内 靖		
研究協力実施場所	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設 サイクル機構・大洗工学センター		
通算研究期間 (予定)	平成10年 4月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年12月17日~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>現在、超ウラン元素(TRU)入り燃料炉心の設計・検討及び関連する核燃料サイクル施設の検討が進められているが、設計、検討に必要なTRU核種の精度良い崩壊熱測定データは、現状ではほとんど無い。このため、TRU 核種を高速中性子で照射し、照射後のTRU 核種の崩壊熱を測定・評価し、TRU 核種の崩壊熱データの精度向上を図ることを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容(概要)】</b></p> <p>照射するTRU試料は、直径15mm, 厚さ0.1mmのチタン板に電着し、ポリエチレンフィルムで密封されたものをカプセルに取り付けて使用する。</p> <p>照射は、気送管システムを用いて行い、炉心中心へカプセルを挿入して所定の時間、照射した後、10秒以内に取り出し核種ごとの放射能(β線スペクトル、γ線スペクトル)を測定する。測定データは、高性能データ処理システムで処理され、保存されていく。照射場所は、弥生炉のグレイジングホールを用いる。中性子束は、<math>10^8 \sim 10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}</math>程度である。</p> <p>また、照射されたTRU試料の核分裂数を求めるためにGe検出器を用いて測定を行う。測定結果を解析し、その精度を評価する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設弥生炉</p>			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

本研究は、平成10年度より新規に開始したものである。

【研究成果】

(1)U-235の $\beta$ 線測定

照射時間10秒 原子炉出力500W 2回

照射時間100秒 原子炉出力500W 1回

Ge検出器による核分裂数の測定。（全ての照射に対して）

(2)U-235の $\gamma$ 線測定

照射時間10秒 原子炉出力500W 2回

照射時間100秒 原子炉出力500W 1回

Ge検出器による核分裂数の測定。（全ての照射に対して）

(3)Np-237の $\beta$ 線測定

照射時間10秒 原子炉出力1500W 1回

照射時間100秒 原子炉出力1900W 2回

照射時間500秒 原子炉出力1900W 1回

Ge検出器による核分裂数の測定。（全ての照射に対して）

(4)Np-237の $\gamma$ 線測定

照射時間100秒 原子炉出力1900W 3回

照射時間500秒 原子炉出力1900W 1回

Ge検出器による核分裂数の測定。（全ての照射に対して）

(5)Am-243未照射試料の測定

試料自身からの放射線が強すぎるため、dead timeが約95%と、測定不可能な状態である。

(6)その他

チタン板だけの照射（上記の様々な条件において）

未照射試料からの放射線の測定。

自然環境バックグラウンド等。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

測定データ（U-235, Np-237）のデータ解析及び評価。Am-243, Am-241及び高次Puの測定検討。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし。

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	TRU核種の崩壊熱の測定・評価		
研究協力課題	TRU崩壊熱測定値を用いた包括的な崩壊熱評価手法の確立		
研究者所属、氏名			
大学側	武蔵工業大学工学部 教授 吉田 正*		
機構側	名古屋大学大学院工学研究科 助手 親松和浩* (*客員研究員 **研究生)		
研究協力実施場所	大洗 システム技術開発部 炉心技術開発Gr 大川内 靖		
研究協力実施場所	武蔵工業大学工学部、名古屋大学大学院工学研究科、核燃料サイクル開発機構・大洗工学センター		
通算研究期間 (予定)	平成10年 4月 ~ 平成11年 3月	当該年度 研究期間	平成10年 4月 1日~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>原子炉崩壊熱の実用的な評価を行う上で、総和法をはじめとする計算による予測は将来的にもその中核となる。TRU崩壊熱において、評価計算の有効性を把握し、汎用性のある評価法を先行的に確立すれば、TRU装荷炉やTRU燃焼炉を実現する上での懸案を解決する一方、FPの核的挙動を包括的に把握する評価手法確立への道を開く。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>総和法をはじめとする崩壊熱計算手法は、FPの生成消滅挙動に立ち返って崩壊熱を算出するため、崩壊熱と、個々のFP核種生成量や遅発中性子など、他のあらゆるFP集団挙動を相互整合的かつ包括的に把握できる。しかしながら、原子炉崩壊熱の予測は、安全性に直接関わる問題であるので、直接的な実験データによる計算手法の検証が不可欠である。本研究では、TRU核種の崩壊熱という新規性あるデータをFPの集団挙動という本源に立ち戻って解析評価することにより、包括的な崩壊熱評価手法の確立を目指す。</p> <p>具体的には、研究協力テーマの実施によって得られるTRU核種（高次Pu, Np, Am, Cm等の同位体）の崩壊熱実験値を総和計算等により解析し、これまでその適用性が未知であったTRU核種への崩壊熱評価計算の適用性およびその限界を把握する。次に、解析結果を、崩壊熱総和計算の重要な入力データである個々のFP核種からのエネルギー放出量、核分裂収率等へフィードバックし、ウラン、プルトニウムの主要核分裂核種からExoticなTRU核種にいたる広い範囲に一貫して適用可能な崩壊熱評価法を確立する。さらに、その結果に立脚して崩壊熱評価手法の適用限界の拡張を目指す。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>    なし</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

本研究は、平成10年度より新規に開始したものである。

## 【研究成果】

### (1) パソコン用崩壊熱総和計算プログラムの作成（文献1）

実験データの迅速で効率的な解析のため、大掛かりな計算コードを必要とした崩壊熱総和計算を、パソコンで行えるようにした。これにより総和計算の信頼性の検討を、実験現場でも簡単に行える。このプログラムはグラフィカルなユーザーインターフェースを持ち専門家でなくても容易に操作できるように設計されている。

### (2) 新たに開発した崩壊熱評価手法である「ハイブリッド法」を用いた検討の結果、以下の結論を得た（文献2）

(a) 秋山等の弥生炉でのTh, U, Puの崩壊熱測定データは相互にconsistentであり、十分信頼できる。特に問題となる冷却時間4000秒以下の崩壊熱測定値のconsistencyについても問題ない。従って、今回のMA核種の崩壊熱測定を、秋山らの方法に準拠して行うことは妥当である。

(b) 秋山等の冷却時間4000秒以下の測定値を用いて、ハイブリッド法でMA核種の崩壊熱を計算した。この結果と総和計算値を比較し、ベータ崩壊熱については良好な一致をみた。しかし、ガンマ崩壊熱については総和計算値の誤差をやや超えるずれがあった。したがって、ガンマ崩壊熱計算値については、大きめの不確かさを見込む必要がある。

### (3) ガンマ崩壊熱誤差要因に関する検討（文献3）

今回の測定は、高速炉、軽水炉の安全解析上問題となる、冷却時間300～3000秒でのガンマ崩壊熱の、測定値と総和計算値の間の不整合の原因を明らかにする上でも貴重な情報を提供する。そこで、総和計算に基づく予備検討を行い、比較的Q値の大きなFP核種の高エネルギー領域におけるベータ強度が見落とされている可能性を指摘した。特に、 $^{102}\text{Tc}$ ,  $^{104}\text{Tc}$ ,  $^{105}\text{Tc}$ および $^{108}\text{Rh}$ の各核種が、主要な3つの核分裂親核である $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ に見られるガンマ線成分不一致の一貫した原因となっている公算が高いと結論した。また、このガンマ線成分不一致が、原子炉崩壊熱にもたらす影響の上限を初めて定量的に把握した。

### (4) 崩壊熱の理論計算のみによる予測（文献4）

燃料の高燃焼度化やADC（加速器駆動型炉）などの新概念炉ではこれまで問題とされなかったexoticな核分裂や核破砕反応生成物の崩壊熱が問題となってくる。そこで、生成核種のyieldとベータ崩壊のQ値以外をすべて理論計算によって、どこまで崩壊熱を正しく予測できるかを検討した。



【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究は、平成10年度をもって終了した。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) K. Oyamatsu: Easy-to-use Application Programs to Calculate Aggregate Fission-product Properties on Personal Computers, Proc. 1998 Symposium on Nuclear Data, JABRI-Conf 99-002(1999)234
- (2) H. Takeuchi, K. Oyamatsu and Y. Kukita: Decay Heat Calculation for Minor Actinides in the Hybrid Method, Proc. 1998 Symposium on Nuclear Data, JAERI-Conf 99-002(1999)124
- (3) T. Yoshida, T. Tachibana, F. Storrer, K. Oyamatsu and J. Katakura: Possible Origin of the Gamma-Ray Discrepancy in the Summation Calculation of Fission Product Decay Heat, J. Nucl. Sci. and Technol., 36(1999)135
- (4) T. Yoshida, T. Tachibana: Fully Theoretical Treatment of Fission Product Decay Heat at Very Short Cooling-Times, (to be submitted for publication)

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高燃焼度燃料の物性に関する基礎的研究		
研究協力課題	模擬燃焼燃料を用いた高燃焼度燃料の熱物性及び機械的性質に関する基礎的研究		
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 山中伸介、 助教授 宇埜正美、 助手 黒崎健 [*客員研究員 **研究生]		
機構側	大洗 照射センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室 阿部和幸		
研究協力実施場所	大阪大学 工学部 原子力材料工学講座 サイクル機構 大洗 照射センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室		
通算研究期間 (予定)	平成10年11月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年11月25日~ 平成11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】 MOX 燃料の高燃焼度化の為には、高燃焼度燃料の熱物性及び機械的性質の評価が必要である。しかしながら、150Gw/tを越える燃焼度の燃料については、技術的に測定が困難な為実測された物性値は極めて限られている。本研究は、模擬燃焼燃料を用いた実験を実施して分子動力学法等による計算結果と比較検討することにより、150Gw/tを越える高燃焼度の高速炉燃料について、熱伝導度、熱膨張率及び弾性率を予測する手法の確立を目的とする。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>大阪大学において、高燃焼度MOX 燃料を模擬するためにMOX を模擬した<math>UO_2 - CeO_2</math>固溶体を用いて、非放射性的のFP元素を添加し、高燃焼度燃料の模擬ペレットを作製する。このペレットを用いて、格子定数や熱容量等の測定データを取得し、分子動力学法等を用いて高燃焼度MOX 燃料の熱伝導度や熱膨張率及び弾性率を計算により予測する。サイクル機構では、未照射MOX 燃料・低燃焼度の実照射MOX 燃料・未照射MOX 燃料に模擬FPを添加した高燃焼度の模擬燃焼燃料について熱伝導度データを取得する。予測結果の妥当性評価は、<math>UO_2 - CeO_2</math>固溶体を用いた模擬燃焼燃料や実照射MOX燃料及びFP添加MOX燃料の実測値と比較することで実施し、その結果を元に、高燃焼度燃料の物性値予測手法の確立を目指す。</p>			
<p>【使用主要施設】</p> <p>高温 X線回折装置、超音波音速測定装置（大阪大学工学部） 熱伝導度測定装置（サイクル機構 大洗 照射センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室）</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成10年度に実施した内容を以下に示す。

模擬MOX燃料に、FPとしてネオジム及びジルコニウムを添加して模擬燃焼燃料を作製し、熱拡散率と超音波音速測定及びビッカース微小硬度を測定した。測定結果より、熱伝導度及び弾性率、ポアソン比、ビッカース硬度、降伏応力の評価を行い、添加元素濃度依存性等について検討した。また、 $UO_2$ 及び $PuO_2$ の分子動力学計算を行い、熱伝導度の温度依存性を評価した。 $(U_x, Pu_x)O_2$  ( $0 \leq x \leq 1$ )についても計算を行い、熱伝導度の組成による影響を検討した。

## 【研究成果】

### 1. 模擬高燃焼度MOXの熱物性及び機械的性質の評価

プルトニウムをセリウムで模擬した模擬MOX燃料を用いて、ORIGENコードを用いた250GWd/tまでの燃焼計算結果より、模擬燃焼燃料を作製した。FPは、希土類元素をネオジムで、それ以外をジルコニウムで代表させ作製した $(U_{0.8-y}, Ce_{0.2}, Nd_y)O_{2-x}$ 、 $(U_{0.8-y}, Ce_{0.2}, Zr_y)O_{2-x}$ 固溶体について、熱物性と機械的性質を評価した。

#### (1) 模擬高燃焼度MOXの熱物性評価

レーザーフラッシュ法熱定数測定装置により試料の熱拡散率を求め、密度及び比熱を乗ずることにより熱伝導度を評価した。ここで、試料の比熱は、文献<sup>1)</sup>より得られた成分酸化物の比熱を用いてKoppの法則より決定した。

ジルコニウムとネオジム添加の場合について、試料の熱伝導度の温度依存性を図1と図2に示す。熱伝導度は添加元素が増加するに従って減少を示した。また、全試料の熱伝導度は約1000Kまで、温度が増加するとともに減少した。熱伝導度の温度依存性は、フォノン伝導の近似式 $K=(A+BT)^{-1}$ を約1000Kまで満足した。さらに、各試料の熱伝導度は、FP濃度によって表現することが出来た。図3と図4に添加元素の固溶に伴って増加する熱抵抗率すなわち実効格子欠陥熱抵抗率と、ジルコニウム及びネオジムの濃度との関係を示す。

#### (2) 模擬高燃焼度MOXの機械的性質の評価

試料の超音波音速測定を行い、弾性率、ポアソン比、デバイ温度を求めた。また、ビッカース硬度計により硬度を評価し、超音波音速測定の結果と合わせて、機械的性質の総合評価を行った。

図5にネオジムを添加した試料の弾性定数と添加元素濃度依存性を示す。試料の弾性定数はネオジムの濃度が増すにつれ減少することが確認された。また、図6に降伏応力のネオジム濃度依存性を示す。これも同様にネオジム濃度が増すにつれ減少することが確認された。ジルコニウムを添加した試料については、最小の添加量試料については音速測定が実施できたが、他の添加量試料については測定できなかった。この原因として、試料内部にクラックや残留応力等が残っていたと考えられる。アニーリングを長時間行うことで、試料内部の組織を均一化できると考えられる。

### 2. 分子動力学法を用いた $(U_x, Pu_x)O_2$ 固溶体の熱伝導度の評価

$U^{4+}$ 、 $Pu^{4+}$ イオンと $O^{2-}$ イオンを蛍石型に配置した体系で、周期的境界条件の下で分子動力学計算を行った。MOX系として $U^{4+} \rightarrow Pu^{4+}$ の置換をランダムに行い、Pu富化度に応じてU:Puの粒子数比を増減した。粒子間相互作用はBusing型+Morse型ポテンシャルを用いた。 $U^{4+}$ 、 $Pu^{4+}$ イオンのパラメータは $UO_2$ 、 $PuO_2$ の膨張率と圧縮率の実験値を再現するように試行錯誤的に決定した。積分時間間隔は2fsとし、温度・圧縮制御にはNoseの方法、Andersenの方法を用いた。熱伝導度の導出にはGreen-Kuboの方法を用いた。尚、計算には分子動力学プログラムmxdortho<sup>2)</sup>をカスタム化したものを用いた。

図7に $UO_2$ の熱伝導度の温度変化を示す。本研究で得られた熱伝導度の計算値は、300-2500Kまでの

広い温度範囲にわたり、別途行った実験による値及び文献値<sup>3) 4)</sup>と良い一致を示しており、他の分子動力学計算による報告値<sup>5) 6)</sup>と比べても良い結果を与えている。また、PuO<sub>2</sub>についても計算値と文献値との良い一致が得られ、膨張率と圧縮率を入力情報として熱伝導度を評価することが出来た。

図8に(U<sub>0.8</sub>, Pu<sub>0.2</sub>)O<sub>2</sub>の熱伝導度の温度変化を示し文献値<sup>4)</sup>と比較した。また、比較のためUO<sub>2</sub>の計算値及び文献値も示した。MOXの熱伝導度はUO<sub>2</sub>よりもやや低下し、文献値とよい一致が得られた。

### 3. 参考文献

- 1) Japan Thermal Measurement Society, Thermodynamics data base for personal computer MALT2
- 2) K. Kawamura, Proceedings of the 13th Taniguchi Symposium, 1990, p89
- 3) J. H. Hardings and D. G. Martin, J. Nucl. Mater., 166(1989)233.
- 4) C. S. Olsen and G. A. Reymann, "THREE-NUREG-1005(1976)", eds. P. E. MacDonald and L. B. Thompson
- 5) 樋口真一、日本原子力学会「1997秋の大会」p697, I55
- 6) P. J. D. Lindan and M. J. Gillan, J. Phys. Condens. Matter, 3(1991)3929.

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

FP析出相の熱・機械的特性の測定を行うとともに、引き続き分子動力学法による物性予測の手法の確立について研究を行う。FP析出相については、金属間化合物相と複合酸化物相を取り上げる。具体的には金属間化合物相としてMo-Me合金, UMe<sub>3</sub>型金属間化合物 (Me:白金族元素) 及び複合酸化物相としてCs<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, BaZrO<sub>3</sub>, Cs<sub>2</sub>UO<sub>4</sub>, BaUO<sub>4</sub>等について試験を行う。

分子動力学法を用いた物性予測に関しては、UO<sub>2</sub>及び(U, Pu)O<sub>2</sub>について、FPが固溶した系の熱・機械的性質を、今年度実施した(U, Ce, FP)O<sub>2</sub>固溶体の物性測定結果をもとに、分子動力学法を用いて評価する。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 大嶋他、模擬高燃焼度MOX燃料の熱物性、日本原子力学会「1999年秋の大会」発表予定
- 2) 吉田他、模擬高燃焼度MOX燃料の機械的性質、日本原子力学会「1999年秋の大会」発表予定
- 3) 山田他、分子動力学法を用いた(U<sub>1-x</sub>, Pu<sub>x</sub>)O<sub>2</sub>固溶体の熱伝導度の評価、日本原子力学会「1999年秋の大会」発表予定

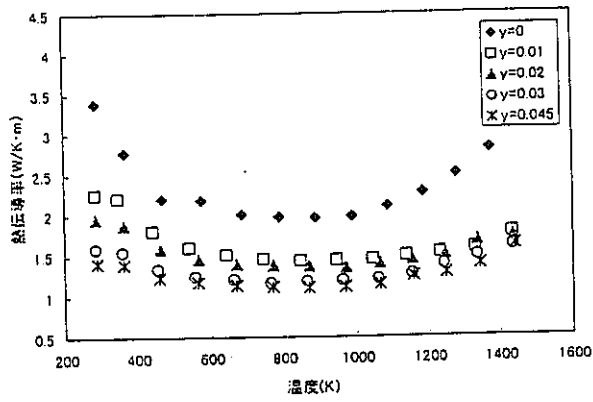


図1  $(U_{0.8-y}Ce_{0.2}Zr_y)O_{2\pm x}$ の熱伝導率の温度依存

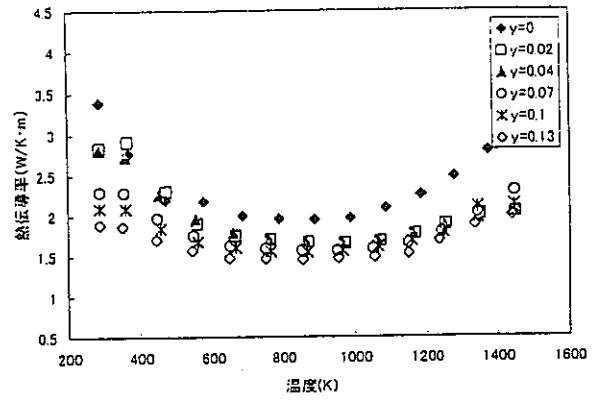


図2  $(U_{0.8-y}Ce_{0.2}Nd_y)O_{2\pm x}$ の熱伝導率の温度依存

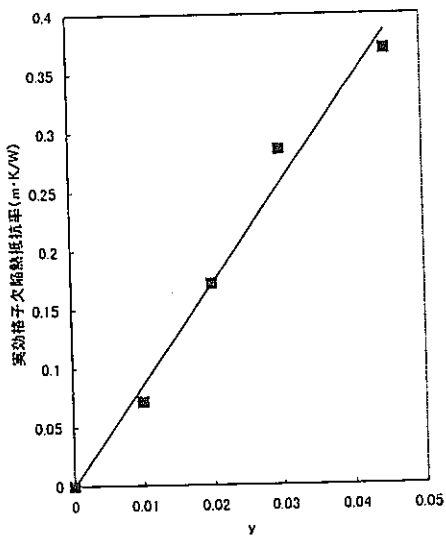


図3  $(U_{0.8-y}Ce_{0.2}Zr_y)O_{2\pm x}$ の実効格子欠陥熱抵抗率のZr濃度変化

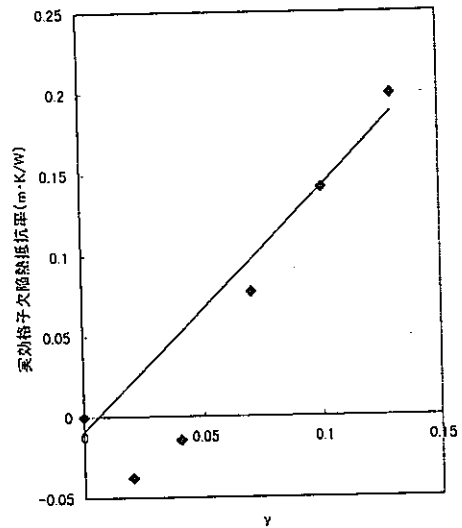


図4  $(U_{0.8-y}Ce_{0.2}Nd_y)O_{2\pm x}$ の実効格子欠陥熱抵抗率のNd濃度変化

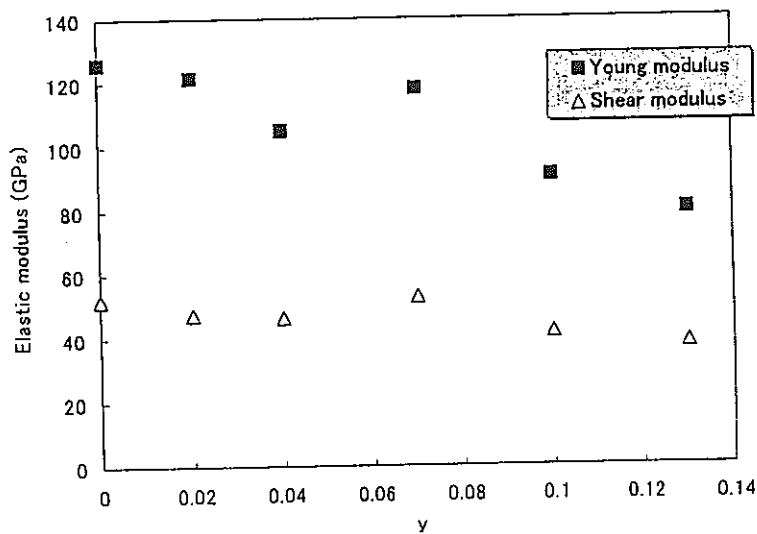


図5  $(U_{0.8-y}Ce_{0.2}Nd_y)O_{2\pm x}$ の弾性定数の添加元素濃度依存性

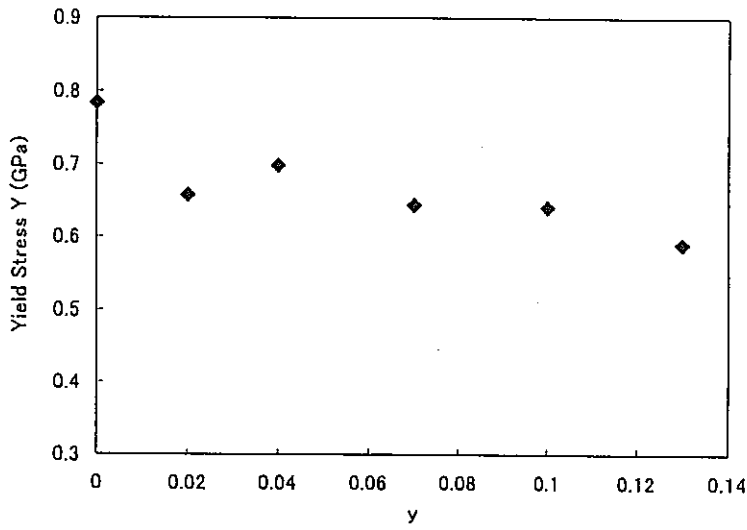


図6  $(U_{0.8-y}Ce_{0.2}Nd_y)O_{2\pm x}$ の降伏応力の添加元素濃度依存性

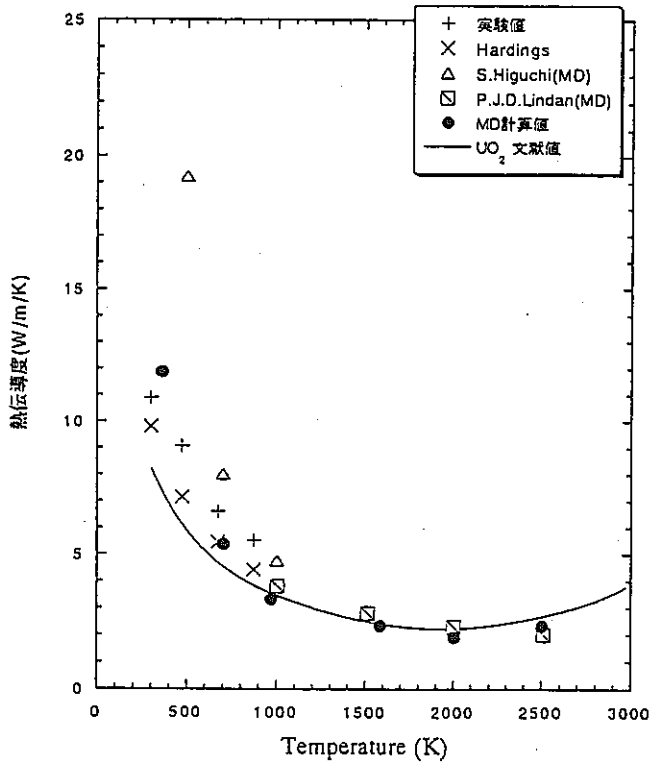


図7  $UO_2$ の熱伝導度の温度依存性

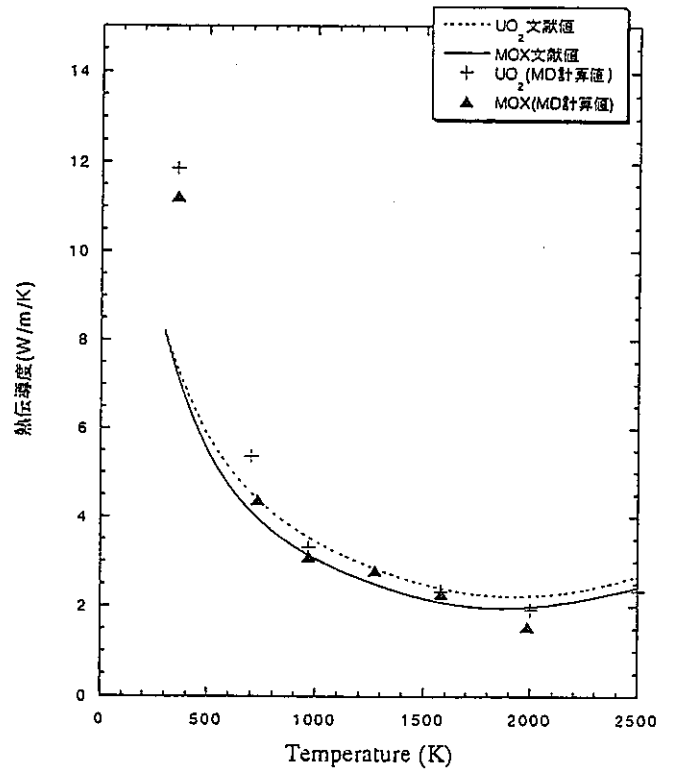


図8 熱伝導度の温度依存性 ( $UO_2$ とMOXの比較)

