

先行基礎工学研究に関する 平成11年度研究概要報告

2000年7月

核燃料サイクル開発機構

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

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

2000

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告

報告者課Gr 課題一覧参照
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11年度で5年目を迎え、対象としている研究分野は機構の研究開発に係わるすべての分野に拡大している。

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開発に先行した基礎・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。

同制度では、機構が設定した研究協力テーマに対して、大学等から研究目的を達成する上で必要な研究協力課題及び研究協力者を提案して頂き、外部の専門家を中心とする選考委員会で研究協力課題を選考している。

研究協力形態としては、大学等との共同研究の実施又は客員研究員として受け入れる形態を採用している。なお、共同研究又は客員研究員に大学院修士課程・博士課程の学生を研究生として加えることも可能としている。

本報告書は、平成11年度に実施した高速増殖炉関係、核燃料サイクル関係及び環境技術関係の先行基礎工学研究に関する49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、49件の研究協力課題のうち、高速増殖炉関係の12件、核燃料サイクル関係の1件及び環境技術関係の4件の合計17件については、平成11年度で終了した。

— 目 次 —

I	先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題	i
II	先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告	
1.	高速増殖炉関係	
(1)	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	1
(2)	溶接部の高温損傷の定量化技術	6
(3)	中性子ビーム制御システムの開発	11
(4)	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	18
(5)	粒子画像流速測定法による2次元流速場測定との比較	26
(6)	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－	35
(7)	レーザー超音波による非接触非破壊評価手法の検討	42
(8)	ODSフェライト鋼の電子線照射による評価	48
(9)	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	52
(10)	物質変態を伴う現象の数値解析法	56
(11)	燃焼エアロゾル挙動解析手法の開発	61
(12)	粒子法を用いたナトリウム漏洩燃焼解析手法の開発	65
(13)	弥生炉を用いたTRU核種の崩壊熱の測定・評価	70
(14)	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	73
(15)	配管合流領域における複雑乱流場の流動特性に関する研究	79
(16)	配管合流領域における乱流混合メカニズムの基礎研究	85
(17)	FBR冷却系における流体物性変化を伴う流動現象に関する研究	89
	－物性変化を伴う流動現象モデル－	
(18)	ナトリウムの沸騰伝熱特性に関する研究	93
(19)	形状記憶合金の機械的特性モデル化	98
(20)	熱荷重と材料変形の連成場に関する研究	102
(21)	NaFe複合酸化物の化学熱力学特性変化に関する基礎的研究	106
(22)	ラマン分光法による金属ナトリウムを起源とする高温高腐食性酸化物及びその熔融体の化学種分析	110
(23)	磁性材料の磁気特性と破壊挙動に関する研究	114
(24)	相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発	125
(25)	数値計画法を応用した経済性解析手法の開発	132
(26)	Fe-Cu, HOPGの電子線照射効果の陽電子消滅寿命測定	137
(27)	光陰極電子銃による高輝度電子ビームの研究	140
(28)	合金元素のスリッパ挙動に及ぼす影響	143
(29)	核変換ガス原子の効果に関する研究	148

2. 核燃料サイクル関係

(1) 金属表面における放射線分解反応と腐食	151
(2) ランタニド・アクチニド化合物における電子状態の第一原理計算	155
(3) 先進的再処理プロセスに整合する溶媒抽出分離プロセスの検討	160
(4) 乾式分離プロセスの研究	166
(5) 白色光レーザーによる粒子のリアルタイム3次元計測と評価	170
(6) 光核反応における中性子計測法の開発	173
(7) バンド計算による f および d 電子系物質の物性に関する研究	176
(8) フッ素系潤滑油の超臨界水による分解に関する研究	178
(9) 2次元データ集積装置を用いる γ - γ 同時計測法による放射能絶対測定 of 検討	184

3. 環境技術関係

(1) 地下水流動の総合調査・解析システムの構築	189
(2) クロスホール試験の解析法の開発に関する研究	193
(3) 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	196
(4) 岩盤内の浸透特性の計測法に関する研究	202
(5) コロイドイオン-岩石3相系相互作用メカニズムの解明	221
(6) 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	228
ー亀裂モデルの信頼性評価手法の開発ー	
(7) 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	231
(8) 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	233
(9) 均質化法による緩衝材のミクロ・マクロ解析	235
(10) 分子動力学法による緩衝材のミクロ挙動解析	241
(11) 岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの実験的・解析的研究	248

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題一覧(1/6)

【高速増殖炉関係】

-----平成11年度終了した研究協力課題

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	研 究 協力形態	大 学 側 研究者名	備 考
1. 高密度比気液二相流に関する基礎研究 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	大洗 安工部 炉安Gr	飛田吉春 小西賢介 鈴木 徹	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 より実施し 平成11年度 で終了
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	大洗 安工部 機安Gr	永江 勇二	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 より実施し 平成11年度 で終了
3. 中性子ビーム/炉に関する研究(Ⅰ) 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 北海道大学大学院 工学研究科 量子材料工学専攻 他	平成10年度 より実施し 平成11年度 で終了
4. 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/ラマン分光を用いたPPHsに 対する基礎研究	大洗 照射センター 実験炉部 技術課	伊藤 和寛 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 より実施し 平成11年度 で終了
5. 炉心槽内流速分布測定への超音波 流速計の適用性評価 粒子画像流速測定法による2次元 流速場測定との比較	大洗 安工部 炉工Gr	上出英樹 A. Tokuhito 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 より実施し 平成11年度 で終了
6. 高純度鉄基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 より実施し 平成11年度 で終了
7. 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 より実施し 平成11年度 で終了
8. 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 燃料部 MMS	赤坂尚昭 吉武清光	共同研究 研 究 生	大貫 聡明 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 より実施し 平成11年度 で終了
9. 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 研 究 生	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 より実施し 平成11年度 で終了
10. 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 FBRGr	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 他	平成10年度 より実施し 平成11年度 で終了

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題一覧(2/6)

【高速増殖炉関係】

平成11年度終了した研究協力課題

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	研 究 協力形態	大 学 側 研究者名	備 考
11. 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 研 究 生	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 より実施中
12. 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	山口 彰 飯田 将雄 岡野 靖	共同研究	越塚 誠一 助教授 東京大学大学院 工学系研究科 原子核工学専攻 他	平成10年度 より実施中
13. 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	越塚 誠一 助教授 東京大学大学院 工学系研究科 原子核工学専攻 他	平成10年度 より実施中
14. 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 より実施中
15. 配管系サーマルストラクチャの乱流特性に関する基礎研究 (1) 配管合流領域における複雑乱流場の流動特性に関する研究 (2) 配管合流領域における乱流混合メカニズムの基礎研究	大洗システム部 熱流体Gr	村松 壽晴	共同研究 共同研究	教授 須藤 浩三 広島大学 工学部第一類 他 教授 戸田 三朗 東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻 他	平成11年度 より実施中 平成11年度 より実施中
16. FBR冷却系における流体物性変化を伴う流動現象に関する研究 同上-物性変化を伴う流動現象モデル-	大洗システム部 熱流体Gr	山口 彰 飯田 将雄 高田 孝	共同研究	助教授 岡本孝司 東京大学大学院 工学系研究科 原子核工学専攻 他	平成11年度 より実施中
17. 液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究(Ⅱ) ナトリウムの沸騰伝熱特性に関する研究	大洗システム部 熱流体Gr	堺 公明	共同研究	教授 塩津 正博 京都大学大学院 エネルギー科学研究科 エネルギー応用専攻 他	平成11年度 より実施中
18. 形状記憶合金を利用した炉心変形模擬試験法の研究 形状記憶合金の機械的特性モデル化	大洗システム部 構材Gr	月森 和之 堀切 守人 (機安Gr)	共同研究	教授 直井 久 法政大学 工学部 機械工学科 他	平成11年度 より実施中

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題一覧(3/6)

【高速増殖炉関係】

-----平成11年度終了した研究協力課題

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	研 究 協 力 形 態	大 学 側 研 究 者 名	備 考
19. 移動熱荷重と減肉現象を受ける材料の変形挙動 熱荷重と材料変形の連成場に関する研究	大洗 システム部 F B R Gr	一宮 正和	共同研究	教授 酒井 謙 横浜国立大学 教育人間科学部	平成11年度 より実施中
20. ハリウム化合物の熱力学特性変化に関する基礎的研究 NaFe複合酸化物の化学熱力学特性変化に関する基礎的研究	大洗 技開部 機安Gr	青砥 紀身 上野 文義 古川 智弘	共同研究	教授 山脇 道夫 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11年度 より実施中
21. 高温高腐食性溶融体の構造解析に関する研究 ラマン分光法による金属ナトリウムを起源とする高温高腐食性酸化物及びその溶融体の化学種分析	大洗 技開部 機安Gr	上野 文義	客員研究員	助教授 大島純和 新潟大学大学院 自然科学研究科	平成11年度 より実施中
22. 鉄鋼材料におけるき裂発生以前の疲労損傷検出技術の研究 磁性材料の磁気特性と破壊挙動に関する研究	大洗 技開部 機安Gr	青砥 紀身 加藤 章一	客員研究員	教授 宮 健三 東京大学大学院 工学系研究科 環境工学研究センター 他	平成11年度 より実施中
23. 多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに関する研究 相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発	大洗 技開部 炉安Gr	近藤 悟 飛田 吉春 山野 秀将 鈴木 徹	共同研究	教授 福田 研二 九州大学大学院 工学研究科 環境システム工学研究センター 他	平成11年度 より実施中
24. ナトリウム利用炉材の総合評価手法に関する研究 数理計画法を応用した経済性解析手法の開発	大洗 システム部 サイクルGr	平尾 和則 小野 清 小藤 博英	共同研究	講師 大森 良太 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11年度 より実施中
25. 原子力関連材料の電子線照射効果に関する基礎的研究 Fe-Cu HOPGの電子線照射効果の陽電子消滅寿命測定	大洗 システム部 ビームGr	長谷川 信 遠山 伸一 平野耕一郎	共同研究	教授 蔵元 英一 九州大学 応用力学研究所 他	平成11年度 より実施し 平成11年度 で終了
26. 高品質・高輝度電子ビームの研究 光陰極電子銃による高輝度電子ビームの研究	大洗 システム部 ビームGr	長谷川 信 野村 昌弘 山崎 良雄	共同研究	教授 望月 孝晏 姫路工業大学 高度産業科学技術 研究所 他	平成11年度 より実施し 平成11年度 で終了
27. 中性子照射したオーステナイト鋼の基礎物性に関する研究 合金元素のミグレーション挙動に及ぼす影響	大洗 照射センター 燃材部 MMS	堂野前貴子 山県 一郎 赤坂 尚昭	共同研究	教授 松井 秀樹 東北大学 金属材料研究所 他	平成11年度 より実施中
28. 不活性母材用ミックス材の照射効果に関する研究 核変換ガス原子の効果に関する研究	大洗 システム部 燃材Gr	鶴飼 重治 小野瀬庄二 (MMS)	共同研究	助教授 四竜樹男 東北大学 金属材料研究所 環境材料研究センター 他	平成11年度 より実施中

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題一覧(4/6)

【核燃料サイクル関係】

平成11年度終了した研究協力課題

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	研 究 協 力 形 態	大 学 側 研 究 者 名	備 考
1. 電子線を用いた放射線材料照射の基礎研究 金属表面における放射線分解反応と腐食	大洗システム部 ビームGr	田中 拓	共同研究	所長 藤井 晴彦 東京工業大学 原子炉工学研究所 他	平成11年度より実施し 平成11年度で終了
2. 先進的再処理技術開発における量子化学的研究 リチウム・フッ素化合物における電子状態の第一原理計算	東海環境センター 先進リサイクル部 先進再処理Gr	小田 好博	共同研究	教授 足立 裕彦 京都大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 他	平成11年度より実施中
3. 先進的再処理プロセスの安定性に関する研究 先進的再処理プロセスに整合する溶媒抽出分離プロセスの検討	東海環境センター 先進リサイクル部 先進再処理Gr	小山 智造 野村 和則	共同研究	教授 山本 一良 名古屋大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻 他	平成11年度より実施中
4. 統合型乾式再処理プロセス研究 乾式分離プロセスの研究	東海環境センター 先進リサイクル部 乾式Gr	明珍 宗孝	共同研究	教授 岩瀬 正則 京都大学大学院 工学研究科 工学専攻 他	平成11年度より実施中
5. バイパック燃料の粒子評価方法に関する基礎研究 白色レーザーによる粒子のリアルタイム3次元計測と評価	東海環境センター 先進リサイクル部 プル燃Gr	鈴木 政治	共同研究	教授 藤井 寛一 茨城大学 工学部 応用通信工学科 他	平成11年度より実施中
6. 加速器を利用した核特性に関する研究 光核反応における中性子計測法の開発	東海環境センター 先進リサイクル部 解析評価Gr	馬場 務 原田 秀郎 中村 詔司 古高 和植	共同研究	教授 笠木治郎太 東北大学大学院 理学研究科 原子核物理学専攻 他	平成11年度より実施中
7. 計算科学的手法による物性研究 バンド計算によるfおよびd電子系物質の物性に関する研究	東海環境センター 先進リサイクル部 解析評価Gr	馬場 務 原田 秀郎 中村 雅弘 手島 正吾	共同研究	教授 浜田 典昭 東京理科大学 理工学部 物理学専攻 他	平成11年度より実施中
8. 難分解性廃棄物の超臨界水酸化分解に関する基礎研究 フッ素系潤滑油の超臨界水による分解に関する研究	東海環境センター 環境保全部 技術開発Gr	佐々木紀樹	共同研究	教授 新井 邦夫 東北大学大学院 工学研究科 化学工学専攻 他	平成11年度より実施中
9. 内部被ばく線量評価高度化に係る共同研究 2次元データ集積装置を用いるγ-γ同時計測法による放射能絶対測定法の検討	東海安全管理部 線量計測課	百瀬 琢磨 田崎 隆	共同研究	教授 宮原 洋 名古屋大学 医学部 保健学科 他	平成11年度より実施中

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題一覧（5／6）

【環境技術関係】

-----平成11年度終了した研究協力課題

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	研 究 協 力 形 態	大 学 側 研 究 者 名	備 考
1. 地下水流動調査研究 地下水流動の総合調査・解析システムの構築	東濃 地層科学研究 Gr	三枝博光 中野勝志	客員研究員	渡辺 邦夫 教授 埼玉大学大学院 理工学研究科 生物環境科学専攻	平成8年度 より実施し 平成11年度 で終了
2. 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 地層科学研究 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 環境デザイン工学科 他	平成8年度 より実施中
3. 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 長柄収一	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 より実施し 平成11年度 で終了
4. 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 処分研究Gr	藤田朝雄 千々松正和 菊池広人	共同研究	西垣 誠 教授 岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科 他	平成10年度 より実施中
5. 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	東海 環境センター 処分研究部 処分研究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 システム量子工学専攻 他	平成10年度 より実施中
6. 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 内田 雅大	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 より実施中
7. 深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究 (1) 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 (2) 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	東濃 地層科学研究 Gr	岩月輝希	共同研究 研 究 生 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 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 より実施し 平成11年度 で終了 平成10年度 より実施し 平成11年度 で終了

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究協力課題一覧(6/6)

【環境技術関係】

平成11年度終了した研究協力課題

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	研 究 協 力 形 態	大 学 側 研 究 者 名	備 考
8. 緩衝材特性評価モデルの高度化に関する基礎研究 (1) 均質化法による緩衝材のミクロ・マクロ解析	東海環境センター 処分研究部 処分利用Gr	柴田 雅博 上野 健一 (総研Gr) 佐藤 治夫 鈴木 寛 (総研Gr) 藤島 敦	共同研究	助教授 市川康明 名古屋大学大学院 工学研究科 地圏環境工学専攻	平成11年度より実施中
(2) 分子動力学法による緩衝材のミクロ挙動解析			共同研究	教授 河村 雄行 東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻	平成11年度より実施中
9. 単一割れ目中の水理・物質移行に関する研究に関する研究 岩盤不連続面の力学・透水性の 実験的・解析的研究	東海環境センター 処分研究部 システム解析Gr	内田 雅大 赤堀 邦晃 畑中耕一郎	共同研究	教授 江崎 哲郎 九州大学大学院 工学研究科 環境システム科学センター 他	平成11年度より実施中

Ⅱ 先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告

1. 高速増殖炉関係

先行基礎工学研究に関する平成 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		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 高速炉安全工学 Gr 飛田吉春、小西賢介、鈴木 徹		
研 究 協 力 実 施 場 所	京都大学原子炉実験所, 日本原子力研究所 東海研究所 機構 大洗工学センター 高速炉安全性第 4 試験施設		
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 11 年 9 月 30 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 本研究は、高速炉の炉心損傷事故時に炉心で形成される燃料-スチール混合プールの沸騰挙動を解明するための基礎研究であり、炉心プールを模擬した高密度流体（熔融金属）を含む気液二相流を可視化・計測することで、その流動特性を解明することを目的とする。			
【研究内容（概要）】 熔融した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・計測を行って、高密度比気液二相流の気泡形状、動態、ボイド率および液相の速度分布などの基礎データを取得するとともに、同データを用いてサイクル機構の SIMMER-III コードのモデル検証・改良等を行うものである。			
【使用主要施設】 京都大学原子炉実験所 日本原子力研究所			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 7、8 年度には、熔融金属内の気泡形状を模擬した空間を有する固体試料（鉛）を用いて、中性子ラジオグラフィによる可視化実験を行い、計測性能を確認した。なお、中性子ラジオグラフィ実験は、日本原子力研究所 JRR-3M 熱中性子ラジオグラフィ設備（TNRF-2）を利用して実施した。平成 9 年度には、SIT 管カメラによる時間平均ボイド率の計測を中心に研究を進めた。実験結果から、高密度比気液二相プールのボイド率評価には、Kataoka-Ishii の式が適用できることがわかった。平成 10 年度は、高密度比気液二相流の詳細構造を明らかにするためダウンカメラを設けた実験を行った。また、金カドミウム合金のトレーサ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。平成 10 年度は、金カドミウムトレーサを用いた液相速度分布の計測を中心に研究を進め、ボイド率評価に用いていた Σ -スケーリング法を応用した画像処理法によって PIV（Particle Image Velocimetry）法に適したトレーサ画像が得られること、および良好な速度計測が可能であることを示した。

【研究成果（当該年度）】

1. 概 要

高速炉シビアアクシデント時に生じる高密度比気液二相プールの流動特性に関する基礎研究として、中性子ラジオグラフィによる窒素ガス-鉛ビスマス熔融金属二相流の可視化・計測を行い、以下の結果を得た。金カドミウムトレーサを熔融金属中に分散させ、液相の循環流を可視化し、PIV 処理により、液相速度分布を定量的に算出する方法について検討した。

2. 実 験

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。試験部は熔融炉心-スチールプールを模擬したアルミニウム製矩形容器（高さ 550mm、幅 100mm、試験部肉厚 5mm）であり、試験部の奥行きは、水力相当径の影響を調べるために、10、15、20、30mm の 4 種類変化させた。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。矩形容器外側には加熱用電気ヒータ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。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および溶融した鉛ビスマス（融点 397K）を用いた。熔融金属の温度計測は K 型シース熱電対により行った。ガス温度はガス流量計入口とガス噴射ノズルのプレナム内の 2 ヶ所で計測した。

実験は大気圧下で容器内温度を一定（423K または 473K）に保ち、窒素ガス流速を 0~30cm/s に変化させて行った。実験では、精度良くボイド率計測を行うため、トレーサを含まない状態で撮影を行い、その後、熔融金属中に金カドミウムトレーサを分散させて実験を行った。

Fig. 2 に中性ラジオグラフィ動画法の概念図を示す。実験は日本原子力研究所 JRR-3M において実施した。

3. 画像解析処理法

3.1 気泡画像とトレーサ画像の分離

中性子ラジオグラフィによって得られた原画像の一例を Fig. 3(a)に示す。この画像において、白い部分が気泡、灰色の部分が液相、黒い点がトレーサに対応する。しかし、 Σ -スケーリング法では、中性子は液相（ここでは鉛ビスマス）のみで減衰されるものとしているため、トレーサを含む画像に同様の方法を用いるとトレーサの周辺のボイド率は計算上、負の値になる。したがって、本研究では、空の試験部の画像、熔融金属を満たした試験部の画像およびトレーサを含む二相流画像から、ボイド率を計算し、ボイド率の正負により、気泡とトレーサを判別した。トレーサ画像は、ボイド率が負の部分を反転させ、正の部分をゼロとして画像の輝度値を計算した。得られた気泡画像とトレーサ画像の一例を Fig. 3(b)および(c)に示す。気泡とトレーサが良好に抽出できていることがわかる。したがって、以下の解析では、原画像に上記の処理を施した後、液相速度分布を計算した。

3.2 液相速度分布計測

上記の処理により得られたトレーサ画像から液相速度計測を行った。今回対象としたのは、500fps の中性子ラジオグラフィ高速度撮像法により得られた連続画像である。PIV 処理（ここでは濃度相関法）に用いる 2 時刻の画像の時間差は、流速に応じて、1/500s（k 番目と k+1 番目の画像）~4/500s（k 番目と k+4 番目の画像）の間で変化させた。マスクサイズ及びサーチ領域は、いずれも 20×20 ピクセルで行ったが、各々実験条件に合わせて適宜変化させた。

4. 実験結果と考察

Fig. 4(a)に、気相の見かけ流速 $j_g=1.0\text{cm/s}$ における瞬時ボイド率分布と液相速度分布の計算例を示す。図からわかるようにボイド周辺で複雑な循環流が生じていることがわかる。しかし、(1)ラジオグラフィ画像の画質が悪いこと、(2)トレーサ濃度が十分ではないこと、(3)定常的な流れではないことおよび(4)気泡周辺では3次元的な流れの影響が大きくなるために、相当量の誤ベクトルが含まれていることが考えられる。しかし、一般の誤ベクトル削除アルゴリズムは、定常的な流れを想定していることが多く、本実験において誤ベクトル削除を行うことは極めて難しい。そのため、比較的ランダムに現れる誤ベクトルを取り除きかつ、平均的な流れ場を調べるために250枚(0.5秒間)の瞬時的なベクトル線図を時間平均した。平均化する際には、各々の点で得られた相関係数を重み付けし、気泡周辺で得られた誤ベクトルを取り除いた。Fig. 4(b)は時間平均したボイド率分布およびベクトル線図である。この図からわかるようにボイド率の高い部分で上昇流が起り、周辺部で下向きに流れるといった試験部内の2次元的な対流の様子が明瞭にとらえられていることがわかる。また、本実験はプール体系であるので、各高さにおいて、液相の速度の断面平均では、ゼロとならなければならないが、図から計算結果は、ほぼ妥当と考えられる。

Fig. 5(a), (b)に、 $j_g=2.9, 8.9\text{cm/s}$ における時間平均のボイド率分布およびベクトル線図を表す。図から、気相流速が大きくなると、全体的に上昇流が目立って現れており、液体の物質収支を考えると妥当な計算結果ではないことがわかる。これは、ボイド率が大きくなると試験部内の液相が相対的に少なくなるため、トレーサ濃度が低くなることと気泡周辺の非定常かつ3次元的な流れの影響が大きくなるために、液相の速度計測に誤差が生じているためと考えられる。

5. まとめ

高速炉シビアアクシデント時の高密度比二相プール流動特性に関する基礎研究として、中性子ラジオグラフィを用いた窒素ガス-鉛ビスマス熔融金属二相流の可視化・計測に金カドミウムトレーサを適用し、ボイド率分布計測とともに液相速度分布を計測する手法を開発し、以下の結論を得た。

- 1) Σ -スケリング法を用いて気泡画像とトレーサ画像を分離できることを示した。
- 2) トレーサ画像から液相速度を気泡画像からボイド率分布を計測し、2次元的な対流の様子を観察することができた。
- 3) ボイド率が大きくなると気泡周辺の非定常な3次元的な流れの影響が大きくなるために計測誤差が大きくなるが、ボイド率が小さい場合には平均的な流れパターンを計測できることがわかった。

以上の処理により得られた液相速度分布は、高密度比気液二相流の現象の理解に貴重なデータベースとなるとともに、SIMMER-IIIコードの検証にも使用できると考えられる。

なお、本研究にトレーサとして使用した金カドミウム合金の作製については、神戸大学 工学部 竹中 信幸 助教授に御指導していただいた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) Hibiki T., *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 351 (1994) pp.423-435.
- 2) Hibiki T., *et al.*, Nucl. Eng. Des., Vol. 196 (2000) pp.233-245.
- 3) Ishii M., Argonne National Laboratory Report, ANL-77-47, (1977).
- 4) Kataoka I., Ishii M.: Int. J. Heat Mass Transf., Vol.30 (1987) pp.1927-1939.
- 5) Kondo S., *et al.*, Proc. Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant, IV, 40.5-1-40.5-11, Tokyo, Japan, (1992).
- 6) Mishima K., Hibiki T.: Nucl. Sci. Eng., Vol. 124 (1996) pp.327-338.
- 7) Mishima K., *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol.424 (1999) pp.229-234.
- 8) Nonaka N., *et al.*, Proc. Int. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant, Tokyo, Japan (1992).
- 9) Saito M., *et al.*, Proc. 6th Int. Conf. Nuclear Engineering, ICONE-6, San Diego, CA, USA (1998).
- 10) Takenaka N., *et al.*, Neutron Radiography. Vol.4. (ed. Barton J.P.), Gordon & Breach (1993) pp.355-362.
- 11) Takenaka N., *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 377 (1996) pp.156-160.
- 12) Umekawa, H., *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 424 (1999) pp.77-83.

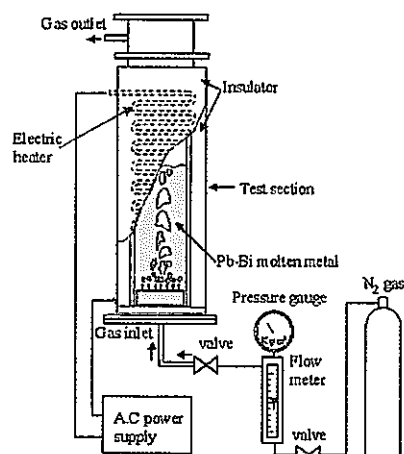


Fig. 1. Schematic of test section.

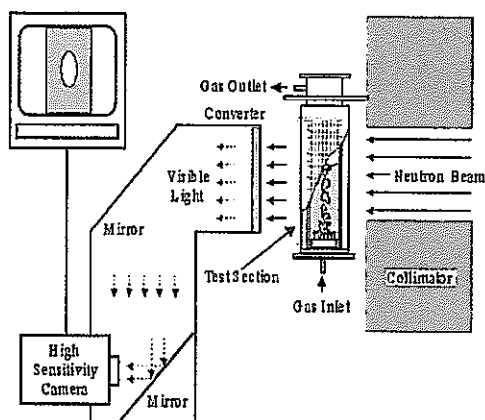
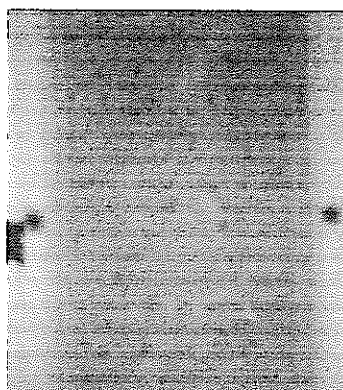
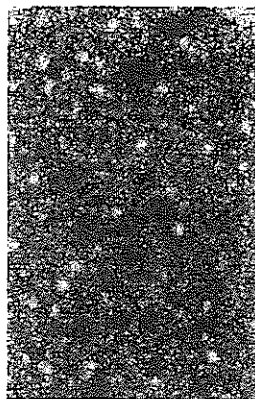


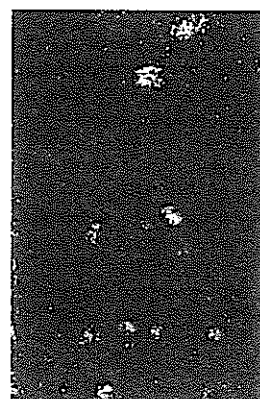
Fig. 2. Basic concept of neutron radiography dynamic imaging method.