## 2. 先行基礎工学分野に関する平成10年度研究協力概要報告

### (2) 環境技術関係

先行基礎工学分野に関する平成10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	同上 — 巨視的分散現象に関する検討 —		
研究者所属、氏名			
大学側	九州大学工学部建設都市工学科 教授 神野健二 九州大学工学部建設都市工学科 中川啓 (*客員研究員 **研究生)		
機構側	東海環境保全センター 処分研究部 システム解析グループ 内田雅大, 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 機構 東海環境保全センター 処分研究部 システム解析グループ		
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10年10月8日 ~ 平成11年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b> 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><b>【研究内容(概要)】</b> 多孔質媒体水理試験設備(MACRO)において不均質な透水係数場を粒径の異なる6種類のガラスビーズを用いて人工的に作成し、種々の水理条件のもとでトレーサ試験を実施し、物質移動モデルの開発/検証と分散パラメータのスケール依存性について検討を行う。トレーサには、NaClを用い、媒体内部に配置した導電率計により濃度変化を測定している。また、NaClの他に染料トレーサを用いて視覚的にも物質移動現象を観察している。 本試験を通じて、流速の変動により生じる分散現象を場の特性が既知な実験室レベルからモデル化してゆき、従来の移流分散モデルを用いて物質移行を解析する際のパラメータのスケール依存性について明らかにする。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b> 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 地層処分基盤研究施設 多孔質媒体水理試験設備(MACRO)</p>			



### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

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

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

平成10年度は、巨視的分散係数が一定値に漸近しながら増加すると仮定した場合に、巨視的分散係数が遷移する過程を判別する手法について検討し、その適用性を数値解析を用いて検討した。また、トレーサ試験において観測井戸で観測される破過濃度の結果を用いて場の不均質性を推定する手法についても検討し、本手法を原位置のトレーサ試験結果に適用し、不均質浸透場の特性を推定した。さらに、平成8年度から平成10年度までの3年間で実施した研究成果を詳細報告書として取りまとめた。

### 【研究成果】

平成10年度は4月から12月までに不均質場における巨視的分散の遷移状態の特性評価及び原位置トレーサ試験と数値計算による不均質場の推定に関する研究を行い、その成果については平成10年度研究概要中間報告書としてまとめた。平成11年1月から3月にかけては平成8年度から平成10年度の3年間で実施した本研究の成果について取りまとめ、詳細報告書の作成を行った。したがって、本概要報告書では、詳細報告書に記述した3年間の研究内容及び成果についての総括を述べる。

#### （1）室内試験による不均質浸透場の流れと物質移動特性の解析

粒径の異なるガラスビーズを不均質に充填した2次元浸透層におけるトレーサの分散過程の室内試験を対象として数値計算を実施した。特に透水係数の不均質な分布とトレーサの分散過程、すなわち巨視的な分散過程が発生する機構について数値計算モデルにより詳細な検討を加えた。以下に得られた結果をまとめる。

- ・ 透水係数の空間分布とガラスビーズの微視的な分散特性が既知であると、観察されるトレーサプルームの広がりやトレーサ濃度の変化を十分な精度で予測できることがわかった。
- ・ 透水係数が空間的に大きく変化する流れの場での移流分散過程では、トレーサ濃度は局所的に複雑な挙動を示す。特に透水係数が小さな領域周辺では、プルームはこの領域の影響を受けて巨視的な分散をおこす。また、各々の領域内では、局所的な流速に基づく微視的分散効果による広がりが卓越している。
- ・ 数値計算により、巨視的分散効果は積分特性距離の大きさおよび局所的な実流速の変動とによって規定されることが示唆された。
- ・ 室内試験結果からは、プルームは透水係数が大きく、エネルギーロスが小さい領域に向かって輸送されることが観察された。
- ・ 成層状態に近い帯水層で、下流側の観測井戸でトレーサ濃度を記録し、この記録を基に種々の解析を行う場合には、観測井戸における成層の区間毎に注意深くトレーサ試験を行う必要があることが示唆された。

## (2) 透水係数の積分特性距離と断面平均濃度に対する巨視的分散係数

不均質浸透場における巨視的な分散について数値計算により検討した。また、その検討に先立ち、現場スケールで場を発生させる場合の不均質発生モデルの特性について検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- ・発生させる不均質浸透場の特性はその発生モデルのパラメータに大きく依存する。
- ・モデルの透水係数の対数変換値の空間分布の積分特性距離と巨視的分散係数の間にはほぼ線型関係があることがわかった。
- ・積分特性距離に応じてどの程度の観測時間スケールあるいは観測空間スケールがあれば、巨視的分散スケールとしての議論ができるかを検討し、積分特性距離の3倍強の流下距離をトレーサが経験すれば一定の巨視的分散係数に収束する。

## (3) 巨視的分散係数の定常値への遷移状態の特性評価

不均質浸透場における巨視的分散係数の変動の段階を判別する方法について検討した。次に、対象とするスケールに対して一定の巨視的分散係数として取り扱うことができないと判断された場合に、透水係数の対数変換値の不均質浸透場発生モデルの自己回帰係数を直接調べる方法を検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- ・線源に瞬間注入されたトレーサに対し、下流の観測井戸における断面平均濃度の時間変化と、対応する解析解を比較して適合度検定で調べることと、さらに下流の第2の観測井戸での断面平均濃度も適合度検定する判別方法により、巨視的分散係数の一定値への収束状態を判別できることが確かめられた。
- ・不均質場発生モデルの自己回帰係数を直接評価する方法については、観測井戸内での断面平均濃度からだけでは完全に浸透場そのものを推定することは困難であるが、流れ方向の積分特性距離の大小、換言すれば発生モデルの係数の相対的な大小関係の目安を評価できることがわかった。
- ・ここで検討した手法は、観測井戸内での濃度時系列を場の推定に積極的に活用しようというものであり、原位置でのトレーサ試験や観測体制のあり方を考える一助になると思われる。

## (4) 原位置トレーサ試験と数値計算による不均質場の推定

トレーサ試験の観測井戸における断面平均濃度変化をもとに、不均質浸透場を種々発生させて、実際のトレーサ試験を再現できるような不均質浸透場の推定を試みた。さらに、現場データを用いて推定された不均質浸透場に対して、浸透場の積分特性距離と必要最小流下距離の関係、および浸透場の積分特性距離と巨視的分散の関係について比較検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- ・Horkheimer Inselサイトに対して不均質場発生モデルの自己回帰係数を評価し、適合度検定を行ったところ 有意水準5%でモデルの有効性が示された。
- ・Horkheimer Inselサイトに対して評価された浸透場の一例に対するトレーサプルームの挙動によればトレーサは不透水基盤から3.0mの高さから先に流下して、帯水層の上部および下部は遅れて流下する様子が示された。これは、Ptak and Teutschの示している観測井戸内の流速分布とも一致している。
- ・Horkheimer Inselサイトに対して評価された浸透場の一例として本研究で開発した手法を適用し、水平方向と鉛直方向のそれぞれの積分特性距離を調べると、それぞれ、74.52cm、58.63cmと推定された。

・評価された浸透場の積分特性距離と必要最小流下距離の関係により、巨視的分散係数の収束値を評価すると、 $4.92\text{cm}^2/\text{s}$  と推定された。また、巨視的分散定数は $136.7\text{cm}$  と推定できる。この値は Ptak and Teutsch の求めた $5.02\text{cm}^2/\text{s}$  及び $138.0\text{cm}$  とほぼ同じである。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

なし。平成10年度で終了。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 巨真吾 (1997) : 不均質多孔媒体中の流れ特性と物質輸送について, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 (第5回), pp. 173-178
- 2) 井尻裕二, 巨真吾, 畑中耕一郎, 内田雅大, 神野健二, 金澤康夫 (1998) : フラクタル透水場における巨視的分散現象に関する実験的研究, 日本原子力学会1998春の年会, p. 617
- 3) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 巨真吾 (1998) : 不均一多孔質媒体中の流れと物質輸送特性について, 地下水学会誌, 第40号第4号, pp. 1-16
- 4) 中川啓, 神野健二 (1998) : 不均一場と巨視的分散について, 日本地下水学会春季講演会, pp. 34-39
- 5) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男 (1998) : 不均一浸透場におけるトレーサー輸送の微視的分散と巨視的分散に対する水理学的考察, 水工学論文集, 第42巻, pp. 385-390
- 6) 中川啓, 神野健二 (1998) : 不均一場における巨視的分散の遷移状態の特性評価, 地下水学会誌, 第40巻第4号, pp. 485-499
- 7) 中川啓, 神野健二, 細川土佐男 (1998) : トレーサー試験と数値計算を用いた不均一場の推定, 日本地下水学会秋季講演会, pp. 94-97
- 8) K. NAKAGAWA, K. JINNO, T. HOSOKAWA, K. HATANAKA, Y. IJIRI, S. WATARI (1998): NUMERICAL STUDY OF NON-REACTIVE TRACER TRANSPORT IN THE HETEROGENEOUS FIELD, WITH RANDOM MICROSCOPIC DISPERSIVITY, IAHS Publication No. 250, pp. 567-574.
- 9) K. NAKAGAWA, K. JINNO, T. HOSOKAWA (1998): STUDY ON THE MICROSCOPIC DISPERSION FOR THE TRACER TRANSPORT IN NON-UNIFORM POROUS MEDIA, JHHE (投稿中)
- 10) 神野健二, 中川啓, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 巨真吾, E. K. WEBB, 金澤康夫, 内田雅大 (1997) : 不均質多孔媒体中の水理・物質移動に関する研究, 先行基礎工学分野に関する平成8年度報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TY1606 97-001
- 11) 神野健二, 中川啓, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 巨真吾, 吉田隆史, 金澤康夫, 内田雅大 (1998) : 不均質多孔媒体中の水理・物質移動に関する研究Ⅱ, 先行基礎工学分野に関する平成9年度報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TY1606 98-001
- 12) 神野健二, 中川啓, 細川土佐男, 畑中耕一郎, 井尻裕二, 巨真吾, 金澤康夫, 内田雅大 (1999) : 不均質多孔媒体中の水理・物質移動に関する研究Ⅱ, 先行基礎工学分野に関する平成10年度報告書, 核燃料サイクル開発機構 (印刷中)

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	地下水流動調査研究										
研究協力課題	地下水流動の総合調査・解析システムの開発										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td> <td colspan="3">埼玉大学 理工学研究科 教授 渡辺邦夫* 〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>機構側</td> <td colspan="3">東濃地科学センター 地層科学研究グループ 中野勝志, 三枝博光</td> </tr> </table>			大学側	埼玉大学 理工学研究科 教授 渡辺邦夫* 〔*客員研究員 **研究生〕			機構側	東濃地科学センター 地層科学研究グループ 中野勝志, 三枝博光		
大学側	埼玉大学 理工学研究科 教授 渡辺邦夫* 〔*客員研究員 **研究生〕										
機構側	東濃地科学センター 地層科学研究グループ 中野勝志, 三枝博光										
研究協力実施場所	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地層科学研究グループ										
通算研究期間(予定)	平成8年4月～ 平成13年3月	当該年度 研究期間	平成10年11月1日～ 平成11年3月31日								
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究										
<p>【研究目的】</p> <p>地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)】</p> <p>本研究では上記目的を受けて以下の研究を実施する。</p> <p>① 亀裂性岩盤の割れ目系のモデル化に関する研究</p> <p>② 地表部の水収支を把握するための蒸発散計測装置の精度の向上、および現地測定と水分移動解析</p> <p>③ 飽和・不飽和領域の地下水解析法の高度化</p>											
<p>【使用主要施設】</p> <p>東濃地科学センター, 東濃鉾山, 東濃鉾山周辺, 正馬様用地, 神岡鉾山, 埼玉大学構内</p>											

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

- ・岩盤割れ目系のモデル化を目的とした現場調査を実施し、割れ目系の水理地質特性を割れ目形成プロセスから評価・モデル化する考え方の妥当性を示し、従来より開発してきたチャンネルネットワーク解析への割れ目系調査結果の導入方法を明らかにした。
- ・簡易ベンチレーション試験による蒸発散計測において熱収支を考慮することによって、計測精度の向上を計ると共に、蒸発散量計測装置を改良・開発し、原位置試験を実施した。
- ・地表部の流出現象を把握するために、多種多様なデータを同時に考慮することが可能な解析手法を選択し、解析の有効性や精度について検討した。
- ・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 System」を開発し、原位置での適用試験及び試験精度の向上を目的とした基礎実験を行い、装置の改良を実施した。

### 【研究成果】

#### (1) 地表部流出現象の解析

地表部の流出現象の把握は、深部岩盤への降雨浸透量の算定などを行う上で重要である。このため、東濃地科学センターでは、東濃鉾山周辺流域において、降雨流出量や、地表付近の飽和度、気象データなどを測定している。また、飽和・不飽和浸透流の3次元解析によって、地表部の地下水流動解析を実施してきた。しかし、上記の方法では小さい領域の地下水流動を詳細に解析することは可能であるが、広域の地下水流動の把握には適していない。この問題を解決するために、統計手法の一つであるニューラル・ネットワークを用いて、広域の水収支を把握することを試みている。この手法は、多種多様なデータを同時に考慮することが可能であることが特徴である。

本研究では、河川流量や気象、土壌水分量等を観測している東濃鉾山周辺の流域を対象として、ニューラル・ネットワークを用いた地表部における地下水流動解析を実施した。

解析では、河川流量が、その観測時点以前の土壌水分状態から予測することが可能であるかについて検討した。その結果、土壌水分データを用いることによって、河川流量ハイドログラフを予測することが可能であることが示された（表1，図1）。

#### (2) Evaporation Logging Systemの改良

Evaporation Logging System は難透水性岩盤の水理学的特性を把握することを目的として開発している。本装置の原位置適用試験においては、蒸発量の場所的変化を捉えることが可能であることが示された。しかし、同時に下記の問題点が課題として挙げられた。

- a) 試錐孔壁のサクション圧の測定方法の改善
- b) パッカーの遮気性の向上
- c) 低蒸発量測定などの測定精度の検証

これらの問題点を解決するために下記に示す改良・検討を実施した。

- a) Evaporation Logging System に微小な感圧部を持つテンシオメータを試錐孔壁に設置するための小油圧ジャッキを組み込むために、テンシオメータ部の改良設計を実施し、改良を実施している。
- b) エアerpッカー部を通してベンチレーション用の空気パイプや電気ケーブル群を計測区間に接続している箇所で、空気漏れが生じていたため、空気漏れ防止のための機構を設計し、改良を実施している。
- c) 低蒸発性岩盤におけるEvaporation Logging System の適用性の検証と測定精度の向上を目的とし

た室内試験を実施した。室内試験は、図2に示すように試錐孔を模擬したアクリル製の筒に水を浸した試料を設置し、ベンチレーション風量を変化させて行った。

その結果、まず、ベンチレーションを行い岩盤からの水分の蒸発を定常状態にした後に、ベンチレーションを止めた状態で蒸発量測定を行うことによって、低蒸発性の岩盤での蒸発ポイントや量を把握することが可能であることが示された(図3)。

表1 ニューラルネットワークモデルによる解析ケース

Model Name	Inputs	Training Phase EI	Testing Phase EI
NN1	(t-Δt) 40D soil moisture	0.935	0.714
NN2	(t-4Δt) 40M soil moisture	0.565	0.612
NN3	(t-Δt) 20D soil moisture	0.943	0.701
NN4	(t-Δt, t-2Δt, t-3Δt, t-4Δt) rainfall values	0.907	0.64

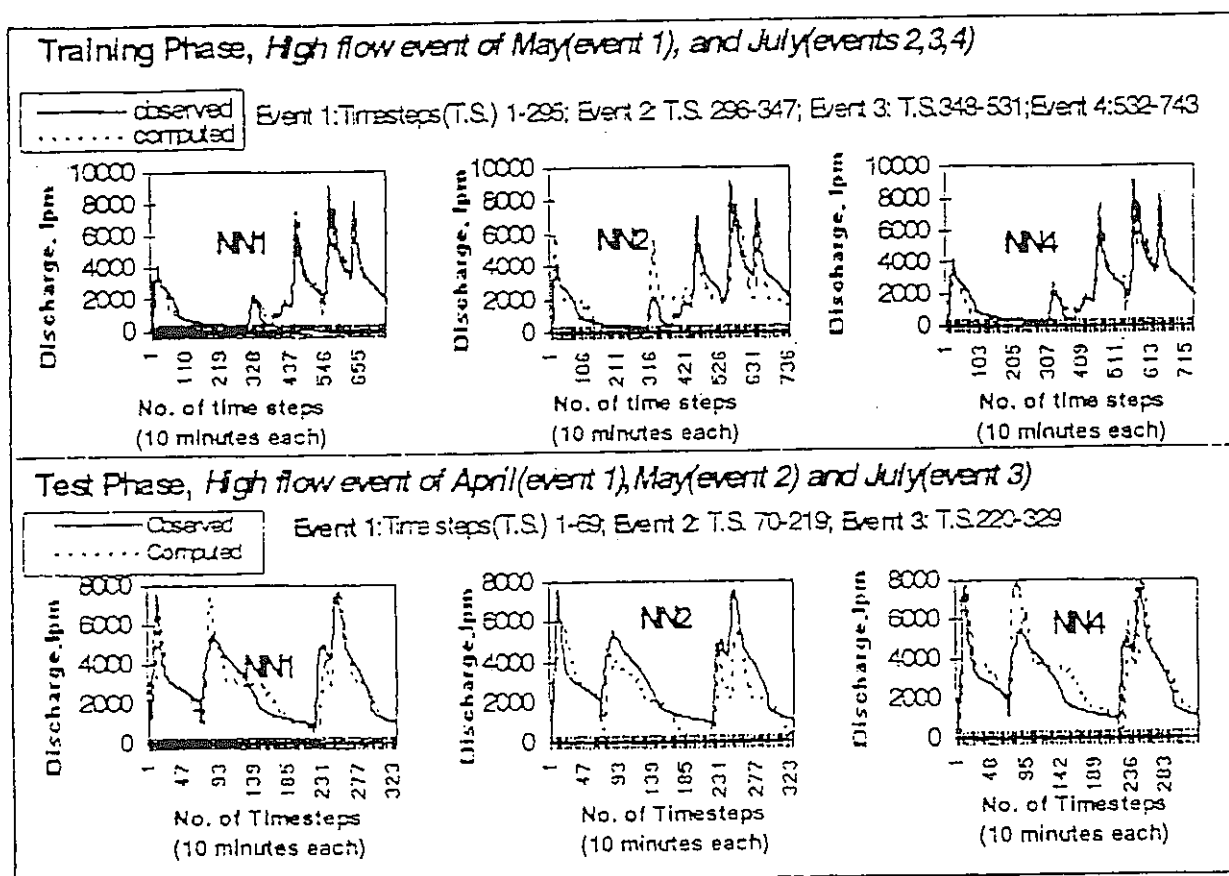


図1 実測値と解析値の比較 (河川流量)

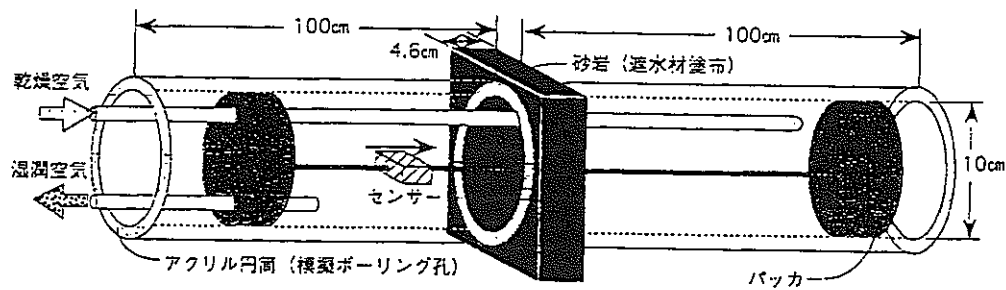


図2 室内試験概況

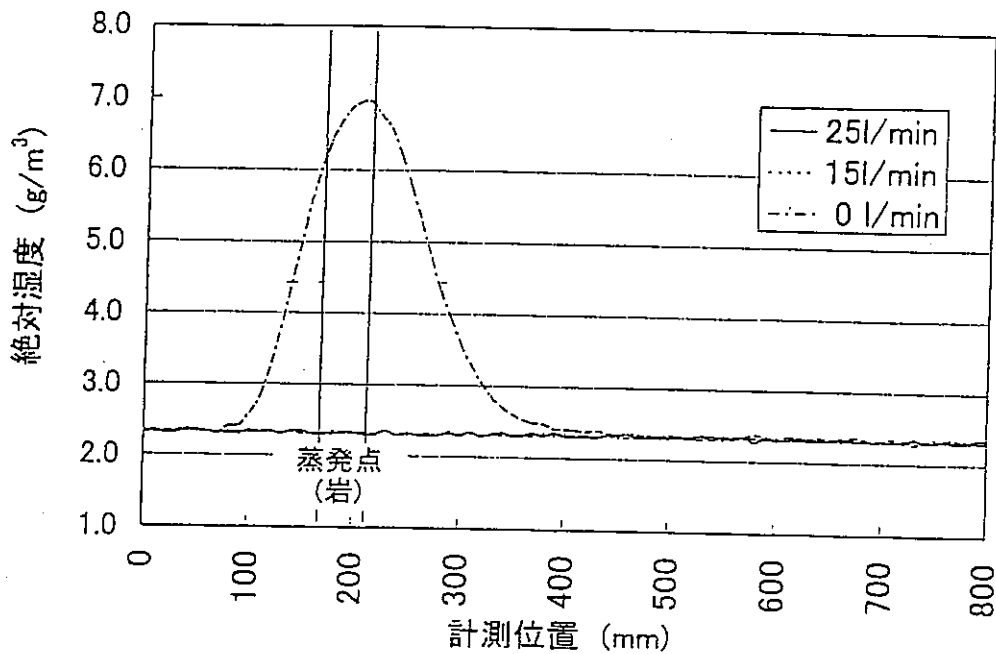


図3 風量が蒸発量 (=絶対湿度) に与える影響

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

- (1) 地表部流出現象解析の実施。
- (2) Evaporation Loggig System の改良の継続、および原位置試験の実施。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) 三枝博光, 渡辺邦夫, 今井久, 志田原史子: Evaporation Loggig System の開発、資源・素材学会 地下計測部門委員会 (1998)
- (2) M. R. GAUTAM, H. SAEGUSA, K. WATANABE: Artificial Neural Network: An Application to the runoff analysis in Tono area、第54回土木学会年次学術講演会 (1999) (投稿中)
- (3) 吉澤達夫, 今井久, 三枝博光, 渡辺邦夫: Evaporation Loggig System による低蒸発量測定法の検討 第54回土木学会年次学術講演会 (1999) (投稿中)