(a) Original image

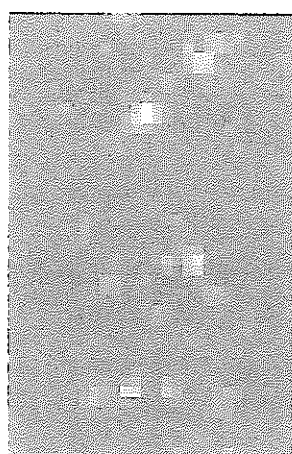


(b) tracer image

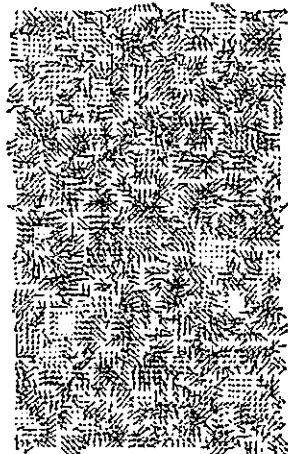


(c) void image

Fig. 3. Example of an original image, tracer image, and void image taken by high-frame rate neutron radiography. (frame rate: 500fps)

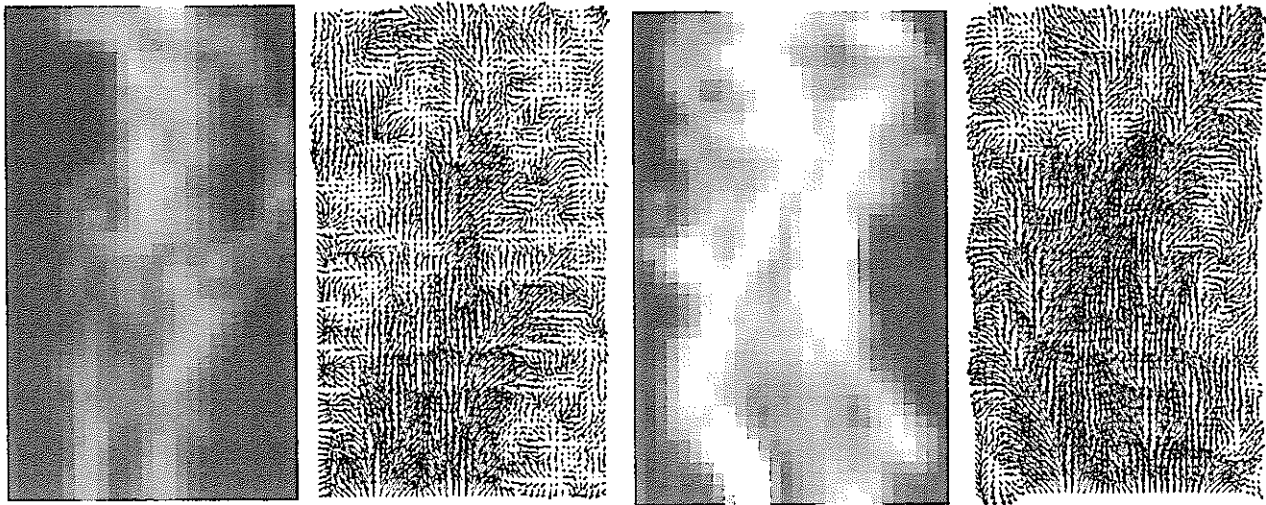


(a) Instantaneous void profile and vector map.



(b) Time averaged void profile and vector map.

Fig. 4. Example of calculated void profile and liquid velocity vector map. ($j_g = 1.0 \text{ cm/s}$)



(a) $j_g = 2.8$ cm/s

(b) $j_g = 8.9$ cm/s

Fig. 5. Time averaged void profile and liquid velocity vector map.

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本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】

齊藤、他 京都大学原子炉実験所第 32 回講演論文集、pp.275-280 (1998).

Mishima, K. *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., Vol.424, pp.229-234 (1998)

齊藤、他 日本混相流学会講演論文集、(1998)

齊藤、他 日本原子力学会講演論文集、pp.419 (1999)

Hibiki, T., *et al.*, Proc. 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference (1999)

Hibiki, T., *et al.*, Nuclear Engineering and Design, Vol.196, pp.233-245 (2000)

齊藤、他 第 28 回可視化情報シンポジウム発表予定(2000)

Saito, Y., *et al.*, to be presented in the 9th International Symposium on Flow Visualization (2000).

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	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			
大 学 側	高知工科大学 工学部 物質・環境システム工学科 教授 門馬義雄* 科学技術庁 金属材料技術研究所 力学機構研究部 主任研究官 山崎政義* [*客員研究員]		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器・構造安全工学 Gr 永江 勇二		
研 究 協 力 実 施 場 所	科学技術庁 金属材料技術研究所 力学機構研究部 機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第 1 試験室, 第 3 試験室		
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 11 年 4 月 1 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】			
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。			
【研究内容（概要）】			
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材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。			
【使用主要施設】			
金材技研 力学機構研究部 金属組織解析関連施設, 材料試験施設 サイクル機構 分析顕微鏡(SEM)及び試料作成装置, 損傷負荷試験機(単軸)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

304 および 316 ステンレス鋼の溶接継手に対して、最大荷重容量 50t の大型クリープ試験機により 823 および 873K で最長 30,000 時間までのクリープ試験を行った。その結果、溶接継手のひずみ分布は母材と溶接金属の相対的な強度差により支配されるが、溶接熱サイクル効果により、ステンレス鋼板内部の溶接金属は溶接継手の最終積層付近よりも硬化しており、クリープ抵抗の高いことを見いだした。また、全積層を含んだ厚板溶接継手試験片の低応力長時間側での破断位置は溶接金属部であることを明らかにした。

【研究成果】

316FR 鋼の溶接用に開発された 16Cr-8Ni-2Mo および共金系ワイヤーを用いて、ガスタングステンアーク溶接(GTAW)法により、板厚 50mm の 316FR 鋼厚板溶接継手を 2 種類製作した。母材および溶接ワイヤの化学組成を表 1 に示す。製作した溶接継手より、溶接線方向に板厚の 1/4 の位置から全溶接金属試験片を採取し、823 および 873K でクリープ試験を行い最長 37,000h までのクリープデータを取得した。それらのクリープ破断データから、クリープ破断特性を明らかにすると共に、クリープ破断した試験片平行部の組織観察を行い、クリープ破断特性と組織変化の関係について調べた。

1) クリープ破断挙動

母材(BM)，16Cr-8Ni-2Mo 系溶接金属(16-8-2WM) および共金系溶接金属(316LWM)の応力と破断時間の関係を図 1 に示す。この図中には Nishida¹⁾らの共金系溶接金属のデータも併せてプロットしている。16-8-2WM および 316LWM のクリープ強度はいずれの温度においても BM よりも小さい。また、16-8-2WM のクリープ破断強度は 316LWM より小さいが、低応力長時間側でその差は小さくなる。16-8-2WM および 316LWM の 823K におけるクリープ破断時間と破断延性の関係を BM の結果と併せて図 2 に示す。なお、316LWM の短時間側については Nishida¹⁾らのデータを引用している。溶接金属の破断伸びは時間の経過と共に低下する傾向にある。また、16-8-2WM のクリープ破断伸びは 316LWM よりもいずれの時間においても大きい(図 2)。以上の結果から、16-8-2WM のクリープ破断強度は高応力短時間側で 316LWM よりも小さいが、その差は低応力長時間側で少なくなる傾向にある。また、クリープ断延性は 16-8-2WM の方が 316LWM より優れていることがわかった。

2) 組織観察結果

823K でクリープ破断した 16-8-2WM 平行部の SEM 組織を図 3 に示す。311h 破断材では δ フェライト部に $1\mu\text{m}$ 以下の σ 相等の金属間化合物および M_{23}C_6 、 Cr_2N 等の析出が観察される。破断時間の増加とともに σ 相等の金属間化合物は粗大化しているものの M_{23}C_6 、 Cr_2N 等は粗大化していない。約 10,000h 破断材では金属間化合物と δ フェライト界面で割れが観察される。最長時間の 3,7092h 破断材では、さらに金属間化合物の粗大化が進み、割れも多数観察される。

一方、873K 破断材では短時間破断材においても金属間化合物界面での割れが観察され、その量は時間の増加と共に多くなる。また、金属間化合物は時間の増加と共に粗大化が進み、 δ 相が少なくなっていることがわかる(図 4)。

823K における 16-8-2WM および 316LWM クリープ破断材平行部の SEM 組織を図 5 に示す。16-8-2WM の σ 相の粗大化の程度は 316LWM よりも小さく、 σ 相界面割れの数も少ない。これは、16-8-2WM 中の δ フェライトの Cr 量が 316WM よりも少ないため、 σ 相の粗大化が遅くなったためであると考えられる。以上の組織観察結果から、溶接金属の 823K での低応力長時間および 873K では δ フェライト中に析出した σ 相界面に発生する割れがクリープ破壊の起点となることが明らかとなった。

(3) δ フェライト量の変化

823K で破断した 16-8-2WM 平行部の残留 δ フェライト量は試験前と比較して減少するが、その量はわずかである、しかし 873K では、短時間側で急激に減少し、その後、緩やかな減少傾向を示す。また、いずれの温度においても 16-8-2WM の残留 δ フェライト量は 316LWM よりも多い。(図 6)

(4) 析出物量の変化

溶接金属のクリープ破断材平行部の析出物量は時間と共に増加し、その量は 823K よりも 873K の方が多い。また、16-8-2WM の析出量はいずれの温度、時間においても 316LWM よりも少ない。析出物の変化は図 7 に示した残留 δ フェライト量の変化と良く対応して、 δ フェライト量が時間の経過と共に減少するのに伴い、析出量は増加することが明かとなった。

16Cr-8Ni-2Mo 系溶接金属について、クリープ破断時間の増加に伴う析出量の予測を行うために、析出量および応力とクリープ破断時間の関係を調べた。図 8 は 16-8-2WM のクリープ破断材平行部の析出量の結果およびクリープ破断応力について、クリープ破断時間を Larson-Miller パラメータ、 $LMP=T(\log t_R+C)$ 、で整理した結果を示したものである。16-8-2WM の析出量と Larson-Miller パラメータ値は直線関係にあることが観察される。図 8 に示した 16-8-2WM の析出量(P)と Larson-Miller パラメータの関係は次式で表すことができる。

$$P = A(LMP) - G \quad (1)$$

ここで、 T は試験温度 (K)、 t_R は破断時間 (h)、 $C=20$: 定数である。

また、 A 、 G は定数であり最小二乗法で決定すると $A=1.583E-3$ 、 $G=29.1167$ である ($R^2=0.95$)。この式から 16Cr-8Ni-2Mo 系溶接金属の析出量の予測が可能になる。この式により 16-8-2WM の 823K における、100,000 時間の析出量を予測すると P の値は 約 3.5 となる。

同様に、16-8-2WM のクリープ破断応力(σ)と Larson-Miller パラメータの関係は次式で表すことができる。

$$LMP=b_1+b_2(\log \sigma) \quad (2)$$

ここで、 b_1 、 b_2 は定数であり $b_1=4.2996382E04$ 、 $b_2=-9.614626E03$ である ($R^2=0.93$)。この式から 16-8-2WM の 823K における、100,000 時間破断応力 σ は約 215MPa と予測することができる。以上のことから、温度 823K、応力 215MPa の条件において 100,000 時間でクリープ破断する 16Cr-8Ni-2Mo 系溶接金属破断材の析出量は約 3.5%と予測できる。

(5) まとめ

溶接材料の異なる 2 種類のガスタングテンアーク溶接継手について、550℃と 600℃で最長約 3 万 7 千時間までのクリープ試験を行い、 δ フェライトと粒界析出物の量を測定した。 δ フェライト量は時間と共に減少し、 σ 相を中心とする析出物量は増加することがわかった。析出物量を面積率で表すと、それは Larson-Miller による時間・温度パラメータで直線関係にあることが明らかとなった。この実験式から任意の温度・応力・時間の析出物量を予測できることが可能となった。

- 1) Nishida, T., Ueta, M., Sukekawa, M., Hirayama, H. and Asada, Y.: ASME PVP, 262(1993), 75.
(図参考文献 3) に対応)

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

平成 11 年度をもって、本研究は終了する。

【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.
Hongo et al., Progress in Mechanical Behaviour of Materials, ICM8, (1999) 629.

表 1 母材およびワイヤの化学成分 (mass %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
Base metal	0.009	0.58	0.84	0.026	0.002	11.13	16.89	2.25	0.070
316L Wire	0.012	0.36	1.30	0.022	0.003	11.10	18.33	2.30	0.121
16-8-2 Wire	0.012	0.56	1.31	0.022	0.001	8.08	16.22	1.81	0.117

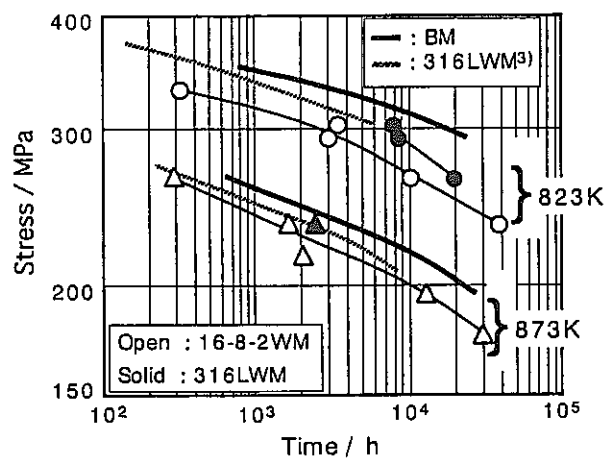


図 1 母材および溶接金属の応力と破断時間の関係

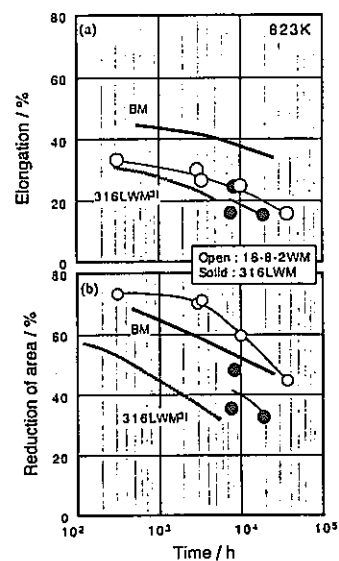


図 2 母材および溶接金属のクリープ破断伸びと破断時間の関係

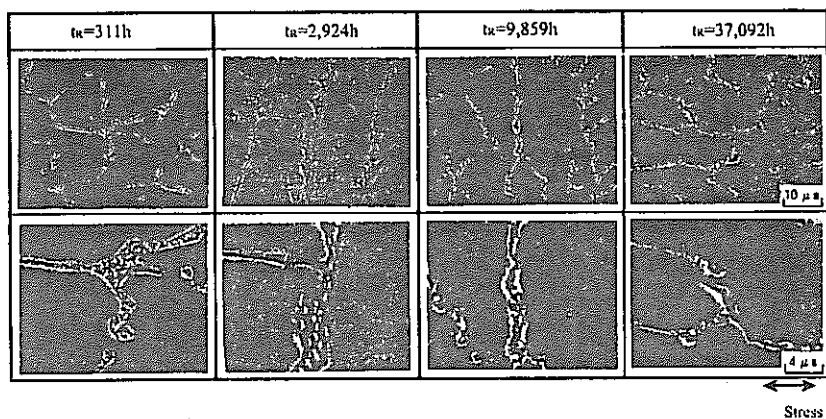


図 3 823K における 16-8-2WM クリープ破断材平行部の SEM 組織

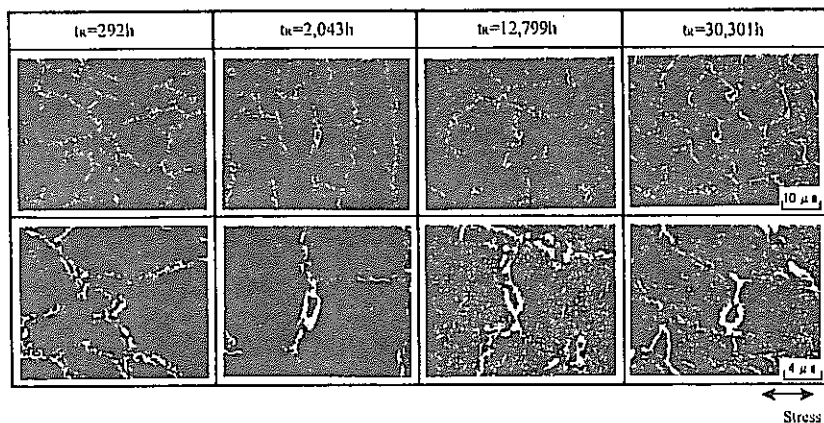


図 4 873K における 16-8-2WM クリープ破断材平行部の SEM 組織

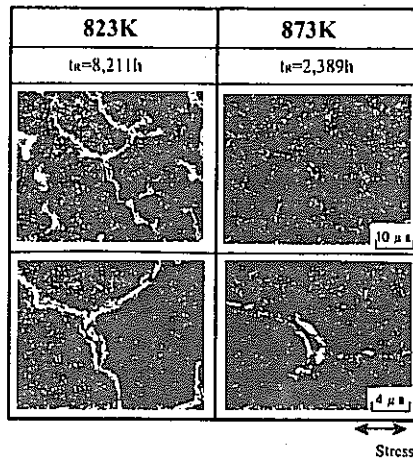


図5 16-8-2WM および 316LWM クリープ破断材平行部の SEM 組織

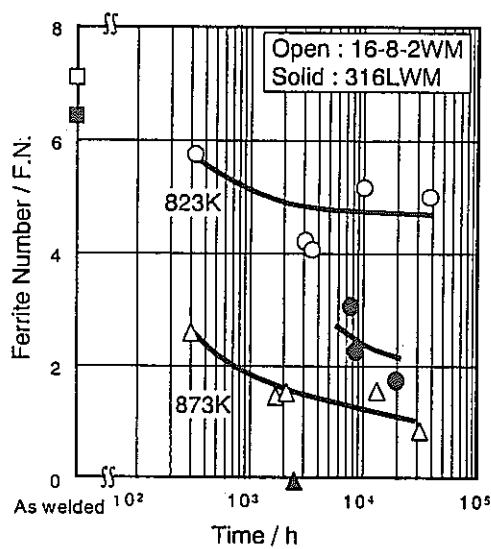


図6 16-8-2WM および 316LWM クリープ破断材平行部の δ フェライト量変化

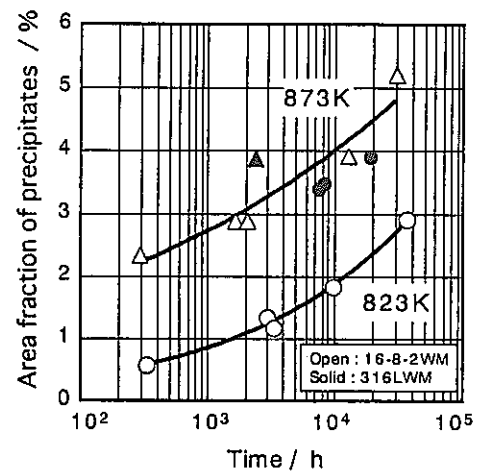


図7 16-8-2WM および 316LWM クリープ破断材平行部の析出量変化

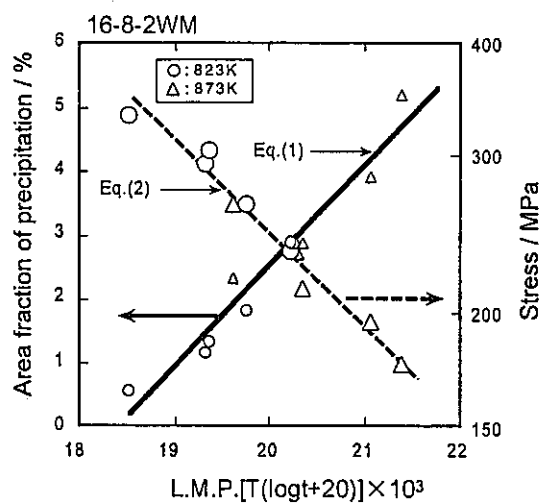


図8 析出量のラーソンミラー指数表示

先行基礎工学研究に関する平成 11 年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子ビームプローブに関する研究 (Ⅱ)		
研究協力課題	中性子ビーム制御システムの開発		
研究者所属、氏名			
大 学 側	北海道大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 鬼柳善明, 加美山隆, 平賀富士夫, 小川雪郎, 廣田智章, 小池元		
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	北海道大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 鬼柳研究室 機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第 3 試験室		
通算研究期間 (予定)	平成 10 年 12 月 ~ 平成 12 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 9 月 3 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 中性子ビームを制御（ビームの方向の変更、収束）する事により、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事を企画している。			
【研究内容（概要）】 中性子ビーム制御の方法としては、大きく分けて次の三つのものが考えられる。一つは中性子ガイド管による全反射を利用してビームの向きを変えるもの、二つ目は磁場を利用して中性子を収束させるもの、三つ目はキャピラリーファイバー（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）をおこなう。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事を行う。これは、非破壊検査、微量分析に用いる。			
【使用主要施設】 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			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

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

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

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

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

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

キャピラリー管については、簡単な数値シミュレーションを行った。また、直管、曲管の透過スペクトル測定も行ったが、バックグラウンドやアライメント調整を正確に行う必要があることが分かり、再実験が必要と結論付けられた。

平成 10 年度は、マルチキャピラリーファイバーの中性子透過特性の再測定および計算との比較を行った。キャピラリーの直径が 10 と 15 μm 、曲率が 2.5、6、 ∞ （直管）について、波長依存の中性子透過率を求めた。その結果、長波長では、中性子の透過率はキャピラリーの径が大きい方が高いこと、直管でも短波長側で透過率が落ちていて、理論解析と合わないことが示された。これは、ファイバーを設置したときに、 μm オーダーで歪んでいることが原因ではないかと考えられる。このことは次年度以降の課題となった。

また、磁気レンズによる中性子収束に関しては、磁気レンズ内の反射の影響を調べ、理想状態では実験で得られたよりも大きな強度が得られることがシミュレーションから示された。現在使われているマグネットは孔径が 10mm であるが、その径を 20mm にすることで収束特性が約 10 倍良くなることも示された。

【研究成果（当該年度）】

1. マルチキャピラリーファイバー

1.1 ファイバーの歪みの透過特性に対する影響

図 1 に前年度行ったマルチキャピラリーファイバーの透過実験の結果から求めた見かけの反射率の波長依存性を示す。波長が短いところで、キャピラリーの径によって反射率が大きく変化している。原理的には反射率は波長や径によっては変化しない筈である。従って、実験結果から反射率を求めるときに、考慮していないことがあることが考えられる。その一つとして、キャピラリー設置時の歪みが上げられる。実験では、キャピラリーファイバーを 30mm 間隔でアルミで支えるようになっている。このためファイバーが微妙にたわんでいることが予想される。この場合、曲げの力がかかっていない直管の方がゆがみ易いと考えられるので、実験から求めた反射率が直管の方が低くなっていることも定性的に説明できる。この考えで、どこまで説明できるかを直管の場合を例にとってシミュレーション計算を行っ

た。

図2に計算体系の概要を示す。中性子減速材から放出された中性子は6m離れたところに設置されているマルチキャピラリーファイバーに入射する。ファイバーから出たところで中性子を検出するようにする。キャピラリーファイバーの歪みについては、実験での設置の仕方にあわせて、半周期30mmとしてサインカーブで表した。振幅はパラメータとして振った。反射率Rは、臨界角以下では以前に得られた値 $R_0=0.96$ で一定とした。また、臨界角以上では次式で表される関数で反射率を計算した。ここで θ は入射角、 θ_c は臨界角、 λ は中性子波長である。

$$R=R_0 \left(1 - \left(1 - (\lambda \theta_c / \theta)^2 \right)^{1/2} / \left(1 + \left(1 - (\lambda \theta_c / \theta)^2 \right)^{1/2} \right)^2 \right)^2$$

図3にキャピラリー径が $10\mu\text{m}$ の場合の、また、図4に $15\mu\text{m}$ の場合の中性子透過率に関する計算結果を示す。歪みの振幅については夫々 $5, 10\mu\text{m}$ と $5, 10, 15\mu\text{m}$ である。歪みがない場合では、短波長でも中性子の透過率が高く、長波長の透過率と殆ど変わらないことが両方の径のファイバーで示された。しかし、歪みの振幅が大きくなるに従って短波長側の透過率が減少している。長波長領域の透過率は、波長に対してはほぼ一定となっている。歪みの振幅の影響に関しては、 $5\mu\text{m}$ が歪みがない場合よりも長波長領域の透過強度が強く、振幅がそれ以上になると強度が減衰していた。いずれのキャピラリー径においても、振幅が大きくなるに従って短波長側の強度が減衰して来ており、実線で示した実験結果の傾向を示している。今回の解析では実験結果を完全に再現するには至っていないが、それは実際の体系はもっと複雑な歪みを持っているためであると考えられる。その歪みを実測することは不可能であり、これ以上のシミュレーションは困難である。しかし、この解析から、キャピラリーファイバーが $10\mu\text{m}$ のオーダーの非常に小さな歪みでも短波長中性子の透過率は大きな影響を受けることが明らかとなった。

1.2 キャピラリー透過中性子空間分布シミュレーション三次元コードの作成

同じ開孔率でも、キャピラリーの径が大きい方が長波長中性子の透過率が高いことが実験・計算の両方の結果から明らかになった。このことは、透過率を上げるためにはより径の大きなキャピラリーを使えばよいことを示唆している。しかし、径を増やすことは、ビームの広がりも大きくすることを意味する。それがどれくらいになるかは、実験では簡単には測定できない。それで、三次元シミュレーションコードを作成し、透過率のキャピラリー径依存性とビームの広がりについて調べた。図5に径が $30\mu\text{m}$ のキャピラリーを透過してきた中性子のビームの広がりを、出口から50mmの位置でもとめたものを示す。図5(a)は2次元分布で、(b)はz方向の断面をしめす。強度はほぼ一様になっており、ビームの広がり半値幅で1mm以下となっている。このファイバーの径は1mmであり、キャピラリーからのビームの広がりを小さくしても、ファイバー全体としてのビームの広がりほぼこの大きさになると考えられる。従って、 $30\mu\text{m}$ でも十分この要求を満たせることが分かった。今後、種々の径のキャピラリーについて計算を進めるとともに、実際により太い径のものについて実験的に検討を行い、必要とされる波長の中性子にとって最適な径を明らかにしていく。最終的に波長と用途に合わせたファイバー収束器を製作する。

2. 磁場による中性子の収束

2.1 中性子収束特性に対する磁気レンズの歪みの影響

6 重極永久磁石中性子収束管（中性子レンズ管）の中性子ビーム収束実験において、実験でえられた収束強度は予測値のはば半分であった。この強度減は大きいと、その原因について検討した。原因として、中性子レンズ管の中にセットした磁気ユニットの位置のずれに伴う歪みが考えられる。それを調べるためレンズ管の歪みを測定した。結果を図6に示す。横軸は磁気レンズの長手方向の位置を、縦軸は歪みの大きさを示している。磁気ユニット間の反発力が働かない場合には、レンズ管の歪みは小さく、多少変動がある程度で場所による変化も少ない。しかし、磁気ユニットを入れた場合には、レンズ管が大きく歪んでいるのが分かった。この歪みをサインカーブで近似し、それによる収束特性の変化をシミュレーションした。この結果を実験と比較するために新たな測定も行った。数値シミュレーションで用いた、歪みの形は次式の通りである。

$$y(\text{mm})=A(\text{mm})\times\sin((n-1)\pi/B)$$

ここで、 n はユニットの番号で、ユニットは全部で40個ある。歪みの大きさとして A をパラメータとして振り、実験によって得られた透過強度と近くなる値を求めた。

図7、8、9に実験結果との比較を示す。横軸は中性子波長、縦軸は磁場による収束強度比（磁場ありの強度／磁場ありの強度）を示す。図7はレンズ管の幾何学的中心で測定したデータで、図8は1mm下、図9は2mm下の結果である。図7から分かるように歪みが無い場合の計算値は実験値の約2倍となっている。歪みを考慮した場合、強度比をかなり再現できている。図8では歪みがある場合も無い場合もほとんど強度比は同じであり、いずれも実験値に近いものになっている。これは、たまたま一致したに過ぎないと考えられる。図9は歪みが無い場合の計算では、強度比が大きく落ち込むのに対して、実験結果は全くその傾向を示していない。歪みを考慮した計算では、このような落ち込みが無くなり、実験値と極めて近い分布になっている。このように、磁気レンズのゆがみは中性子の収束特性に大きな影響を与えることが分かった。また、ここでは述べないが磁場が連続して変化する場合には、あまり大きな影響を与えないことも数値計算で分かった。今後は、さらに強力な超伝導マグネットなどによる収束が考えられるが、そのときの磁場の乱れも不連続にならないようにすることが大切である。