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	精密周波数制御連続電磁波調査法の研究		
研究協力課題	計算機を用いた連続電磁波のシミュレーション及び解析手法の研究		
研究者所属、氏名			
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* 博士課程 眞田 佳典**		
機 構 側	東濃地科学センター 調査技術研究グループ 藪内 聡, 茂田 直孝		
研究協力 実施場所	サイクル機構 東濃地科学センター 調査技術研究グループ		
通算研究期間 (予定)	平成8年8月 ~ 平成11年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年12月21日~ 平成11年2月10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		
<b>【研究目的】</b> 地下に正弦波的に変化するエネルギーを連続して長時間送り込む手法を採用することにより、調査深度の拡大や解析精度の向上ならびに調査機器の小型化を目指した地球物理学的調査の研究開発の一環として、室内および野外実験を効率よく進めるため電磁波の応答をシミュレーションできる計算機プログラムを開発する。			
<b>【研究内容（概要）】</b> 本研究は、精密に周波数を制御した連続波を用いることにより、従来の電磁波調査法と比較して、調査深度の拡大や解析精度の向上を目指すものであり、大きく分けて以下の3つの研究開発から構成される。 (1)ハードウェアの開発 精密に周波数を制御した連続波を用いた岩盤調査用レーダー（ハードウェア）の開発。 (2)解析アルゴリズムの開発 観測された連続波データから地下信号に起因する信号を抽出するアルゴリズムの開発。 (3)電磁波挙動シミュレーション技術の開発 岩盤中を伝わる電磁波の挙動を把握する（可視化する）ための計算機プログラムの開発。 本研究の協力課題は、主に(2)および(3)の研究開発に関するものである。			
<b>【使用主要施設】</b> 連続波レーダー装置、東濃鉱山、正馬様洞鉱業用地、 ワークステーション COMPAQ Deskpro 5150			



## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成8年度はレーダー調査に使用する電磁波のシミュレーションプログラムの開発を実施した。平成9年度は、連続波を取り扱えるようにプログラムの改良を実施した。また、解析アルゴリズムの開発の一環として、連続ウェーブレット変換による時間周波数解析の有効性を検討した。

## 【研究成果】

### (1)概要

本年度は、これまでに開発したFDTD法（時間領域有限差分法）によるシミュレーションプログラムを導入した、トモグラフィデータのインバージョン解析を行った。

ハードウェアの開発の一環として現有の連続波測定技術を把握するために実施した、連続波レーダートモグラフィ調査のデータを解析した。通常のインバージョン解析では、電磁波の速度分布ならびに振幅減衰比の分布が得られるが、FDTD法を導入した解析により導電率の分布を新たに求めることが可能である。

### (2)特徴

今回採用したインバージョン解析手法は、地震波の解析で用いられているフルウェーブインバージョンの考えに基づく勾配法を用いたアルゴリズムであり、従来の積分方程式や連立方程式を解くというような大規模な行列解法を必要としない。従って、計算時間を大幅に短縮することができる。

また、順問題のシミュレータ（FDTD法によるシミュレーション）があれば、これを用いることによって、反復解法時のモデルの修正量を直接求めることができる。

### (3)解析手法

具体的なインバージョン解析のアルゴリズムを図-1に示す。まず、導電率分布の初期モデルを設定する。今回は導電率を0.01S/mとして、これを一様に与えたものを初期モデルとした。そして、計算のために解析領域を格子に分割し、送信から受信までの時間を分割したすべての時刻での電界(EZ1)をすべての格子点について求める。同時に、初期モデルに対して、1つの送信源から得られる受信データ(EZT1)をFDTD法を用いたシミュレーションによって求める。次に、観測データと導電率分布モデルに対してシミュレーションにより求めた受信データとの残差を求める。波形データとなるこの残差を信号源として受信器のあった位置に設置し、時間逆伝播させFDTD法によりすべての時刻での電界(EZ2)を求める。最後にEZ1とEZ2の相互相関関数を求めて、すべての格子点での導電率を修正する。以後、2番目以降の送信源についても同様の計算により導電率の修正を行い、これを送信源の数だけ繰り返す。これを1回の反復計算として、これを導電率の修正が収束するとみなすまで繰り返す。

### (4)解析結果

観測データは、サイクル機構所有の正馬様洞鉱業用地内に掘削されたAN-1号孔（受信源側）とAN-3号孔（送信源側）を利用して取得されたトモグラフィデータである。送信源および受信源は深度方向に1m間隔で、それぞれの試錐孔に設置した。なお、両試錐孔の間隔は約36mである。深度60m～80mまでの観測データを用いて、上に述べたFDTD法を導入したインバージョン解析を実施した。

図2(a)に観測データの一例を示す。(b)に導電率分布の初期モデルに対する受信データのシミュレーションを示す。(c)は反復計算5回のシミュレーションによる波形データである。インバージョン解析による導電率分布モデルの修正の繰り返しにより、シミュレーションによる波形データの振幅値が観測データのそれに近づいていることがわかる。図3(a),(b)に求められた導電率分布モデルを示す。インバージョン解析によって、初期モデルが真の導電率分布に近づくように修正されてゆくことがわかる。

以上の結果より、FDTD法を導入したインバージョン解析により、連続波レーダー調査のデータ(トモグラフィデータ)から導電率分布を求められることがわかった。

#### [参考文献]

真田佳典, 渡辺俊樹, 長谷川健, 藪内聡, 芦田譲(1997): 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回学術講演論文集, pp353-356

Tarantola, A(1986): A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data, Geophysics, vol51, pp1893-1903

Tsili Wang Micheal Oristaglio, Alan Tripp and Gerald Hohmann(1994): Inversion of diffusive transient electromagnetic data by conjugate-gradient method, Radio Science, vol 26-4, pp1143-1556

#### 【今後の予定(翌年度以降の概要)】

本研究協力課題に対する研究は今年度で終了する。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

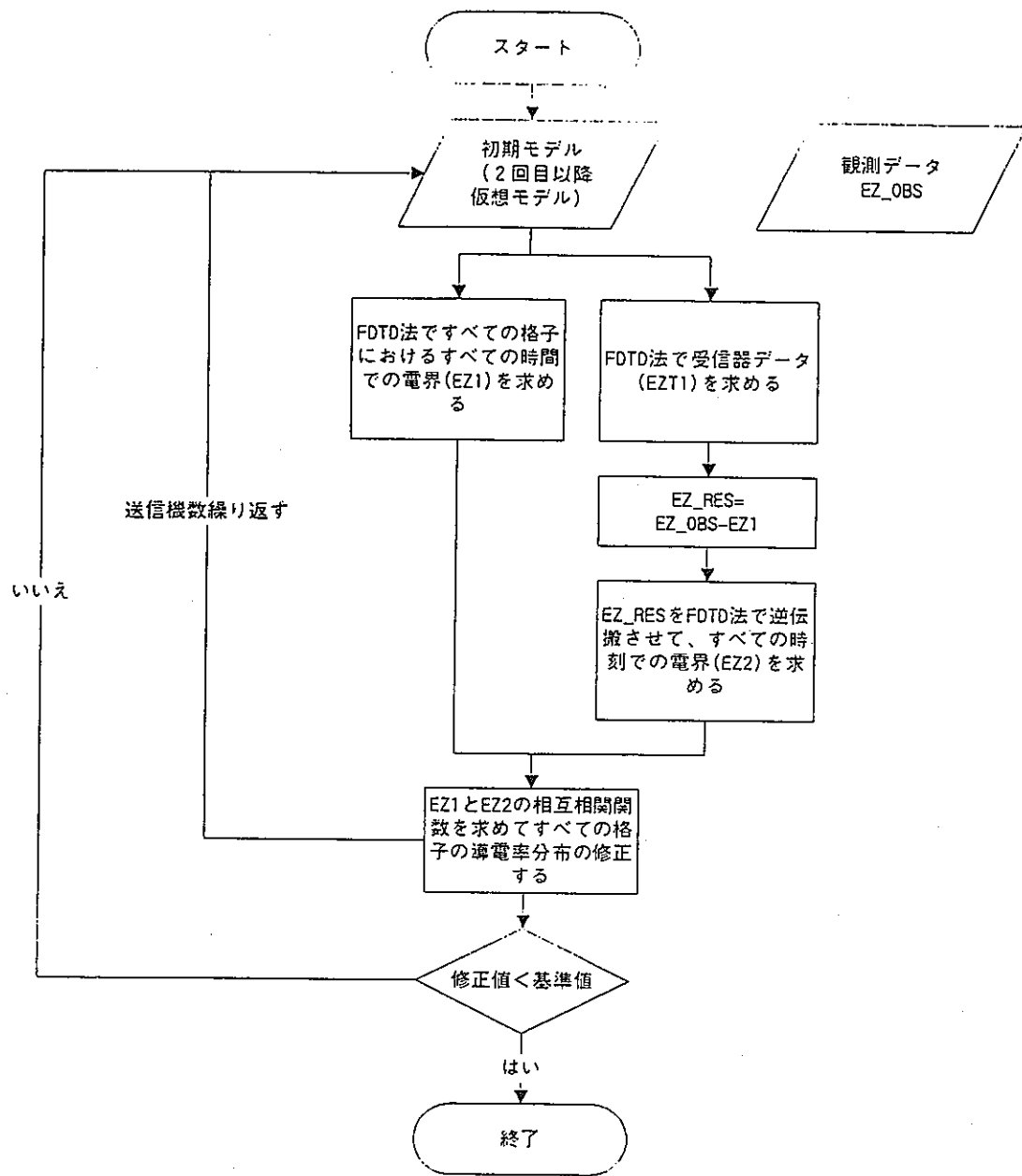
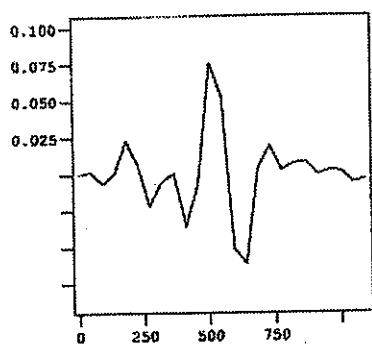
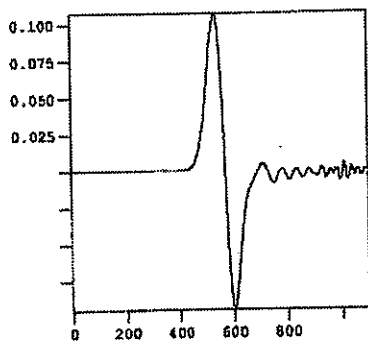


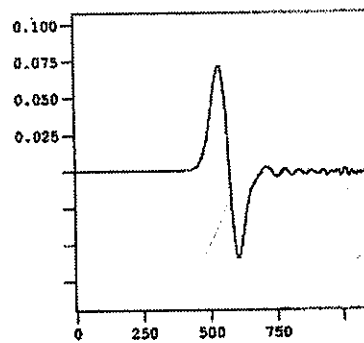
図-1 インバージョン解析のフローチャート



(a)観測データ

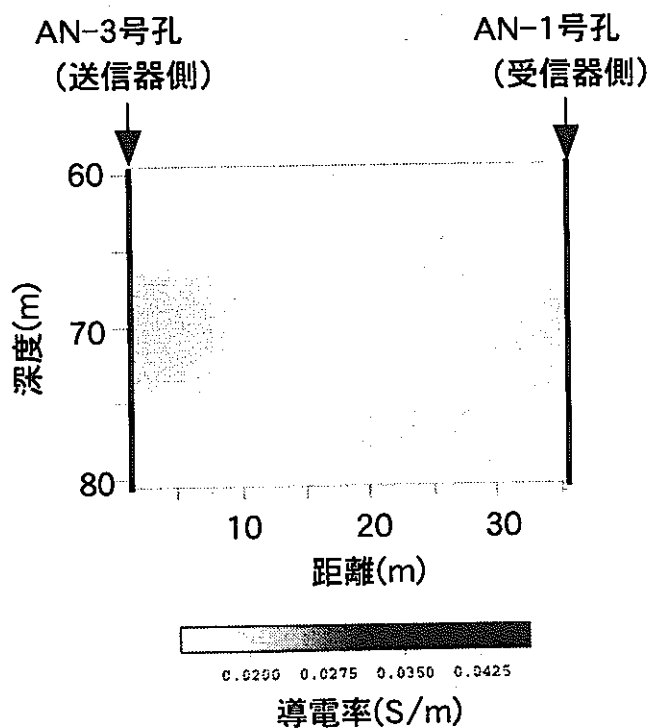


(b)初期モデルに対する  
シミュレーションデータ

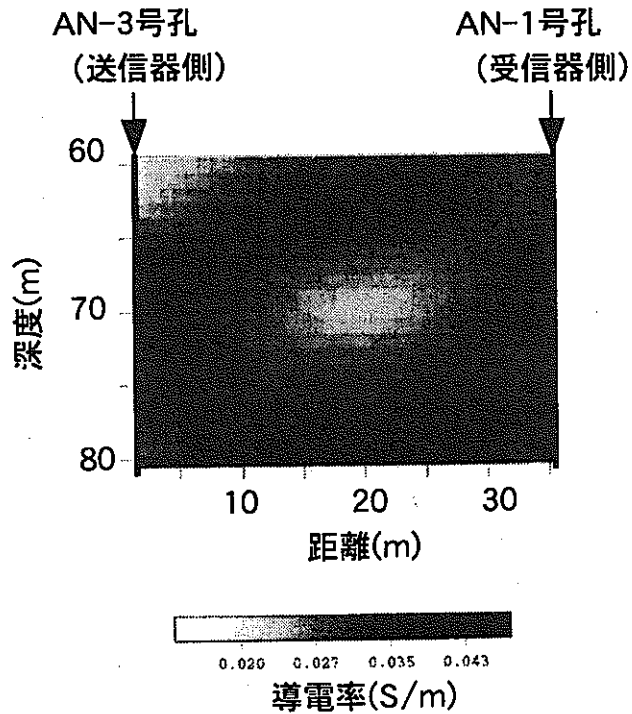


(c)導電率修正後のモデル  
に対するシミュレーション  
データ

図-2 波形データの一例  
(観測データとシミュレーションによるデータ)



(a)反復計算 1 回



(b)反復計算 5 回

図-3 インバージョン解析結果

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	水理試験と地球物理学的調査手法を組み合わせた地下水の調査・解析手法の研究		
研究協力課題	クロスホール試験の解析法の開発に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	西垣 誠 (岡山大学 環境理工学部) 竹内 将暢 (岡山大学大学院 修士課程) **		
機構側	東濃地科学センター 地層科学研究グループ 竹内 竜史 中野 勝志		
	[* 客員研究員 ** 研究生]		
研究協力実施場所	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科		
通算研究期間 (予定)	平成8年9月 ~ 平成13年3月	当該年度 研究期間	平成10年10月8日 ~ 平成11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 type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></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次的に把握するための調査・解析手法の体系化を図る。</p>			
<p><b>【研究内容 (概要)】</b></p> <p>研究内容は、以下の3項目に区分される。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. クロスホール水理試験装置の開発と試験手法に関する研究                      現有の試験装置の改良や新たな試験装置の開発、種々のクロスホール水理試験の適応限界を把握するための検討を行う。</li> <li>2. クロスホール水理試験データの解析手法に関する研究                      地球物理学的調査手法で用いられている解析手法の原理をクロスホール水理試験データの解析に導入し、さらに短時間で解析できるようにするための解析コードの開発を行う。</li> <li>3. クロスホール水理試験と地球物理学的調査手法を組み合わせた調査・解析手法の研究                      岩盤中の地下水の移行経路や水理特性を把握するためのクロスホール水理試験と地球物理学的調査手法を組み合わせた調査・解析手法の体系化を図る。</li> </ol>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>動燃事業団：東濃地科学センターの施設 (解析設備など)、試験装置 (試錐孔間水理試験装置など)                      釜石鉾山原位置試験場</p> <p>岡山大学：岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科の施設 (解析設備など)</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

1. 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および数値逆解析（トモグラフィ解析）コードを開発した。

### 【研究成果】

1. クロスホール水理試験データの解析手法に関する研究

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

本研究では、L T G法（Laplace Transformation Galerkin Method）を用いたトモグラフィ解析コードの開発を進めており、平成8年度にはL T G法を用いた2次元浸透流解析コード、平成9年度にはL T G法を用いた3次元浸透流解析コードを開発した。

本年度は、昨年度開発した3次元浸透流解析コードを基に、演算時間を短縮するために、非対象行列に対する解法の一つであるB C G法（Incomplete LU decomposition Bi-Conjugate Gradient Method）を用いた解析コードを開発した。これにより、従来の時間差分法に比べ演算時間を短縮できるようになった（図-1、表-1参照）。

#### (2) トモグラフィ解析手法の開発（L T G法を用いた3次元浸透流逆解析コードの開発）

本研究では、水理試験データを用いて3次元的不均質性、異方性を考慮した岩盤の水理パラメータ（透水係数、比貯留係数）の分布を把握するためのトモグラフィ解析コードを開発する。

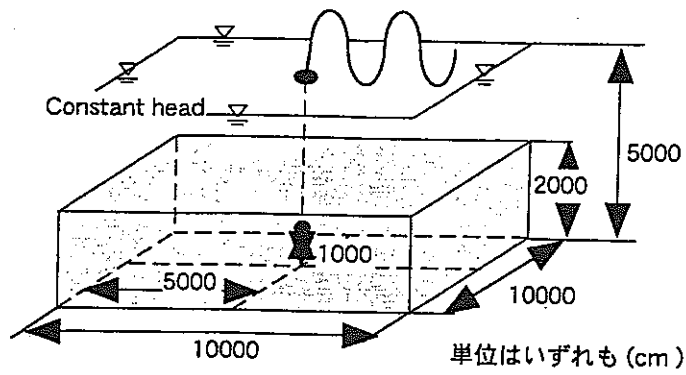
本件で開発するトモグラフィ解析コードは、今年度改良を実施している3次元浸透流解析コードを用いて、岩盤の水理パラメータの最適化を行うものである。パラメータの最適化をラプラス空間中で行うことにより、演算時間を大幅に短縮できる（図-2参照）。

本年度は、ラプラス空間中での非線形最適化手法に関する検討を終了し、最適化アルゴリズムとして、準ニュートン法を用いたトモグラフィ解析コードを開発した。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

1. 平成10年度に開発したトモグラフィ解析コードを数値解析結果等を用いて検証し、その妥当性を評価する。
2. クロスホール水理試験データを解析するためのトモグラフィ解析コードについて、逆解析アルゴリズムに関する検討を行い、トモグラフィ解析コードの改良・高度化を図る。
3. 現場水理試験結果と水理試験データを用いたトモグラフィ解析結果、および、地球物理学的調査手法による結果を組み合わせた調査・解析手法に関する検討を行う。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】



透水係数  $1.0 \times 10^{-6} (\text{m/s})$                       総節点数 1947  
 比貯留係数  $1.0 \times 10^{-3} (\text{m}^{-1})$                       総要素数 1560

図-1 解析モデル

表-1 LTG法と時間差分法の解析時間の比較

$t_{\max}$ (sec)	解析時間(sec)	
	LTG法	時間差分法
1	161	30
10	162	70
100	161	133
1,000	161	254
10,000	161	1,386
100,000	162	15,744

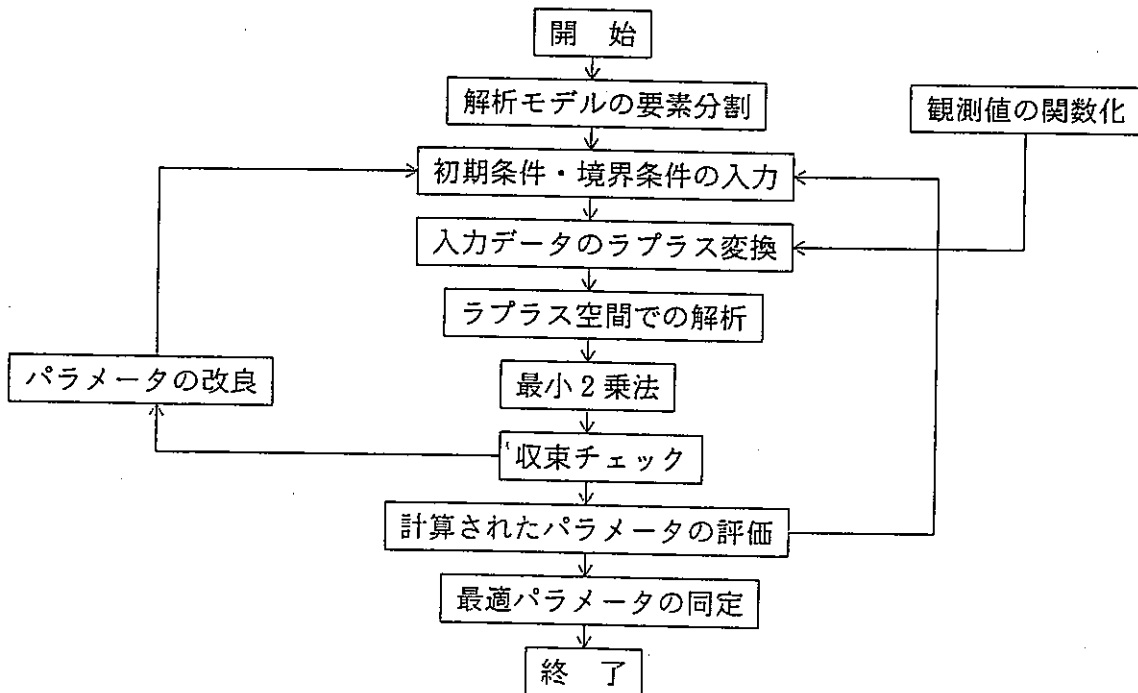


図-2 数値逆解析フローチャート

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	岩石及び鉱物と地下水との反応に関する研究										
研究協力課題	緑泥石化に関する実験的研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td> <td>兵庫教育大学 地学教室 助教授 澁江靖弘*</td> <td colspan="2">[*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>機構側</td> <td>人形・環境保全技術開発部 環境研究グループ 時澤孝之, 鶴留浩二</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>			大学側	兵庫教育大学 地学教室 助教授 澁江靖弘*	[*客員研究員 **研究生]		機構側	人形・環境保全技術開発部 環境研究グループ 時澤孝之, 鶴留浩二		
大学側	兵庫教育大学 地学教室 助教授 澁江靖弘*	[*客員研究員 **研究生]									
機構側	人形・環境保全技術開発部 環境研究グループ 時澤孝之, 鶴留浩二										
研究協力実施場所	兵庫教育大学 地学教室 人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 環境研究グループ										
通算研究期間(予定)	平成9年4月 ~ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成10年4月1日~ 平成11年3月31日								
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究										
<p><b>【研究目的】</b>            地熱地帯に適用されている緑泥石地質温度計について、その妥当性を実験的研究を通して検証する。実験によって玄武岩と熱水との反応で生じる緑泥石化あるいは粘土鉱物化について検証する。さらに、これらの化学組成と熱水の温度との関係を検証することを目的とする。</p>											
<p><b>【研究内容(概要)】</b>            緑泥石は地熱地帯で産する代表的な変質鉱物の一つであり、その化学組成は大きな変化を示す。緑泥石の化学組成と熱水の温度との関係を経験的に表した地質温度計(例えば, Cathelineau and Neiva, 1985)がいくつかの地熱地帯に適用されてきたが、その有効性については問題とされる点がある(Essene and Peacor, 1994)。これまで緑泥石地質温度計について地熱水の温度と化学組成および緑泥石の化学組成の観点から検討されてきたが、その内容は十分なものではなかった。            そこで、玄武岩と熱水を高温高圧状態で反応させて、生成する緑泥石などの粘土鉱物の化学組成や熱水変質について検討する。また、緑泥石化や粘土鉱物化がどのような反応過程で生じるかを、微細な領域での化学分析に基づいて検討する。            今年度は、熱水温度のパラメータとして200°C, 250°C, 300°C, 350°C, さらに地層科学への応用の可能性も考慮に入れた100°C, 150°Cでの実験を行った。</p>											
<p><b>【使用主要施設】</b>            大学側：原子吸光光度計, X線回折装置            機構側：高温高圧試験装置(オートクレーブ), X線マイクロアナライザ(E PMA), 反射顕微鏡, 偏光顕微鏡</p>											



【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度の研究成果の概要は次の通りである。

- (1) 400℃, 300kgf/cm<sup>2</sup>の実験でスメクタイトが生成していることがわかった。しかしながら、緑泥石あるいは緑泥石/スメクタイト混合層の生成は確認できなかった。
- (2) 350℃, 160kgf/cm<sup>2</sup>（飽和蒸気圧）の10日間の実験でスメクタイトが生成していることがわかった。ただし、21日間のおよび32日間の実験では、スメクタイト以外の粘土鉱物の生成があり、緑泥石の可能性が考えられた。

【研究成果】

以下に平成10年度の研究成果の概要をまとめる。

1. 実験方法

- (1) 玄武岩試料の粉末状にしたものと角柱（5m/m角×高さ20m/m）を金チューブに入れて、さらに海水を加えた後でTig溶接により金チューブを封入した（溶接は、フラットペンチにより金チューブの溶接部を成形したものをバイスに固定した後に1.0mmの溶接棒を用いて電流値を20～25Aに設定して行った。この時の岩石試料の重さ（粉末と角柱の重さの和）と海水の重さの比は100℃, 1.02kgf/cm<sup>2</sup>の条件で約0.2, 150℃, 4.77kgf/cm<sup>2</sup>の条件で約0.2, 200℃, 15kgf/cm<sup>2</sup>の条件で0.25, 250℃, 38kgf/cm<sup>2</sup>の条件で平均0.25, 300℃, 83kgf/cm<sup>2</sup>の条件で平均0.30, 350℃, 160kgf/cm<sup>2</sup>の条件で平均0.62である（ただし、粉末と海水の比は常に10である）。
- (2) 高温高圧試験装置（ただし、100℃及び150℃はユニシールを使用）を用いて表-1に示す条件で、玄武岩と熱水を反応させて実験を行った。
- (3) 実験終了後、固相と液相をミリポアフィルターを用いて分離した後に原子吸光光度計によって液相の組成の測定を行い、粉末試料については、乾燥させた後にX線回折による鉱物の同定を行った。また、金チューブから取り出した角柱は変質の状況を確認するために研磨薄片を作製した。

表-1 実験条件

温度（℃）	圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	試験期間（日）
100	1.02（計算値）	367
150	4.77（計算値）	367
200	15	20, 31, 62
250	38	20, 30, 66
300	83	20, 30, 62
350	160	21 <sup>*1</sup> , 32, 60

注) <sup>\*1</sup>試験の繰り返し数n=2

## 2. 実験結果

- (1) 固相粉末のX線回折分析の結果、いずれの実験においてもエチレングリコール処理後のピークの移動からスメクタイトが生成していることが確認できた(添付資料-1の図1参照)。また昨年度実施した350℃、160kgf/cm<sup>2</sup>で32日間の条件について再実験を行った結果、緑泥石あるいは緑泥石/スメクタイト混合層の生成は確認できなかった。
- (2) 角柱の薄片の顕微鏡写真を添付資料-2(写真1~4)に示す。顕微鏡写真から熱水変質が進行したために、玄武岩の組織が乱されていることが、また、微細な粘土化についても確認される。
- (3) 反応させた海水の組成と実験後の水溶液の組成を比較すると、陽イオンの重量比に変化が認められる。その結果を表-2.1から表-2.5に示す。また、試験後の溶液の分析結果について添付資料-3の表1,2, その図を添付資料-4の図1~図3に示す。

表-2.1 実験前後の陽イオンの重量比

	実験前* <sup>2</sup>	実験後* <sup>3</sup>	実験前* <sup>2</sup>	実験後* <sup>4</sup>
①(Na 濃度) / (K 濃度)	43.4	66.8	43.4	37.2
②(Na 濃度) / (Mg 濃度) <sup>0.5</sup>	3.76	2.45	3.76	3.98
③(Na 濃度) / (Ca 濃度) <sup>0.5</sup>	6.90	1.88	6.90	2.07

注) \*<sup>2</sup> 平成9年度に採取した海水組成

\*<sup>3</sup> (温度:100℃, 圧力:1.02kgf/cm<sup>2</sup>) \*<sup>4</sup> (温度:150℃, 圧力:4.77kgf/cm<sup>2</sup>)

表-2.2 実験前後の陽イオンの重量比 (温度:200℃, 圧力:15kgf/cm<sup>2</sup>)

	実験前	20日後	31日後	62日後
①(Na 濃度) / (K 濃度)	23.7	27.9	24.9	14.7
②(Na 濃度) / (Mg 濃度) <sup>0.5</sup>	13.6	6.45	7.25	5.32
③(Na 濃度) / (Ca 濃度) <sup>0.5</sup>	5.31	15.1	4.22	2.61

表-2.3 実験前後の陽イオンの重量比 (温度:250℃, 圧力:38kgf/cm<sup>2</sup>)

	実験前	20日後	30日後	66日後
①(Na 濃度) / (K 濃度)	23.7	11.7	10.7	9.91
②(Na 濃度) / (Mg 濃度) <sup>0.5</sup>	13.6	16.4	8.32	11.5
③(Na 濃度) / (Ca 濃度) <sup>0.5</sup>	5.31	3.64	2.45	2.49

表-2.4 実験前後の陽イオンの重量比

(温度: 300 °C, 圧力: 83 kgf/cm<sup>2</sup>)

	実験前	20日後	30日後	62日後
①(Na 濃度) / (K 濃度)	23.7	4.74	9.44	8.87
②(Na 濃度) / (Mg 濃度) <sup>0.5</sup>	13.6	16.1	12.6	14.9
③(Na 濃度) / (Ca 濃度) <sup>0.5</sup>	5.31	3.31	2.55	3.19

表-2.5 実験前後の陽イオンの重量比

(温度: 350 °C, 圧力: 160 kgf/cm<sup>2</sup>)

	実験前	21日後	32日後	60日後
①(Na 濃度) / (K 濃度)	23.7	9.15	6.32	6.37
②(Na 濃度) / (Mg 濃度) <sup>0.5</sup>	13.6	14.5	15.6	18.0
③(Na 濃度) / (Ca 濃度) <sup>0.5</sup>	5.31	2.98	2.59	3.27

## 3. 技術的提案

- (1) 直径約 20 mm の金チューブの中に溶液の入った状態での T i g 溶接による封入を行った例がほとんどない。ただし、従来の研究で用いた金チューブは直径 10 mm 以下のものが多く、主に圧着法(圧着ペンチ)により封入を行っていた。
- (2) 昨年度より T i g 溶接による封入を行ったが、適正な電流値や溶接棒の太さの選定等により、今年度は溶接に費やす時間が大幅に短縮され、溶接の成功率も昨年の 20% から約 80% 程度と大幅に向上した。また、溶液の回収率も平均で 78% となり、分析の精度が向上した。
- (3) 大型の金チューブでの実験が可能となり、実験の再現性が今後期待できる。

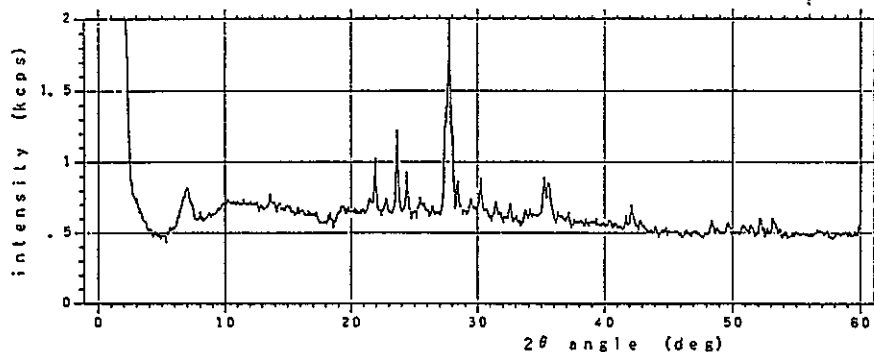
## 【今後の予定】

本研究は平成 10 年度をもって終了した。

## 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

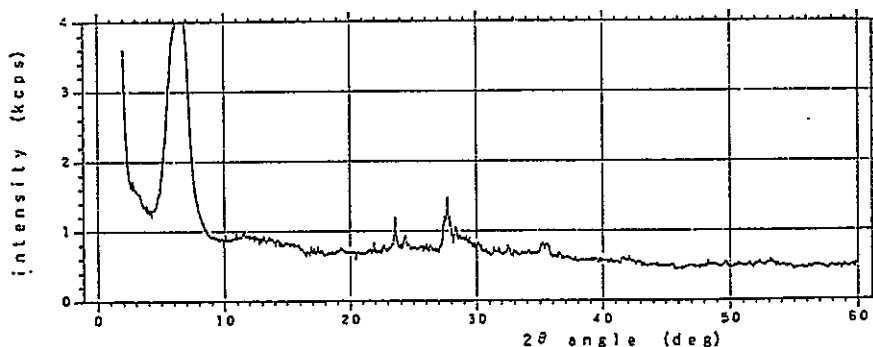
< DOUNEN-10-BULK > 不定方位

X-ray tube : target Cu 30 kV 20 mA  
 slit : (SS) 1 deg (DS) 1 deg (RS) .3 mm  
 scan mode : CONTI  
 preset time : 2 (s)  
 step width : 08756 (deg/step)  
 scan speed : 2 (deg/min)



< DOUNEN-10-ORIENT > 定方位

X-ray tube : target Cu 30 kV 20 mA  
 slit : (SS) 1 deg (DS) 1 deg (RS) .3 mm  
 scan mode : CONTI  
 preset time : 1 (s)  
 step width : .05419 (deg/step)  
 scan speed : 2 (deg/min)



< DOUNEN-10-EG > エチレングリコール処理後

X-ray tube : target Cu 30 kV 20 mA  
 slit : (SS) 1 deg (DS) 1 deg (RS) .3 mm  
 scan mode : CONTI  
 preset time : 1 (s)  
 step width : 05424 (deg/step)  
 scan speed : 2 (deg/min)

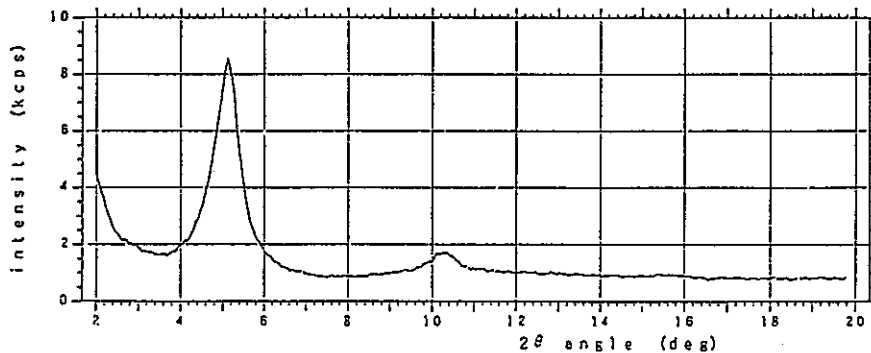
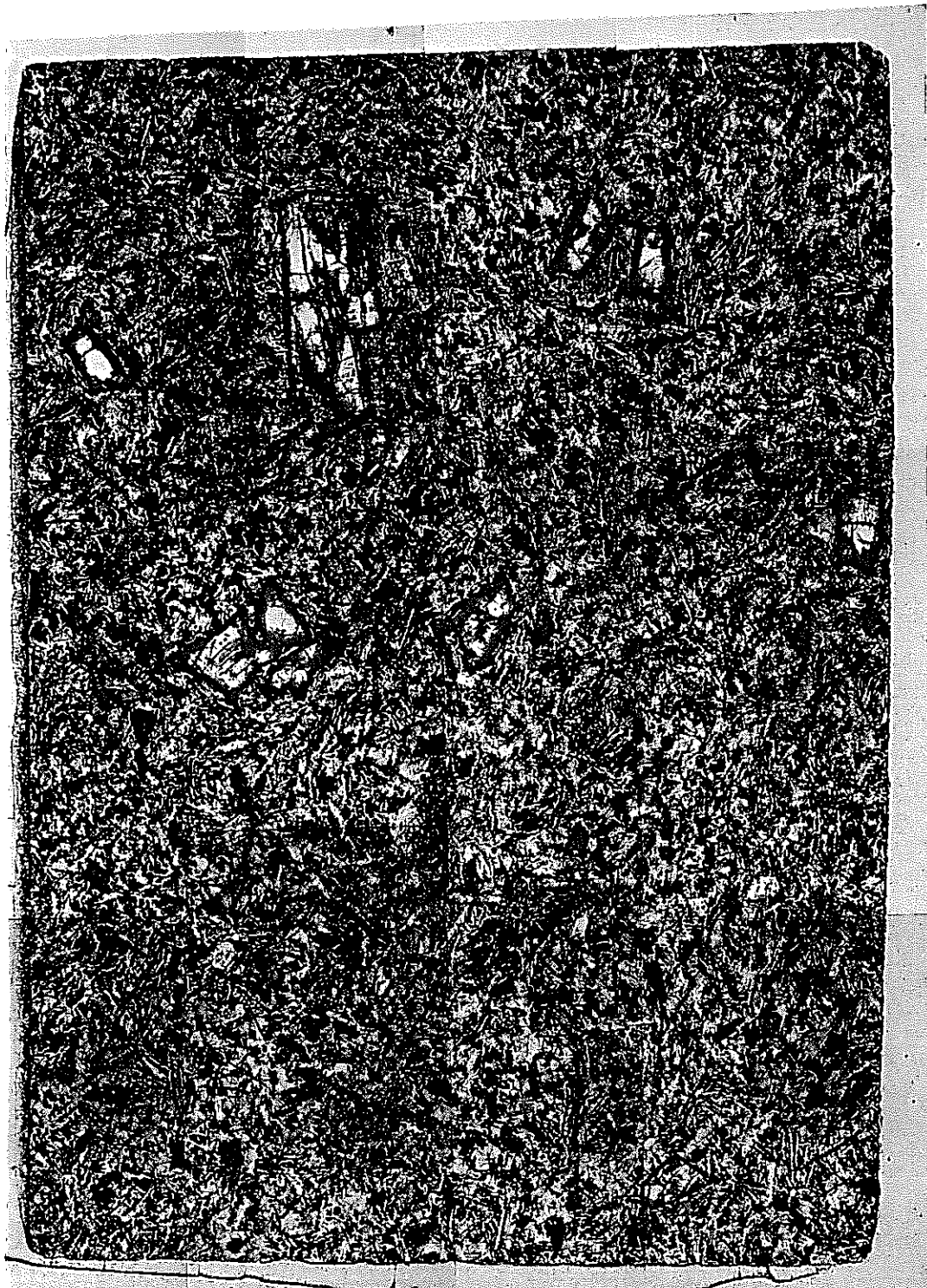


図1 X線回折結果 (200°C, 15 kg f/cm<sup>2</sup>; 62日間)



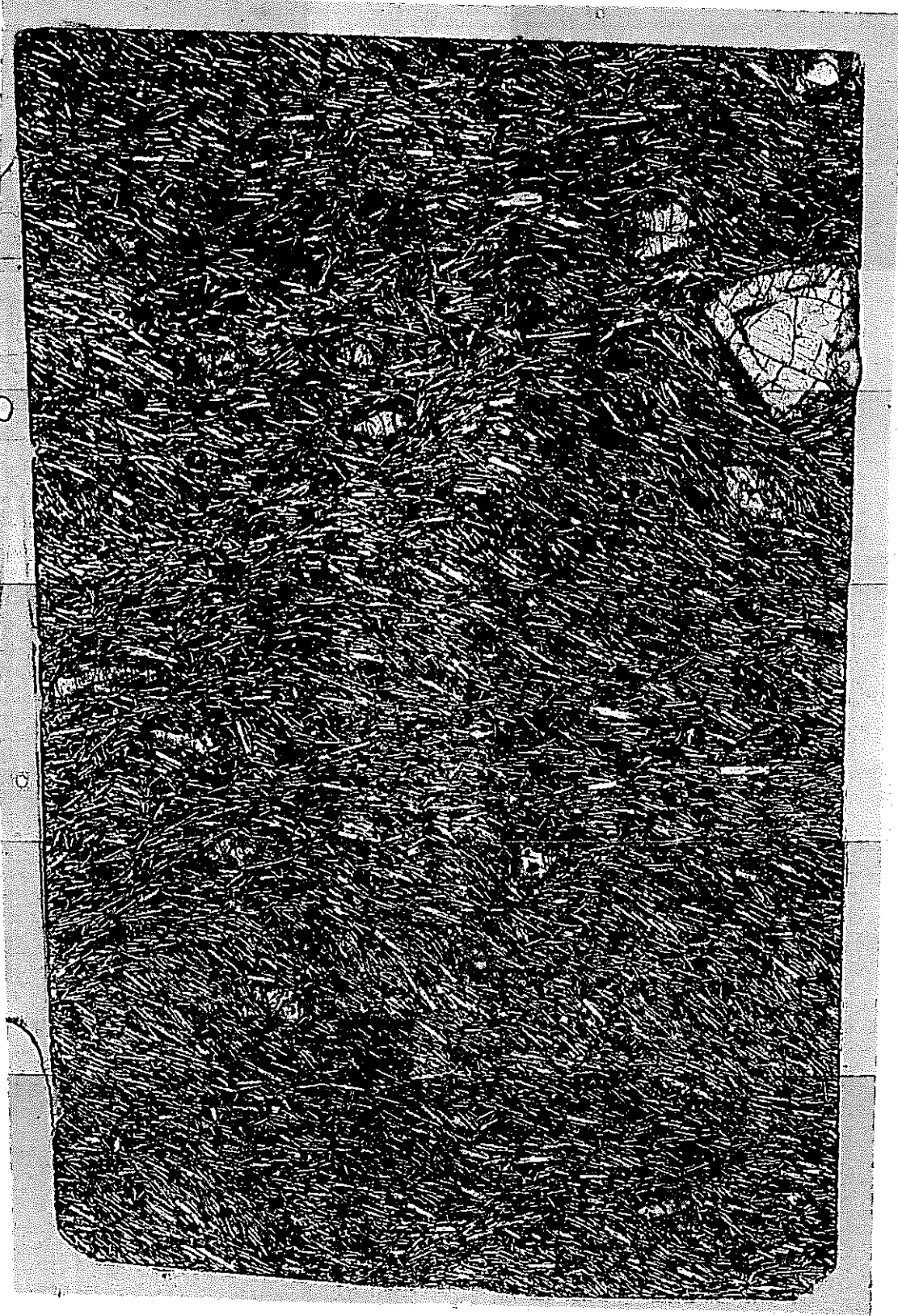
1cm

写真-1 試験後の角柱の顕微鏡写真 (350°C, 160 kg f / cm<sup>2</sup>; 32日間)



1cm

写真-2 試験後の角柱の顕微鏡写真 (300°C, 8.8 kg f/cm<sup>2</sup>; 20日間)



1cm

写真-3 試験後の角柱の顕微鏡写真 (250℃, 38kgf/cm<sup>2</sup>; 30日間)



写真-4 試験後の角柱の顕微鏡写真(250°C, 38 kg f/cm<sup>2</sup>; 20日間)



表1 泥液の分析結果

温度 (°C)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	試験期間 (日)	サンプル量	Na <sup>+</sup> (wt%)	K <sup>+</sup> (wt%)	Mg <sup>++</sup> (wt%)	Ca <sup>++</sup> (wt%)	Fe <sup>++</sup> (wt%)	Mn <sup>++</sup> (wt%)
100	1.02 (計算値)	357		0.8352	0.0125	0.1165	0.1977	0.0008	0.0015
150	4.77 (計算値)	367		1.0122	0.0272	0.0648	0.2387	0.0070	0.0134
200	15	20	15	1.23160	0.04406	0.03650	0.00667	0.00256	0.00099
200	15	31	11	1.19637	0.04789	0.02726	0.02042	0.00212	0.00056
200	15	62	10	0.78210	0.05309	0.02158	0.08952	0.00131	0.00108
250	38	20	4	1.4194	0.12181	0.00751	0.15197	0.00013	0.00044
250	38	30	5	0.7292	0.06814	0.007687	0.088428	0.003448	0.001624
250	38	66	6	0.82787	0.08446	0.005257	0.11342	0.001993	0.000623
300	83	20	3	1.2741	0.26888	0.00624	0.14812	0.00154	0.00144
300	83	30	7	0.8086	0.08570	0.004087	0.100897	0.003294	0.001671
300	83	62	9	1.17441	0.13236	0.00614	0.13522	0.00537	0.00223
350	160	21	13	0.83048	0.10059	0.00412	0.10885	0.00625	0.00282
350	160	21	14	1.00592	0.11133	0.00486	0.10346	0.00586	0.00218
350	160	32	1	0.7911	0.12517	0.002575	0.093511	0.004207	0.001140
350	160	60	2	1.15824	0.18187	0.004133	0.12548	0.006279	0.002280
海水				1.12917	0.04692	0.00617	0.04479	0.00041	0.00000
海水				1.0888	0.04589	0.00639	0.04196	0.00013	0.00000

表2 泥液の分析結果 (補正後: 温度+溶液の回収率)

温度 (°C)	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	試験期間 (日)	サンプル量	回収率 (%)	Na <sup>+</sup> (wt%)	K <sup>+</sup> (wt%)	Mg <sup>++</sup> (wt%)	Ca <sup>++</sup> (wt%)	Fe <sup>++</sup> (wt%)	Mn <sup>++</sup> (wt%)
200	15	20	15	56.2	2.19146	0.0784	0.06496	0.01167	0.00456	0.00176
200	15	31	11	75.9	1.57625	0.06321	0.03592	0.10596	0.00279	0.00126
200	15	62	10	78.6	0.98504	0.06754	0.02746	0.11427	0.00167	0.00157
250	38	20	4	78.7	1.80356	0.15478	0.00954	0.1931	0.00017	0.00056
250	38	30	5	86.9	0.83913	0.07641	0.00665	0.10176	0.00397	0.00157
250	38	66	6	79.5	1.0533	0.10624	0.00661	0.14267	0.00251	0.00076
300	83	20	3	83.9	1.51859	0.32048	0.00744	0.17654	0.00184	0.00172
300	83	30	7	73.4	1.10163	0.11676	0.00557	0.13746	0.00449	0.00223
300	83	62	9	56.4	2.08228	0.23468	0.01089	0.23973	0.00952	0.00395
350	160	21	13	67.1	1.06829	0.11549	0.00473	0.124971	0.00718	0.00324
350	160	21	14	80.7	1.24649	0.13756	0.00802	0.1262	0.00726	0.0027
350	160	32	1	100	0.78952	0.12492	0.00257	0.09332	0.0042	0.00114
350	160	60	2	90.2	1.28408	0.20163	0.00458	0.13911	0.00696	0.00253