2.2 中性子収束・平行化実験

磁気レンズの凸レンズと凹レンズを組み合わせることによって、中性子の平行化、マイクロビーム化が可能である。このための実験体系の概要を図10に示す。二つのレンズの間に中性子のスピンの向きを変えるためのスピNFLリッパが必要となる。今回はシート型のスピNFLリッパを用いて実験を行った。図11にスピNFLリッパのOn、Offによる透過中性子の空間分布の変化を示す。図には計算結果も合わせてのせてあるが、実験結果は計算のような収束・平行化の効果が観測されなかった。中性子磁気レンズについては、その有効性が既に調べられているので、スピNFLリッパが原因であると考えられる。これに関して、現在、新しいタイプのフリッパを作製しており、再測定を行う予定である。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本課題での次年度以降への継続はない。しかし、中性子ビーム制御はより大きなプロジェクトとして全国組織で研究が続けられる。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・ Y. Kiyanagi, H. Nakagawa and T. Wakabayashi, J. , in press.
- ・ H.M. Shimizu, T. Oku, H. Sato, C. Otani, H. Kato, Y. Suda, H.Nakagawa, T. Kamiyama, Y. Kiyanagi and T.Wakabayashi : A Magnetic Cold Neutron Lends, Physica B, in press
- ・ Y. Kiyanagi, H. Nakagawa and T. Wakabayashi : Energy Dependence of Transmission through A Multi-Capillary Fiber, Physica B, in press
- ・ 廣田智章, "六重極磁場による中性子ビーム制御", 日本原子力学会北海道支部第 17 回研究発表会
- ・ 廣田智章、平賀富士夫、鬼柳善明、奥隆之、清水裕彦、若林利男, "収束中性子特性に及ぼす磁気レンズの歪みの影響", 日本原子力学会 2000 年春の年会

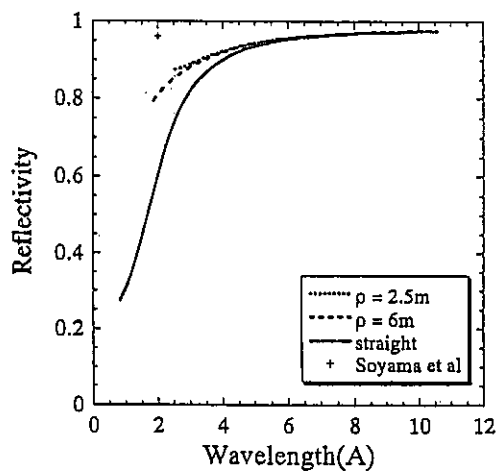


図 1 見かけの反射率

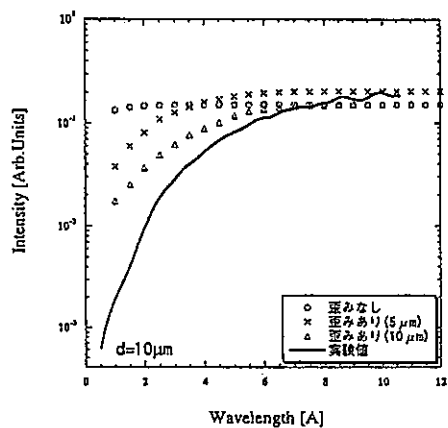


図 3 ファイバー歪みによる透過スペクトルの変化 ($10\mu\text{m}$)

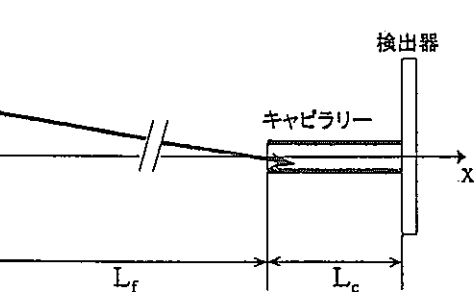


図 2 計算体系

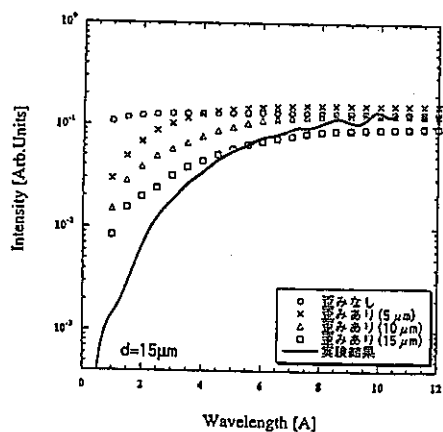


図 4 ファイバー歪みによる透過スペクトルの変化 ($15\mu\text{m}$)

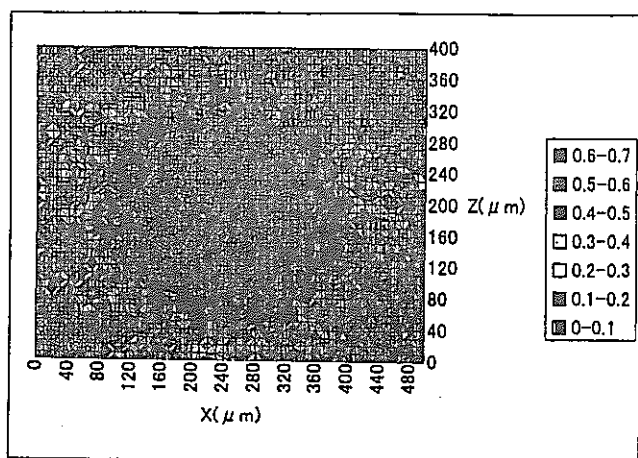


図 5-a キャピラリー透過中性子の空間分布

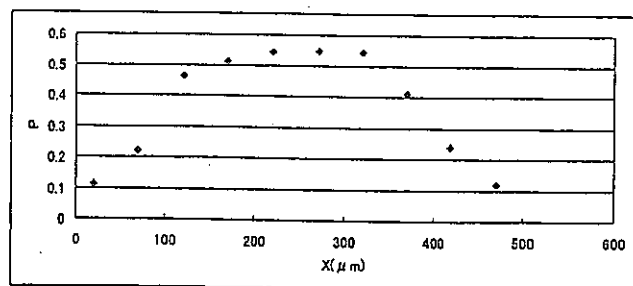


図 5-b キャピラリー透過中性子の空間分布 (断面, 出口から 50mm)

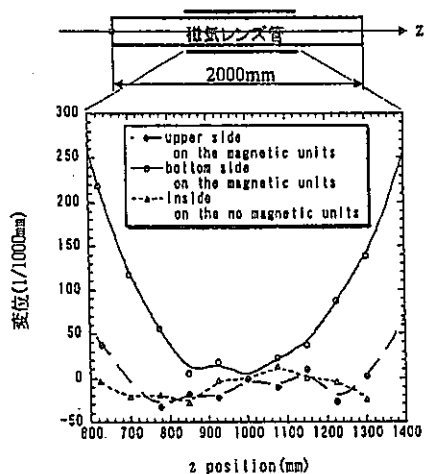


図 6 磁気レンズ管の歪み

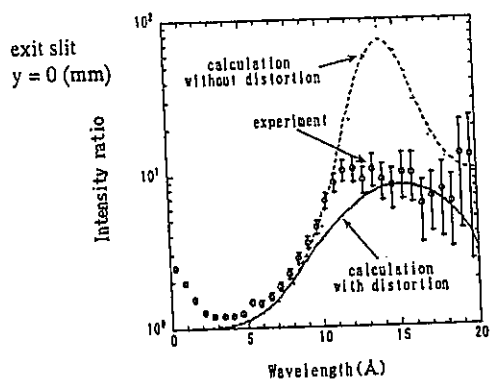


図 7 収束中性子強度比 ($y=0(\text{mm})$)

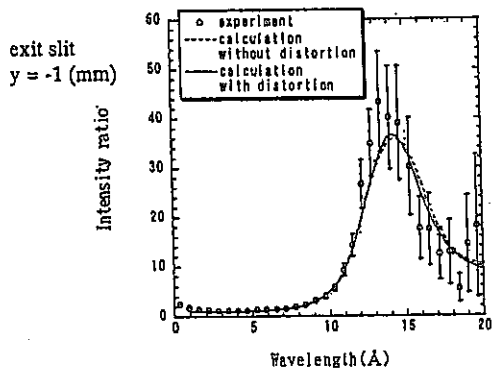


図 8 収束中性子強度比 ($y=-1(\text{mm})$)

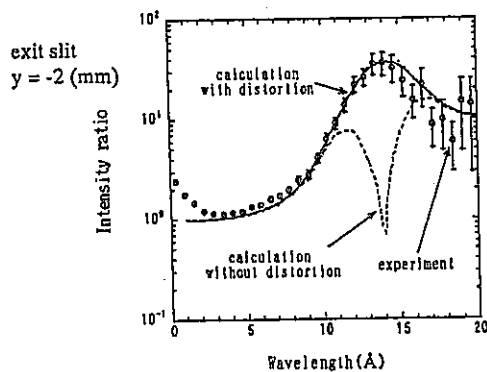


図 9 収束中性子強度比 ($y=-2(\text{mm})$)

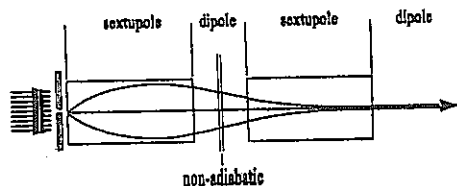


図 10 中性子平行化実験の概念図

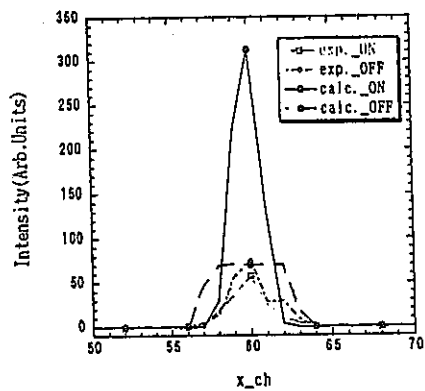


図 11 13Åのスピンフリップパー ON,OFF による空間分布

先行基礎工学研究に関する平成11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F Pガスモニタリングの基礎研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	名古屋大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻 教授 井口哲夫* 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 教授 中沢正治* 〔*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 伊藤和寛, 野瀬正一		
研 究 協 力 実 施 場 所	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 1 2 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 1 1 年 4 月 1 日 ~ 平成 1 2 年 3 月 3 1 日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】			
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F Pガスモニタリングに関する基礎研究を行う。			
【研究内容（概要）】			
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F Pガスモニタリングによる破損燃料検出法 (Failed Fuel Detection and Location: FFDL) の高精度化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。 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。			
【使用主要施設】			
東京大学大学院工学系研究科附属原子力研究施設 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研究施設 高速中性子源炉「弥生」			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

東京大学工学研究科原子力工学研究施設のレーザー共鳴イオン化質量分析(RIMS)システムを用いて、高速実験炉「常陽」から採取されたカバーガス試料中のFPガス(Kr, Xe)分析のための基礎及び実証試験を実施し、結果のとりまとめとともに、RIMSのFFDLへの適用性を評価した。本研究は、平成8年度に実験システムを立ち上げ、予備的な基礎実験から研究成果の見通しを得た後、平成9年度及び平成10年度前半にかけて、RIMSを用いたXe検出に関わる基本性能の検証と理論的評価を行った。それらの結果をもとに、平成10年度後半から、本格的に「常陽」カバーガス中に人工的に放出された微量Xe検出とその同位体比の分析実験を試み、期待通りの成果を得た。そこで、平成11年度は、Xe検出と同様の手順に従い、Kr検出に関わる基本性能の確認、および「常陽」カバーガス中のKr分析に対する実証実験を行った。以上のように、実験システムの現状性能で、FPガス分析への適用性を評価する一方、より検出感度を向上させるため、レーザー照射のイオン化領域内にFPガス原子を濃縮する工夫として、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、現在の実験システムの大幅な改造を要することが分かったため、平成10年度は、現システムの電極構造で、より実現の容易なパルス超音速分子線バルブ(PSV)を用いた局所的高圧ガス注入法の適用性を検討した。この検討結果を受けて、平成11年度は、現在の実験システムにPSVを装着し、基本特性およびその有効性を実験的に検証した。

【研究成果（当該年度）】

平成12年3月までの研究成果の概要をまとめる。

(1) Kr検出実験と基本性能評価

RIMSによるKr検出能を実験的に評価するため、Xe検出実験と同様に、天然組成100%の高純度KrガスとそれらをArで希釈した混合ガス（高速炉のカバーガスを模擬）を用いて、入射レーザー波長と出力、及びイオン化チェンバー内の圧力（気体の濃度）を変化させた時のイオン収量を測定した。Kr原子の共鳴イオン化スキームは、Xeと同じく、1波長の可視域レーザー光による2光子共鳴吸収と1光子イオン化を採用しているが、基底準位からのエネルギー差108.30 nmの中間準位 $5p[5/2]2$ を経る必要があるため、波長216.60nmのレーザー光を用いなければならない。その結果、本実験システムのレーザーでは発振効率が低く、最大レーザー出力はXeの共鳴波長の場合の1/10程度であったので、今回の実験では、Krに対する測定原理実証と予備的な検出能評価に留めた。

まず、基礎実験における主な結果として、イオン収量の入射レーザー波長依存性、即ち216.60 nmの時の共鳴的検出（ピーク半値幅 ~ 0.002 nm）、観測されたKr同位体組成比の文献値との一致（同位体シフト効果は無視可）などが確認された。

次に、イオン収量のレーザー出力依存性は、Xe実験に比べて測定範囲は狭いながら、図1に示されるように、同様の理論モデル計算で比較的良くフィッティングでき、その結果を外挿すると、レーザー出力密度が $\sim 3.0 \times 10^{11}$ W/cm²（ ~ 2 mJ/パルス相当）付近でイオン化が飽和すると推定された。従って、現在の共鳴イオン化率が $\sim 1\%$ 程度であるので、レーザー出力の増強により、理論的には約100倍までの著しい感度向上が見込まれる。また、図2に、Krイオン検出数と原子数密度との相関関係を示すが、両者はほぼ比例していることが分かる。一方、本実験システムのKrに対する検出限界は、Xeの場合と同様に、イオン検出数と原子数濃度を直線フィッティングし、その直線を外挿して、MCPにイオンが1個検出された時の濃度を求めると、レーザーパルス1ショット当たり ~ 6.66 ppmと見積もられた。

以上の結果を踏まえると、「常陽」カバーガス中に人工的に放出されたKr濃度は、 $\sim 10^{-2}$ ppmと見積もられるので、本実験システムでは、1個のKrイオン検出に対して、約700ショット（10Hzの繰り返し率で、約70秒）で可能と予想された。そこで、実際のカバーガス中に含まれる微量Krが検出可能であることを実証するため、約 3.0×10^{-5} torrの真空度を保ちながら、採取されたカバーガスを分析チェンバー内に導入し、Krの共鳴波長に同調された ~ 0.18 mJ/pulseのレーザーを打ち込んだ。

典型的な実験結果の一例として、図3に、参照用の天然組成Krと「常陽」採取カバーガス中のKrの質量スペクトルを重ねて示す。スペクトルパターンの比較から分かるように、天然組成Krでは、⁸²Kr（11.56%）と⁸³Kr（11.55%）の同位体比はほぼ同じであるが、「常陽」採取Krでは、両者の関係に差が生じている。これは、事前に提供されたKrガスの同位体比分析結果の傾向と一致しており、

実機カバーガス中の Kr 検出を実証できたと言える。ただし、これらの測定結果は、レーザーパルス 10000 ショット (1000 秒) 分の平均値であるが、本実験システムでは、Kr 検出において、レーザー出力が不足しているため、Xe 検出に比べると、 ^{78}Kr (0.354 %) や ^{80}Kr (2.27 %) の少数同位体について十分な計数統計の得られていないことが分かる。

(2) パルス超音速分子線バルブ (PSV) を用いた局所的高圧ガス注入法の適用性評価

RIMS-FFDL における検出限界向上の方策として、昨年度より、現在の実験システムの変更が少なく、実現の容易なパルス超音速分子線バルブ (PSV) を用いた局所的高圧ガス注入法の適用を検討してきた。後者の方式の適用性を実験的に検討した。

PSV は、定常的に気体試料をバルブ本体内に流しながら、トリガーにより電磁バルブをパルスのに作動させ、超音速の分子線パルスを発生させることができるが、本実験では、図 4 のような構成に変更された実験システムにおいて、3 種類の Xe 混合比 (1.0%, 0.1%, 0.01 %) の Ar/Xe 混合ガスを大気圧で PSV に供給し、レーザー光と同期をとって、分析チャンバー内へパルスのに打ち込んだ。PSV 使用時の Xe イオン収量について、まず、レーザー同期における遅延時間の影響を調べ、適切な遅延時間を設定した後、レーザー波長や出力の依存性、また Xe 濃度との相関性を実験的に評価した。

まず、図 5 に、本実験で得られた PSV 開放トリガーとレーザーパルス同期の遅延時間に対する Xe イオン収量の典型的な依存性を示す。図には、予備的ながら、流体力学に基づく数値計算により、分析チャンバー内に PSV で導入された気体の挙動、即ち、レーザー照射域における気体密度の時間変化のシミュレーション結果も併せて示してある。イオン収量の実験結果は、遅延時間 $\sim 200 \mu\text{s}$ でパルスのに立ち上がり、その後ダブルピークを形成しているが、気体密度のシミュレーション結果も、この傾向を比較的良く再現している。本来、気体密度の時間変化は、矩形パルス状になることが望ましいが、本実験システムでは、気体の進行方向を揃えるスキマーを使用していない上、PSV ノズルとレーザー照射域の距離が離れている (約 10 cm の距離) ため、分析チャンバーに放出された超音速自由噴流内で、気体原子間の速度の差が顕著に現れるようである。実際、流体力学に基づく気体挙動の数値シミュレーションにおいて、PSV ノズルとレーザー照射域が $\sim 1 \text{ cm}$ 程度の距離であると矩形パルス形状が保たれ、両者の距離が離れるにつれ、ダブルピークの形成とともに、後方のピーク幅が広がっていく傾向が得られた。また、図 5 の実験結果は、ダブルピーク後方に緩やかに尾を引いているが、真空排気系の能力が十分でないことと PSV ノズルが瞬時に閉まっていない可能性が考えられる。

次に、試料気体中の Xe 同位体濃度と検出されたイオン収量の相関関係について、PSV の使用/不使用の場合を比較した結果を、図 6 に示す。ここで、PSV のレーザー同期遅延時間は、Xe イオン収量が最大となる $\sim 400 \mu\text{s}$ に設定している。PSV を使用した場合も、Xe 同位体濃度とイオン収量の間には、ほぼ傾き ~ 1 の良好な比例関係があり、PSV を使用しない場合に比べて、検出効率 (または、検出限界濃度) が ~ 6 倍ほど向上していることが分かる。また、流体力学に基づく気体挙動の数値シミュレーションから、パルスピーク時の気体密度が、PSV ノズルとレーザー照射域の距離に対し、ほぼ逆二乗則に従うことが示されているので、両者をできるだけ近づけた配置で、分析チャンバーの設計改良を行うことにより、さらなる検出限界の向上が期待できる。

この他、PSV の効用として、レーザー波長依存性における共鳴ピークの先鋭化や質量スペクトルの分解能の向上も観測された。これらは、PSV を用いることで、試料気体原子の速度分布の分散が通常よりも抑制され、共鳴波長におけるドップラー拡がりの効果や共鳴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緩和されたためと思われる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究は、今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】

口頭発表 3 件

1. 荻田利幸、井口哲夫、瓜谷章、河原林順、渡辺賢一、青山卓史、野瀬正一、「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(3)」、日本原子力学会 1999 年 秋の大会、新潟工大、A54、(1999)。

2. 渡辺賢一、荻田利幸、渡邊武志、河原林順、瓜谷章、井口哲夫、原野英樹、野瀬正一、「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」

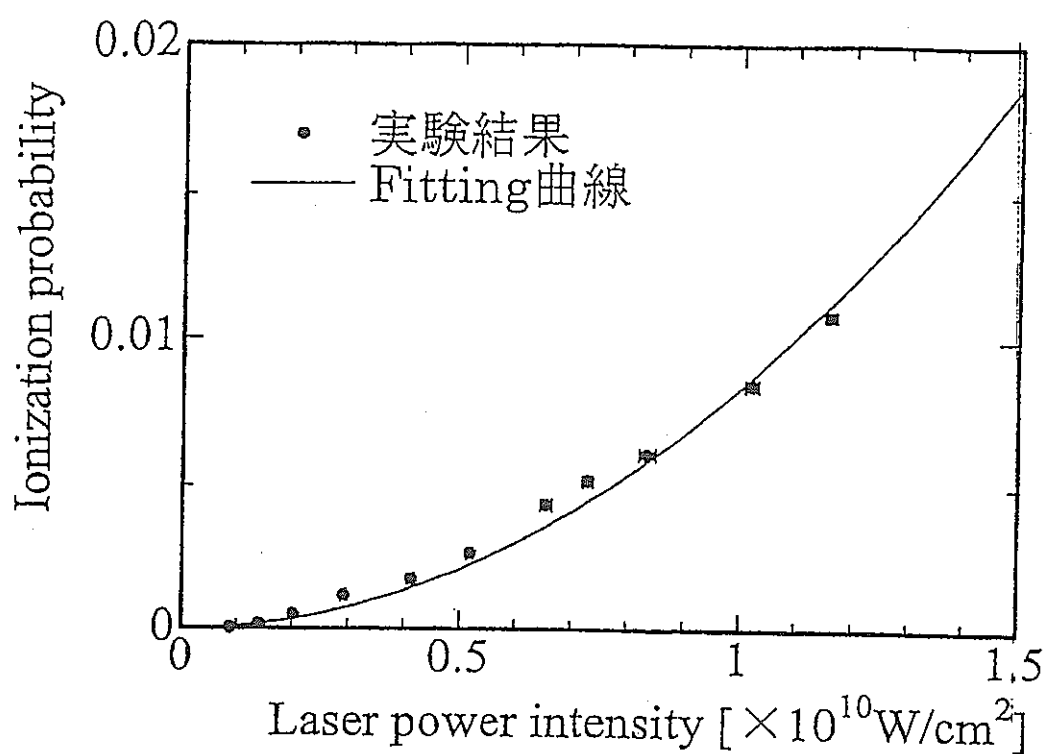
研究会「放射線検出器とその応用」(第 14 回)、平成 12 年 2 月、高エネルギー加速器研究機構、要旨論文集 (2000) 51-52.

3. 渡辺賢一、荻田利幸、渡邊武志、河原林順、瓜谷章、井口哲夫、原野英樹、野瀬正一、「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(4)」、日本原子力学会 2000 年 春の年会、愛媛大、L3、(2000)。

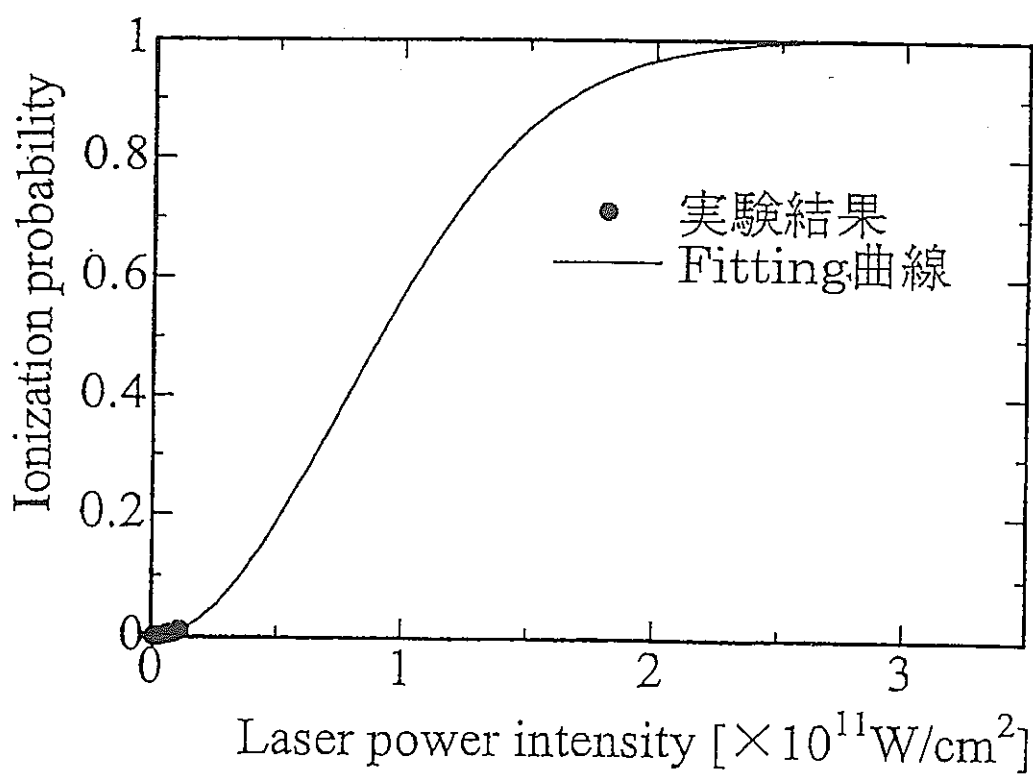
発表論文 2 件（予定を含む。）

1. K. Watanabe, T. Iguchi, T. Ogita, T. Watanabe, A. Uritani, J. Kawanabayashi, H. Harano and S. Nose, 'Development of Failed Fuel Detection and Location Technique using Resonance Ionization Mass Spectrometry: Improvement of the Detection Limit with Pulsed Supersonic Valve', Proc. 14 th W.S. on Radiation Detectors and Their Uses, KEK Proc., 00-8(2000), to be published.