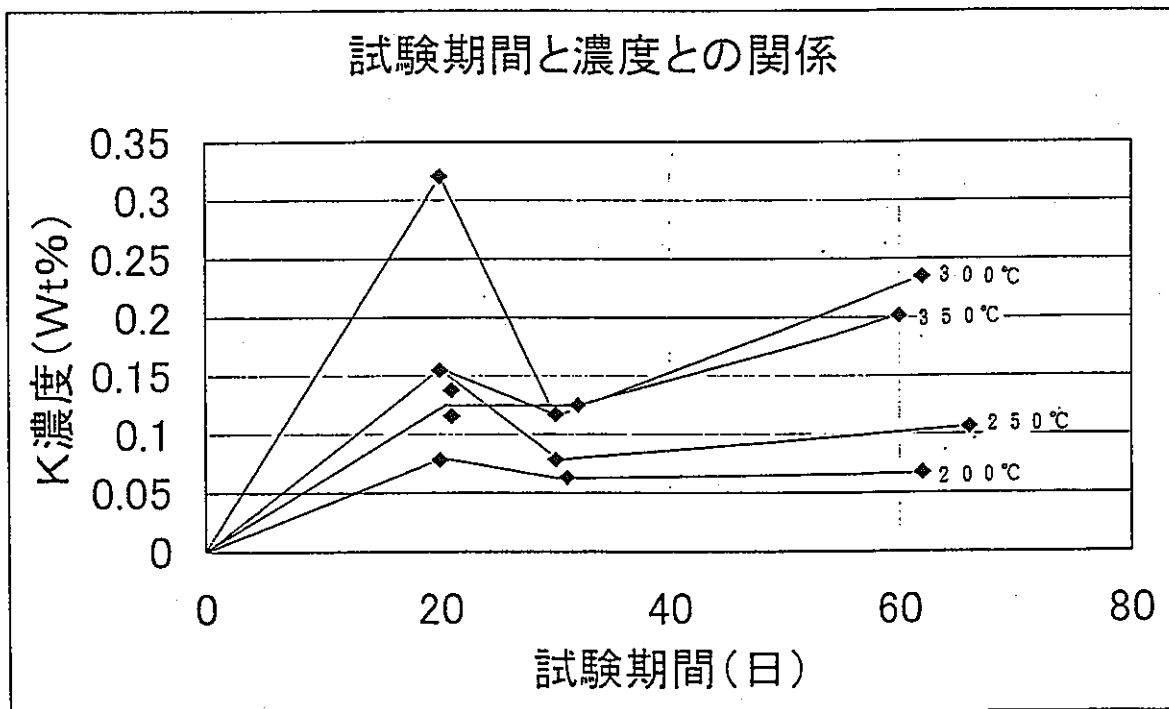
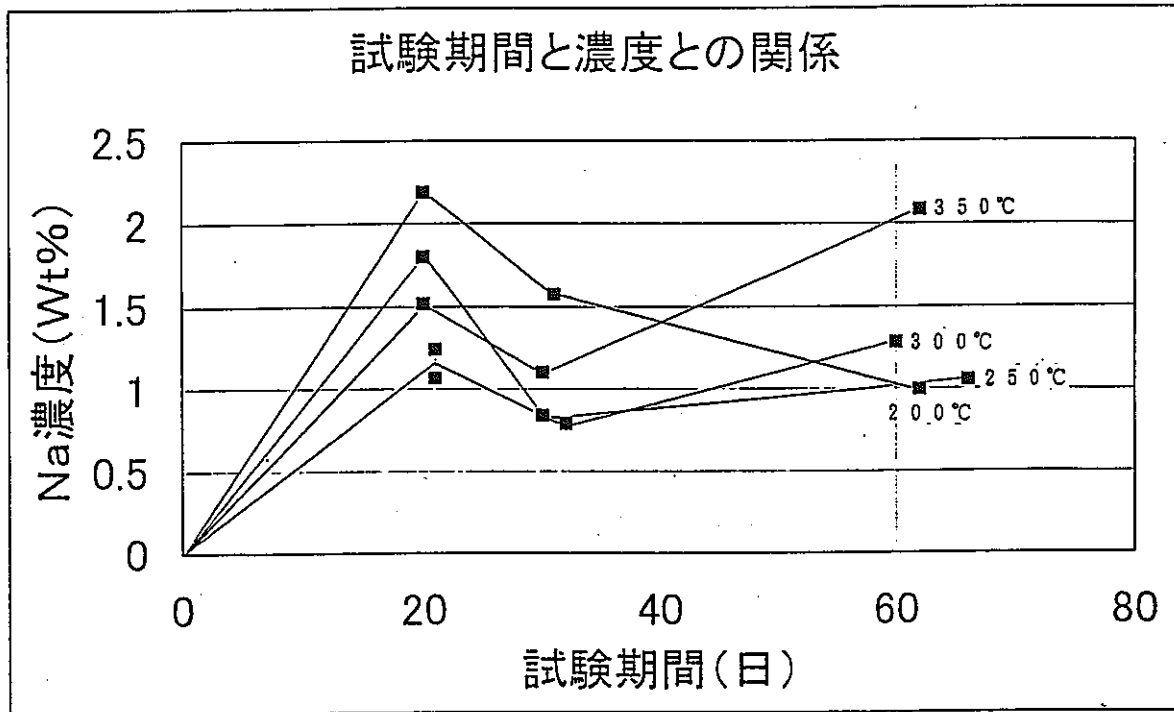


図 1

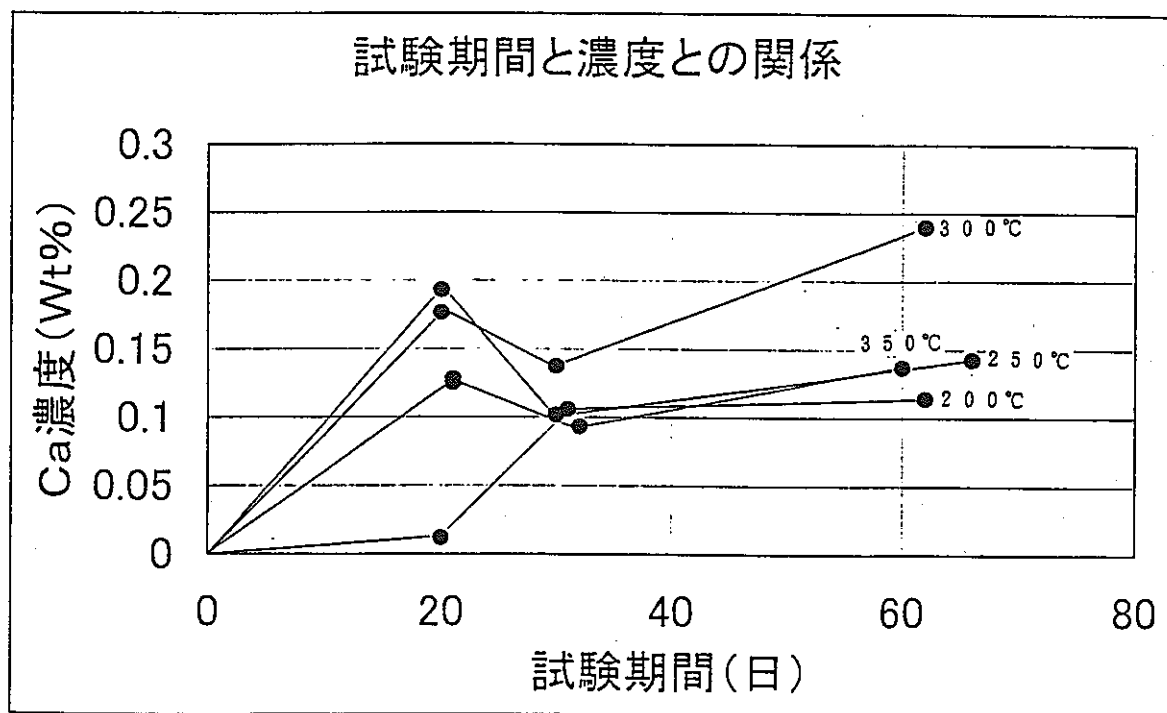
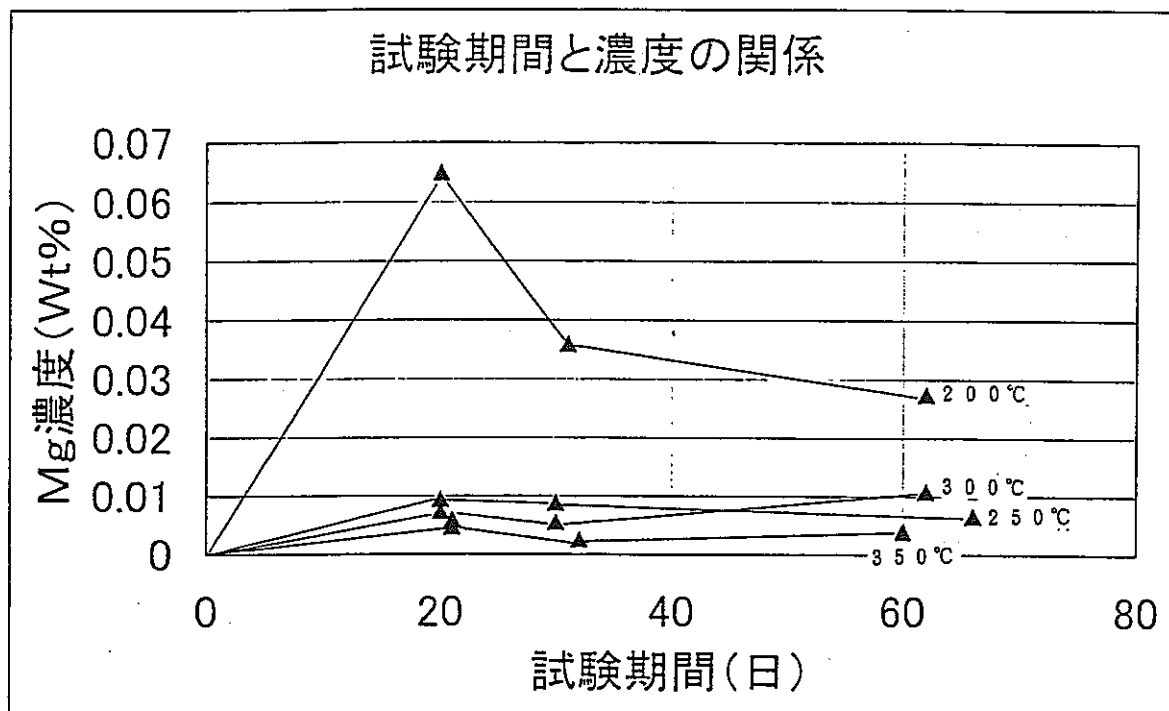


図 2

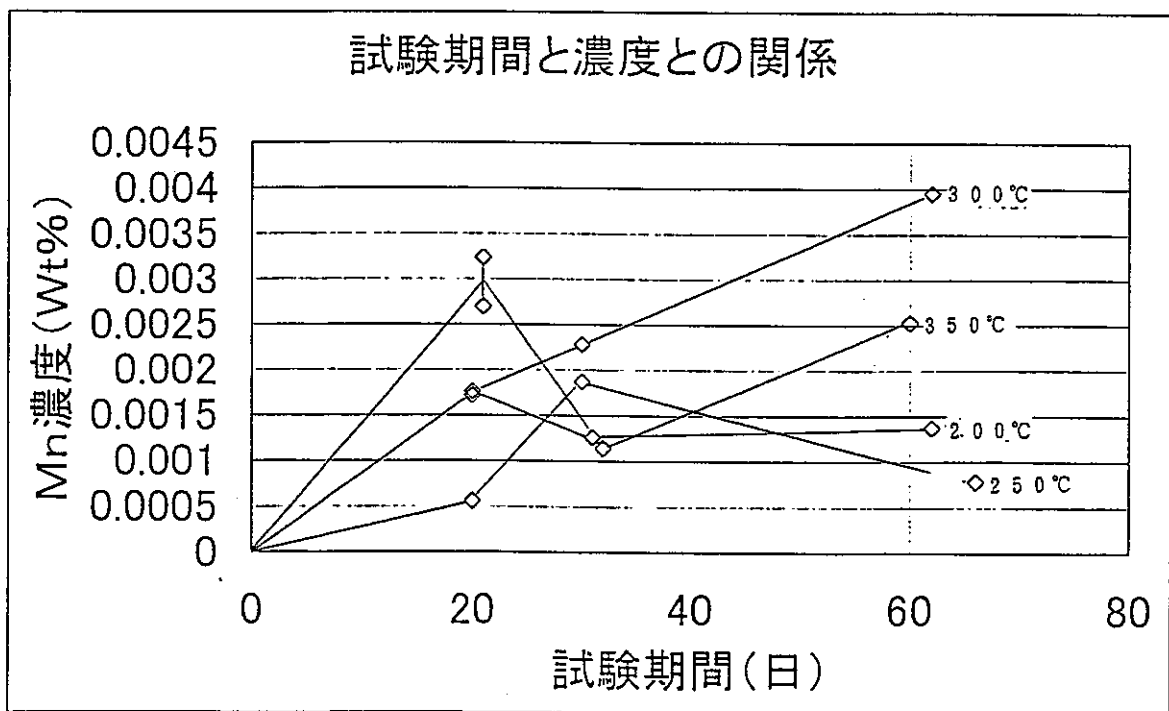
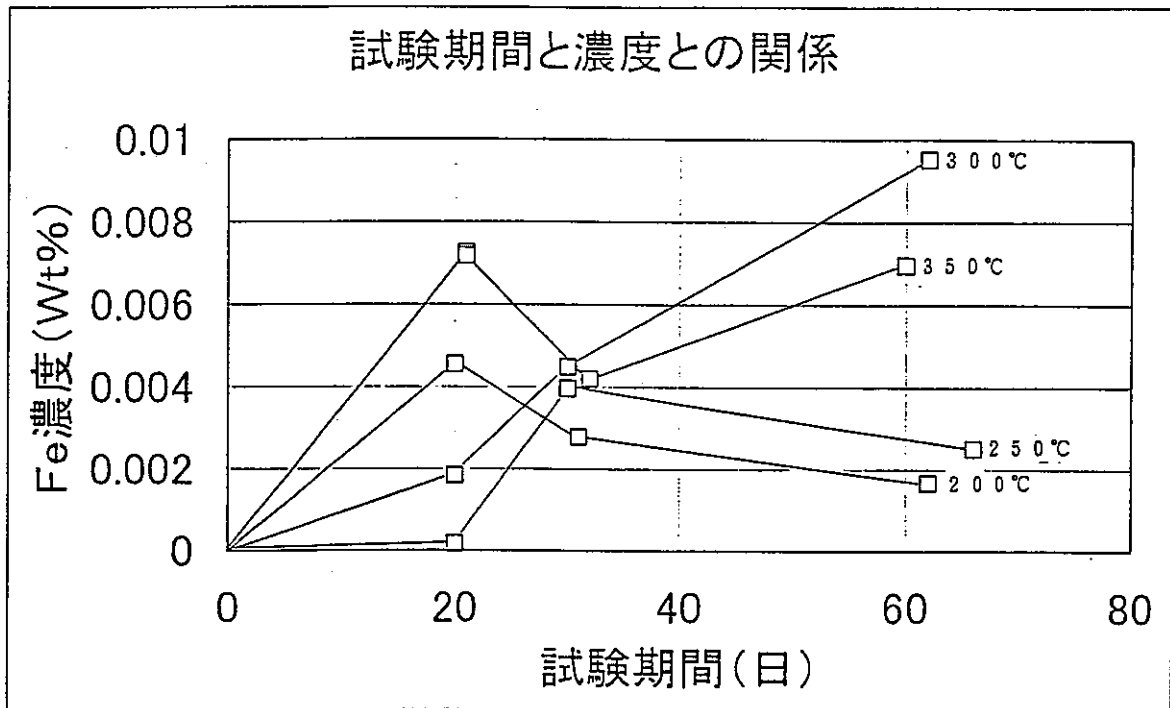


図 3

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	放射性物質の植物への移行と影響に関する研究										
研究協力課題	放射性物質のシロイヌナズナへの移行と影響に関する研究										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">岡山大学 農学部総合農業科学科 教授 山田哲治, 修士課程 竹内香純, [*客員研究員 **研究生]</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">人形 環境研究Gr 時澤孝之, 鶴留浩二</td> </tr> </table>			大 学 側	岡山大学 農学部総合農業科学科 教授 山田哲治, 修士課程 竹内香純, [*客員研究員 **研究生]			機 構 側	人形 環境研究Gr 時澤孝之, 鶴留浩二		
大 学 側	岡山大学 農学部総合農業科学科 教授 山田哲治, 修士課程 竹内香純, [*客員研究員 **研究生]										
機 構 側	人形 環境研究Gr 時澤孝之, 鶴留浩二										
研究協力実施場所	岡山大学 農学部 総合農業科学科 サイクル機構 人形峠環境技術センター 環境研究Gr										
通算研究期間 (予定)	平成9年4月 ~ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年7月28日~ 平成11年3月31日								
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究										
<p><b>【研究目的】</b> 本研究では、温度、湿度、照度、日照時間を制御できる植物育成試験装置を用いて、U、Raの植物体へのDNA レベルでの影響評価を行うとともに、移行メカニズムについて評価する。</p>											
<p><b>【研究内容（概要）】</b> 本研究では、U、Raを含む土壌等でシロイヌナズナ (<i>Arabidopsis thaliana</i>) の生育に最適となるように培養条件（温度、湿度、照度、日照時間等）を変化させて、種々のデータを蓄積するものである。また、植物の遺伝子構造が最もよく明らかにされているシロイヌナズナの放射性物質に対して変異を受けやすい遺伝子（例えばアントシアン合成遺伝子）をモデルにU、RaのDNA に及ぼす影響等について評価を行うとともに、イメージングプレート等を用いて植物体へのU、Raの濃集、収着の状況等を把握する。</p>											
<p><b>【使用主要施設】</b> 人形峠：植物培養装置，電気泳動装置，DNA 増幅装置（PCR Thermal Cyclar），その他分析装置 岡山大学：組換えDNA 実験施設，電気泳動装置，DNA 増幅装置（PCR Thermal Cyclar）， DNA シークエンサー（Perkin Elmer 310 Genetic Analyzer），IP分析装置</p>											

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度は、鉦さいなどの土壤に生育させたシロイヌナズナからのDNA抽出及び予備的なDNA増幅を実施した。平成10年度は昨年度抽出したDNAを用いて、放射線及び放射性核種影響に關与する遺伝子を増幅させ、シーケンス解析を実施した。また、鉦さい土壤で生育させたシロイヌナズナのIP分析を実施して、植物体内の微量な放射線分布を確認した。

## 【研究成果】

### 1. 放射線及び放射性物質による植物体の遺伝子変異に対する影響

平成9年度までに植物の育成からDNA抽出を実施しており、昨年度に引き続き平成10年度はDNA増幅～シーケンス解析を実施した。

#### (1) PCRを用いた特異的遺伝子座DNA断片の増幅

DNA断片の増幅は、PCR Thermal Cyclerにより95℃ 1分→53℃ 2分→72℃ 2分のプログラムで30サイクルのPCR反応を行った。プライマーには本実験用に新規合成したものを使用して、放射線及び放射性核種に対して変位を受けやすい遺伝子のモデルとしてカルコン合成酵素遺伝子を用いた。PCR反応終了後、カルコン合成酵素遺伝子の増幅を確認するための電気泳動解析を行った。

図1に鉦さいダム土壤生育サンプルのPCR産物を電気泳動で分画した結果を示す。この図から1kbp付近にDNA断片のバンドを検出できたので、目的とするカルコン合成酵素遺伝子の増幅ができたと考えられる。その他のサンプルについても同様にDNA増幅を行うことができた。

#### (2) シークエンサーによるDNA塩基配列解析・比較

放射性物質に対して変異を受けやすい遺伝子のモデルとして用いた*Arabidopsis thaliana*（シロイヌナズナ）のカルコン合成酵素遺伝子は、2つのexonと1つのintronから成る。本実験でPCRにより増幅しベクターにサブクローニングした領域は、第2のexon（2328-3322）のうち2422-3170までの749bpである。

目的のカルコン合成酵素遺伝子が挿入された大腸菌からプラスミドを抽出しRNase処理した後、フェノール抽出2回、クロロホルム抽出、エタノール沈澱によりプラスミドDNAを得た。その後、DNA濃度を測定し、1μgをテンプレートDNAとしてシーケンス解析を行なった。

シーケンスはABI PRISM™ 310 BIGDye™ Terminator Cycle Sequencing kitによるDye Terminatorシーケンス法に基いて解析をおこなった。プライマーは、M13 Forward primerとM13 Reverse primerを使用し、4種類の蛍光標識したddNTP、耐熱性ポリメラーゼ及びテンプレートDNAと共に、96℃ 10秒→50℃ 5秒→60℃ 4分のプログラムで25サイクルのPCR反応を行なった。反応後のサンプルはエタノール沈澱した後、オートシーケンサーによる自動解析を行った。解析後得られたエレクトロフェログラムから塩基配列を決定し、DNAデータベースを用いて、それぞれの土壤で生育させた*A. thaliana*由来のカルコン合成酵素遺伝子の変異の有無を解析した。尚、各生育土壤からの放射線及びU濃度測定結果は表1に示すとおりである。

図2に鉦さいダム土壤生育サンプルのDNA塩基配列解析で得られたエレクトロフェログラムを示す。ベースラインのノイズはほとんどなく500bp近い塩基配列解析が1回のシーケンス反応で可能であった。得られた塩基配列はBLASTを用いてDNAデータベース（Genbank）に対し相同性検索を行なったが（図3）、すでに報告されている*A. thaliana*カルコン合成酵素遺伝子と2422-3170の領域において100%の同一性を示し、今回解析した領域においては遺伝子の変異は生じなかったことが判明した。同様の解析を他のサンプルでも行なったが、遺伝子の変異は認められなかった。

## 2. IPによる放射性物質の植物体への濃集に関する調査

放射性核種を含有する土壌で生育させた植物体について、放射性核種の移行部位調査を目的として、植物体からの放射線分布状態及び強度について、Fuji BAS 2000 イメージアナライザーを用い、IP（イメージングプレート）に植物体を感じさせ調査を行った。図4にIP分析結果を示す。3hr 露出の結果から、植物体内部に取り込まれた放射性核種からのものと思われる画像が特に葉部分に見られる。今回IPに用いたサンプルが非常に小さな植物体であることから、これ以上の把握についてはIPでは難しいことも考えられるが、更に詳細なIP画像解析により、本植物の部位毎のTF（濃縮比）やCR（移行係数）についてデータを求めることができると考える。

また試験に用いた鉍さいダム土壌の溶出試験（固液比1:10, 6hr 振とう）により放射性核種濃度を測定した結果、U:1.07 $\mu$ g/ml, Ra:2.0E-3Bq/mlが溶出媒体である純水中に確認された。このことから、鉍さいダム土壌中に生育させた植物が鉍さい土壌から溶出した微量の放射性核種を体内に吸収したものと考えられる。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

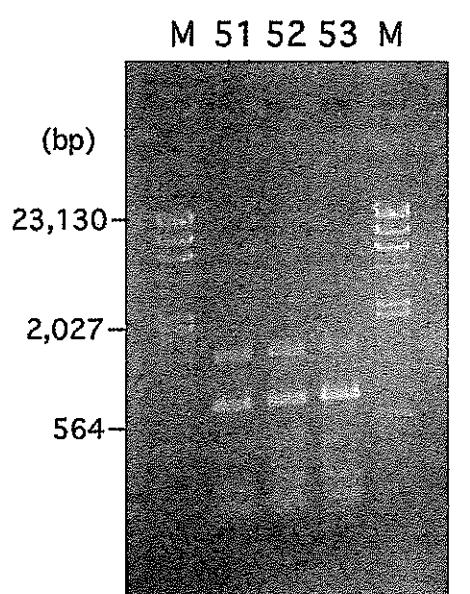
放射線及び放射性物質による植物体の遺伝子変異に対する影響については、さらにサンプル数を増やし今年度の実験の再現性も含めて植物の生育及びシーケンス解析を継続し、放射線及び放射性核種に対して変異の起こる可能性のある遺伝子の対象として新たにC4H（クマリル酸4-ヒドロキシラーゼ）もCHSと同様に検討する。

IPによる放射性核種の植物体への濃集に関する調査では、一般的土壌と鉍さい土壌との対象実験を行うとともに、IP露出時間を変えた実験によって、各部位への放射線強度の違いによる放射性核種移行について調査を行う。鉍さい土壌中で生育させた植物体中の放射性核種量の分析を行い、鉍さいから植物体が吸収する放射性核種量を把握する。また、3年間で実施した環境影響評価における植物の遺伝子解析手法の検討結果や放射性物質の植物影響調査結果を、今後の鉍山跡措置に係る環境影響研究に反映できるようにとりまとめを行う。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

表1 植物生育に用いた各土壌からの放射線及びU 濃度

土壌	$\beta$ $\gamma$ 線 (cpm)	U 濃度 (ppm)
岡山大学圃場	130	0.89
人形・試験棟横	130	1.37
人形・鉾さいダム	1.8k	806
人形・鉾さいダム+バ-ミキュライト	1.2k	—



M : マーカー (λ-hind III)

図1 鉾さいダム土壌生育サンプルのPCR 産物を電気泳動で分画した結果



# BLASTN Search Result

Computed at GenomeNet on 2 05 11 11: 01: 5 JST 1999

Database Name GENBANK-NONST

```
>query
GGACACAGA CAGGACATTC TGGTGGTGA AGTCCCTAAG CTAGCCAAAG
AAAGCGGCAAT GAAAGGCTCC AAGGAGTGGG GCCAGCCCA CTCAAAGATC
ACTATGTGC TCTCTGCGAC TACTCTCCGG GTCCGATGTC TGCTGTCTCA
CTACCACTC ACCAAGCTTC TTGGTCTCCG TCTCTCCGTC AAGGCTCTGA
TGATGTACCA GCAAGGTGGC TTCCGCGGGC GTACTGTGCT CCGTATGCTC
AAGGATCTCG CCGAGAACAA CCGTGGAGCA GGTGTCTCG TTGTCTGCTC
TGAGATCACA GCGGTACTC TCGTGTGGTC CTCTGACACC CACTTGTACT
CCCTGTCTGG TCAAGGCTCT TCAAGGTATG GCGCCCGCCG ACTCATGTGG
GGGTGGGACC CTGACACATC TGTCCGGAGG AALCCCATCT TTGAGATGGT
GTCTCCGCTC CAGACATCC TTCCAGACTC TGATGTGGCC ATAGCGGAC
ATTTCAGGGA AGTT
```

Database: Genbank nucleic acid sequence database  
BLASTN 1.4.10MP [03-December-1996] [Build 17:51:05 Apr 21 1997]

Reference: Altschul, Stephen F., Warren Gish, Webb Miller, Eugene W. Myers, and David J. Lipman (1990). Basic Local alignment search tool. J. Mol. Biol. 215:403-10.

>gb:ATHCHS A.thaliana chalcone synthase (CHS) gene, complete cds.  
Length = 3864

Score = 2570 (710.1 bits), Expect = 7.1e-206, P = 7.1e-206  
Identities = 514/514 (100%), Positives = 514/514 (100%), Strand = Plus / Plus

Query: 1 GGACACAGA CAGGACATTC TGGTGGTGA AGTCCCTAAG CTAGCCAAAG CGGCAAT 60

Subject: 2422 GGACACAGA CAGGACATTC TGGTGGTGA AGTCCCTAAG CTAGCCAAAG CGGCAAT 2481

Query: 61 GAAAGGCTCC AAGGAGTGGG GCCAGCCCA CTCAAAGATC TGGTGTCTCA

Subject: 2482 GAAAGGCTCC AAGGAGTGGG GCCAGCCCA CTCAAAGATC TGGTGTCTCA 2541

Query: 121 TACTCTCCGG CTTGACATGCT GTGTGACTAC CAGCTCAG CCAAGCTCTT GGTCTCG 180

Subject: 2542 TACTCTCCGG CTTGACATGCT GTGTGACTAC CAGCTCAG CCAAGCTCTT GGTCTCG 2601

Query: 181 TCCTTCCGTC AAGGCTCTCATGATGTACCAGCAAGTTCTTGGCCGGCTACTGCTCT 249

Subject: 2602 TCCTTCCGTC AAGGCTCTCATGATGTACCAGCAAGTTCTTGGCCGGCTACTGCTCT 2661

Query: 241 CCGTATCGCT AAGGATCTCGCGAGAACACC GTGGAGCACTGTCTGTTGTCTGCTC 309

Subject: 2662 CCGTATCGCT AAGGATCTCGCGAGAACACC GTGGAGCACTGTCTGTTGTCTGCTC 2721

Query: 301 TGAGATCAG CCGCTTACCTCTGTTGGTCCCTCTGACACCCACCTTGA CTTCCCTGTCG 360

Subject: 2722 TGAGATCAG CCGCTTACCTCTGTTGGTCCCTCTGACACCCACCTTGA CTTCCCTGTCG 2781

Query: 361 TCAAGGCTCTTTTCAGTGTGGCCGGCCGCACTATTGTGGGGTGGGACCTTGACACATC 420

Subject: 2782 TCAAGGCTCTTTTCAGTGTGGCCGGCCGCACTATTGTGGGGTGGGACCTTGACACATC 2841

Query: 421 TGTGAGAGAAACCCATTTTGAGATGGTGTCTGCGGCTCA GACATCTTCCAGACTC 480

Subject: 2842 TGTGAGAGAAACCCATTTTGAGATGGTGTCTGCGGCTCA GACATCTTCCAGACTC 2901

Query: 481 TGATGTGCCATAGACGGGCAATTTGAGGAAATT 514

Subject: 2902 TGATGTGCCATAGACGGGCAATTTGAGGAAATT 2935

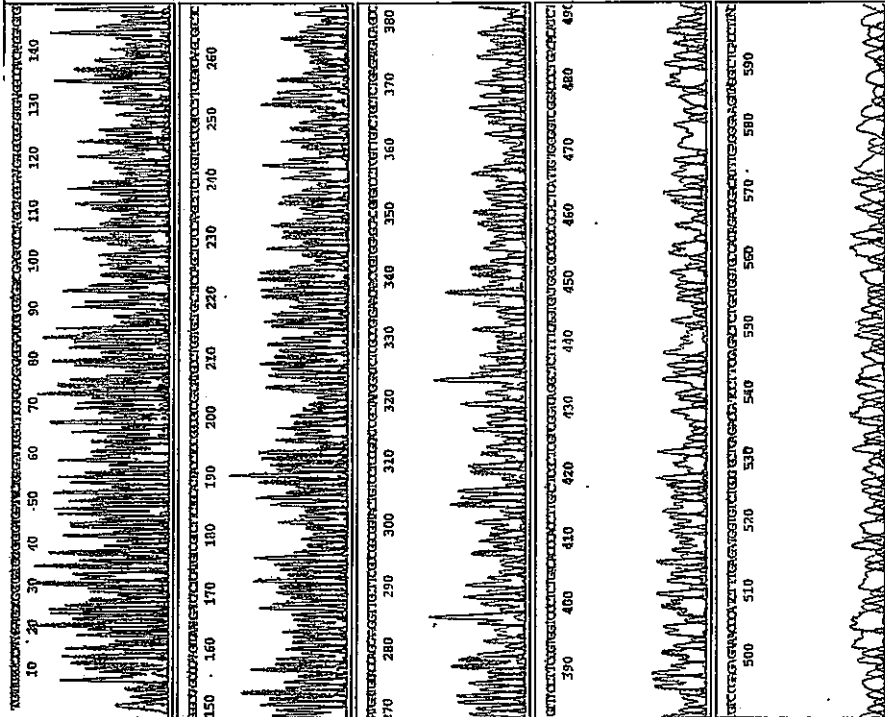
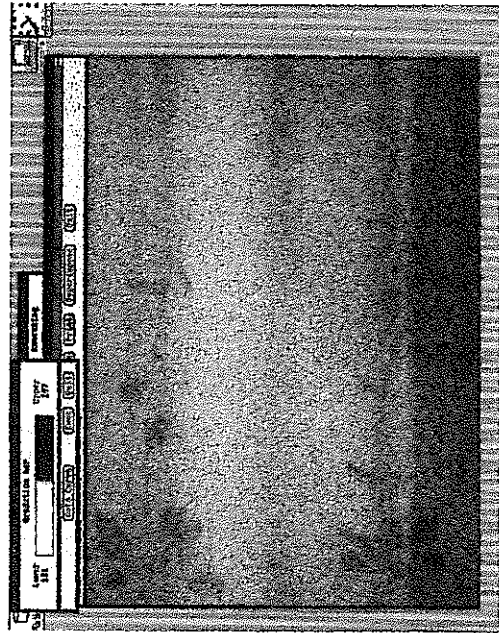


図2 鉋さいダム土壌生育サンプリのDNA 塩基配列解析結果

図3 DNA データベースによる塩基配列の相同性検索結果



植物体 (シロイヌナズナ)



IP分析写真 (3hr露出)

図4 鉋さい土壤で生育させた植物体のIP分析結果

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	岩盤内の不飽和領域のメカニズムに関する研究		
研究協力課題	岩盤内の浸透特性の計測法に関する研究		
研究者所属, 氏名			
大学側	岡山大学環境理工学部 西垣誠 教授 岡山大学環境理工学部 小松満 博士2年** 〔*客員研究員 **研究生〕		
機構側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ 藤田朝雄, 千々松正和, 菊池広人		
研究協力実施場所	岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部		
通算研究期間 (予定)	平成10年8月～ 平成13年3月	当該年度 研究期間	平成10年8月1日～ 平成11年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受け入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
【研究目的】			
<p>高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道掘削に伴い生じる掘削影響領域を考慮した処分坑道周辺岩盤中での不飽和領域の発生および埋め戻し後の再冠水のメカニズムに関する基礎的研究を行ない、掘削影響領域の水理・核種移行特性に与える影響を評価することを目的とする。</p>			
【研究内容(概要)】			
<p>多孔質媒体不飽和水理試験設備を用いて、坑道掘削に伴い坑道周辺岩盤中に発生する不飽和領域の発生メカニズムに関する基礎的研究を実施する。試験は多孔質媒体と実岩石を用いて行ない、媒体内の間隙水圧変動と体積含水率変動を計測する。また、多孔質媒体内の体積含水率の計測法としてTDRやFDR等の適用性に関する検討を行なう。</p>			
【使用主要施設】			
<p>多孔質媒体不飽和水理試験設備 (東海事業所地層処分基盤施設試験棟) 瞬時水分計測装置, FDR水分計 (岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科実験棟)</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

- ・本年度が本共同研究の初年度である。したがって、現在、当初のスケジュールに従って研究を進めている状況である。

## 【研究成果】

現在までに下記の内容を実施している。詳細に関しては別添資料を参照。

現在までの研究の実施状況および成果は以下の通りである。

### (1) FDRの校正

FDR(Frequency Domain Reflectometry)水分計を大型水槽で使用する多孔質媒体（ガラスビーズ）に適用するために校正式の取得を行なった。体積含水率0.002(気乾状態), 0.136(Sr=34%), 0.260(Sr=65%), 0.388(飽和)の4種類のガラスビーズ試料( $\rho_d=1.49$ )を用意し、各々の試料の誘電率を求めた。なお、FDRの電極は長さ15cmのものを使用した。体積含水率と得られた誘電率の値から校正曲線を求めた。校正曲線を図-1に示す。校正式は( $\epsilon-\theta$ )の関係であり5次式とした。校正式を以下に示す。

$$\theta = 3.06 \times 10^{-7} \epsilon^5 - 2.60 \times 10^{-5} \epsilon^4 + 8.549 \times 10^{-4} \epsilon^3 - 1.38 \times 10^{-2} \epsilon^2 + 1.24 \times 10^{-1} \epsilon - 2.74 \times 10^{-1}$$

### (2) ガラスビーズの基本特性の取得

ガラスビーズの飽和透水係数、不飽和水分特性曲線、不飽和透水係数の取得を行なった。飽和透水係数は変水位透水試験、不飽和水分特性曲線は土柱法、瞬時水分計測法で測定を行なった。瞬時水分計測法の装置の概要を図-2に示す。また、瞬時水分計測法の結果から不飽和透水係数の算定を行なった。得られた水分特性曲線を図-3に、不飽和透水係数を図-4に示す。図-4には土柱法により得られたデータを元にVGモデルを用いて算定した不飽和透水係数を示している( $\alpha=0.01685$ ,  $n=12.52$ )。この図から瞬時水分計測法により得られた値は不飽和状態になった時に急激な透水係数の低下が見られることがわかる。しかし、この差がそのまま残るものの体積含水率0.35ぐらいからVGモデルにより同定された値と平行している。体積含水率0.20までではあるが、2つの値はその差が1オーダー以内であり瞬時水分計測法により妥当な結果が得られていると考えられる。

### (3) 多孔質媒体を用いた不飽和水理試験

#### 1.はじめに

本実験は、不飽和領域の形成条件を把握し、その広がる状況を観察することを目的としている。不飽和の浸透を支配する物性値の計測法として、FDR計測法(Frequency Domain Reflectometry)を採用し、経時的な水分量の変化をリアルタイムで測定する。また、間隙水圧計により圧力の測定も実施した。

#### 2.実験条件

実験条件を以下に示す。今回は不均質場を対象とし、2種類のビーズを用いて坑道モデル部分からの排水を行なった。

岩盤部                      ガラスビーズ0.1mm

掘削影響領域部          ガラスビーズ2mm

#### 3.センサー設置状況

図-5に各センサーの設置状況を示す。間隙水圧計はNo.21~37の17個、FDRはNo.1~8の8個を設置した。間隙水圧計は測定負圧範囲が小さいため、セラミックカップを用いずにステンレスメッシュによる計測法を採用した。また、FDRは電極が150mmのタイプを用いた。

#### 4.観測結果

このモデルで、①坑道部からの排水を行うと、ゆるみ領域に気泡が浸入し、不飽和領域の発生が見られた。この気泡は、外側の部分(0.1mmビーズ)には広がらず、内部の円形部分の上部に溜まっていった。その後、②坑道部からの排水を停止し、水槽下部から排水を行った。

## 【研究成果】

### 5.計測結果

圧力水頭の経時変化を図-6 (No.21～29) , 図-7 (No.30～37) に示す。結果を見ると①坑道部より排水直後に全体の圧力は急激に低下し、ゆるみ領域のNo.29, No.31が負圧に転じている。つまり、排水直後にこの部分に不飽和領域が発生していることがわかる。その後、②坑道部からの排水を停止し、水槽下部から排水を行うと、全体的に緩やかに低下し、その後、水槽上部から順に不飽和状態に至っている。なお、No.21, No.22, No.23, No.28の圧力が急激に上昇しているが、これはセンサー部分に気泡が浸入したためと考えられる。図-8に実際にFDRによる測定結果を示す。時間とともに体積含水率が低下している様子が測定できている。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

#### (1) 多孔質媒体および岩石を用いた不飽和水理試験

多孔質媒体不飽和水理試験設備を用い坑道周辺への不飽和領域の発生の状況を観察し、定性的に現象を把握する。

#### (2) FDR等による不飽和領域測定に関する検討

多孔質媒体不飽和水理試験設備において発生した不飽和領域を、FDR等の計測機器を用い測定し、定量的な把握を実施する。

#### (3) 解析手法の検討

坑道周辺への不飽和領域の広がりを解析的に評価する。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等）】

・なし

【別添資料】

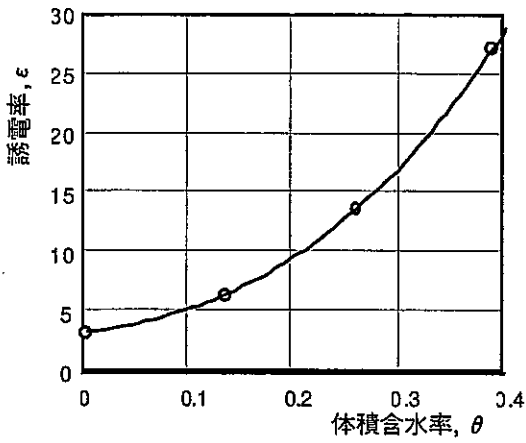


図-1 校正曲線

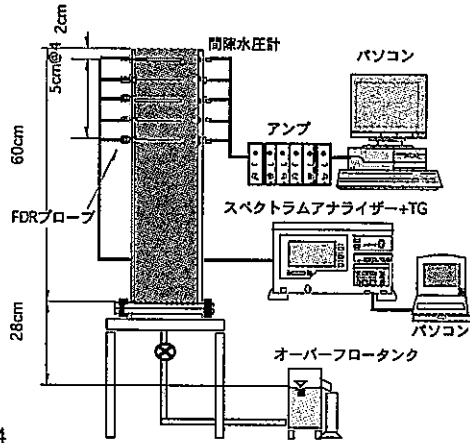


図-2 瞬時水分計測法の装置図

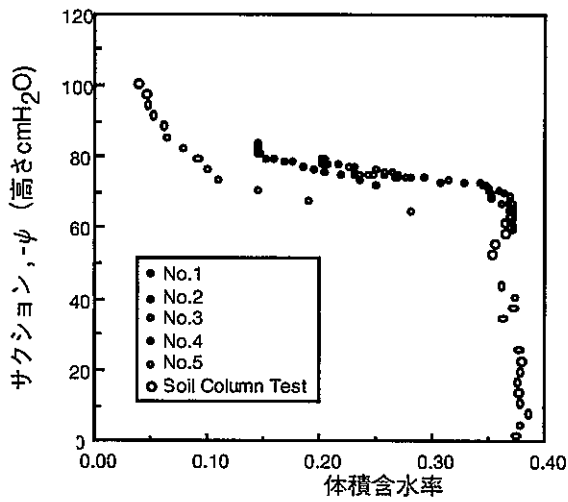


図-3 不飽和水分特性曲線

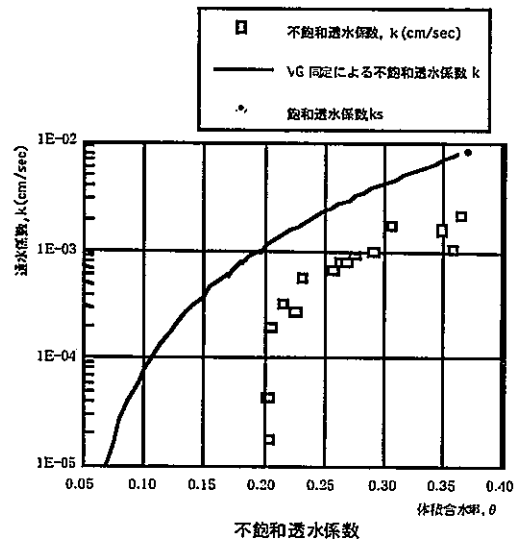


図-4 不飽和透水係数

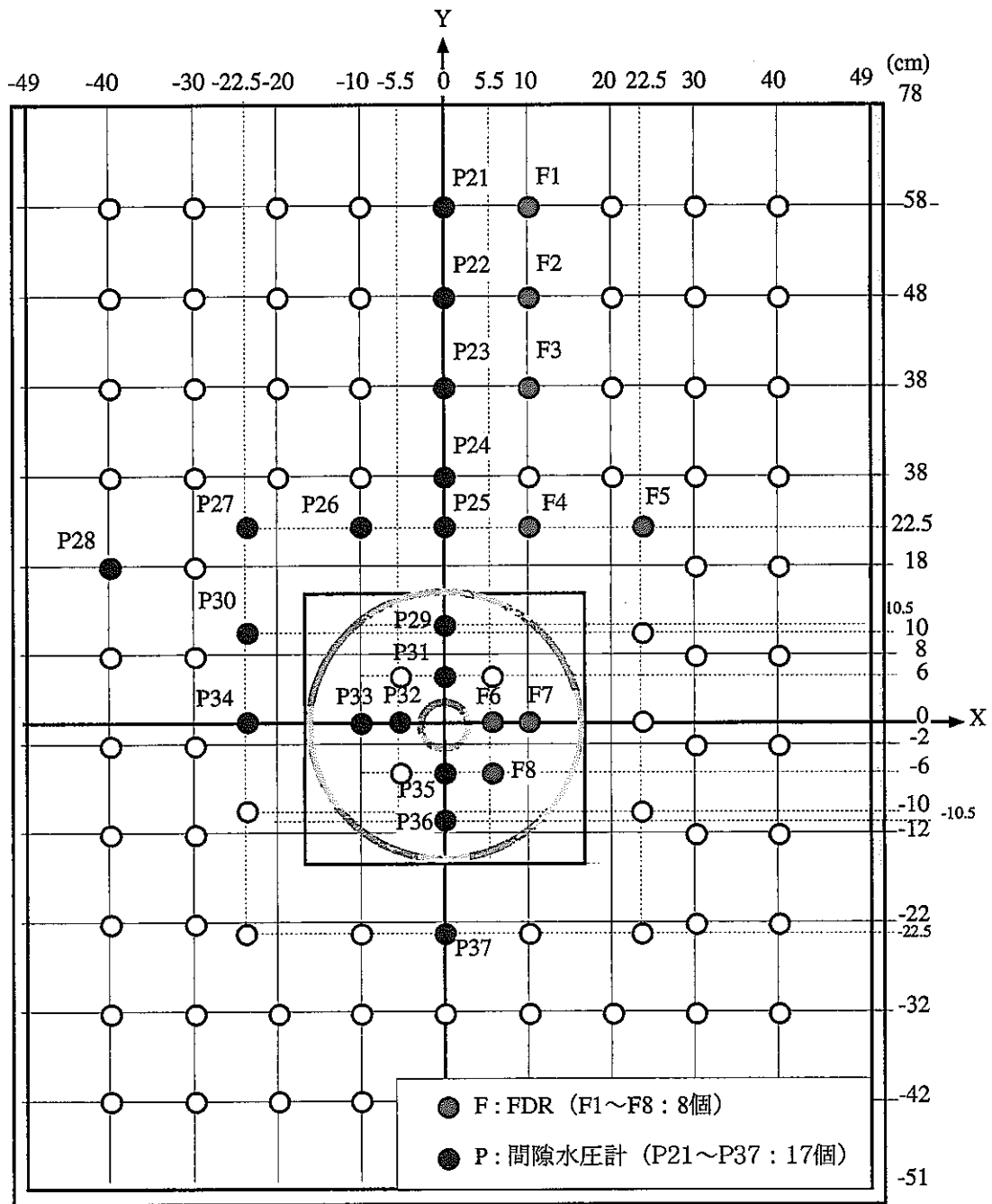


図-5 センサー取り付け用穴配置図 (CLUE水槽A : EX-3)