2. K. Watanabe, T. Iguchi, T. Ogita, A. Uritani, H. Harano and S. Nose, 'Application of Resonance Ionization Mass Spectrometry to Failed Fuel Detection and Location Technique for Fast Reactors', J. Nucl. Sci. Technol.へ投稿予定。



(a) 低出力領域



(b) 高出力領域への外挿

図 1. Kr 共鳴イオン化率のレーザー出力依存性と理論モデルフィッティング

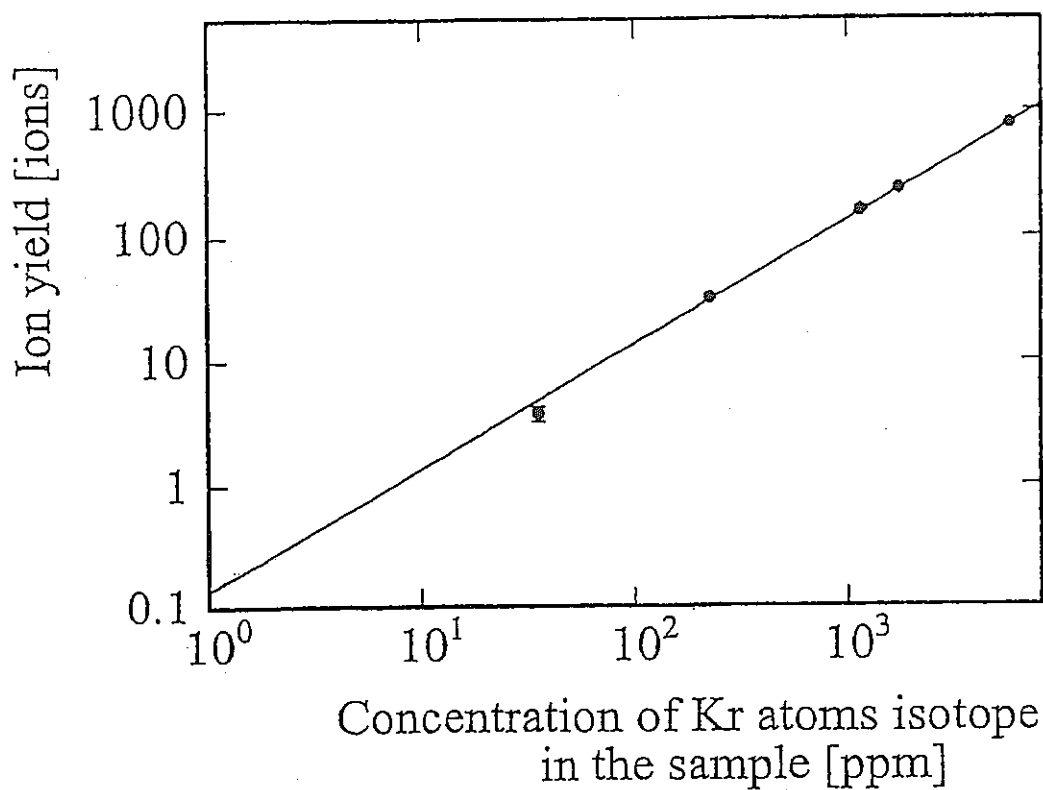


図2. Kr 同位体濃度と0イオン収量の関係

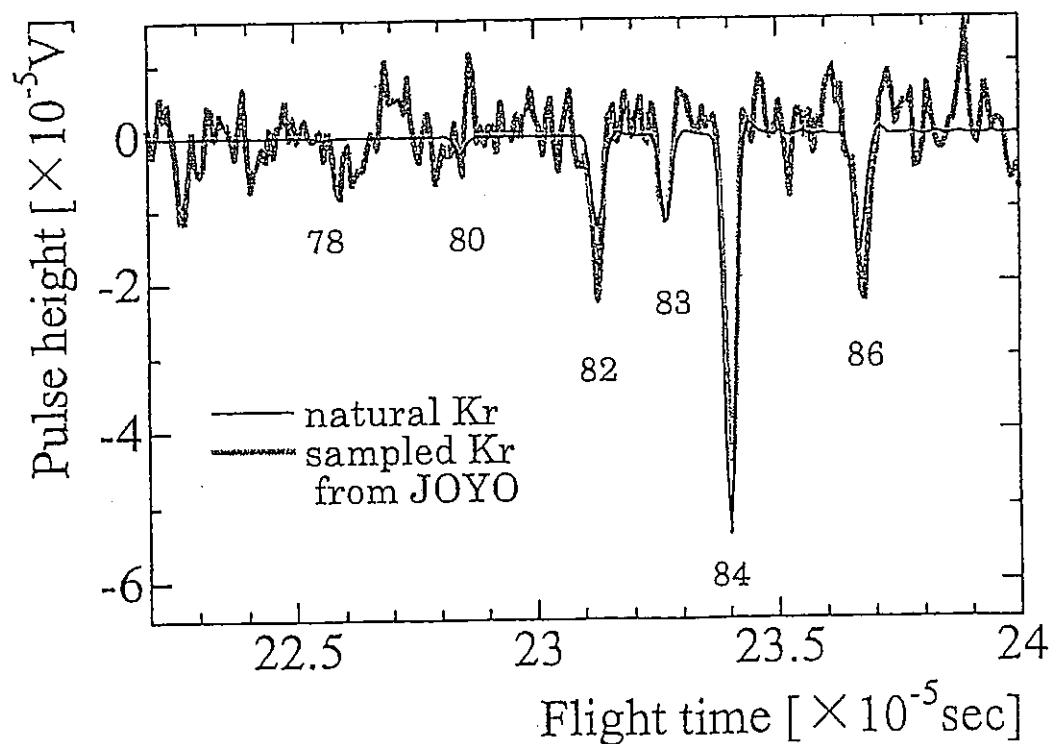


図3. 天然組成 Kr と「常陽」カバーガス採取 Kr の質量スペクトルの比較

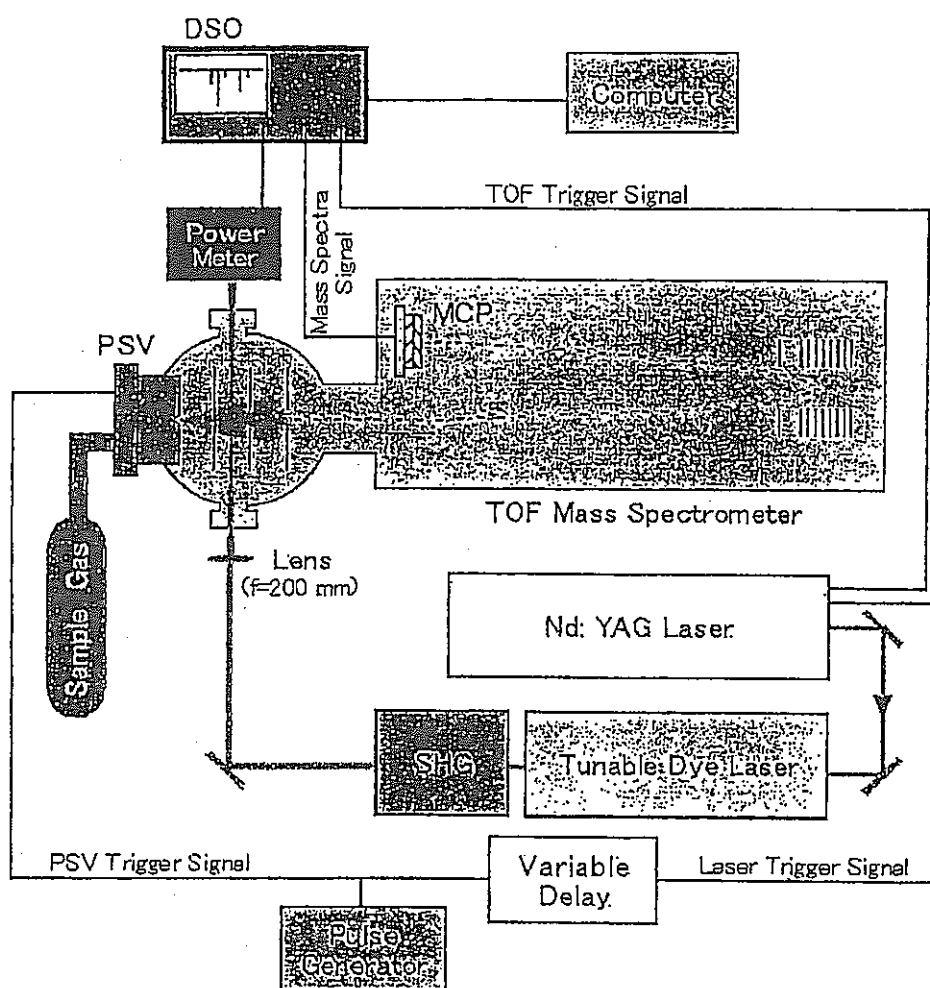


図4. パルス超音速分子線バルブによる気体試料導入実験システム

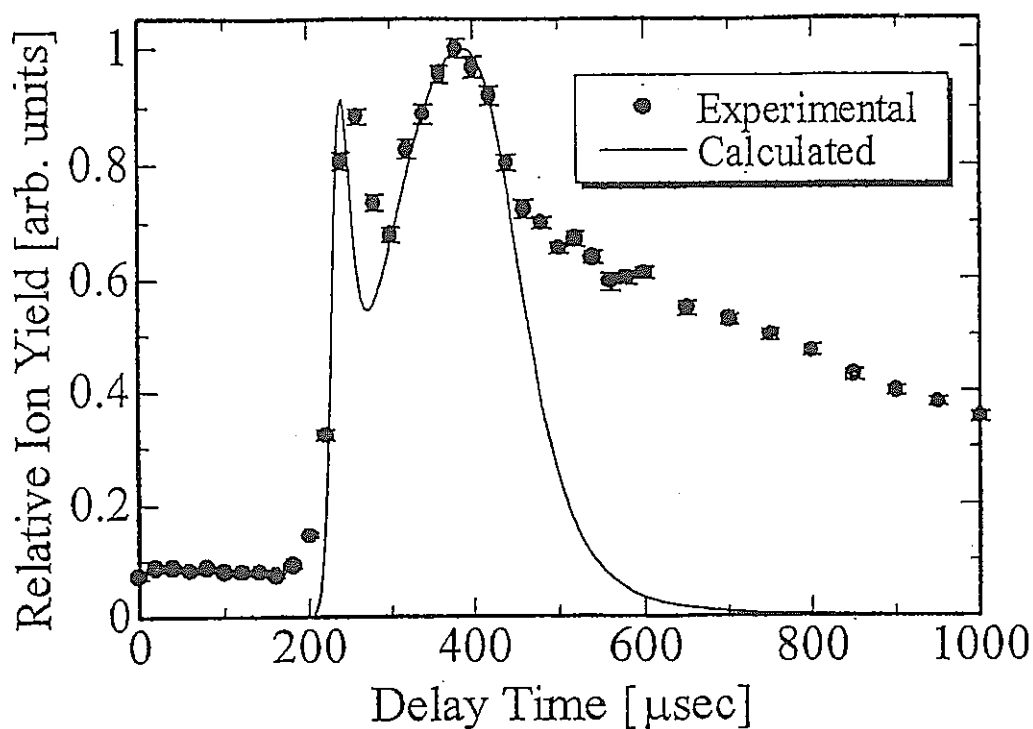


図5. パルス超音速分子線バルブのレーザー同期遅延時間に対する Xe イオン収量の依存性
(レーザー照射域における試料気体密度の時間変化)

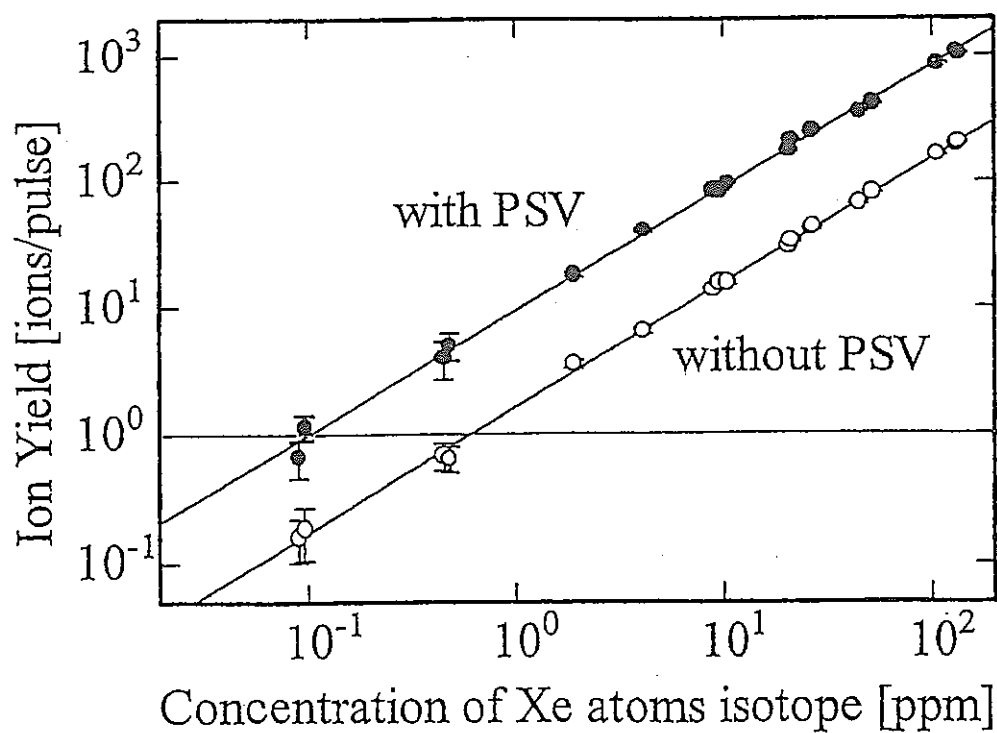


図6. PSV 使用／不使用時における Xe 同位体濃度とイオン収量の関係

先行基礎工学研究に関する平成11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	粒子画像流速測定法による2次元流速測定場との比較		
研究者所属、氏名			
大 学 側	慶應義塾大学 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]		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学 Gr 上出 英樹, A. Tokuhiko, 木村 暢之		
研 究 協 力 実 施 場 所	機構 大洗工学センター 水流動試験施設		
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11年4月1日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】 高速炉の受動的安全性向上において、自然循環による崩壊熱除去現象の把握とその評価手法の確立は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。			
【研究内容（概要）】 インターラップフローの現象解明のための基礎研究として炉心槽内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。 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。			
【使用主要施設】 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）			

【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。

11年度はPIVを用いて炉心槽内の熱流動場を明らかにするとともに、解析結果と比較した。また、UVP並びにPIVを含めた計測手法を水流動試験に適用した結果をまとめた。

【研究成果】

1. はじめに

自然循環時の炉心を冷却するフローパスとしてその重要性が指摘された集合体間ギャップ部の自然対流（インターラッパーフロー、IWF）について、水を作動流体とした模擬試験を実施した。^{(5), (6)} これまでに、7体の集合体からなる模擬炉心をもつナトリウム試験によりIWFの除熱効果を確認した。ここでは、径方向に広がりをもつ炉心全体を対象とした水試験を実施することにより炉心規模でのIWFの熱流動特性を明らかにした。速度場の計測には粒子画像流速測定法（PIV）を用いた。評価手法として集合体間ギャップ領域（炉心槽）の模擬にポラスボディ近似を用いた多次元解析手法を適用した。また、計測手法として超音波流速分布計測手法並びにPIVについて、水流動試験に適用する上での特性についてまとめた。

2. 水流動試験

図1に試験体系を示す。実機規模の炉心を30度セクターでモデル化し、発熱集合体6層、非発熱集合体2層からなる模擬炉心、上部プレナム、炉内冷却器（DHX）を模擬した熱交換器を有している。各集合体は対面間距離を実寸大とし、アクリルで製作した。発熱集合体についてはラッパー管表面からIWFへの熱輸送を模擬するため透明なガラスヒーターにより熱流束境界を与えることとした。集合体内の発熱及び流動はIWFの可視化計測のため模擬しないこととした。集合体間の隙間を保持するスペーサーとしてボタン型のパッドを六角集合体上部の各面に上下2段設けた。

自然循環時のIWFの速度場については、狭い隙間の流れであることなどによる技術的困難さからこれまで測定された例がない。ここでは、上述のように試験体を透明部材で構成することにより外側から流路を可視化することで流速測定を可能とした。この他に超音波を用いた計測手法の適用性検討を行い、可視化計測と合わせて、4節に示すように測定技術を整理した。トレーサー粒子を流した可視化画像から流速を得る粒子画像流速測定法（PIV）を本試験に適用するにあたって、試験体系が複雑な流路で構成されるため画像中に構造物やレーザー光の反射が写り込み画像解析上のノイズとなり正しい速度場が得られない問題があった。これについては4節に示すようにノイズ除去技術を新たに開発することで解決した。⁽⁷⁾

図2に集合体表面熱流束を 2kW/m^2 としたケースにおけるPIVで得られた速度ベクトルを示す。外周の発熱集合体に面した流路（P4）では、炉心中心に向かう横流れが見られるとともに発熱部の上方に行くに従い流速が大きくなっている。炉心の中心部の集合体に面した流路（P1, P2）では鉛直上方に流れるとともにやはり発熱部の上方に行くに従い流速が大きくなっている。集合体上部のパッド周りではパッドを避けて速い流速が見られる。集合体の発熱部上端近傍での鉛直方向流速成分は 3cm/s 程度である。

3. 多次元解析

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3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実験解析の目的とする。

模擬燃料集合体表面の熱流束 2kW/m^2 のケースについて図4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。図2に示した試験結果とIWFのフローパターンは概ね一致している。図2に示したP2、P4の集合体間ギャップ流路について、鉛直方向並びに水平方向の流速成分の鉛直方向空間分布を実験と解析で比較した結果をそれぞれ図5.1、5.2に示す。実験では各流路内の詳細な空間分布が測定されて

いるが、解析と比較するため6角形のラッパー管の1辺に相当する水平領域について平均値を求めて示している。発熱部より上方で実験データのばらつきが大きいのはボタン型パッドの影響と考えられる。水平方向流速成分では、特に炉心外周側P4流路の発熱部の下部で流速が解析結果において過大評価されている。可視化の結果では発熱部よりさらに下方で水平方向流れが見られた。鉛直方向流速成分では実験データにばらつきがあるものの発熱部において上方へいくにつれ加速している様子はよく一致している。絶対値としては発熱部中央から上端にかけて解析結果の方が低めとなっているが、P2流路の発熱上端部を除いて実験結果のばらつきの下限に相当する程度である。ポーラスボディモデルを用いた本解析手法では、発熱下部のフローパターンの予測について検討が必要な面もあるが、鉛直方向流速に相当する全体の循環流量としては概ね評価できる。

実験値を含め炉心槽内の径方向温度分布を図6に示す。図には、発熱部下端および上端の高さにおけるスタッガード方向並びにインライン方向の温度分布を示す。発熱下端の温度は実験値に比べ解析結果が高めとなっているが、これは炉内冷却器の熱伝達係数の設定に依存している。発熱上端の温度分布を比較すると、スタッガード方向では解析の方が下端温度のシフトを考慮しても、特に外周の集合体に面した領域で高めである。インライン方向では実験結果とよい一致が見られている。速度場、温度場を通して本解析手法は低温の上部プレナムと高温の炉心槽の間での自然対流除熱現象(IWF)をよく模擬できる。但し、解析においてスタッガード方向の流動抵抗を過大評価している可能性があるため、強制循環による横流れ試験を実施することによりこの点を今後明らかにする。

4. 超音波及び粒子画像計測手法適用のまとめ

これまでに超音波を用いた流速分布測定手法(UVP)並びに粒子画像流速測定法(PIV)の適用性を検討してきた。⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ UVPは超音波ビームの軸方向に瞬時の流速分布が得られる利点があり、不透明流体にも適用できることからナトリウムへの応用を含め基礎的な試験を実施した。平行噴流体系にてUVPとレーザー流速計の相互比較を行った結果、速度分布の良好な一致を確認した。配管内流速への適用では水、ナトリウムについて試験を実施し配管内の流速が測定できることを確認した。ナトリウム体系では、超音波ビームの射出部近傍での散乱の影響を受けることが明らかとなった。これから超音波ビームの指向性などを向上させるための技術開発を継続している。PIVでは、前述のように画像ノイズの除去手法を開発した。PIVの画像解析では流れに乗って動く粒子の画像のみが必要となる。それ以外の構造物やレーザー光の反射などの画像ノイズは流速を評価する上で誤差の原因となる。このようなノイズを輝度の時間変化特性(ある画素についてみると、ノイズの場合その輝度は比較的一定であるのに対し、粒子の通過では輝度値が大きく変化する)に着目して動く粒子の情報のみを取り出す新しい手法を開発するとともに特許を申請した。^{(7),(8)}

5. まとめ

炉心槽内の自然対流(IWF)による集合体の除熱について、水流動試験を実施しその熱流動特性を把握した。特に試験体をヒーターを含め透明部材で構成することにより、計測手法として粒子画像流速測定法(PIV)を適用し、自然循環時のIWFの速度場を初めて明らかにした。多次元解析手法として炉心槽内をポーラスボディ近似でモデル化する手法を構築し、試験データとの比較により手法の妥当性を明らかにした。計測手法として超音波を用いた速度場計測手法の適用性を明らかにするとともにPIVの適用範囲を広げるためのノイズ除去手法を開発した。

【今後の予定(翌年度以降の概要)】

本研究は、今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】

- (1) A. Tokuhira, 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. Tokuhira, 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 ultrasound Doppler velocimetry," NURETH-8, pp.1712-1723, Kyoto, Japan (1997)
- (3) 木村 暢之, A. Tokuhira 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. Tokuhira 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," Nuclear Engineering and Design 188 (1999) 49-73.
- (5) 安田 明洋、菱田 公一 他、「インターラッパーフロー自然循環水流動可視化実験ーボタン型ラッパ管パッド形状における試験及び解析結果ー」、サイクル機構公開報告書 JNC TN9400 99-072 (1999)
- (6) 宮越 博幸、安田 明洋 他、「高速炉自然循環時のインターラッパーフロー水流動可視化実験」日本原子力学会 1999 年秋の大会、F5 (1999)
- (7) N. Kimura, Y. Miyake, et al., "Noise reduction techniques for the particle image velocimetry - Application to an experimental study on natural convection in a fast reactor core -," ICONE-8, 8405, Baltimore, USA (2000)
- (8) 木村 暢之、三宅 康洋、西村 元彦、「画像相関法を用いた移動物体測定方法」、特許出願中、特願平 11-251489

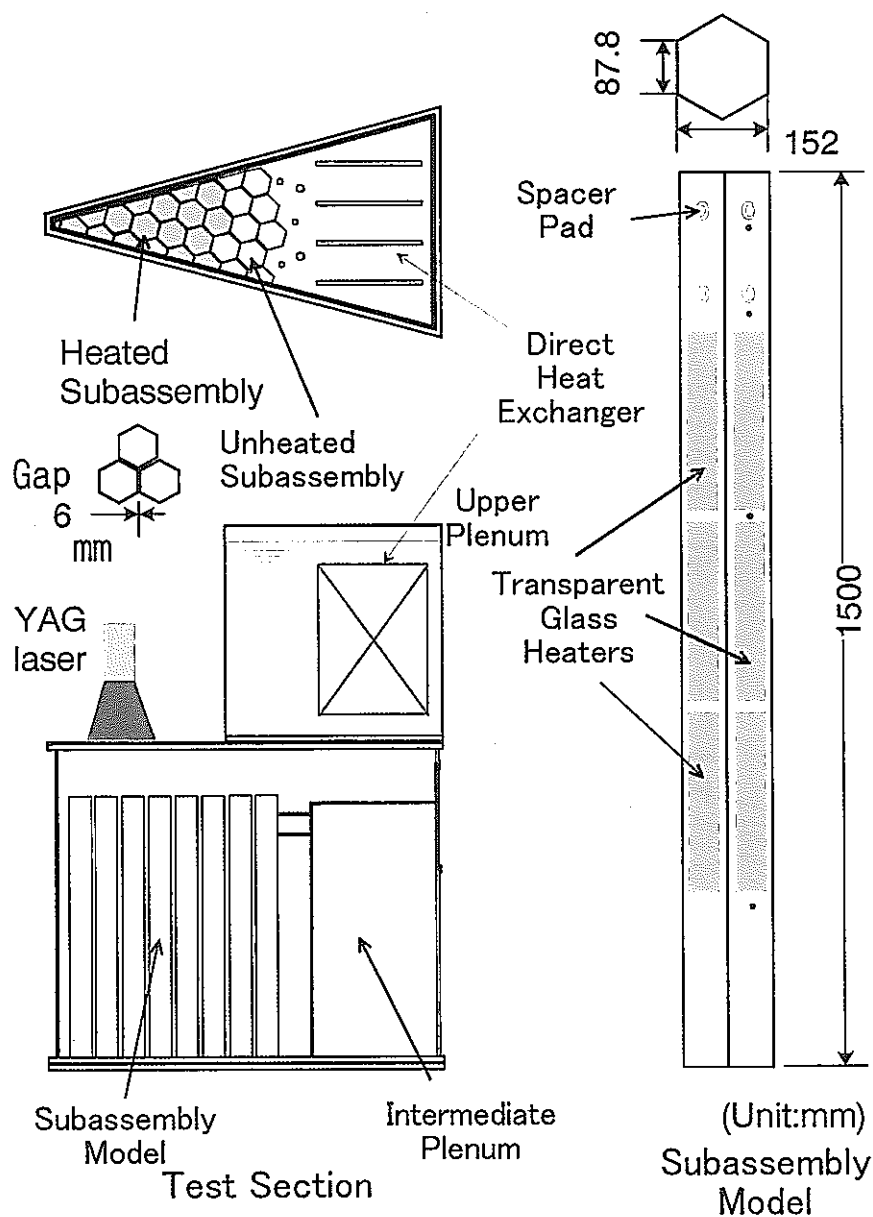


図1 炉心槽内熱流動試験装置

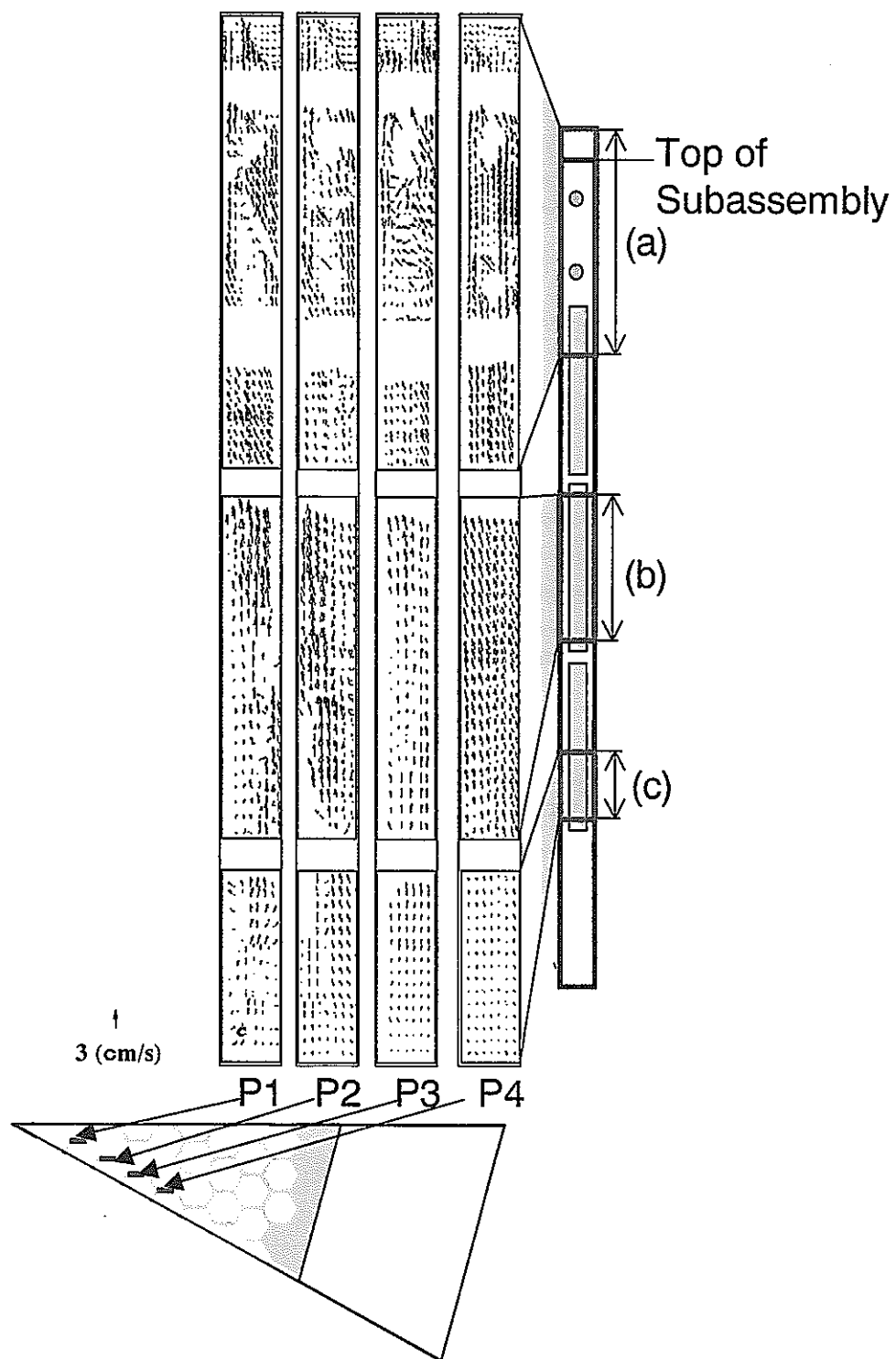


図2 PIVによる炉心槽内流速ベクトル測定結果

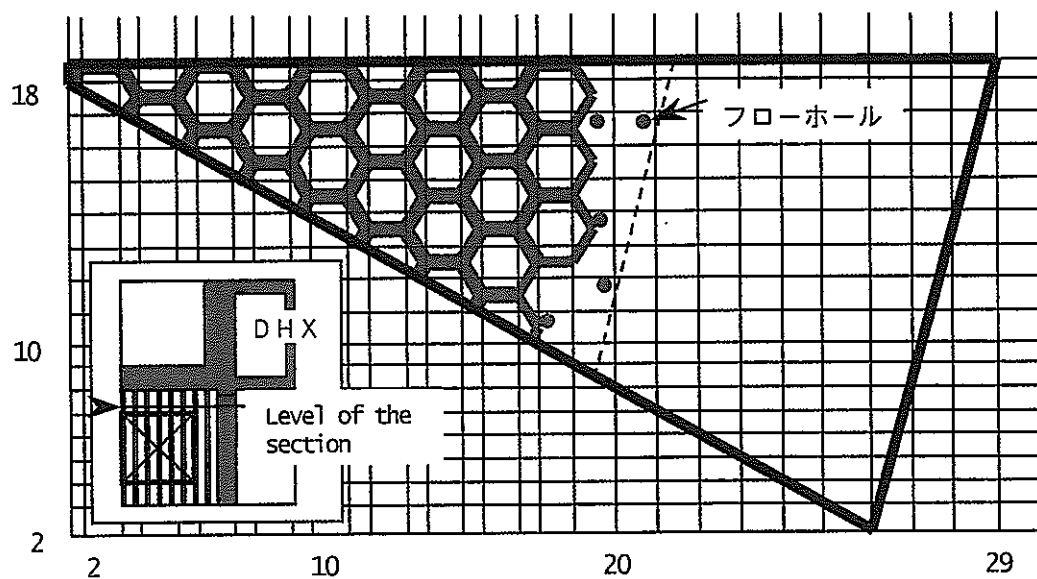


図3 CASCADEコードによる解析メッシュ

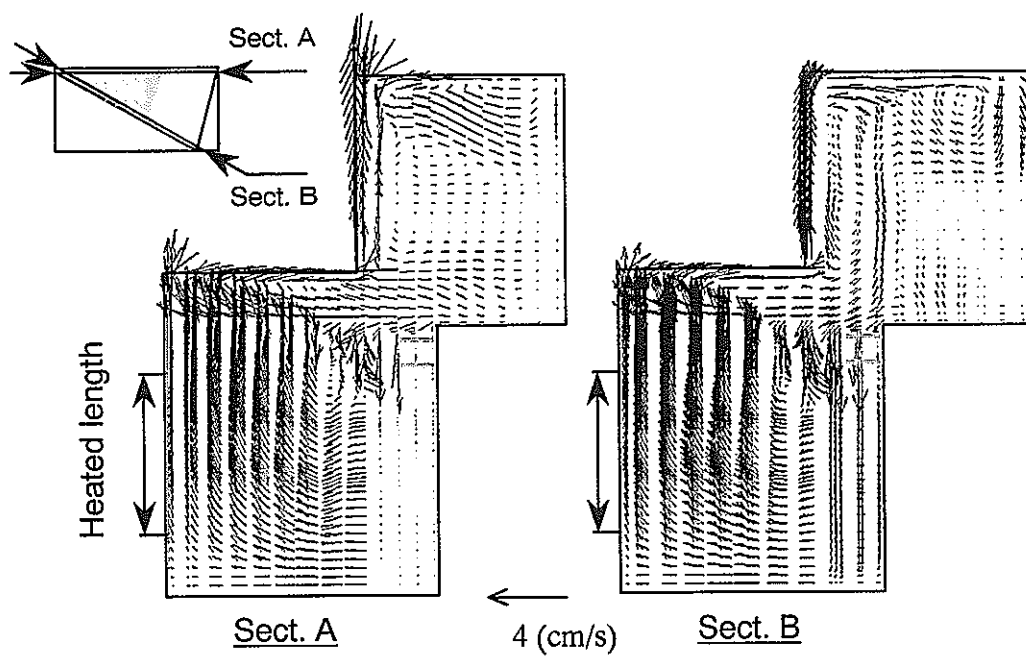
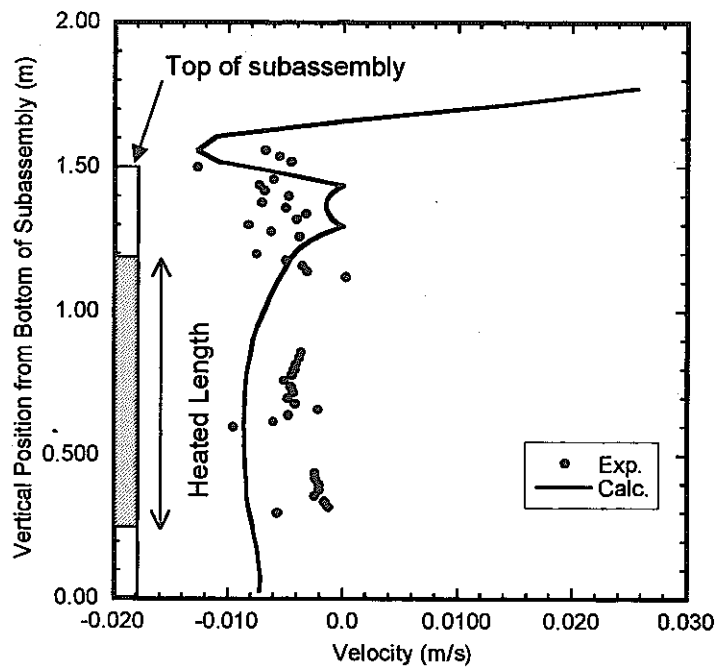
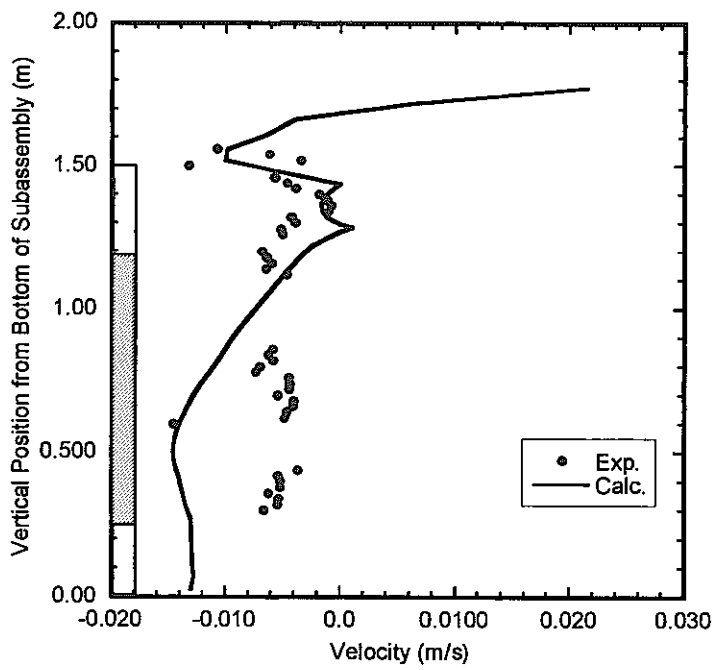


図4 炉心槽内の速度場に対する解析結果

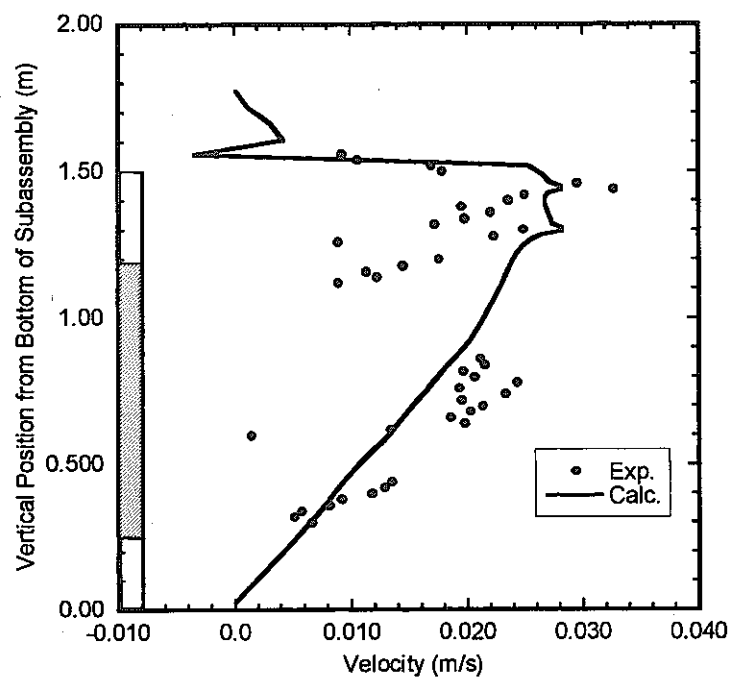


(1) P2

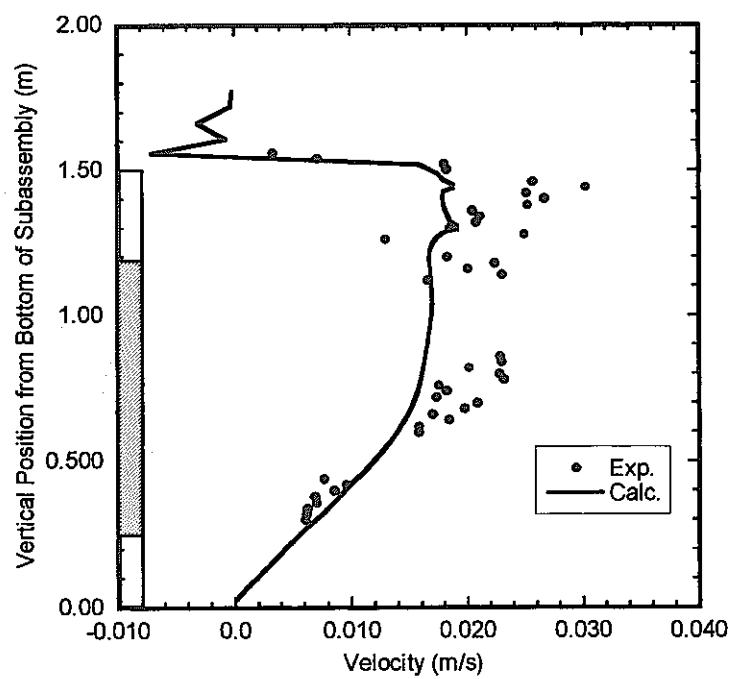


(2) P4

図 5.1 集合体間ギャップ部の水平方向流速成分の鉛直方向分布



(1) P2



(2) P4

図 5.2 集合体間ギャップ部の鉛直方向流速成分の鉛直方向分布

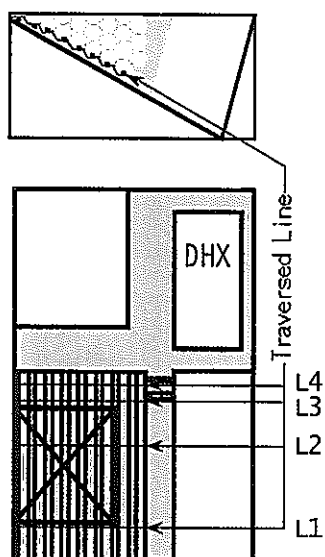
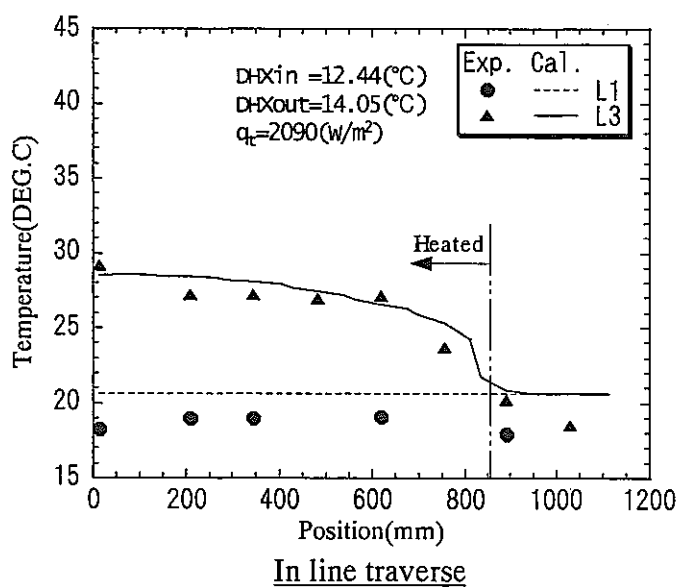
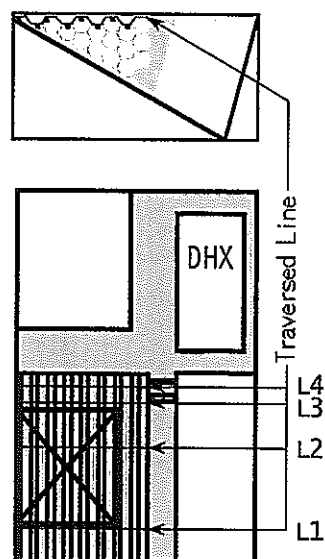
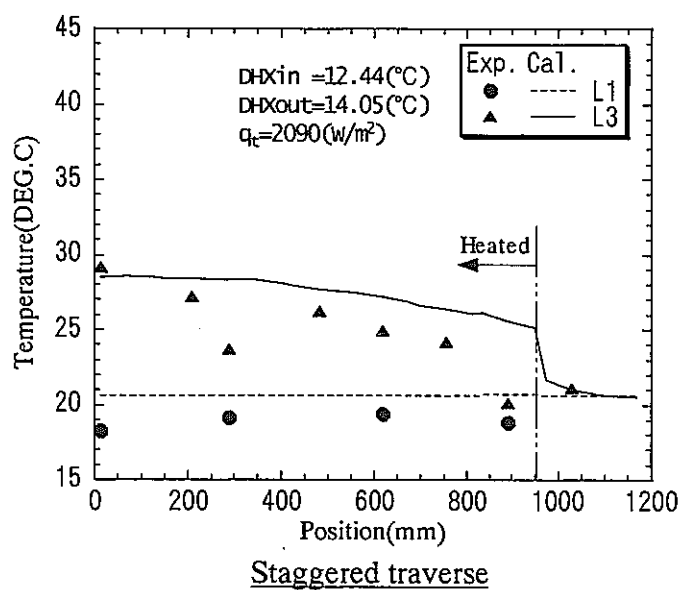


図6 炉心槽内径方向温度分布の実験と解析結果の比較

先行基礎工学研究に関する平成11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	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―		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東北大学 金属材料研究所 安彦 兼次 助教授*, 高木 清一 助手* 〔*客員研究員 **研究生〕		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・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	機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第1試験室		
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11年 4 月 1 日 ~ 平成12年 3 月 3 1 日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】 現状技術で製作可能な高純度鉄およ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 ①先進的高速炉の構造材料開発 ②先進的高速炉の機能性材料開発 への適用見通しを得ることを目的とする。			
【研究内容（概要）】 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、使用環境にもたえられるものであるかどうか見通すこと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速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）及び機能性材料（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。			
【使用主要施設】 高温クリープ試験装置（550℃、大気中）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 8 年～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、引き続き候補材の大気中強度評価を実施するとともに静的ナトリウム浸漬試験を行った。さらに、工業の多分野で利用が期待される高純度 50%Cr-鉄合金を溶製し、その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、電気抵抗率および磁気特性を測定評価した。

平成 11 年度は、平成 10 年度に溶製した高純度 50%Cr-鉄基合金を雰囲気からの汚染に注意を払いながら、熱処理、機械加工を施し、高温クリープ試験用試験片を製作した。それらを用いて高速炉の特化した使用環境でもある高温クリープ試験（550℃、大気中）を実施し高温での機械的特性を評価した。

【研究成果(当該年度)】

1. 平成10年度に溶製した高純度 50%Cr-鉄合金の高速炉に特化した環境下での機械的特性を明らかにするために、高速炉の使用環境でもある 550℃クリープ試験を大気中で実施した。クリープ試験に使用したインゴットの化学分析結果を表1に、試験条件および試験結果は表2に示す。試験片は JIS Z 2271 の「金属材料の引張クリープ試験方法」に準拠し外径 6φ、平行部長さ 30mm の中実丸棒型とした。クリープ試験は、大気中雰囲気において実施した。クリープ試験方法は、JIS Z 2271 準拠して行った。
2. 平成 12 年 4 月末日までに得られた高純度 50%Cr-Fe 合金の大気中クリープ試験結果を表2中に示す。現在までに 4 点の破断データを得た。5条件で試験を実施したが、残り 1 本については現在も継続中(12 年 4 月末で 2790 時間)である。
3. 高純度 50%Cr-Fe 合金の応力-破断時間の関係を改良 9Cr-1Mo 鋼と比較して図1 に示す。最長約 1500 時間までの破断データ計 4 点を得た。低応力側ほど破断時間が長くなる一般的な特性を示した。また、応力 147.1MPa の試験については、2790 時間を経過し破断には至っていない。高純度 50%Cr-Fe 合金のクリープ破断強さは改良 9Cr-1Mo 鋼と比較して、短時間側では高純度 50%Cr-Fe 合金は改良 9Cr-1Mo 鋼に対して高強度であるが、約 1500 時間の破断強度は同程度になる傾向がみられた。この原因の一つとして長時間側ほど高純度 50%Cr-Fe 合金の粒界が脆化するためと考えられる。
4. 高純度 50%Cr-Fe 合金のクリープ破断伸び-破断時間の関係を改良 9Cr-1Mo 鋼と比較して図2 に示す。高純度 50%Cr-Fe 合金のクリープ破断延性は 10%～30%であり、長時間側ほど低下する傾向が認められた。改良 9Cr-1Mo 鋼のクリープ破断伸びと比較すると 1000 時間以上で高純度 50%Cr-Fe 合金の伸びは改良 9Cr-1Mo 鋼のそれよりも破断延性が低下する傾向が見られ、これはクリープ破断強さと同様に粒界の脆化の影響と考えられる。図3 に絞りについて同様に示す。絞りは 20%～60%程度であり、クリープ破断伸びと同様に、長時間側での低下が確認された。また、改良 9Cr-1Mo 鋼との差はより顕著になっていた。
5. 高純度 50%Cr-Fe 合金のクリープひずみ曲線を図4および図5 に示す。定常クリープ領域が非常に小さく、また加速クリープがクリープ変形の初期から生じていた。図4および図5 のクリープひずみ曲線から求めた高純度 50%Cr-Fe 合金の定常クリープ速度を図6 に、改良 9Cr-1Mo 鋼との比較として示す。高純度 50%Cr-Fe 合金の定常クリープ速度は改良 9Cr-1Mo 鋼の定常クリープ速度に比べ 3～4 分の 1 程度低い値を示した。
6. 高純度 50%Cr-Fe 合金のクリープ破断材(最長破断時間:1473.0 時間)の組織観察を行い、以下のことが分かった。き裂は粒界に沿って観察され、粒界破壊をしていた。また、破断時間が 3.6 時間の試験材には多数の変形双晶が観察されたが、破断時間がそれよりも長い試験材には、ほとんど変形双晶が観察されなかった。長時間クリープ(低応力)になると、双晶変形は生じていなかった。長時間破断材では、破断面から 20mm も離れた場所でも多数のき裂が観察された。一方、短時間破断材では、破断面から 20mm も離れるとほとんどき裂は観察されない。高純度 50%Cr-Fe 合金の長時間クリープでは、き裂が

発生しやすいものと考えられる。長時間破断材の粒界および粒内の組成分析を行ったところ、粒界では Cr 濃度が高い部分と低い部分が混在していた。一方、粒内では一定の組成であった。粒界に濃度の分布があることで、粒界が脆化している可能性が考えられる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究課題は平成 11 年度末で終了するが、平成 12 年度より新規課題として 3 年間研究を継続する。そこでは、高純度鉄基合金により、高速炉特化構造材料（鉄鋼材料）の開発見通しを得ること、目的とする構造材料の実用的な製造見通しを得ることを目的とする。具体的には、これまでの研究成果を踏まえて 99.99mass% 以上の高純度鉄を素材とする合金組成の異なった高純度 Cr-Fe 合金を製造し、高温強度特性と冷却材のナトリウムに対する耐食性に及ぼす Cr の効果を把握する。また、それら合金の物理的および熱的基本特性を把握する。さらに、高速炉に特化した特性を向上させると考えられている W, Mo の効果を調査するため、高純度 Cr-Fe-W(Mo)合金を製作し、各種特性を試験評価する予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1. K. Abiko and S. Takaki: Vacuum, 53(1999), 93-96.
2. S. Takaki and K. Abiko: Vacuum, 53(1999), 97-100.
3. S. Takaki and K. Abiko: Mater. Trans. JIM, 41(2000), 2-6.
4. K. Abiko: Mater. Trans. JIM, 41(2000), 233-237.

表1 クリープ試験片用高純度 50Cr-鉄合金インゴットの化学分析結果

	mass %
Cr	50.6

	mass ppm		mass ppm		mass ppm		mass ppm
C	12.1	Al	2.4	Si	20	Mo	1.5
N	10.8	B	0.46	Sn	5.3	Mn	2.64
O	73.9	Co	0.5	Ti	2.5	Ni	6.7
S	6.2	Cu	6.9	V	1.08	Nb	0.39
		Ga	3.6	Zn	0.6	P	4.3

表2 高純度 50%Cr-Fe 合金の大気中クリープ試験条件と結果

試験片 No.	試験温度 [°C]	雰囲気	設定応力 [kg/mm ²]	設定応力 [MPa]	破断時間 [hr]	破断伸び [%]	破断絞り [%]	瞬間ひずみ [%]	定常クリープ速度 [%/sec]	破断位置	加速クリープ 開始時間(hr)
THF-02	550	大気中	42.06	412.47	3.7	25.5	48.1	0.237	-	B	-
THF-03	550	大気中	36.46	357.55	19.4	31.8	58.4	0.233	1.56E-01	B	1.9
THF-04	550	大気中	30.85	302.54	106.2	27.3	41.1	0.177	1.31E-02	B	11.5
THF-05	550	大気中	22.00	215.75	1473.0	10.9	22.1	0.134	1.10E-03	B	446.9
THF-01	550	大気中	15.00	147.10	2790.0	継続中	-	0.079	-	-	-