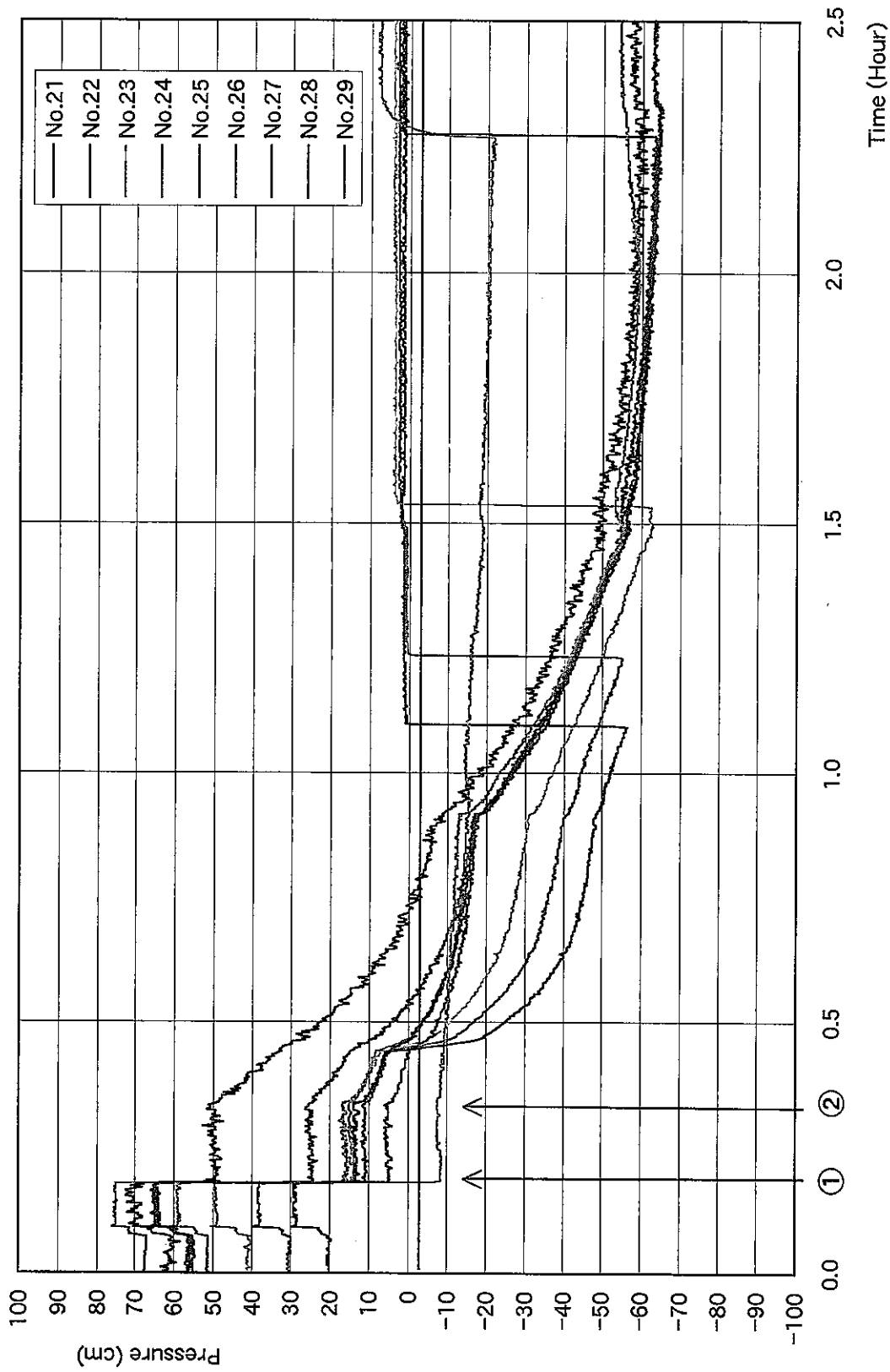


図-6 圧力水頭の経時変化 (No.21~29)



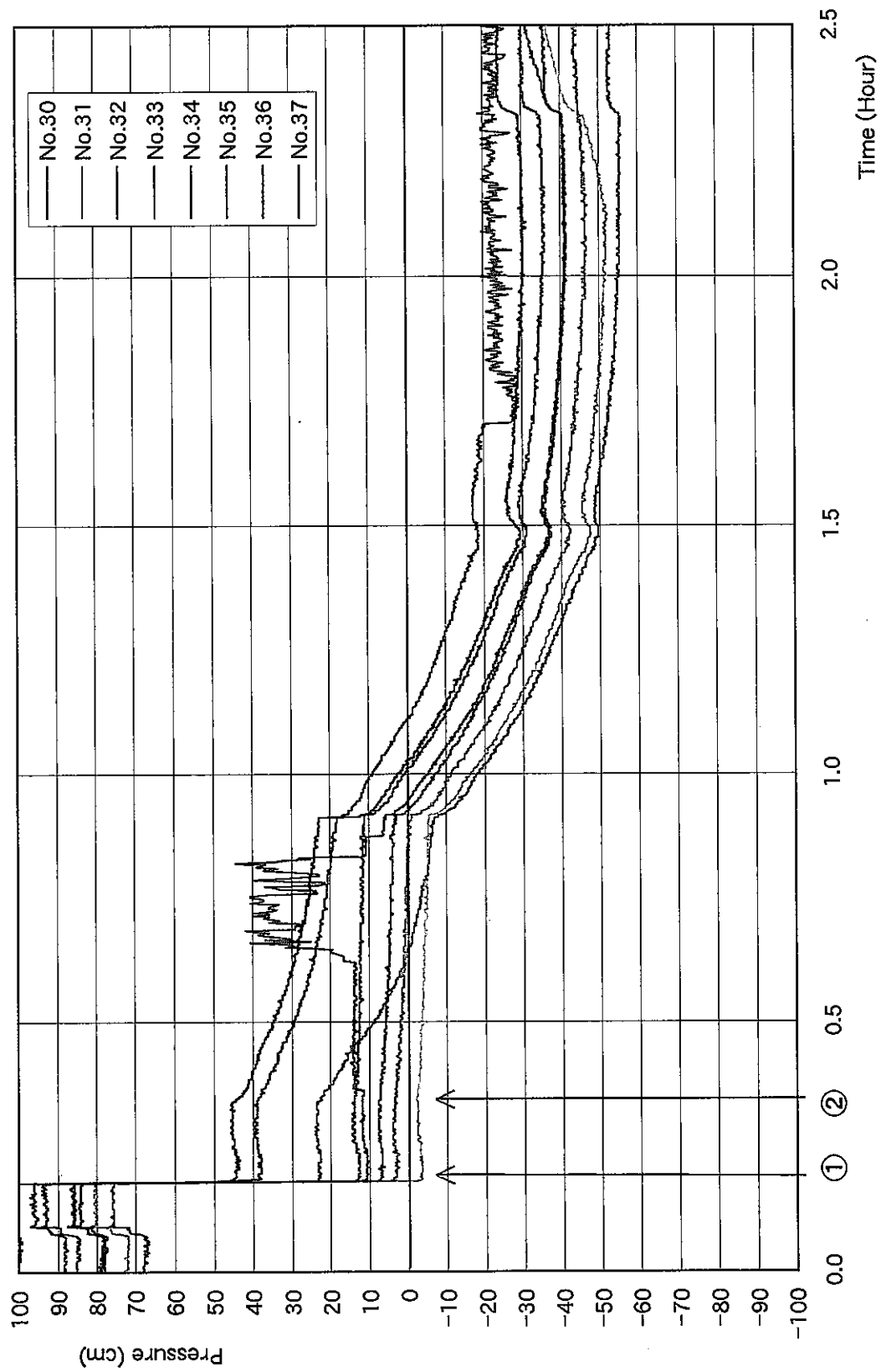


図-7 压力水頭の経時変化 (No.30~37)

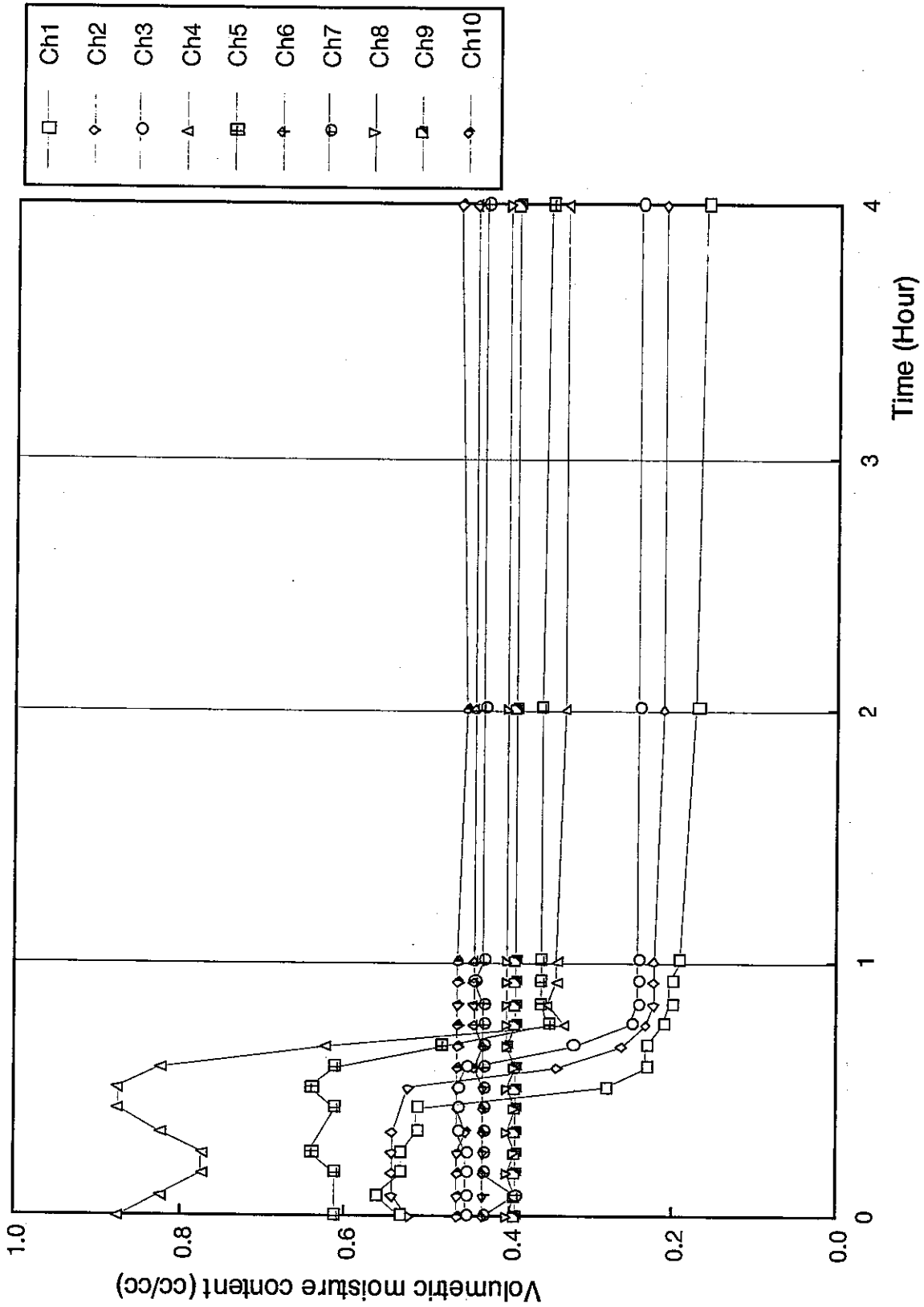


図-8 FDR を用いた大型水槽内の体積含水率の経時変化の測定例

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	亀裂岩石中でのコロイド及び溶質の移行研究		
研究協力課題	コロイド—イオン—岩石3相系相互作用メカニズムの解明と定量化		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 東田中知普他教授* 長崎守浩史助教*		
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分別7 性能研究グループ 亀井 玄人、久野 義夫		
研究協力実施場所	東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 地層処分基盤研究施設		
通算研究期間 (予定)	平成10年 7月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年 7月13日~ 平成11年 3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの安全評価において、放射性核種の移行挙動は、地下水中のコロイドや核種自体が形成するコロイドの存在によって影響を受けることが指摘されている。本研究では、亀裂を有する岩石中でのコロイドの移行挙動に着目し、コロイドが関与する移行メカニズムを解明することによって、核種移行に与える影響を検討する。また、取得されたデータに基づき、安全評価において考慮すべき因子を整理するとともに、核種移行モデルの開発に反映させることを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>岩石亀裂中での核種移行にコロイドが与える影響について、種々の概念モデルが検討されているが、コロイド移行に関しては亀裂面での遅延メカニズムについて詳細な検討が行われていないので、安全側評価の観点からこの効果は無視しているのが現状である。本研究では、まず岩石中でのコロイドの移行を抑制するメカニズムとして考えられる、固相表面上でのコロイドのフィルトレーション効果を明らかにする。この現象は、移流しているコロイドが岩石亀裂面に接触して、ある割合で固相に付着するものと考えられる。具体的に以下の調査・検討を行い、核種移行評価に役立てる。</p> <p>(1) バッチ試験後の試料について、SEM, EDXなどを用いた表面分析により、岩石へのコロイドの付着状態を観察し、両者の相互作用を確認する。また、DLVO理論などのモデルを基礎として、理論と観察結果の比較を行う。</p> <p>(2) 亀裂を有する岩石を試料に用いたカラム試験を実施し、得られる破過曲線と亀裂面の観察から、移流系での岩石とコロイドとの相互作用を確認する。</p> <p>(3) (1)と(2)を結びつける、理論的な考察を行う。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>地層処分基盤研究施設 (ENTRY)    カラム試験装置、表面分析装置など</p>			

## 【進捗状況（当該年度までの概要）】

今年度より、本研究を開始した。

## 【研究成果】

平成11年3月現在の進捗をまとめる。

### 1. カラム試験

亀裂を有する岩石中でのコロイドの移行挙動を確認するために、カラム試験を実施した。図1に試験装置の概要と試験条件を示す。長さ30cmの円柱状の花崗岩を縦方向に2分割し、その切断面を平滑に加工し、幅約1mmの模擬亀裂を有するように岩体を充填し、亀裂岩石カラムを作製した。ポンプ流量は約7 ml/hr（亀裂内平均流速7 cm/hr 相当）で一定とし、トレーサ溶液ないしコロイド溶液をカラムに送液し、流出液をオートサンプラで分取して濃度を紫外吸収スペクトル法で測定した。トレーサには岩石に対する収着性が低いと考えられる  $I^-$  ( $10^{-3}M$  NaI溶液として使用)を用い、コロイドの移行挙動との比較を行った。コロイド溶液は粒径309nmのポリスチレンラテックス溶液を約25ppmの濃度に調製したものをを用いた。

本年度の試験では、コロイド溶液のイオン強度がコロイドの移行挙動に与える影響について明らかにした。図2にラテックス粒子の亀裂岩石カラムからの破過曲線を示す。コロイド溶液のイオン強度はカラム試験の期間中に凝集の起こらない濃度範囲で $NaNO_3$ を添加して調製した( $10^{-6}M$ ,  $10^{-4}M$ ,  $10^{-3}M$ )。それぞれのイオン強度について、図2に示した試験順序で2回づつ試験を行った。各試験終了時には、蒸留水によりカラム内を洗浄し、洗浄液中にラテックス粒子が検出されなくなるのを確認した。

図2より破過曲線の傾向として、カラムへの流入初期の段階では（流出量約200ml まで）、トレーサと同様に急激に破過するが、その後は固相への付着による遅延効果が見られる。またイオン強度の増加に伴いコロイドの流出濃度比 ( $C/C_0$ ) が減少し、岩石内でのコロイドの保持量の増加が認められた。コロイドの流出挙動として、急激な破過の後には徐々に流出濃度が流入濃度 ( $C/C_0=1$ ) に近づく傾向がある。

このようなコロイド粒子の移行や付着について、現段階では、詳細なメカニズムの解明は困難であるが、多孔質媒体中でのコロイド粒子の移行挙動については、参考となる詳細な試験や理論的な考察が検討されている。

Chinjuら<sup>1)</sup>は、固相にガラスビーズを用いた多孔質媒体中でのコロイドの移行試験を実施しており、急激な破過の後に徐々に流出濃度が流入濃度 ( $C/C_0=1$ ) に近づくという点で、本試験と定性的には同様の結果を得ている。この報告では、多孔質媒体中でのコロイド移行において、初期の破過曲線の急激な立ち上がりをフロントが通過する段階、またその後にコロイドの固相への付着が継続的に起きるものとして考察しており、初期段階に固相に付着したコロイドが、その後に固相に接触するコロイドの付着を妨げる現象（ブロッキング）が、顕著に起きていないと推定している。

またSongら<sup>2)</sup>は、コロイドの固相への付着現象について理論的な検討を行っており、固相媒体の不均質性を考慮した移行モデルを提案している。多孔質媒体中での移行において、コロイド粒子が非可逆的に固相に付着する場合、移行方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (VC) = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \frac{f}{\epsilon} KGC \quad (1)$$

ここで、C : コロイド濃度、t : 時間、V : 移流速度、D : コロイドの分散係数、f : 固相の比表面積、 $\epsilon$  : 空隙率である。また、Kは初期のコロイドが付着していない固相表面に対する、コロイド粒子の平均付着速度を表し、Gは固相へのコロイドの付着が起きることによる、被覆率(付着率)の増加を考慮した、付着速度の補正係数である。ここで、付着速度Kについては、さらに以下のように細分化している。

$$K = \lambda K_P + (1 - \lambda) K_R \quad (2)$$

$\lambda$  : 付着性の高いサイトの割合、 $K_P$  : 付着性の高いサイトへの収着速度、 $(1 - \lambda)$  : 付着性の低いサイトの割合、 $K_R$  : 付着性の低いサイトへの収着速度を表す。

種々の条件での解析より、初期の破過曲線の急激な立ち上がりは、コロイドの付着性は高いが量的には少ないサイトへの優先的な付着およびそれによるブロッキングが起きる段階と考え、その後、付着性は低い但量的には多いサイトへの付着が継続的に起きることによって、破過曲線の傾きがゆるやかになる結果を理論的に導いている。

## 2. 岩石亀裂面の表面観察

鉱物の表面とコロイド粒子とは相互作用を有することは、Dranら<sup>3)</sup>によって実験的にも確認されている。岩石カラムの模擬亀裂表面へのラテックスコロイドの付着状態を確認するために、流出試験終了後カラムを解体し、採取した花崗岩試料の表面をSEMで観察した。

岩石カラムを解体した状態を図3に示す。表面が平滑に加工された模擬亀裂には、白色のラテックスの皮膜が付着しており、特に岩石下部(カラム流入口の側)の方が付着量が多い。これより、コロイドはカラムに流入した地点でよく付着し、流入口から遠ざかるほど付着量が減少する分布を持つことが推察された。

コロイドの付着量が多い、岩石試料の下部の方から亀裂表面を採取し、SEMで観察した結果を図4に示す。ラテックスコロイドの付着層の状態が観察しやすいよう、試料調製時に皮膜の一部を剝離した。溶液における岩石表面でのコロイドの付着状態と、表面分析を実施しているときのそれとは、必ずしも同様の状態であるとは判断できないが、SEM像で見る限りは、球状のラテックスは何層にも積層して付着しており、その結果、試験終了時に皮膜を形成したと推量される。また最初に付着したコロイドが、その後に固相に接触するコロイドの付着を阻害する、ブロッキングは起こりにくいと考えられる。これはコロイドの固相への付着が継続して起きている破過曲線の挙動とも一致する。

### (参考文献)

- 1) Chinju, H., Nagasaki, S., Tanaka, S., Tanaka, T., Muraoka, S.: Filtration in Colloid Migration through Porous Media -Colloid Deposition Behavior onto Solid Surface-, 原子力バックエンド研究, Vol. 5, No. 1, pp59-66(1998).
- 2) Song, L., Elimelech, M.: Transient Deposition of Colloidal Particles in Heterogeneous Porous Media, J. Colloid Interface Sci., Vol. 167, pp301-313(1994).
- 3) Dran, J. C., Mea, G. D., Moulin, V., Petit, J. C., Rigato, V.: Interaction of Pseudocolloids with Mineral Surfaces: The Fate of the Scavenged Cation, Radiochim. Acta, Vol. 66/67, pp221-227 (1994).

**【今後の予定（翌年度以降の概要）】**

本年度の研究より、岩石亀裂中でのラテックスコロイドの破過におけるイオン強度依存性が確認された。今後、さらにラテックスコロイドの破過挙動に与える流速や濃度の依存性を確認し、界面化学や溶液化学的理論からその結果を考察することにより、コロイド粒子の移行を支配するメカニズムを解明する。

また、花崗岩は石英、斜長石、黒雲母などの鉱物で構成されており、本来不均一な媒体であると考えられる。今後もバッチ試験や付着状態の表面観察を継続することにより、鉱物によるコロイドの付着の選択性など、花崗岩の不均一媒体としての評価を検討する。

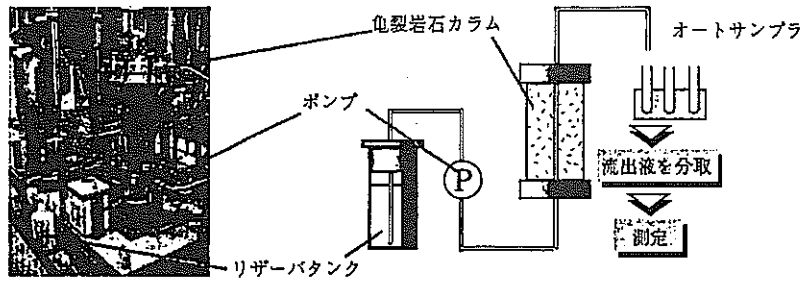
上記2つのプロセスから、コロイド粒子自体の移行特性を定量的に把握し、その後、コロイドに対する収着性の高いイオンが共存した場合、このイオンの移行挙動に与えるコロイドの影響を解明する。

**【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】**

## ● 目的及び試験装置・条件

目的：模擬亀裂岩石中でのコロイドの移行挙動をカラム試験によって確認する。(イオン強度依存性)

試験装置：



試験条件：

- ・ 模擬亀裂岩石
- ・ 亀裂面研磨平滑処理
- ・ カラム長さ 30cm
- ・ 亀裂寸法 約W100mm X H1mm
- ・ ポンプ流量 約7ml/hr
- ・ トレーサ試験 1E-3M NaI
- ・ コロイド移行試験 ポリスチレンラテックス (309nm) 濃度25ppm (1.5E+9個/ml) イオン強度調整試薬 NaNO3
- ・ 濃度測定 紫外吸収スペクトル法 測定波長：ヨウ素イオン 226nm ラテックス 270nm

図1. 試験装置の概要と試験条件

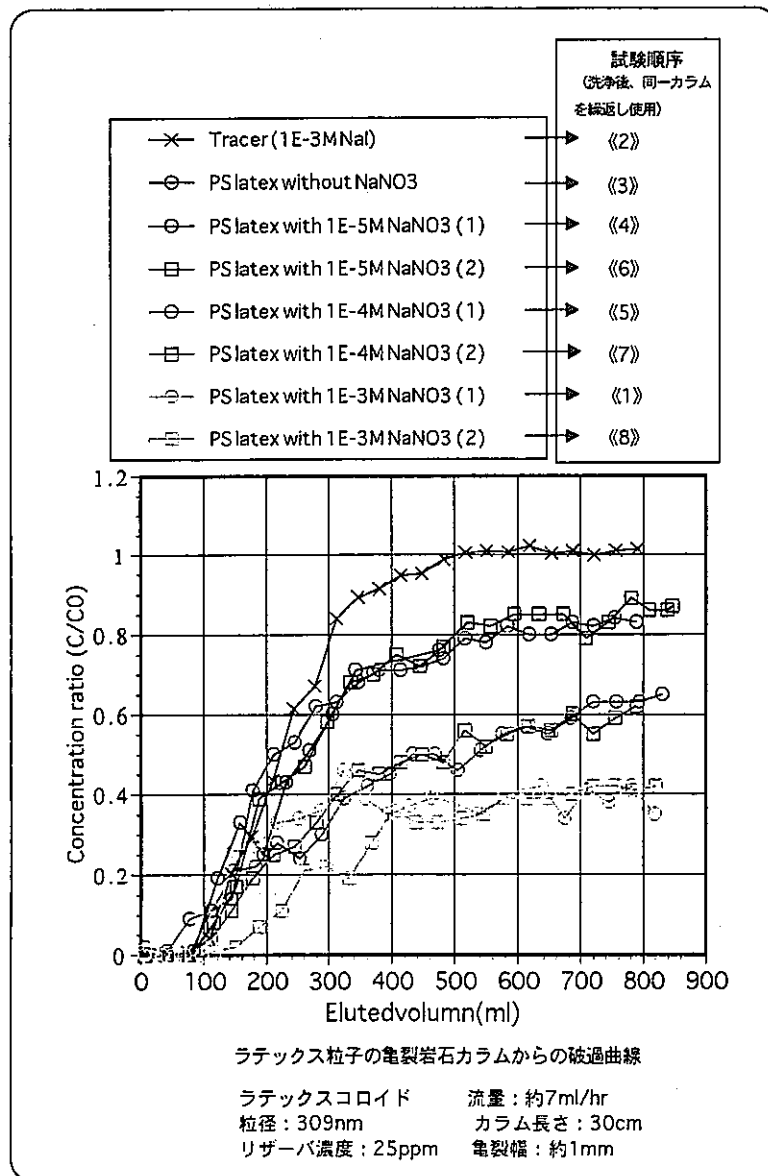


図2. カラム試験におけるラテックスコロイドの破過曲線

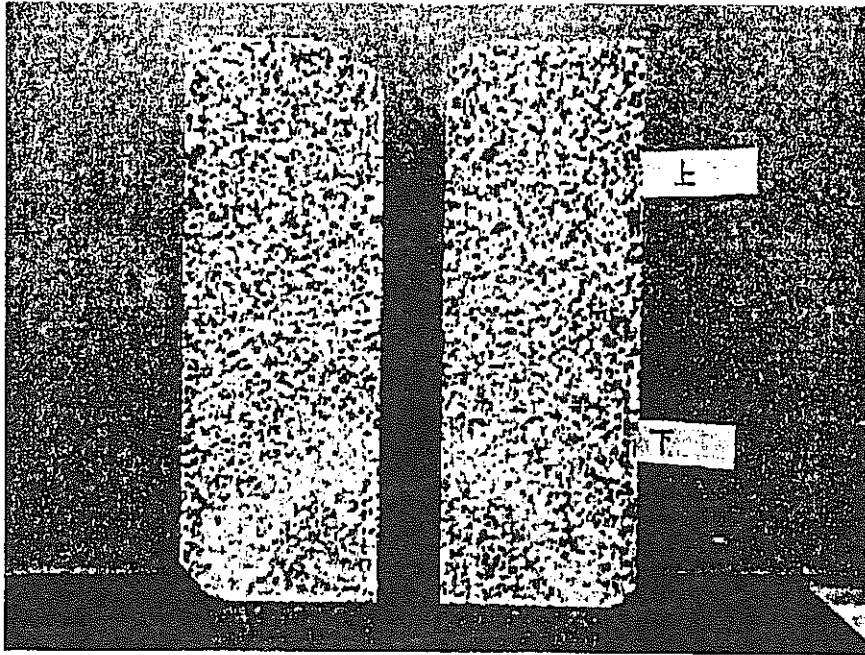


図3. 岩石カラムの解体状態

(平滑に加工された模擬亀裂表面には、白色のラテックスの皮膜が付着しており、特に岩石下部(カラム流入口の側)の方が付着量が多い。)