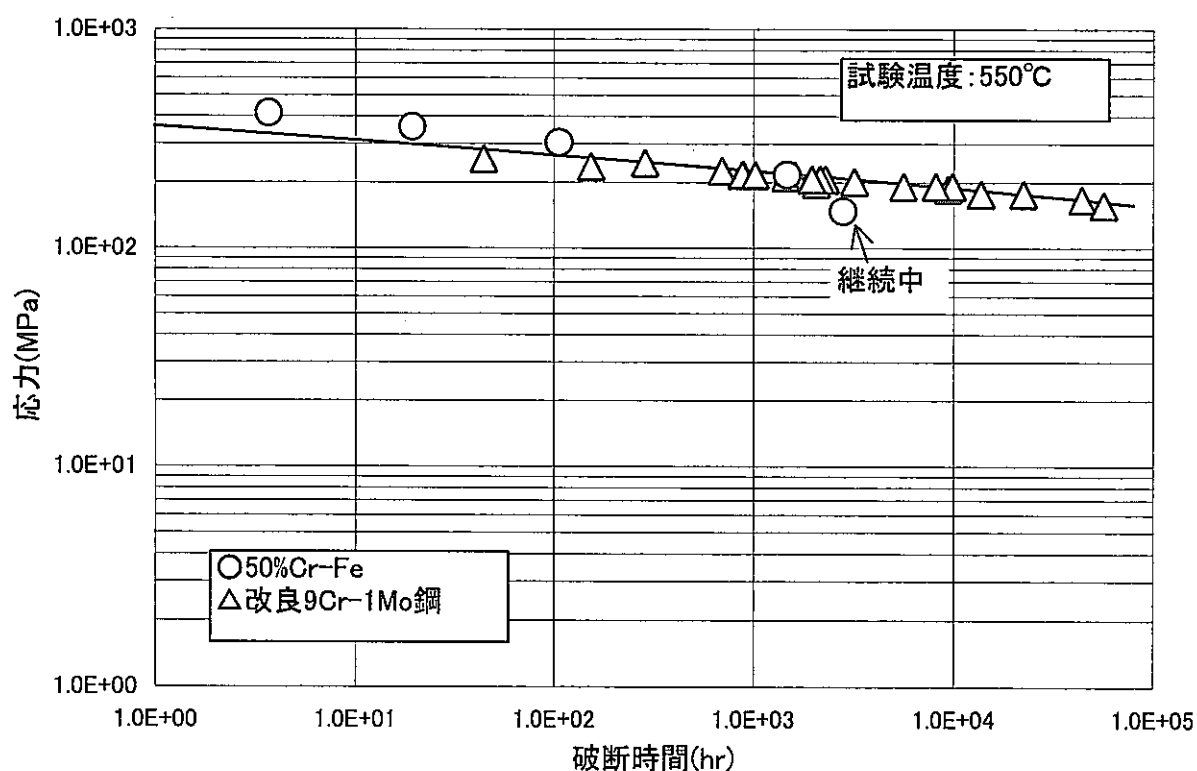


図-1 Cr-Fe系鋼のクリープ破断強さ

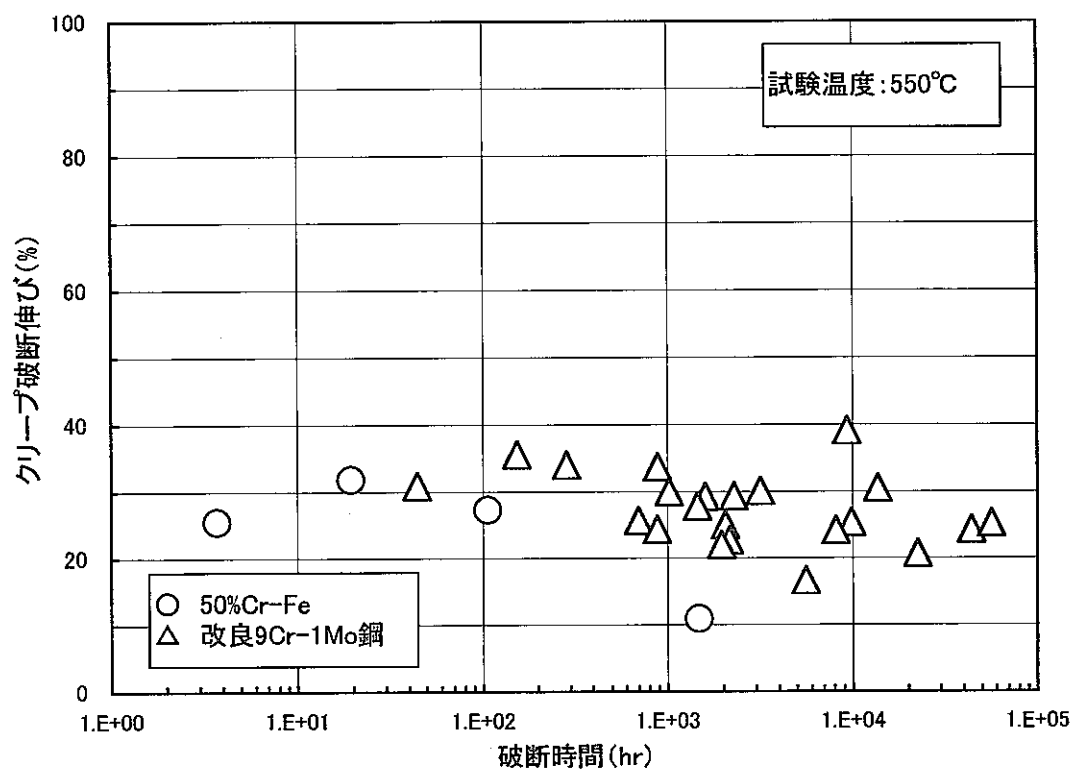


図-2 Cr-Fe系鋼のクリープ破断伸び

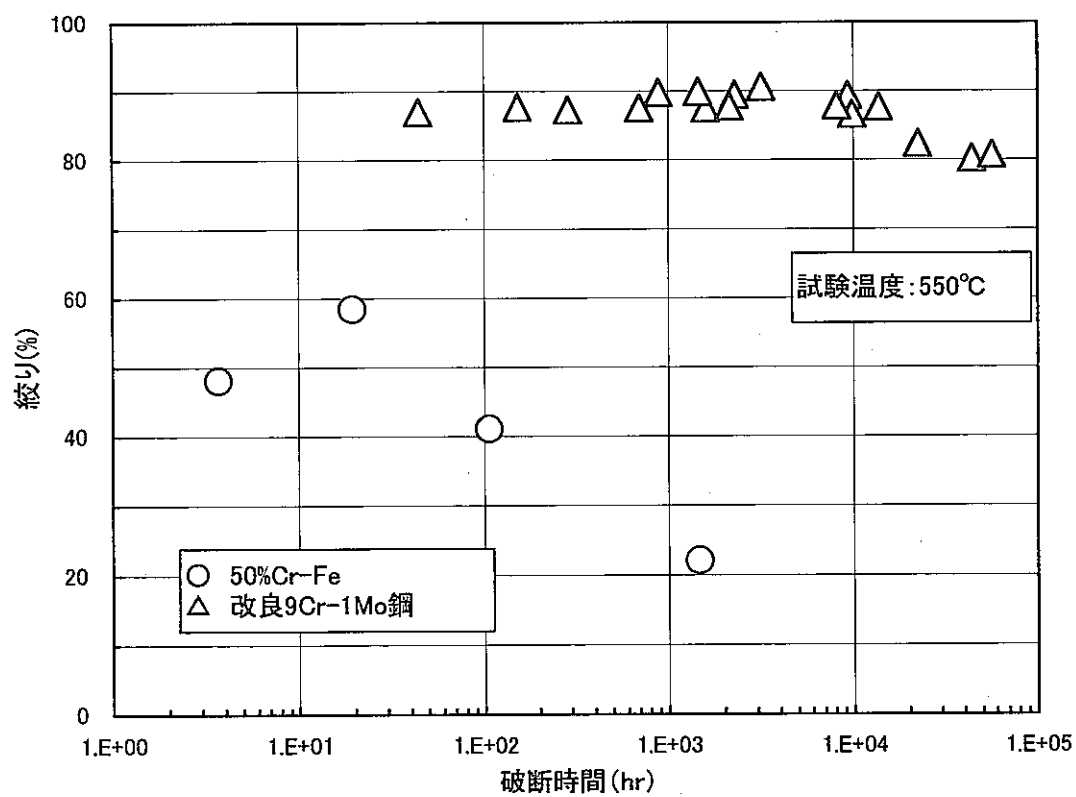
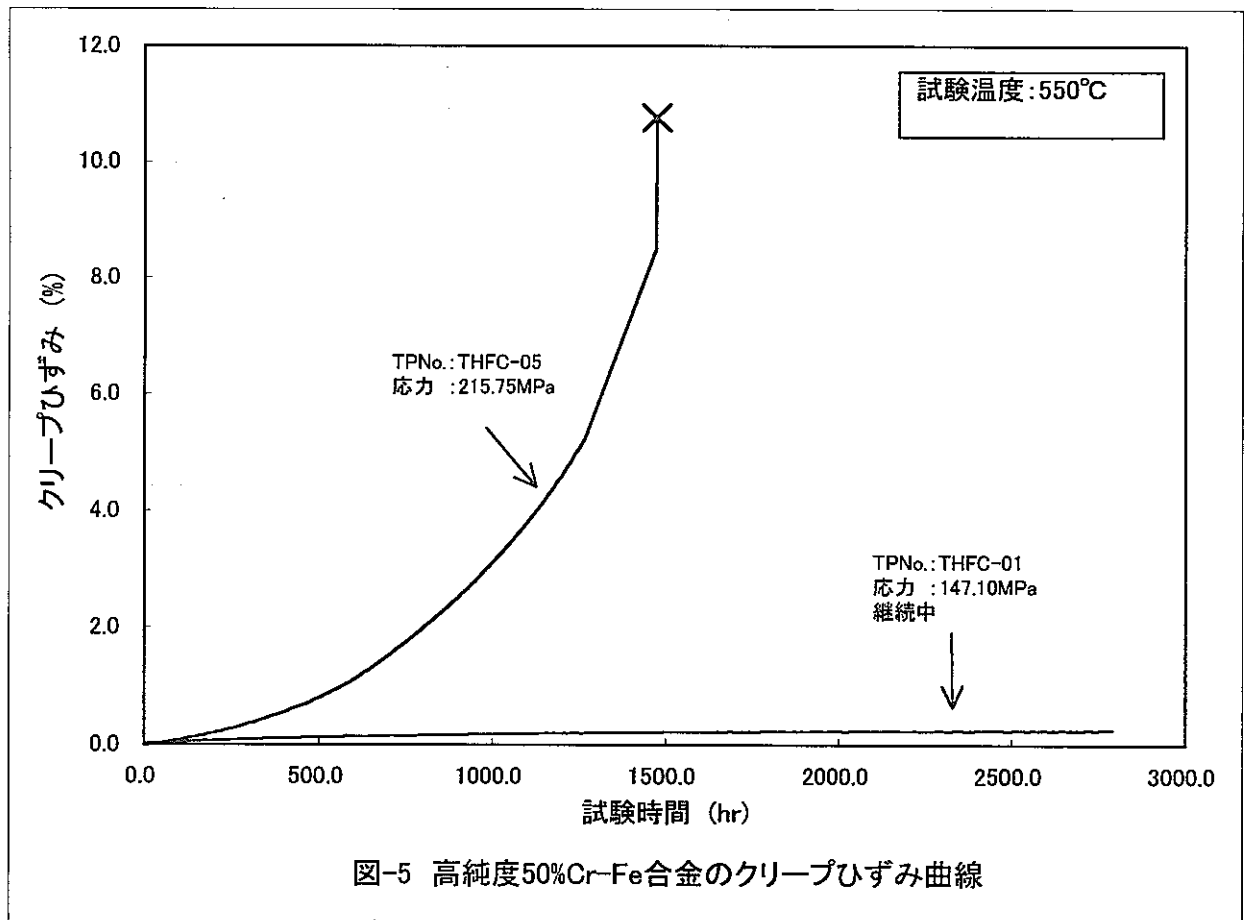
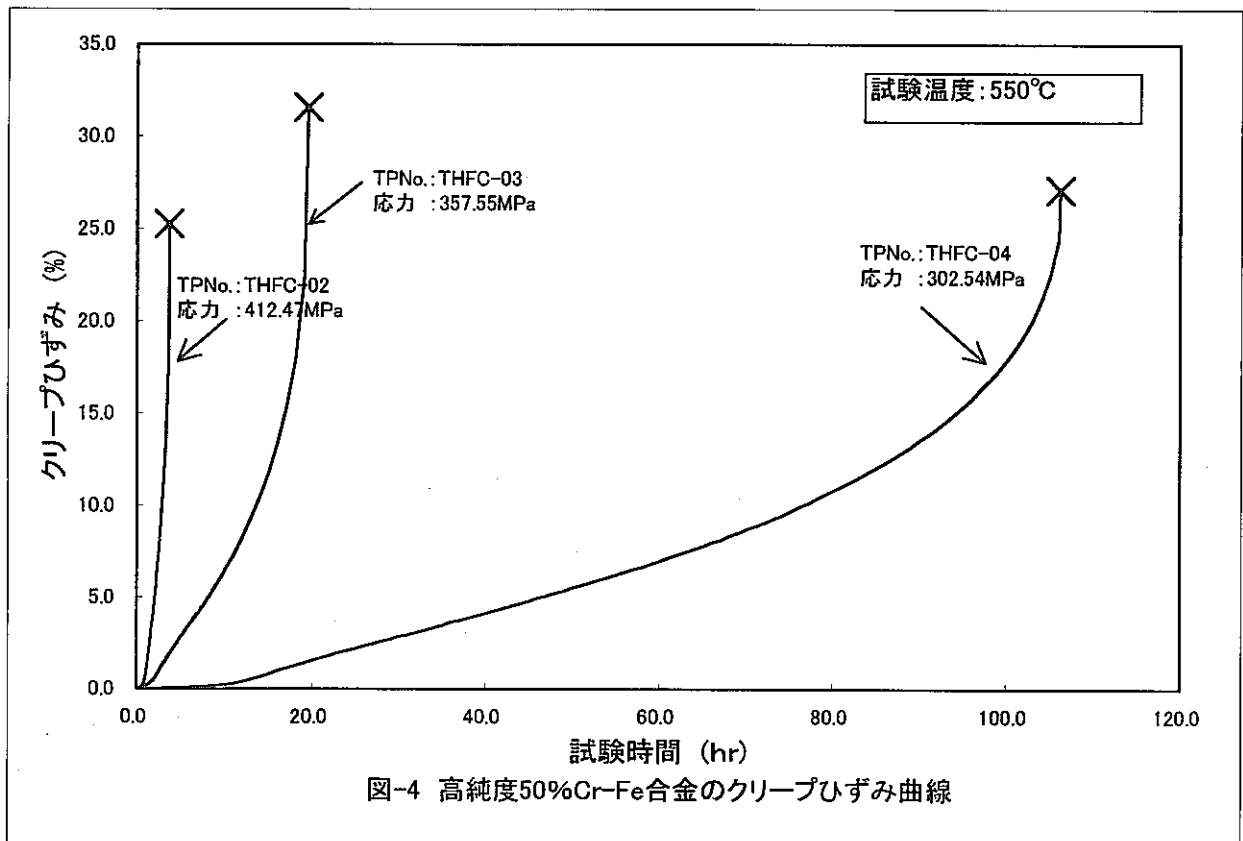


図-3 Cr-Fe系鋼の絞り



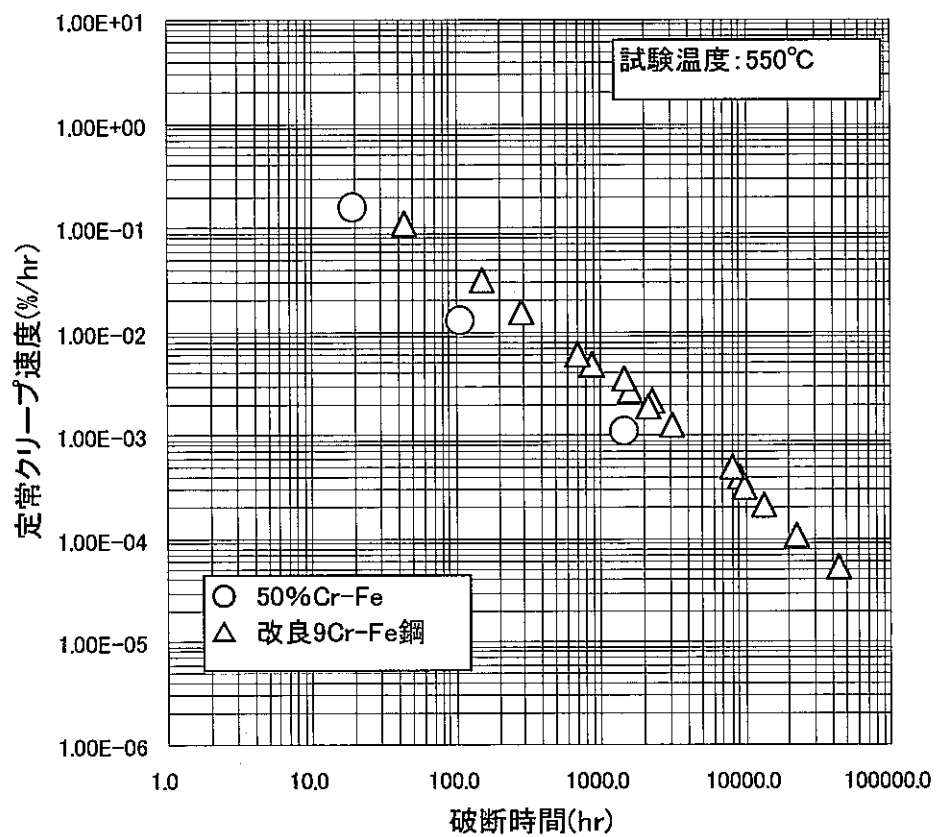


図-6 Cr-Fe系鋼の定常クリープ速度

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 教授 岸 輝雄*1, 助教授 榎 学 (*1 現在 通産省工業技術院 産業技術融合領域研究所 所長)		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 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 機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第1, 第3試験室		
通算研究期間 (予定)	平成9年4月 ~ 平成12年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年9月21日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受け入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 FBRプラント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。			
【研究内容（概要）】 本研究は、FBRプラント機器の異常振動の発生を検出すること、異常振動部のき裂発生・進展を検出する方法を開発することである。異常振動の検出においては、数百Hz程度までの高サイクル振動を検出することができる非破壊検出システムを開発する。このため、非破壊検出法として非接触もしくは接触式の超音波センサー等を適用した検出システムを開発する。検出した超音波波動の散乱および乱れ等に注目して、高サイクル振動を高感度・高精度に検出する。また、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、き裂モニタリングを可能とするシステムを開発する。			
【使用主要施設】 レーザー干渉計、AE波形解析装置、ワークステーション（東京大学） 微小硬さ計、超音波検出装置（サイクル機構大洗 ナトリウム技術開発第1、第3試験室）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 9 年度：レーザー干渉計による AE の検出方法検討
平成 10 年度：波動伝播特性の計算および AE 波形解析アルゴリズムの開発
微小硬さ特性によるき裂発生検出方法検討
平成 11 年度：レーザー干渉計を用いた AE 計測と損傷評価
き裂発生検出のための超音波波形解析方法の検討

【研究成果】

1. レーザー干渉計を用いた AE 計測と損傷評価

(1) 高温下における AE の計測

試料としてプラズマ溶射により作製された $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiCrAlY}/\text{SUS304}$ 片側コーティング材を用いた。母材形状は $15 \times 15 \times 5\text{mm}$ 、膜厚 $500\mu\text{m}$ である。図 1 に示されるように、実験はスポット径 1cm の赤外線イメージ炉を用いて試料コーティング面側を加熱し、保持温度 1100°C にて 10 秒保持後、空冷した。その際、レーザー干渉計による AE 波の検出を試料裏面中央部にて行った。試料裏面は鏡面状に研磨されている。ノイズレベルを押さえるために LPF300kHz、HPF200Hz にて測定を行った。レーザーによる測定位置となる母材裏面は 1050°C 程度になっており、キュリー点以上では測定できない PZT センサーの利用は不可能であった。保持温度 1100°C の場合でも AE 検出が可能であった。このような高温環境下において AE を検出することが可能であることはレーザーによる測定の優位性を示している。

(2) 1 チャンネル AE 計測による Al_2O_3 コーティング材の熱サイクル破壊評価

前節で述べた装置構成および試料を用いて異なる保持温度に対して熱サイクル試験を行った。AE は冷却時においてのみ検出された（図 2）。最終はく離は 1~3 サイクル目に生じ、保持温度が低下するに伴い最終破壊に至るサイクル数が増加する傾向を示した。図 3 に保持温度 1200°C の試料の 1 サイクル後における断面写真を示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiCrAlY}$ 界面極近傍の Al_2O_3 層内において、はく離が生じており、被覆部には縦割れが認められないことから、検出された AE はこれら界面はく離の生成により生じたものと考えられる。保持温度 1100°C において、各サイクル毎に超音波探傷を行った。1 サイクル後、き裂が試料中央部付近にて直径およそ 1mm 程度のはく離が生じ、それらが停留していることが分かる。さらに 2 サイクル目では、き裂が端部へと抜け、ほぼ完全にはく離が生じている。また、検出された波形は、主に高い周波数成分を有するタイプ A と低周波成分を有するタイプ B に分類された。タイプ A の AE は各サイクルの初期の段階に多く見られるのに対して、B はサイクル後半もしくは最終はく離直前において多く検出された。超音波探傷の結果と合わせると、タイプ A は中央部でのき裂生成、タイプ B はそれらが端部へと進展に起因して生じたものと考えられる。

(3) 1 チャンネル AE 波形の原波形解析

試料中央部での破壊に対応するものと推測されたタイプ A 型に対して、モード I の破壊を仮定し原波形解析を行い、割れ半径の評価を試みた。媒体のグリーン関数を既知とすれば、逆畳込み積分により原波形の評価が可能である。グリーン関数の導出には有限要素法を用いた。伝達関数は、各ダイポールの入力関数として立ち上がり時間 $1\mu\text{s}$ 、大きさを 1Nm のステップ状関数を用い、中央界面部セラミックス相側に入力し導出した。解析から割れ半径を導出した結果を図 4 に示す。数 $100\mu\text{m}$ の大きさを有する破壊が生じている。このようにレーザー干渉計を AE センサーとして用いてコーティング材の熱サイクル下での割れ半径を定量的に評価可能となった。

(4) 4 チャンネル AE 計測による Al_2O_3 コーティング材の熱サイクル破壊評価

位置評定および破壊モードの評価を行うために、4 チャンネル AE 計測システムを構築し、熱サイクル試験を行った。システムの加熱系は同様であるが 4 本のレーザー干渉計により試料下面 4 点にて AE 計測を可能とするものである。また、試料の溶射条件を、セラミックス層膜厚、プラスト条件、ボンド層有無について変化させ、破壊挙動に及ぼす各種因子の影響評価を試みた。母材は厚さ 5mm 、半径 15mm の円板状である。実験は、保持温度 1000°C にて 10 秒保持後空冷する過程を 1 サイクルとして、熱サイクルを負荷した。図 5 に試料 No. 1 の試料において検出された AE の位置評定結果を示す。図中、数字は発生順序を示す。この試料に代表されるように今回作成した試料は、試料端部からはく離破壊が生じ、最終的にセラミックス層全面がはく離する挙動を示し、前節で見られた中央部破壊とは異なる挙動を示した。

(5) 破壊モードの導出

同一事象に対して各センサーに計測された波形から、破壊モードの導出を試みた。微視割れに対する畳込み積分方程式を、逆畳込み積分することにより解いて、微視割れ面の変位食い違いを導出できる。有限要素法を用いてグリーン関数の導出は行った。図 6 にイベントにおける解析結果を示す。この例では、破壊は微視割れ面に平行な方向へのすべり成分が主なモードであり、ほぼせん断破壊であることが理解できる。解析の結果、多くのイベントがせん断を主モードとするものであり、この試験片における破壊はせん断応力による破壊であると結論付けられた。従来、破壊挙動の評価が困難とされていた耐熱セラミックスコーティング材の評価を行うために、熱サイクル試験時の AE 計測をレーザーを用いて行うことに成功した。さらにレーザー干渉計を用いた多チャンネル AE 計測により、破壊モードの導出を行い、破壊挙動を定量的に評価した。また、AE 原波形解析と破壊モデルを組み合わせることによる破壊靱性値評価法を提案し、非破壊手法としての AE 原波形解析のさらなる有用性を示した。

2. 超音波検出法によるき裂発生を検出

超音波法を用いてき裂発生を予測するため、き裂発生以前の前兆現象の検出性について検討した。超音波検出信号に含まれる情報を最大限に引き出し、マイクロき裂が発生する以前から損傷評価できるパラメータを見いだすため、時間一周波数解析が可能なウェーブレット変換を用いて、超音波エコーの波形解析を行った。供試材は、前年度、微小硬さ測定で用いた試料と同一部位から採取したものであり、繰り返し熱過渡負荷を受けた構造物の表面に発生したき裂深さ先端近傍の超音波測定を行った。

(1) 音速特性

得られた超音波エコーのウェーブレット解析から導かれる超音波音速を図 7 に示す。B1 エコーのピーク周波数付近に相当する 17 MHz での音速は、有意な変化が認められない。しかし、ピーク周波数より高周波側の周波数成分で低下し、例えば 30 MHz の周波数成分で算出された音速は、明瞭な低下が認められた。すなわち、構造物表面に近づくほど損傷が大きいことに対応して音速の低下が認められた。この音速の変化は、表面ほど熱過渡の繰り返しによって生じたひずみが大きいことに起因する損傷の程度を示すものと考えられる。すなわち、き裂の発生する前兆として、クリープによる熱的組織変化に加えて弾塑性変形に伴う塑性ひずみの硬化が起こり、その結果ヤング率の低下が生じたことによって音速を低下させるものと推測された。超音波エコーの波形解析方法としてウェーブレット解析を用いることにより、き裂発生以前の損傷相違を検出できる見通しが得られた。

(2) ピーク周波数特性

ピーク周波数は、超音波エコーをフーリエ変換してその周波数特性からピークの周波数として算出される。図 8 は、B1 エコーと B2 エコーのピーク周波数をそれぞれ求め、板厚方向に対する変化を調べたものである。B1 エコーと B2 エコーのピーク周波数の相違に着目して、両者の差分 Δf_p ($=B1$ エコーのピーク周波数 $-B2$ エコーのピーク周波数) を調べた結果、多少ばらつきはあるものの、内外表面に近づくとき中央部に比べて Δf_p は大きくなる傾向を示す。これは、損傷の大きい方が、高周波成分の減衰が大きいことを反映しており、ピーク周波数の差分 Δf_p によりその相違が明確に現れたといえる。このように、超音波エコーのピーク周波数特性からもき裂発生以前の損傷による差異は認められた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究は、今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】

- ・ 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、48(6) (1999) 369-373.
- ・ M. Watanabe, H. Mori, M. Enoki and T. Kishi: Evaluation of Fracture Behavior in a Plasma-Sprayed Ceramics Coating by Acoustic Emission Using Laser Interferometer, Nondestructive Characterization of Materials IX, Edited by R. E. Green Jr., American Institute of Physics, New York, (1999) 27-32.
- ・ 川崎弘嗣、奥達雄：熱過渡負荷を受けた構造物の微小硬さ計によるマイクロき裂の検出、日本機械学会論文集 A 編、Vol. 66, No. 642 号、pp149-154 (2000)

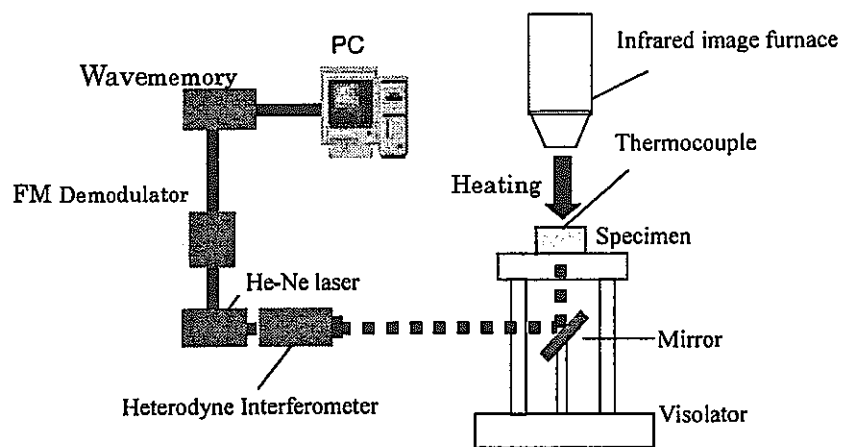


図1 レーザー干渉計によるAE計測システム

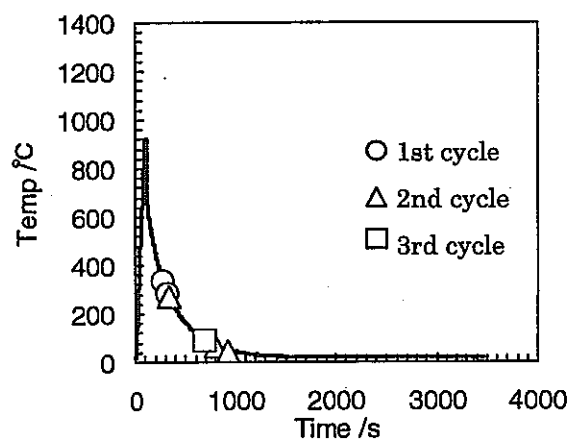


図2 熱サイクル中に発生するAE事象

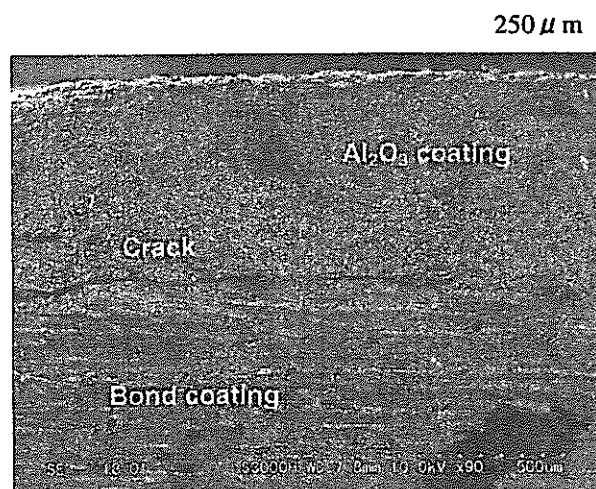


図3 熱サイクル後の試験片の断面写真

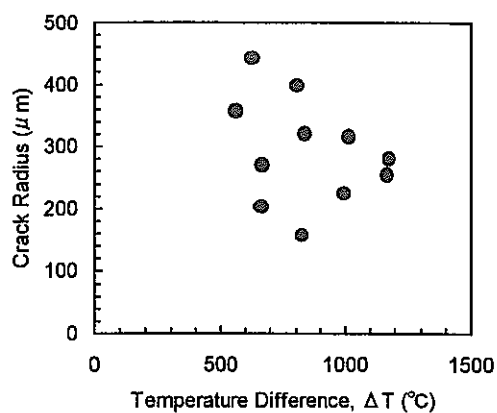


図4 微視割れ半径と温度差の関係

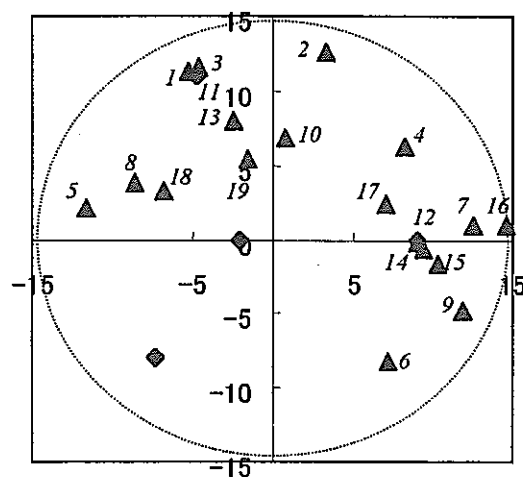


図5 AE位置標定結果

Evnt No.	u_1	u_2	u_3	α (Nm)	θ (°)
1	0.99241	0.02784	0.11975	0.09652	83.12
2	-0.93814	-0.15041	0.31189	0.03178	71.83
4	-0.80259	-0.01356	0.59638	0.01453	53.39
5	-0.50454	0.02605	0.86300	0.05270	30.34
9	0.43168	-0.40366	0.80667	0.32249	36.23
11	0.97433	-0.05956	0.21708	0.08352	77.46
19	0.99996	-0.00719	0.00592	0.09578	89.67

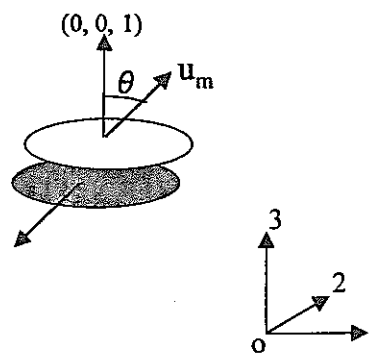


図6 微視割れの破壊モード解析結果

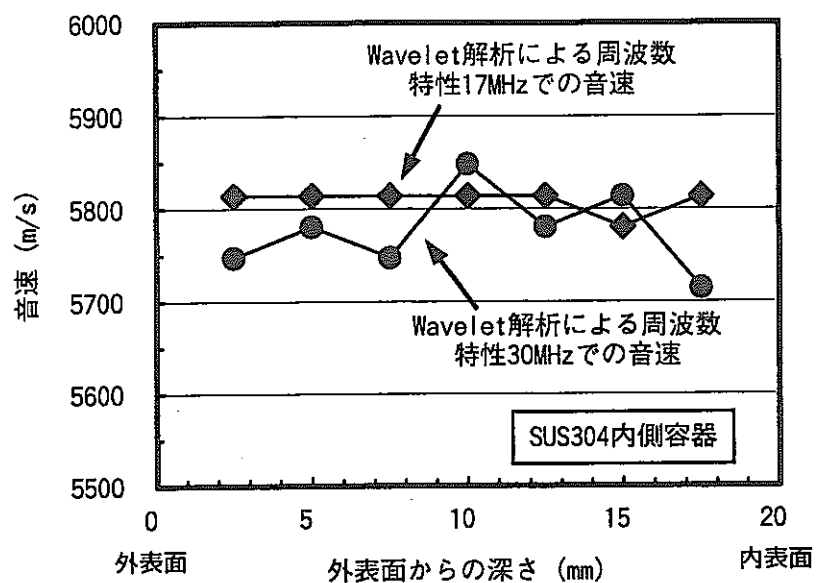


図7 ウェーブレット解析による容器板厚内の音速変化

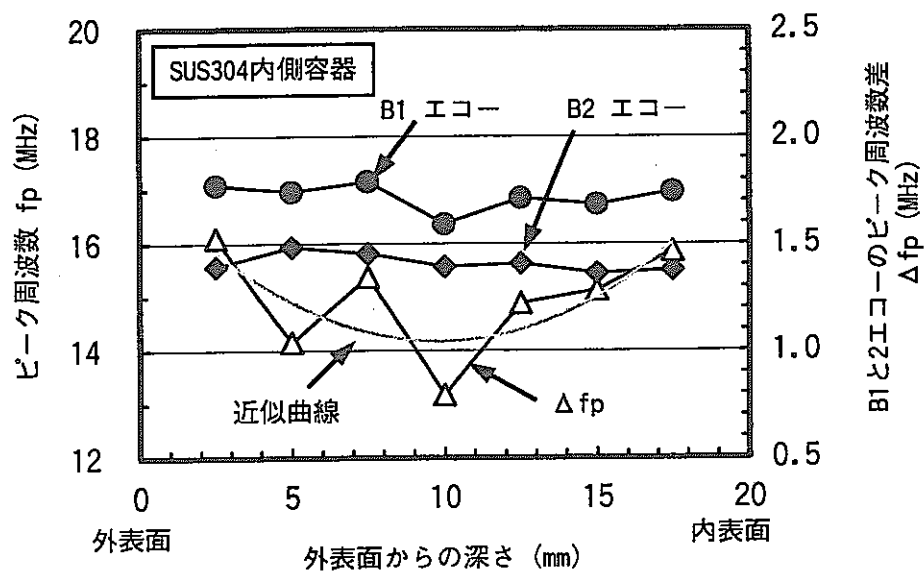


図8 B1 および B2 エコーのピーク周波数変化

先行基礎工学研究に関する平成11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			
大 学 側	北海道大学 大学院工学研究科 物質工学専攻 大貫惣明、渡辺精一、須田孝徳、山下真一郎** 〔*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燃料材料試験部照射材料試験室 赤坂尚昭、吉武庸光		
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 機構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施設		
通算研究期間	平成 9 年 1 2 月 ~ 平成 1 2 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 1 2 年 1 月 5 日 ~ 平成 1 2 年 3 月 3 1 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☒ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 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、特に燃料被覆管への使用が期待されている。本研究では種々の方法で作成した 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、熱処理加工法、鋼種によるの影響の観点から検討・評価する。			
【研究内容（概要）】 核燃料サイクル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、熱処理温度、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。			
【使用主要施設】 ・超高压電子顕微鏡、分析電子顕微鏡、試料加工機及び電解研磨装置（北海道大学）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 9、10 年度にわたり、ODS フェライト鋼試作材（再結晶材、20%および 40%加工材、He 雰囲気材）について、12dpa までの電子線照射を行った。再結晶材ではボイド形成が顕著なものの、加工材では抑制されたことから、本試作材では冷間加工がボイド形成抑制に有効であることを実証した。また、He 雰囲気で作成した再結晶材にはボイド形成がなかった。従って、ODS 鋼の製造に通常用いられる Ar 雰囲気は、ガスの巻き込みからボイド形成を促進する可能性を示した。このガス元素の効果は He では少なく、ボイド形成促進の効果は改良されると期待できる。特に、平成 10 年度においては、被覆管に成形した材料も試験し、同様の結果を示すことを確かめた。

【研究成果（当該年度）】

ODS マルテンサイト鋼の耐スエリング性を検討するために電子線照射を行い、その特性を評価した。電子線照射は超高压電子顕微鏡にて、670-720 K で 12dpa まで行った。基本的な検討項目は析出と転位組織の安定性、照射初期の転位ループの形成挙動とそれ以降のボイド形成である。

また前年度までに得られた成果も含め、ODS 鋼全体の耐スエリング特性の総合評価を行った。

【ODS マルテンサイト鋼の電子線照射試験】

ODS マルテンサイト鋼は相変態による高密度の転位組織と多量の炭化物形成が確認された(図 1)。ボイドは全く形成が認められず、前年度まで同一条件の電子線照射実験を行ってきた ODS フェライト鋼以上の良好な耐スエリング性を示した(図 2)。これは、高密度の転位と炭化物及び微細分散粒子はともに有効な点欠陥のシンクサイトとして作用したと推定される。

この転位組織と析出物及び分散粒子の安定性は、耐スエリング特性のみならず、高温での機械的性質の安定性にとっても極めて有効であると考えられる。しかし析出物が粗大化した場合は強度低下の原因となりうるので、ODS マルテンサイト鋼の更なる向上には、高温クリープ強度を含めた機械特性との兼ね合いを十分考慮した組成や熱処理の選択が必要であろう。

【ODS 鋼全体の耐スエリング特性の総合評価】

ODS フェライト鋼は基本的に耐スエリング性を有する材料であり、その挙動は材料製造過程の中間及び最終処理条件に依存した。再結晶処理の ODS フェライト鋼のスエリングピークはおおよそ 723K で、スエリングは最大でも約 1.3%にとどまった。これは従来のオーステナイト鋼に比較しても 1 桁少ない値である。再結晶化処理後の冷間加工は、高密度の転位を導入することから、スエリングの抑制に効果的である。MA 時に使用する不活性ガスは Ar よりも He を使用するとスエリングが低くなった。また ODS マルテンサイト鋼については、上記のようにボイドの形成は認められず最も良い耐スエリング特性を示した。(図 3)

電子線照射は移動の容易なフレンケル対型の照射欠陥が主体でありまた、薄膜試料であるための表面効果の影響により、スエリング挙動は中性子照射などに比べてかなりの加速的な結果を示すのが一般的である。このような電子線照射によっても ODS 鋼が良好な耐スエリング性を示したことは、中性子照射実験に先だつての材料の評価試験の有効性を示すものである。

また耐スエリング性を考慮した ODS 鋼の製造には、高転位密度の導入・保持、ガスバブルの形成、分散粒子の安定性など多用な因子を考慮する必要があることが明らかとなった。バブル形成及び分散粒子の微細化という観点からは、MA 時の不活性ガスは He がスエリングの抑制に有効であった。本研究では、電子線照射しながらの観察のため比較的大きいバブルのみの観察にとどまったが、さらに微細なバブルが組織中に存在し、ボイド形成の抑制に寄与している可能性がある。また、Ar や He ガスの挙動については、材料製造時の粒子の分散に影響を与えている可能性があり、この点は今後の研究を要する。

本研究で観察した分散粒子の分布やサイズは、結晶粒により異なる(図 4)。これはおそらく結晶粒の成長に依存すると推定された。分散粒子の形成のメカニズムについて解明することは、耐スエリング性及び高温クリープ強度を保持するために重要であり、この点についても今後の研究を要する。また、分散粒子とボイド形成の位置的関連性についての検討も行った。微細な分散粒子はマトリックスの方位に対して特定の優先方位を持つため、関連性を直接的には示せなかったが、分散粒子界面に微小なボイドの優先的形成はあるものの、粒子界面の照射欠陥のシンクとしての作用のほうが勝っていると推定される。なお、本研究の 12dpa までの照射量では、分散粒子に大きな変化は

見られず、分散粒子の安定性は良好であることが示された。

以上を要約すると以下のようになる。

種々の条件で作製した酸化物分散型強化鋼の電子線照射試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) ODS 鋼は優れた耐スエリング性を有する。再結晶処理のみの ODS フェライト鋼ではわずかなボイド形成が見られるが、これは電子線照射特有の薄膜効果によると推定される。スエリングピークはおよそ 723K になる。
- (2) 冷間加工または相変態処理により高密度の転位を導入することは、スエリングの抑制に有効である。
- (3) MA 時に使用する不活性ガスは Ar よりも He を使用すると耐スエリング性に有効である。
- (4) 分散粒子は照射下での安定性は良好であり、耐スエリング性に寄与していると推定される。
- (5) 以上の結果から、酸化物分散強化型 ODS 鋼の照射欠陥形成挙動は、転位密度、分散粒子のサイズ及びその分布、残留ガス濃度、ガスバブル及び相変態処理などに強く関連する。
- (6) 今後の課題は電子線照射の結果と中性子照射の結果の比較検討と分散粒子や炭化物等の照射下での安定性の検討であろう。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

ODS フェライト鋼の耐スエリング性が良好であり、特に ODS マルテンサイトは組織安定性と耐スエリング性の観点から優れていると判断される電子線照射の結果を得た。

本研究は、今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】

論文：

・J. Saito, T. Suda, S. Yamashita, S. Ohnuki, H. Takahashi, N. Akasaka, M. Nishida, S. Ukai ; J. Nucl. Mater., vol.258-263 (1998) 1264-1268

・S. Yamashita, S. Ohnuki, S. Watanabe, H. Takahashi, N. Akasaka, S. Uka ; J. Nucl. Mater. 1999(投稿中)

特許出願中：

大貫 惣明、高橋 平七郎、吉武 庸光、赤坂 尚昭、鵜飼 重治：耐スエリング性に優れた酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼の製造方法 (1999)

学会発表：(国際会議への発表も含む)

・斎藤 順、大貫 惣明、高橋 平七郎、赤坂 尚昭、鵜飼 重治：日本金属学会秋期講演大会

・J.Saito, T.Suda, S.Ohnuki, H.Takahashi, T.Nisida, N.Akasaka, S.Ukai ; Eight International Conference on Fusion Reactor Materials.

・山下 真一郎、斎藤 順、大貫 惣明：日本金属学会 1997 年秋季(121 回)大会

・山下 真一郎、斎藤 順、大貫 惣明、高橋 平七郎、赤坂 尚昭、鵜飼 重治：日本金属学会 1998 年春期(122 回)大会

・S. Yamashita, S. Ohnuki, S. Watanabe, H. Takahashi, N. Akasaka, S. Ukai ; Ninth Int. Conference on Fusion Reactor Materials

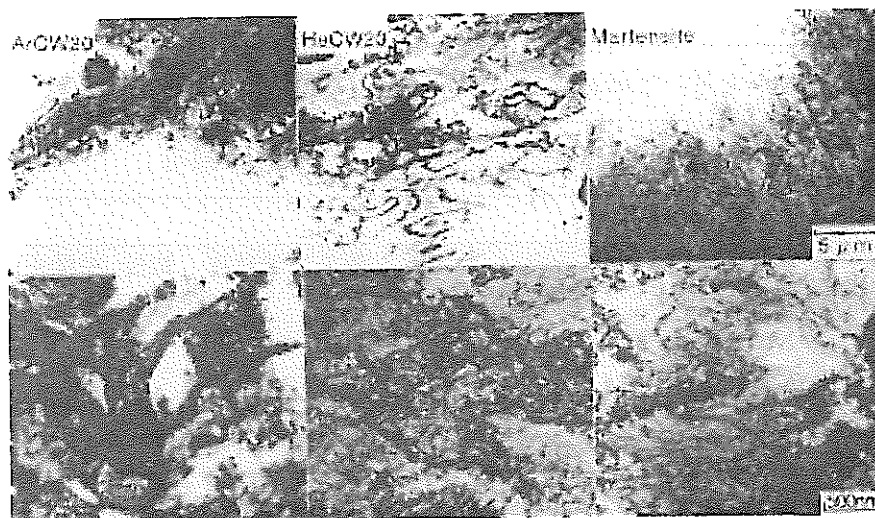


図1 管状試料の照射前の低倍組織 ArCW20, HeCW20, Martensite

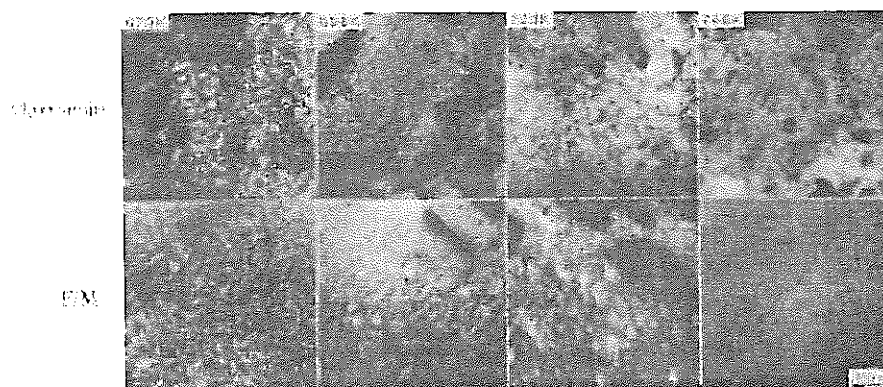


図2 管状試料 Martensite, F/M の12dpa 照射後のボイド組織

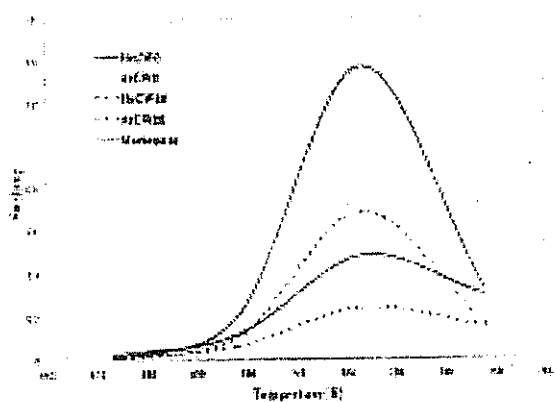


図3 管状試料 ArCW0, HeCW0, Martensite のスエリングの温度依存性(12 dpa)

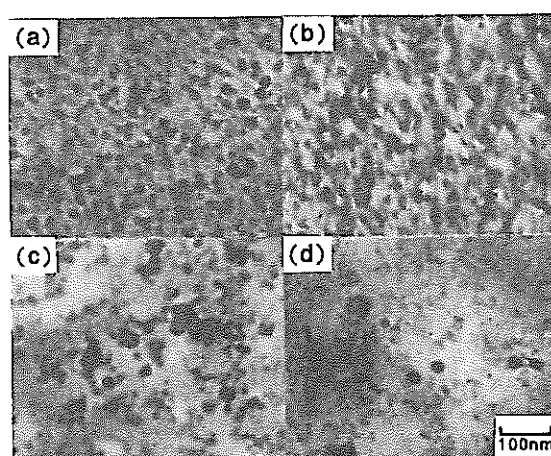


図4 板状試料の照射前の酸化物粒子の分散状態
(a) Ar1000, (b) Ar1100, (c) Ar1200, (d) He1100

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	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温度分布センサの「常陽」への適用		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 教授 中澤正治*, 助教授 高橋浩之, 大学院博士課程 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 中澤研究室 機構 大洗工学センター 高速実験炉「常陽」		
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11年 9 月 7 日 ~ 平成12年 3 月 3 1 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☒ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 核燃料サイクル開発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、ラマン散乱型光ファイバ温度分布センサを用いた高速炉プラントの温度分布測定技術を高速実験炉「常陽」を用いて開発することを本研究の目的とする。			
【研究内容（概要）】 ラマン散乱型光ファイバ温度分布センサ(RDTS)は、従来から用いられている熱電対などの電気式スポット型センサと異なり、電磁障害雑音の無誘導性、光ファイバに沿った数 km に及ぶ連続した温度分布の測定が可能などの長所を有しており、これを高速炉に適用することは、配管の冷却材漏洩位置検出など、プラント監視・保守の点から安全性・信頼性の向上に大きく貢献できるものと期待される。しかし、RDTS を放射線環境下で利用した場合、光ファイバに生じる放射線誘起伝送損失の影響により測定温度分布に誤差が生じるなどの問題点が発生する。そのため、高速炉プラントに RDTS を適用するためには、冷却材ナトリウムの放射化によるγ線の影響を確認し、測定結果の誤差を補正することが不可欠である。 本研究においては、「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光ファイバを敷設し、RDTS を用いて測定を行う。また、放射線による測定結果を補正する方法として、2点の校正用の熱電対を用い光ファイバの伝送損失を位置に寄らず一定であると仮定して補正する方法(伝送損失一定の仮定を用いる補正法)、及び光ファイバを往路と復路が同じ位置を通るように敷設し往路と復路での同一計測点の信号を比較することにより光ファイバの伝送損失を補正する方法(ループ型補正法)の二つの補正法について検討を行い、RDTS の高速炉プラントへの適用性を評価する。 また、光ファイバの設置条件による温度測定への影響の評価を行うために、2次主冷却系配管の外装板表面に1次系で使用した光ファイバと同仕様の光ファイバを設置して測定を行う。			
【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80mのOH基ドープ光ファイバ(耐放射線光ファイバの一種)を螺旋状に設置し、「常陽」100MW第30～32サイクルにわたって温度分布を測定した。また、伝送損失一定の仮定を用いる補正法の評価を行った。

－平成10年度－

平成9年度に測定した温度分布の測定結果には周期性が見られた。この原因を検討するため、2次主冷却系配管の外装板表面に1次系で使用した光ファイバと同仕様のOH基ドープ光ファイバを設置して、主に施工状況による温度測定への影響に着目した補助試験を行うと共に、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、ループ型補正法の評価を行うために、平成9年度に測定を行った場所と同じ位置にフッ素ドープ光ファイバ(耐放射線光ファイバの一種)の往復敷設を行った。

－平成11年度－

平成10年度に敷設したフッ素ドープ光ファイバを用いて、「常陽」100MW第33サイクル以降の温度分布を測定した。また、その測定結果を用いてループ型補正法の評価を行った。

【研究成果】

(1) OH基ドープ光ファイバ(一方向敷設)の測定結果

「常陽」格納容器床下の1次主冷却系配管外装板表面に、約80[m]のOH基ドープ光ファイバを螺旋状に50[cm]ピッチで一方向に敷設した。(配管の直線距離にして約13[m]。)光ファイバの設置状況を図1に示す。また、熱電対はRDTSの温度校正用として2箇所(測定装置から47m(TC-3)、102m(TC-1)の位置)、比較用として1箇所(測定装置から62m(TC-2)の位置)にそれぞれ設置した。

(a) 温度分布測定結果

図2に第30サイクルの出力上昇時のRDTSと熱電対の温度の推移を示す。出力上昇前(3月17日)は熱電対とRDTSの測定値に大きな差は見られないが、出力の上昇に伴って熱電対とRDTSの測定値の差は大きくなった。この温度のずれは、光ファイバの放射線環境下での使用により、原材料のガラスにカラーセンタが形成されて放射線誘起伝送損失増加現象を生じ、後方散乱光の減衰が大きくなったために生じたものである。また、放射線により欠陥の生じた光ファイバを透過する光の伝播経路が長いほどその影響を受けるため、温度分布は右下がりの傾向を示した。

また、当初はほぼ一様であると考えていた配管外装板表面の温度分布に周期性が見られた。この温度分布の周期性の原因は、二次系で行った補助試験及び1次系での施工状況調査から、配管形状及び保温材の施工状態が影響したものと考えられる。

(b) 温度分布の時間変化

第30～32サイクルのRDTS及び熱電対の温度の経時変化を図3に示す。原子炉起動直後からRDTSと熱電対との温度の差は増加し、その後時間の経過に伴って一定となる傾向が見られた。また、その大きさは測定用光ファイバの先端付近に設置した熱電対の位置で約25℃を示した。原子炉を停止すると温度のずれはある程度回復し、再び運転を開始すると温度のずれは原子炉停止直前の状態まで速やかに増加し一定となった。つまり、光ファイバ敷設後の最初のサイクルである第30サイクルでは温度のずれは徐々に増加するが、その後の第31・32サイクルにおいては温度のずれは速やかに増加する。RDTSの結果が示すこれらの挙動は、光ファイバの放射線誘起伝送損失の挙動とよく一致している。このことは「常陽」一次系配管領域における線量当量の大部分が ^{24}Na の γ 線によるものである事からも裏付けられる。

(c) 伝送損失一定の仮定を用いる補正法

光ファイバ設置位置での γ 線線量当量率分布、配管内冷却材温度の分布はほぼ一定であると考えられる。本試験では光ファイバの伝送損失分布を一定と仮定した補正法の適用を試みた。図4に光ファイバで得られた補正前の温度分布と、熱電対TC-1, 3の2点の温度を用いて補正を行った結果を併せて示す。TC-2位置の熱電対とRDTS補正前の温度の差は8[℃]あったが、補正を行うことで約2.5[℃]まで温度のずれが減少しており、本手法が補正手法として有効であることが確認された。

(2) フッ素ドープ光ファイバ(往復敷設)の測定結果

OH 基ドープ光ファイバと同一経路を辿るようにしてフッ素ドープ光ファイバを往復敷設した。光ファイバの設置状況を図 5 に示す。また、RDTs との比較用として、測定装置から 10(230)m、40(200)m、100(140)m、111(129)m の 4 箇所に熱電対を設置した。(括弧内は復路の位置)

(a) 測定結果

図 6 に第 33 サイクル出力上昇前及び定格出力到達後 21 日目、68 日目の RDTs による温度分布測定結果、及び比較用熱電対の温度測定結果を示す。出力上昇前の測定結果から、放射線誘起伝送損失のない状態では往路・復路の温度分布は 1℃程度で一致し、熱電対の測定結果ともほぼ一致した。しかし、原子炉運転中は OH 基ドープ光ファイバの測定結果と同様に、RDTs から遠くなるほど放射線誘起伝送損失の影響を受けるため温度のずれは大きくなった。その結果、光ファイバの末端では、非放射線環境下にある 30m 位置で約 10℃に達した。この温度のずれは定格出力到達後 21 日目と定格出力到達後 68 日目ともに同じ大きさであり、経時変化は確認されなかった。これは、OH 基ドープ光ファイバでの測定と同様放射線誘起伝送損失が一定となっている事によるものと考えられる。

(b) フッ素ドープ光ファイバと OH 基ドープ光ファイバの比較

図 7 に第 33 サイクルで得られた温度を第 30 サイクルのそれと比較して示す。放射線誘起伝送損失による温度のずれが、第 30 サイクルでは光ファイバの終点で最大の約 25℃であったのに対し、第 33 サイクルでは光ファイバの始点・終点で最大の約 10℃と小さな値を示した。このことから、フッ素ドープ光ファイバが OH 基ドープ光ファイバに比べて耐放射線性に優れている事が確認された。

(c) ループ型補正法

図 8 に定格運転中の RDTs と熱電対による測定温度、及びループ型補正法と伝送損失一定の仮定を用いる補正法による補正結果を示す。ループ型補正法を用いた伝送損失補正を行うことにより、111m の位置に設置した比較用熱電対との差は測定した全期間を通して 1～2℃程度に補正する事ができた。このことからループ型補正法が有効であることを確認できた。また、フッ素ドープ光ファイバを用いた試験では、伝送損失を一定と仮定した補正結果とループ型補正法により補正した結果が、測定した全期間を通して熱電対の温度とよく一致した。

以上のことから、フッ素ドープ光ファイバを用いた温度測定では、設置環境(温度、線量当量率分布等)に大きく影響されることなく上記両伝送損失補正法とも有効であることを確認できた。但し、伝送損失一定の仮定を用いる補正法では、温度の再現性が校正用熱電対の設置条件に大きく依存することから多くの校正用熱電対を使用して補正することが必要である。

以上の結果から、高速炉等の放射線環境下にあっても RDTs は十分に適用可能であることが確認された。

【今後の予定(翌年度以降の概要)】

本研究は平成 11 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) 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.

(3) 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.

(4) 木村、中澤、市毛、「光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定方法の評価(共同研究報告書)」 JNC TY9400 2000-001 (1999/12)

(5) 木村、中澤、市毛 他、「光ファイバを用いた高速炉プラントの温度分布測定方法の評価」

日本原子力学会 2000 年春の年会、R49(2000/3/30)

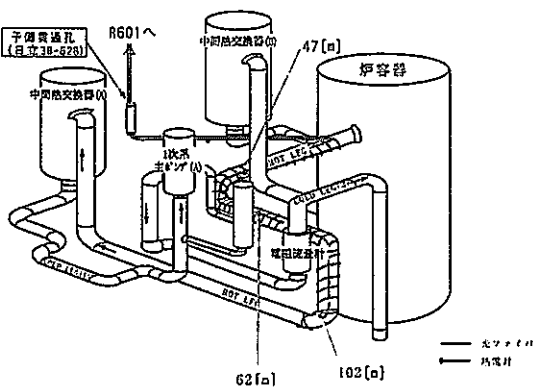


図1 光ファイバの敷設図 (一方向敷設)

— TC-1での熱電対の測定温度 — TC-3での熱電対の測定温度
— TC-1でのRTDSの測定温度 — TC-3でのRTDSの測定温度

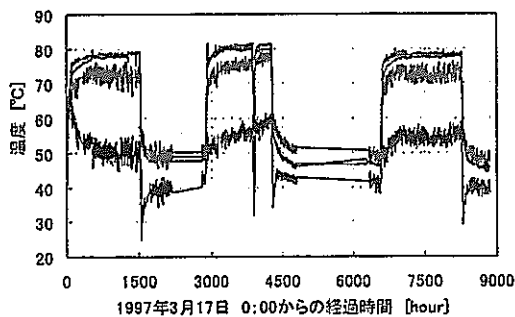


図3 TC-1・TC-3位置での熱電対とRTDSの測定温度の変化

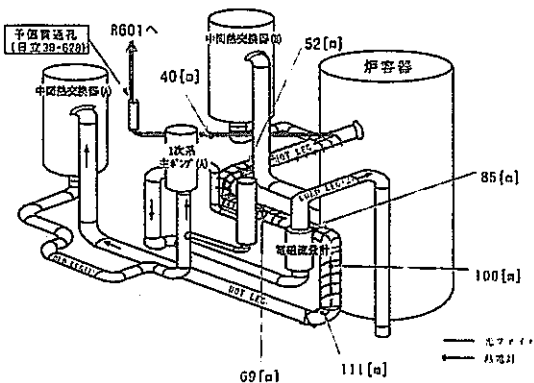


図5 光ファイバの敷設図 (往復敷設)

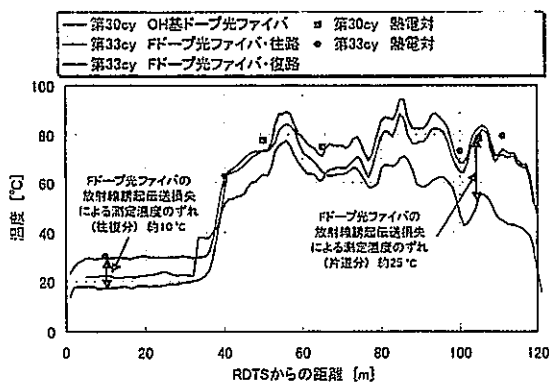


図7 フッ素ドープ光ファイバとOH基ドープ光ファイバの温度分布比較

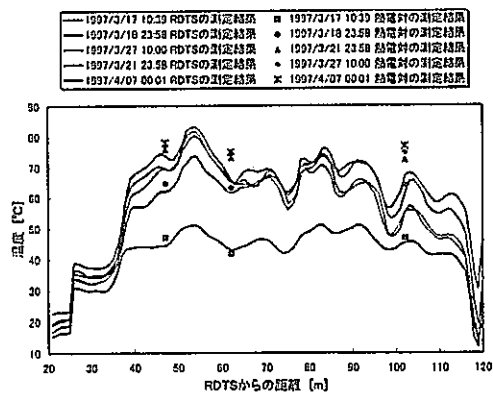


図2 第30サイクル出力上昇時の温度分布

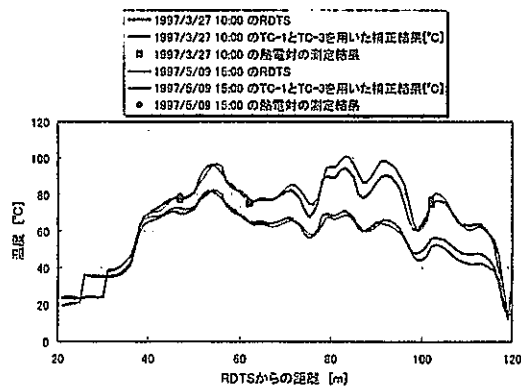


図4 伝送損失一定の仮定をした温度補正結果

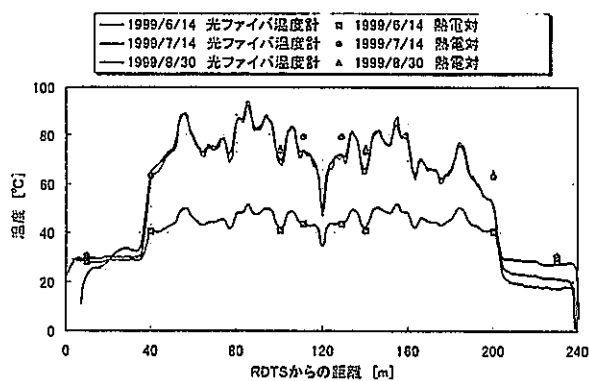


図6 第33サイクル出力上昇前と出力上昇後、停止直前のRTDSによる温度測定結果

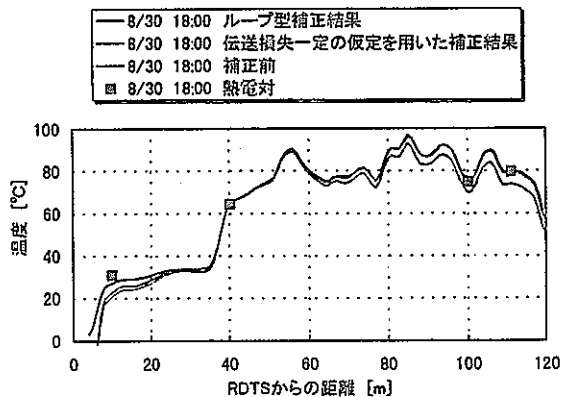


図8 RTDSと熱電対による温度測定結果、ループ型補正法と伝送損失一定の仮定による補正法の補正結果 (出力上昇後68日目)