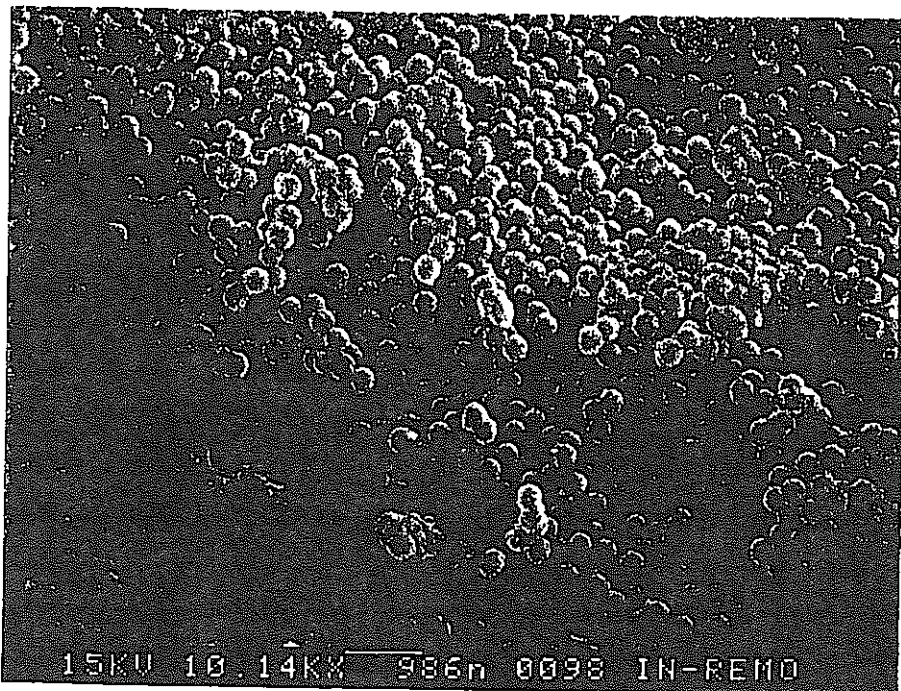


図4. 岩石表面でのラテックスコロイドの付着状態のSEM 観察結果



先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要報告書

研究協力テーマ	我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究										
研究協力課題	同 上 — 亀裂モデルの信頼性評価手法の開発 —										
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 土木システム工学専攻 助手 田中 誠、講師 陳 光齊 博士課程 十 青春</td> <td colspan="2">〔*客員研究員 **研究生〕</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td>核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ 澤田 淳、研究員 井尻裕二</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>			大 学 側	京都大学大学院 工学研究科 土木システム工学専攻 助手 田中 誠、講師 陳 光齊 博士課程 十 青春	〔*客員研究員 **研究生〕		機 構 側	核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ 澤田 淳、研究員 井尻裕二		
大 学 側	京都大学大学院 工学研究科 土木システム工学専攻 助手 田中 誠、講師 陳 光齊 博士課程 十 青春	〔*客員研究員 **研究生〕									
機 構 側	核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ 澤田 淳、研究員 井尻裕二										
研究協力実施場所	京都大学大学院 工学研究科 土木システム工学専攻教室 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ										
通算研究期間 (予定)	平成10年 7月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年12月16日~ 平成11年 3月31日								
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究										
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>高レベル廃棄物地層処分に係わる第2次取りまとめにおいては、岩盤中の支配的な核種移行経路となる亀裂構造を亀裂ネットワークによりモデル化して、我が国における岩盤を対象とした天然バリアの性能評価を実施する予定である。そこで、サイクル機構では、我が国における岩盤中の亀裂特性を把握するために、既往の文献調査を実施するとともに、釜石鉱山や全国16ヶ所の鉱山や露頭において亀裂調査を実施してきたが、これまでに得られた情報は、釜石鉱山をはじめとした花崗岩でのデータが中心で他地域での花崗岩のデータや花崗岩以外の岩種におけるデータは必ずしも十分ではない。そこで、本研究では、土木分野で広く集められている亀裂データを利用して我が国の岩盤における亀裂特性を明らかにしていくとともに、得られた亀裂特性パラメータを用いて統計的に構築した亀裂ネットワークモデルの妥当性および信頼性を過去の研究の知見も踏まえて評価することを目的とする。</p>											
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>京都大学が保有する日本全国のトンネルや大規模地下空洞で観察された亀裂データを用いて、他地域における花崗岩の亀裂特性ならびに花崗岩以外の岩種における亀裂特性を明らかにする。また、得られた亀裂特性を用いて構築した亀裂ネットワークモデルの妥当性および信頼性評価手法についても検討する。</p>											
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>京都大学大学院 工学研究科 土木システム工学専攻教室 計算機 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ 計算機</p>											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

【研究成果】

今年度の研究成果の概要を以下に示す。

(1) 亀裂データベースの構築

日本各地のトンネルや地下空洞で測定された亀裂データを収集し、亀裂解析ができるように亀裂データの読み取り、並べ替え、デジタル化等により亀裂データベースを構築した。今年度収集・整理した亀裂データは以下のとおりである。

①本四道路舞子トンネル下り線TBM区間

岩種：六甲花崗岩

データ：走向・傾斜、トレース長（円筒面上）

②関西電力奥多々良木地下発電所

岩種：流紋岩、凝灰岩（一部）

データ：走向・傾斜、トレース始点・終点3次元座標

③菊間地下石油備蓄基地

岩種：新期領家花崗岩（白亜紀後期）

データ：走向・傾斜（空洞壁面）、トレース始点・終点座標（空洞壁面、サイト全域）

④久慈地下石油備蓄基地

岩種：花崗岩（白亜紀前期）

データ：トレース始点・終点座標（サイト全域）

⑤串木野地下石油備蓄基地

岩種：古期安山岩

データ：トレース始点・終点座標（サイト全域）

⑥京都市音羽ダム

岩種：チャート、粘板岩、珪質粘板岩、流紋岩、凝灰岩

データ：走向・傾斜、トレース始点・終点座標（露頭面上2次元）

⑦スーパーカミオカンデ

岩種：六甲花崗岩

データ：走向・傾斜、トレース始点・終点座標（円筒面上）

⑧中部電力赤石地下発電所

岩種：砂岩・頁岩

データ：走向・傾斜、トレース始点・終点座標（露頭面上2次元）

⑨関西電力伊奈川地下発電所

岩種：伊奈川花崗岩

データ：走向・傾斜、トレース始点・終点座標（露頭面上2次元）

上記以外にも平成11年度には、第2東名高速道路第3清水トンネルにおける亀裂データも併せて収集する予定である。これらのデータはいずれも比較的大きな領域内で数多く測定されていることから、局所的なばらつきの影響を排除できるだけでなく、観察領域が比較的大きいことから比較的大きな構造を捉えることが可能と考えられる。

## (2) 亀裂特性の評価

亀裂解析により一部のサイトにおける亀裂特性を評価した結果、第2次取りまとめで採用した亀裂特性に関して以下のような知見が得られた。

### ①本四道路舞子トンネル下り線TBM区間（花崗岩）

花崗岩においては、互いに直交する鉛直方向の亀裂が卓越することが検証された。

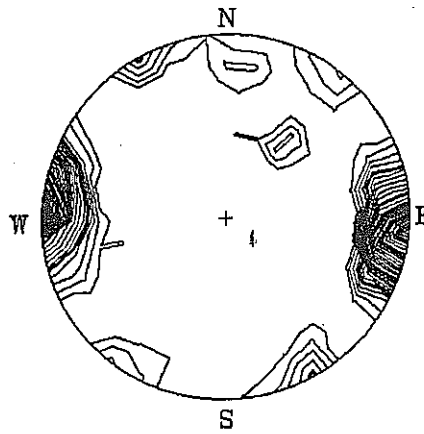


図1 舞子トンネルにおける亀裂ステレオ投影図

### ②関西電力奥多々良木地下発電所（流紋岩）

花崗岩以外の酸性結晶質岩においても花崗岩と同様、互いに直交する鉛直方向の亀裂が卓越することが検証された。

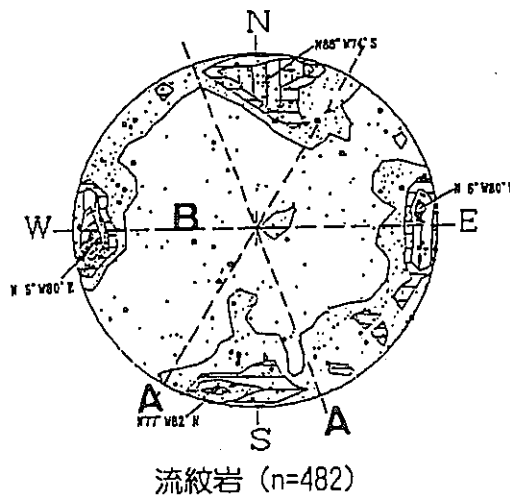


図2 奥多々良木地下発電所における亀裂ステレオ投影図

### ③菊間地下石油備蓄基地（花崗岩）

### ④久慈地下石油備蓄基地（花崗岩）

### ⑤串木野地下石油備蓄基地（安山岩）

いずれのサイトにおいても大規模空洞が10本程度掘削され、数百メートル四方の領域内における亀裂・断層構造が明らかになっている。これらのサイトの亀裂・断層構造から、わが国の地下深部においては、岩種にかかわらず数百メートル規模の比較的大きな亀裂・断層が数多く分布していることが裏付けられた。

### (3) 亀裂ネットワークモデルの妥当性および信頼性評価

第2次取りまとめの天然バリアの性能評価に用いている亀裂ネットワークモデルおよび亀裂ネットワークモデルから作成したチャンネルネットワークモデルの妥当性を評価するために、京都大学でCacas et al. (1993)の手法を用いたチャンネルネットワークモデルを開発した。開発したモデルを用いて釜石鉱山の試験ピットへの湧水量予測解析を実施し、その適用性を確認した。

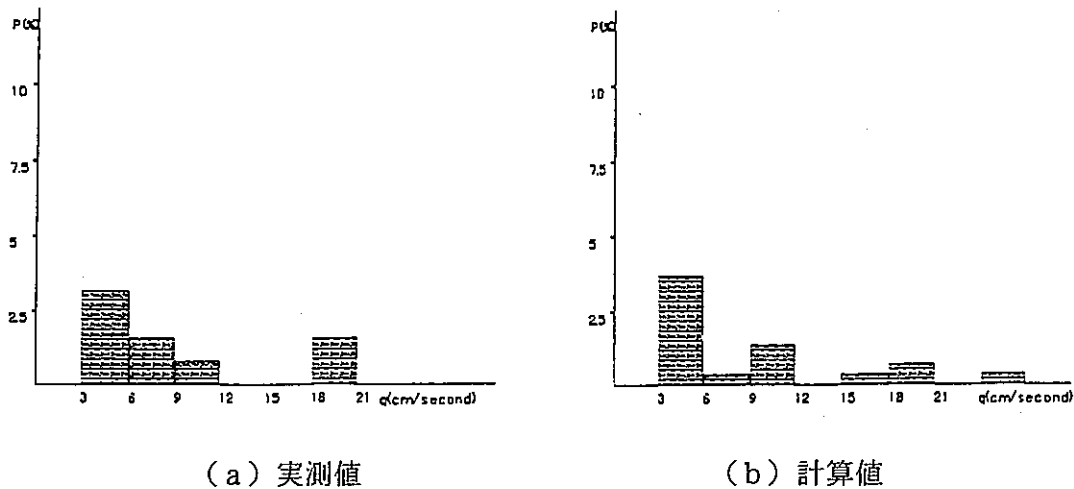


図3 湧水量の頻度分布

#### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成11年度は、亀裂解析コードを用いて収集した亀裂データを順次解析し亀裂特性を評価していくとともに、第2次取りまとめで使用したサイクル機構のチャンネルネットワークモデルと京都大学で開発したチャンネルネットワークモデルで相互比較解析を実施し、構造モデルの不確実性が解析結果に及ぼす影響について検討を実施する予定である。

平成12年度は、亀裂特性の岩種依存性や地域依存性について検討を行うとともに、チャンネルネットワークモデルを用いて亀裂特性の違いに起因した岩種毎の水理特性の違いについて検討を行う予定である。

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

干青春、田中誠、大西有三：不連続性岩盤亀裂ネットワークの水の流れのモデリングとモデルのキャリブレーションに関する研究、（投稿中）

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要 報告書

研究協力テーマ	深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究		
研究協力課題	深部地質環境における微生物生態系の多様性と機能に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	広島大学 生物生産学部 助教授 長沼 毅 修士2年 村上 由記 〔*客員研究員 **研究生〕		
機構側	東濃地科学センター 地層科学研究グループ 岩月 輝希		
研究協力実施場所	東濃鉦山および周辺試錐孔 広島大学 生物生産学部		
通算研究期間 (予定)	平成10年8月 ~ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成10年8月20日~ 平成11年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>地層中の微生物は、地下水の酸化還元電位に影響を与えるだけでなく、地層中の有機物を分解し、有機コロイド等を生成する可能性が指摘されている。しかしながら、地下深部に存在する微生物については、採取方法の不備などの問題のため、種類や量などの基礎的な情報さえ得られていないのが現状である。</p> <p>本件では、地下深部の微生物の生物量、多様性、機能などについて調査研究を行い、微生物活動による地下水の酸化還元や物質移動（溶解・沈殿）への影響評価を行うための基礎的な知見を得ることを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>東濃鉦山及びその周辺から得られた地下水、岩石試料を用いて微生物試料を分離、培養する。得られた微生物試料を用いて、天然群集としての微生物機能の調査研究、特定微生物の分離、生理・生化学特性の解析、酸素濃度に関わる得意微生物の調査研究を行う。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>東濃鉦山および周辺試錐孔、ペレトロン年代測定棟 広島大学 生物生産学部</p>			

### 【進捗状況（当該年度までの概要）】

東濃鉱山および周辺試錐孔において計4回にわたるサンプリングを実施し、微生物の種類および数について、深度による変化を調査し、地下水の地球化学特性との相関について解析した。

### 【研究成果】

東濃地域の地下水中の微生物について以下のことが明らかになった（表1参照）。

- ① 生菌と死菌を合わせた地下水中の微生物の全菌数は、堆積岩で約 $10^7$  cells/ml、花崗岩で約 $10^6$  cells/ml程度である。これらの地下水中の生菌数は $10^3 \sim 10^4$  CFU/ml である。この生菌数は、好気的環境条件で培養、計数された値であり、地下環境は一般に嫌気条件にあるため現位置環境で生息している微生物のうち培養ができたのは数%程度であると考えられる。そのため、地下環境全体で育成する微生物バイオマスはかなり大きなものであることが想像できる。
- ② 花崗岩の深度約130～330m (pH:7.8-8.2, Eh:0mV付近) で、鉄関連細菌 (IRB) の生菌数が最大値を示した。この深度は、酸化還元電位とpH値から鉄の化学種が酸化還元平衡にあると想定され、微生物の活動が酸化還元電位と相関があることを示している。同様に、pH、酸化還元状態が硫黄の化学種の酸化還元反応で決まっていると予想される深度450m付近において、硫酸還元細菌 (SRB) の存在が確認されている。

以上の事から、深部地質環境における微生物の活動は、地下の地球化学プロセスと密接な相関があることが示唆される。

### 【今後の予定（翌年度以降の概要）】

東濃地域の堆積岩、花崗岩中の微生物について、好気性細菌、嫌気性細菌の深度プロファイルを明らかにするための調査を継続する。また、試錐孔掘削時の微生物汚染についての調査を新規掘削試錐孔において行う。

### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

地下500m以深における微生物群集、日本微生物生態学会第14回講演要旨集

地下生物圏における微生物の生態と機能の可能性、原子力バックエンド研究、投稿中

表1. 東濃地域における地下水中の微生物活性

試錐孔	岩種	深度 (G.L.- m)	全菌数 (cells/ml)	好気性生菌数 (CFU/ml)	SO 菌 (CFU/ml)	TAB (CFU/ml)	鉄関連細菌 (CFU/ml)	硫酸還元菌 (CFU/ml)	脱窒菌 (CFU/ml)	硝化菌 (CFU/ml)
				$1/2LB \cdot G \times 10(1/2LB \cdot G)$						
KNA-6 (U)	土岐夾炭累層	-160	3.66E+05			2.01E+05	n.a.	n.a.	n.d.	n.d.
TH-6	明世累層	-104	1.6791E+06			5.00E+06	1.00E+05	4.20E+03	m.a.	n.d.
TH-6	土岐夾炭累層	-132	1.4850E+06			5.00E+06	1.00E+05	2.00E+02	b.l.	n.d.
TH-6	土岐夾炭累層	-153	2.2488E+06			5.00E+06	1.00E+05	n.a.	b.l.	n.d.
TH-6	土岐花崗岩	-177.5	1.9334E+06			5.00E+06	7.51E+03	2.40E+02	b.l.	n.d.
KNA-6 (G)	土岐花崗岩	-180	2.42E+05			n.a.	8.01E+03	2.78E+03	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-19	3.1429E+05	9.07E+03	2.21E+04	5.00E+05	8.83E+03	n.a.	n.d.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-130	6.7757E+05	3.60E+03	1.48E+04	3.33E+06	5.43E+03	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-209	1.1036E+06	2.00E+02	3.60E+03	3.33E+06	0.00E+00	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-330	1.6021E+06	7.40E+03	1.13E+04	1.00E+03	7.23E+03	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-458	2.2426E+06	9.10E+03	1.62E+04	5.00E+06	8.97E+03	1.70E+04	No data	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-485	1.1404E+06	2.23E+03	6.17E+03	1.00E+03	1.97E+03	3.30E+01	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-600	1.0302E+06	3.07E+03	7.60E+03	5.00E+05	3.30E+03	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-645	6.6131E+05	3.37E+03	5.87E+03	5.00E+05	1.20E+03	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-767	1.2522E+06	1.33E+03	6.73E+03	1.00E+03	2.03E+03	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-790	9.0854E+05	9.03E+03	1.24E+04	5.00E+05	7.43E+03	n.a.	b.l.	n.d.
DH-3	土岐花崗岩	-840	8.9319E+05	3.70E+03	5.73E+03	1.67E+05	2.33E+03	n.a.	n.d.	n.d.
DH-5	土岐花崗岩	-330	8.5526E+05	2.11E+04	4.45E+04	5.00E+05	2.29E+04	6.67E+02	n.d.	n.d.

n.a. = not aggressive, m.a. = moderately aggressive

b.l. = background level

n.d. = not detect

先行基礎工学分野に関する平成10年度研究概要 報告書

研究協力テーマ	深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究		
研究協力課題	深部地下における微生物生態系とその物質循環系能の解析		
研究者所属、氏名			
大学側	京都大学 大学院 工学研究科 教授 合中 忠行 助教授 跡見 晴幸 助手 江崎 聡 ( *客員研究員 **研究生 )		
機構側	東濃地科学センター 地層科学研究グループ 岩月 輝希		
研究協力実施場所	東濃鉾山および周辺試錐孔 京都大学 大学院 工学研究科		
通算研究期間 (予定)	平成10年8月 ~ 平成12年3月	当該年度 研究期間	平成10年12月16日 ~ 平成11年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>地下深部の地球化学的環境を考察するためには、地下水の化学的性質に寄与する無機化学的な反応を明らかにするだけでなく、有機的な物質循環についても把握しておく必要がある。</p> <p>本件においては、地下深部の極限環境から得られた個々の微生物について、環境適応戦略や代謝経路を解明する事により、有機的な物質循環に関して基礎的な知見を得ることを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>東濃鉾山及びその周辺から得られた地下水、岩石試料を対象として、極限環境下の微生物の採取、培養を行う。また、得られた個々の微生物について、微生物機能の解析を行う。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>東濃鉾山および周辺試錐孔、ペレトロン年代測定棟 京都大学 大学院 工学研究科</p>			



【進捗状況（当該年度までの概要）】

東濃鉾山および周辺試錐孔において地下水サンプル、岩石サンプルを採取し、微生物のスクリーニングを行い、独立栄養微生物を中心に解析を行った。

【研究成果】

東濃鉾山において採取した地下水試料および地下土壌試料について、好気条件（大気）雰囲気、嫌気条件（窒素：二酸化炭素：水素＝90：5：5）雰囲気において、試料に含まれる微生物の分離・培養を行った。

最小無機塩培地又は好気条件栄養培地を用いて30℃、37℃で嫌気、好気条件下で培養を行った結果、それぞれの培養条件について以下の成果を得ることができた（表1）。

- ①好気従属栄養条件で成育する微生物として、形態的に異なる10種類の微生物を分離成育することができた。
- ②嫌気独立栄養条件で成育する微生物として、4種類の微生物を成育することができた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

分離された独立栄養微生物について、以下の事を行う。

- ①独立栄養微生物の菌学的手法、16SrRNA の配列決定による同定。
- ②分離された微生物が有する炭酸固定能力、炭素固定に関わる酵素の解析。
- ③水素、鉄イオン等をエネルギー源として利用する能力等の代謝・合成経路についての解析。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

表1 深部地下微生物の形態的特徴

\*従属栄養培地

菌株 No.	単離源	コロニーの色、形状など	生育 pH	その他の特記事項
1	土 A	クリーム色、S、ツヤあり	7,8,9	嫌
2	土 A, B	黄色、S、ツヤあり	7,8,9	嫌
3	土 B	クリーム色、R、ツヤなし	7,8,x	コロニーは花形
4	土 C	白、R、ツヤなし	7,8,x	
5	土 C	クリーム色、S、ツヤあり	7,8,9	嫌
6	土 C	白、R、ツヤあり	7,8,9	嫌、生育早い
7	土 C	白、R、ツヤなし	7,8,x	中心が星形に隆起
8	土 D	白、R、綿毛状、ドーム状	7,8,9	嫌、分泌物有り
9	土 D	白、R、ツヤなし	7,8,x	嫌
10	土 D	クリーム色、S、ツヤあり	7,8,9	

※S : Smooth, R : Rough 嫌 : 通性嫌気性 x : 生育が見られなかった

土 A : 含ウラン 土 B : 断層部 土 C : 地下 150m 地点 土 D : 含炭土

\*独立栄養培地

菌株 No.	単離源	コロニーの色、形状など	生育 pH	その他の特記事項
1	土 B	白、S、ツヤなし	7	薄いコロニー
2	土 B	クリーム、S、ツヤなし	7	
3	水 1	桃色、S、ツヤなし	7	やや盛り上がっている
4	水 3	白、S、ツヤなし	7	

※S : Smooth, R : Rough

土 B : 断層部 水 1 : KNA2 水 3 : 堆積岩付近