先行基礎工学研究に関する平成11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 謙 同 助教授 石塚鐵夫〔*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 FBR システム Gr 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 酒井研究室 機構 大洗工学センター 重水炉工学試験棟		
通算研究期間 (予定)	平成10年 4月 ~ 平成12年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年 7月 8日 ~ 平成12年 3月 31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
空気雰囲気下で漏洩 Na を受けるライナーは、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の確立をめざす。			
【研究内容（概要）】			
本研究では、漏洩 Na が炭素鋼板を腐食減肉するとともに、高温溶融塩塊となって変形した床上を移動し、新たな位置で高温熱源として振る舞うというプロセスを数値解析でシミュレーションする手法を開発することを目的とした。 研究内容は、高温熱源による熱伝導問題、漏えい Na による材料の高速腐食減肉問題が相互に関係しあつたいわゆるカップリング問題を扱う手法を検討した。SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 理論に基礎を置く、粒子法 (Particle Method) のモデル化を試みた。この方法では漏洩 Na は粘性をもった液体塊 (粒子群で表現) として材料上を移動することができる。さらに従来の手法として、有限要素法を用いた減肉・熱伝導解析を2次元問題でおこなった。その結果、材料の熱変形を考慮した解析結果は熱伝導解析結果にある程度の影響を及ぼすことが示された。			
【使用主要施設】			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成10年度研究では、有限要素法による熱伝導・変形・減肉解析をおこない、変形を考慮した繰返し解析が有効であることを示した。本研究（平成11年度）は研究の2年目であり、ナトリウムの流動を粒子法で表現して解析の精度を上げた。

【研究成果（当該年度）】

2. 理論

2.1 粒子法

SPH 法は物体を有限個の粒子として分割し、その任意の点の集合を用いて近似を行うアルゴリズムである。また、物体の物理量を近似表現する方法としてはカーネル(kernel) $W(r, h)$ を導入し、Fig. 1 に示したようにある影響範囲 h の内部にある点集合の物理量を中心点 i に内挿する。

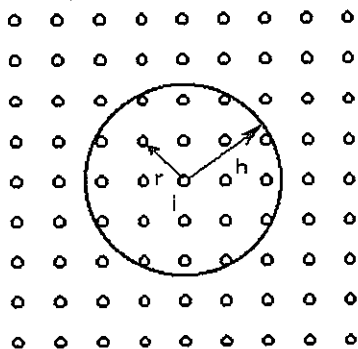


Fig.1 Schematics of SPH method

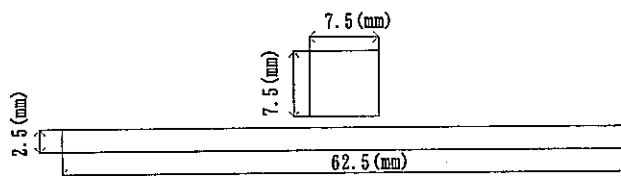


Fig.2 Specification of analytical model

従ってメッシュベースの分割を行う必要がなく、次のような影響範囲の全体で積分し、平均化された近似表現となる。

$$f(x) = \int f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、 x は三次元位置ベクトル、 $W(x-x', h)$ はカーネル関数である。

ここでは支配方程式として次の連続の式とナビエストークス方程式を用いた⁽²⁾。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (3)$$

Fig. 2 は解析モデル形状、Fig. 3 はここで使った粒子の全体数を表す。板部は 756 個の粒子で上の Na は 256 個の粒子で表現した。また、図のようにリブを付けて板を拘束する。



Fig.3 Analytical model of SPH

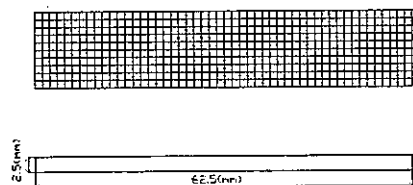


Fig.4 Mesh for temperature analysis

2.2 FEM 解析

熱伝導と熱応力は有限要素法を用いたその解析モデル図を Fig4 に示す。

(a) 熱伝導解析

非定常熱伝導問題に対する解析対象全体の有限要素式は(4)式のように表される。

$$[K]\{\Phi\} + [C] \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \{F\} \quad (4)$$

なお、 $\{\Phi\}$ は全体の節点温度ベクトル、 $[K]$ は熱伝導マトリックス、 $[C]$ は熱容量マトリックス、 $\{F\}$ は熱流速マトリックスである。この式を用い非定常の節点温度を求めた。図 4 に要素分割の図を示す。節点数は 2761 個、要素数は 2500 個、時間増分 0.05 秒、また四角形要素を用いている。

(b) 熱応力解析

要素の平衡方程式は(5)式のようにかける。

$$[k]\{\alpha\} = \{f_s\} + \{f_v\} + \{f_t\} \quad (5)$$

ここで $[k]$ は要素の剛性マトリックス、 $\{f_s\}$ 、 $\{f_v\}$ は、それぞれ表面力および体積力による節点荷重ベクトルを表す。また $\{f_t\}$ は熱ひずみによる見かけの節点荷重ベクトルである。これをすべての要素について求め、これらをたし合わせるにより系全体の平衡方程式が得られ、それを解くことによって変位を求める。図 5 に要素分割の図を示す。ここでは節点数は 5261 個、要素数は 10000 個、三角形定ひずみ要素を用いている。

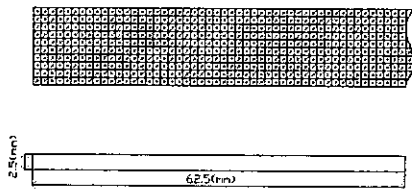


Fig.5 Mesh for structure analysis

3. 解析方法と結果

解析全般の流れ図は Fig.6 のようになる。Na 漏えい事故においては、熔融 Na 塩が床ライナー鋼板上を流動し、鋼板が高温腐食を受け損傷した。そこでこの解析では、熔融 Na 塩に SPH 法を適用しその流れを解析し、高温の熔融 Na 塩による鋼板の変形を FEM により求めた。この FEM による固体の解析では、まず高温物質付着による温度変化を熱伝導解析により求め、その結果を構造解析にフィードバックし変形を求めた。

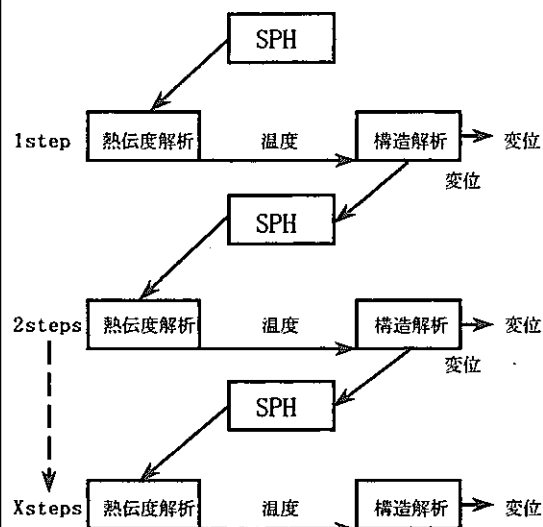


Fig.6 Flow chart of this analysis

ここで、漏えい燃焼して落下した Na の温度は 800 度とし、使用した鋼板の材料定数は

比重量：7849kg/m³, 初期温度：50℃

比熱：0.11Kcal/kg℃ (温度依存なし)

熱伝導率：0.013Kcal/m s °C (温度依存なし)

ヤング率：18000kg/mm², ポアソン比：0.3 (—)

線膨張係数：1.3×10⁻⁵mm/°Cである。

Fig. 7 には SPH で解析した流体の流れを示す。Fig. 2 のモデル図との比較より高温流体の流れとリブ拘束によって変形が生ずる様子がわかる。また、時間を経るにしたがい流体が左右対称に流れ、それに応じて、金属板が変形してゆく挙動が求められている。

Fig. 8 に熱伝導解析の結果を求められた温度分布を示す。時間の経過と流体の流れに従って温度分布が変化し、この温度変化により熱応力が生じる。

結論

以上の解析より、ナトリウム漏洩による液体 Na の挙動と、それによって生ずる熱応力、板の変形が連成してあらわれる一連の現象が求められることが明らかとなった。本手法をライナー設計に反映する可能性が示された。

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

本研究は、今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】

$$\Delta t = 0.001$$

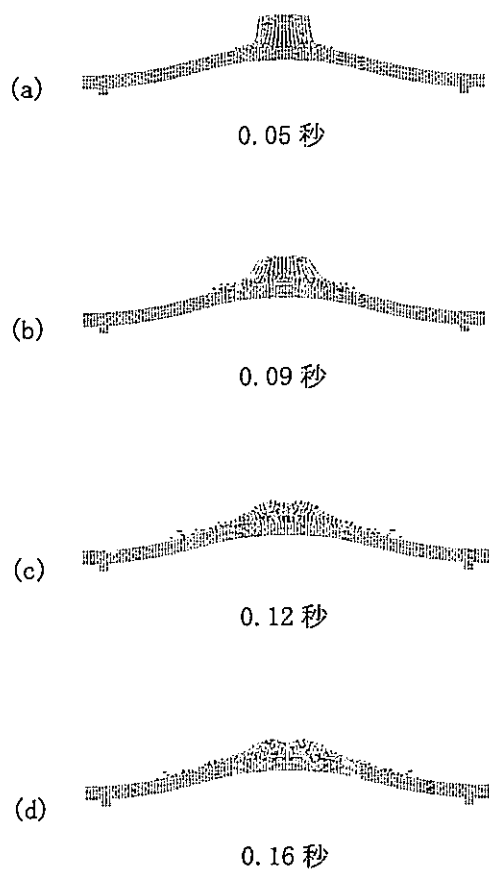


Fig.7 Stream of particle fluid

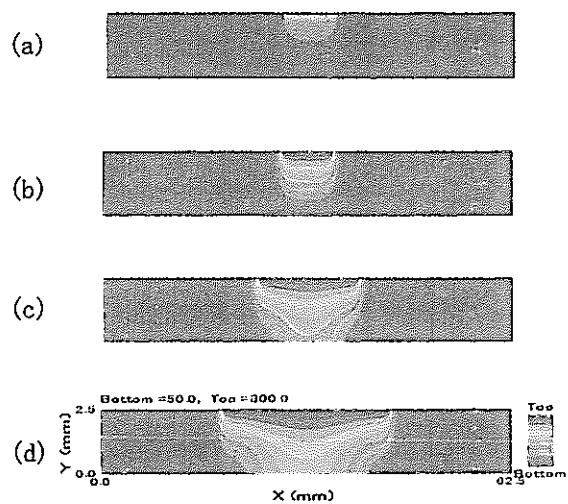


Fig.8 Distributions of temperature

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	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	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">東京工業大学 原子炉工学研究所 ニノ方 壽 教授, 澤田 哲生 助手, 堂田 哲広 大学院生** [*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 システム技術開発部 熱流体技術開発 Gr 岡野 靖</td> </tr> </table>			大 学 側	東京工業大学 原子炉工学研究所 ニノ方 壽 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 Gr 岡野 靖		
大 学 側	東京工業大学 原子炉工学研究所 ニノ方 壽 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 Gr 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 ニノ方研究室 機構 大洗工学センター ナトリウム流動伝熱試験室										
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11年12月17日 ~ 平成12年 3月31日								
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☒ 研究生の受入れ ☒ 共同研究										
【研究目的】 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。											
【研究内容 (概要)】 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。 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。											
【使用主要施設】 情報センターおよび大洗工学センター内の計算機											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成10年度の研究では、燃焼領域近傍の物質輸送、熱輸送に関し、流れを仮定した対流・拡散の妥当性に基づいて、瞬時化学平衡反応モデルを新たに適用して実験の解析を行い、その有効性、妥当性を示した。解析から得られた化学種の濃度分布、温度分布、流速分布を用いて、エアロゾル駆動力として推測される熱泳動力、対流によるドラッグ、重力を計算し、エアロゾルの飛散率(沈降率)の簡易評価を行った。その結果、従来まで解析的評価が不可能であったエアロゾル飛散率の解析手法の方向性が示された。

【研究成果】

平成11年12月までの研究成果の概要をまとめる。

(1) 3次元燃焼流体解析プログラムの開発

プール表面近傍に着目すると、プール表面より蒸発したナトリウム蒸気は、対流・拡散により輸送され、同じく雰囲気中で対流・拡散により輸送されてきた酸素および水蒸気と化学反応を生じる。この時、対流・拡散場は反応熱によって影響を受けて変化するため、化学反応過程と物質・熱輸送過程の結合を考慮する必要がある、さらに燃焼領域から離れた領域における多次元物質・熱輸送の影響を考慮するため、瞬時化学平衡反応モデルを組み込んだ3次元燃焼熱流動解析コードの開発を行った。

プール面近傍の対流場温度の空間的な変化は大きいと考えられるため、場の温度変化による密度変化を考慮した非圧縮性流体(低マッハ数流れ)として流れ場を解く必要がある。具体的には、密度を温度の関数とし、圧力の動力的成分の変化によって生じる密度変化の成分を圧縮性流体の構成方程式から取り除くことにより、熱対流に無関係な音波成分を取り除く、Zero-Mach 数近似手法を導入した。これは、圧縮性流体の構成式で非圧縮性流体を計算すると収束率が悪く、事実上計算が不可能である数値解析上の困難を回避できるという特徴をもつ。

また、反応生成物として固体、液体のエアロゾル成分を解析するためは、質量の保存式において、気体成分がエアロゾル成分に変化する過程を考慮する必要がある。エアロゾル成分は気体成分と比較して体積が十分に小さいことから、流動計算ではエアロゾルの生成は、質量の消滅項として扱った。

さらに、化学反応による急激な温度変化は密度を急激に変化させ、計算を不安定にする。そのため、エネルギー式と化学種の質量保存式を状態方程式を介してカップリングし、温度変化と化学種の濃度変化を密度変化に陽的に反映させ、密度の取り扱いを厳密にした。

全体の計算アルゴリズムとしては、非圧縮性流体の計算アルゴリズムである SMAC 法に似た手法を用い、行列解法は CG (共役勾配法) 系のアルゴリズムを採用した。(図1)

検証計算として、等温流れのベンチマークである Cavity 流れ問題と自然対流のベンチマークである De Vahl Davis 問題の計算を行った。前者について、図2に Re 数が10の場合と Re 数が100の場合の計算結果を示す。後者について、図3に Pr 数0.71かつ Ra 数 1×10^6 の場合の計算結果を示す。結果、ベンチマーク解と良好な一致が確認され、プログラムの妥当性が明らかになった。

(2) 小規模プール燃焼実験

ナトリウムプール燃焼火炎内の生成物成分、火炎温度を実験により得るために、将来、LIF測定実験が予定されている。この測定手法の確立のために、燃焼を安定させ、測定の妨げとなるエアロゾルを測定装置から排除する事が必要となる。実験装置を図4と図5に示す。

本実験の目的は、安定な燃焼条件の取得、及び、観測を妨げるエアロゾルを排除する手法の確立、さらにこれまで直接測定されたことのないナトリウム火炎温度の測定である。実験により、注入流量、酸素濃度およびプール温度などの条件を変化させ、燃焼が比較的定常的に安定で、エアロゾルが発生してから速やかに排気される条件の取得に成功した。また、火炎温度については、熱伝対による火炎温度測定結果は予測されたよりも低い温度が得られた。その原因として、火炎内への熱伝対の挿入が燃焼過程へ与える影響が大きい事が挙げられる。これは、物理的接触のない測定手法である LIF 実験の必要性を示す結果とも言える。今後は、サイクル機構を中心とした LIF 測定実験が行われる予定である。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、エアロゾルの輸送過程を 3 次元燃焼流体解析プログラムに組み込み、プール燃焼実験を解析して、解析手法の妥当性を検証する。解析プログラムの妥当性が示された後、主要な物理パラメータにおいてサーベイ計算を行い、ナトリウムプール燃焼における安全性の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】

- 1) 堂田哲広、二ノ方壽、大平博昭、「ナトリウムプール表面近傍におけるエアロゾル挙動解析」、日本原子力学会 1999 年秋の大会予稿集、p405
- 2) Norihiro Doda and Hisashi Ninokata, prediction of release rate of burnt sodium as aerosol, Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9) San Francisco, California, October 3 - 8, 1999.

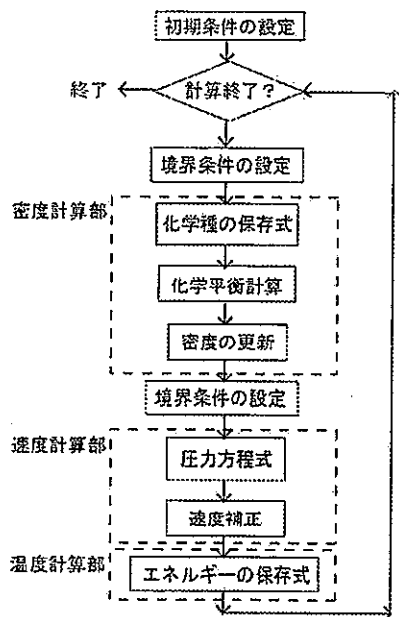


図1 計算アルゴリズム

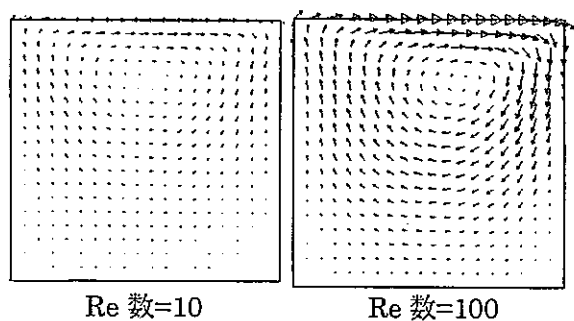


図2 2次元正方キャビティ流れ

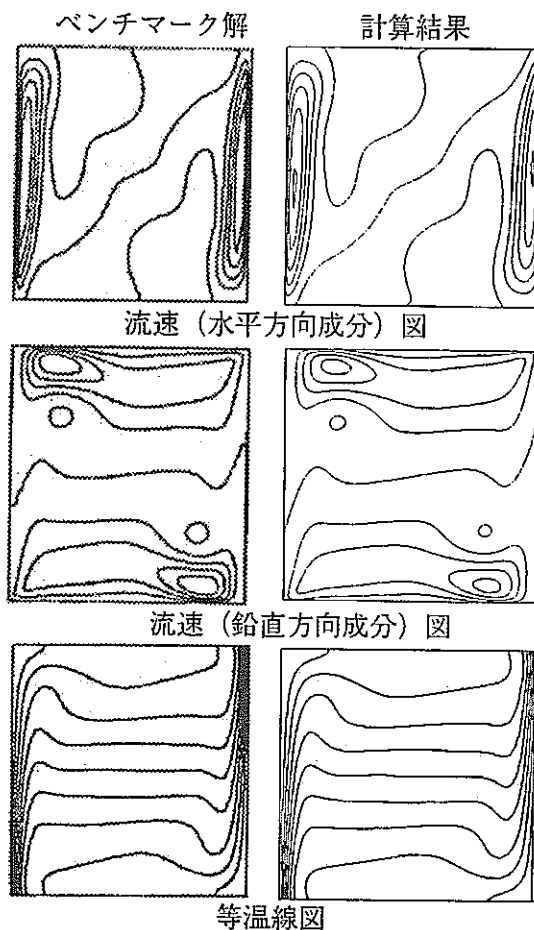


図3 De Vahl Davis 問題 ($Pr=0.71$ 、 $Ra=10^6$)

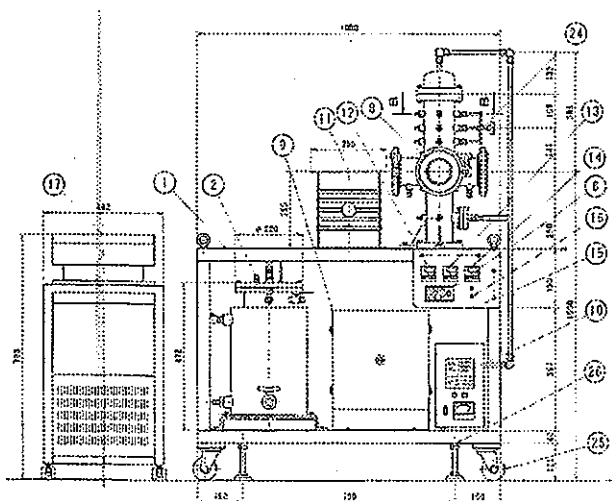


図4 実験全体装置図

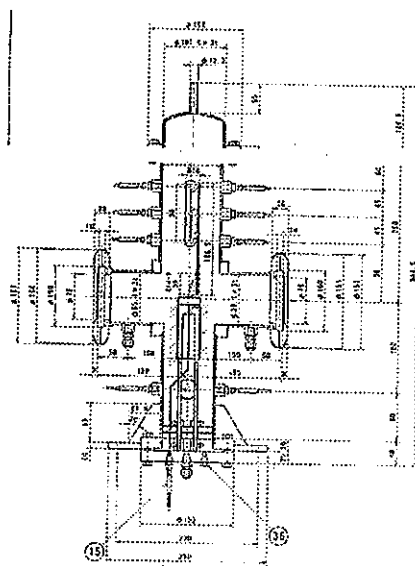


図5 実験装置燃焼容器の拡大図

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	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 助教授 越塚誠一, 助手 向原民		
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 Gr 山口彰, 飯田将雄, 岡野靖		
研究協力 実施場所	東京大学 岡研究室 機構 大洗工学センター ナトリウム伝熱流動試験室		
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 11 年 11 月 16 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 液体金属冷却高速増殖炉(LMFBR)の安全性のより一層の向上のためには、ナトリウム漏洩燃焼の評価手法の開発が必要である。粒子法は、従来の流動解析手法では困難な流体の大変形や液滴の飛散等を取り扱うことができ、液体ナトリウムの飛散や落下のみならず、空気中での燃焼、燃焼生成物の堆積等が複合した現象を解析できると考えられる。そこで本研究では、ナトリウム漏洩燃焼解析に必要な粒子計算モデルを開発し、予測手法の確立を目指す。			
【研究内容(概要)】 ナトリウムの漏洩燃焼挙動を予測するためには、空気中でのナトリウム燃焼とともに、漏洩口からのナトリウムの流下、ダクト等への衝突・飛散、床への落下、床上での流動および燃焼生成物の堆積、を総合的に解析する必要がある。そこで、ナトリウムの漏洩燃焼に関する以下の粒子計算モデルを開発することで、ナトリウム漏洩燃焼の総合的な解析を目指す。 (1) 粒子法の3次元化、(2) 漏洩口における流下モデル (3) ダクトへの衝突・飛散モデル、(4) ダクトを伝う流れのモデル (5) 空気中での燃焼モデル、(6) 気流や湿分の影響に関するモデル (7) 床上での燃焼モデル、(8) 燃焼生成物の堆積モデル これまでの東京大学と機構との共同研究によって、(2), (3)の計算モデルの開発および水模擬実験による検証を行なった。また、機構においては(5), (8)のモデルが開発され、ナトリウム漏洩燃焼実験の解析も行なわれた。平成10年度以降は、さらに以下の研究を進める。 ・数値安定性に優れた燃焼生成物の堆積モデルの確立 ・ダクトを伝う流れの計算モデルの開発 ・効率的な3次元計算方法の研究			
【使用主要施設】 特になし			

【進捗状況(当該年度までの概要)】

平成10年度は、凝固の粒子計算モデルの開発、検証、広がり挙動のシミュレーションを実施した。

平成11年度は、表面張力の粒子計算モデルの開発、検証、広がり挙動のシミュレーションを実施した。

【研究成果】

平成12年3月末までの研究成果の概要をまとめる。

(1) 表面張力の粒子計算モデルの開発

ナトリウムなどの液体の広がり挙動は、その表面張力にも影響を受ける。そのため、表面張力の粒子計算モデルを新に開発した。粒子法では、界面形状を描かなくても自由液面を含む流体の解析ができるため、流体の分裂や合体を容易に計算ができる一方で、表面張力を決定するのに必要な界面の曲率を導くことが難しい。そこで、粒子数密度という値の分布を用いて、曲率の大きさと方向を計算する方法をあらたに開発した。これを用いて表面張力を計算し、各粒子に外力として与えるようにした。(図—1)

この計算法では、液面形状を描く必要がないので、流体が分裂や合体をする場合にも容易に適用することができる。

(2) 表面張力モデルの検証

ここで開発した表面張力の粒子計算モデルを用いて、液滴の振動を解析した。一辺の長さ 7.5cm の2次元正方形の初期形状をしたエタノール(密度 798 kg/m³、表面張力係数 0.02361 N/m)とし、20x20 の粒子で計算した。計算結果を図—2に示す。0.2 秒後には初期に辺であったところは頂点に、初期に頂点だったところは辺になっていることがわかる。0.4 秒後には、やや頂点がなまっているものの、初期の形状に戻っている。BrackbillらはVOF法を用いて同じ計算をしており、液滴の形状および振動周期ともに本計算結果と良く一致している。従って、本研究であらたに開発した表面張力の粒子計算モデルは妥当であることが確かめられた。

(3) 表面張力が卓越する場合の液体の広がり挙動の解析

表面張力が卓越する場合として、ボンド数($=\rho g H^2 / \sigma$)157 における液体の広がり挙動のシミュレーションをおこなった。計算体系を図—3に示す。初期に左側に配置された液柱が重力により崩壊する。液体は 3200 個の粒子で、固体壁は 1509 個の粒子で表されている。

計算結果を図—4に示す。0.2 秒後と 0.4 秒後では、角が多少丸くなっているものの、表面張力が無視できる場合と比較してあまり大きな違いはない。0.6 秒後では、初期に流体が接していた左側の壁面から流体が離れており、これは表面張力の影響である。表面張力が無ければ、左側の壁面から流体が離れることはない。さらに、0.8 秒後には薄く引き伸ばされた流体が、表面張力によって液滴に分裂し始め、1.0 秒後では分裂が終了している。また、板の右端を過ぎた液体は、こぼれ落ちている様子が計算されている。このように液体の分裂挙動を明瞭に解析できるのが粒子法の大きな利点である。

図—5に、崩壊する液柱の先端位置の変化を示す。表面張力が卓越する場合以外の結果は、昨年度のものである。標準ケースは、表面張力も粘性も無視できる場合である。標準ケースと比較して、表面張力が卓越するケースでは先端位置の進行がやや遅れるものの大きな違いはない。むしろ、広がり速度については粘性の方が大きな抑制効果を持っていることがわかる。

【今後の予定(翌年度以降の概要)】

平成12年度はこれまで開発した計算モデルを用いた粒子法の総合的な検証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) S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving Particle Semi-implicit Method for Analyzing Large Deformation of Free Surfaces," Proc. ASME-FEDSM'00, Boston, June 11-15, 2000, FEDSM2000-11270 (to be published)

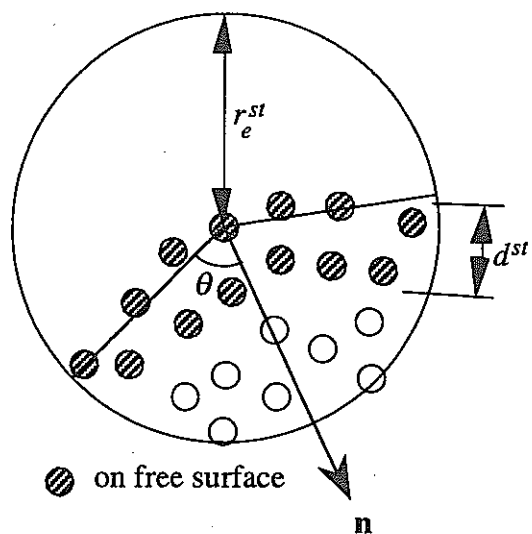


図1 表面張力の粒子計算モデル

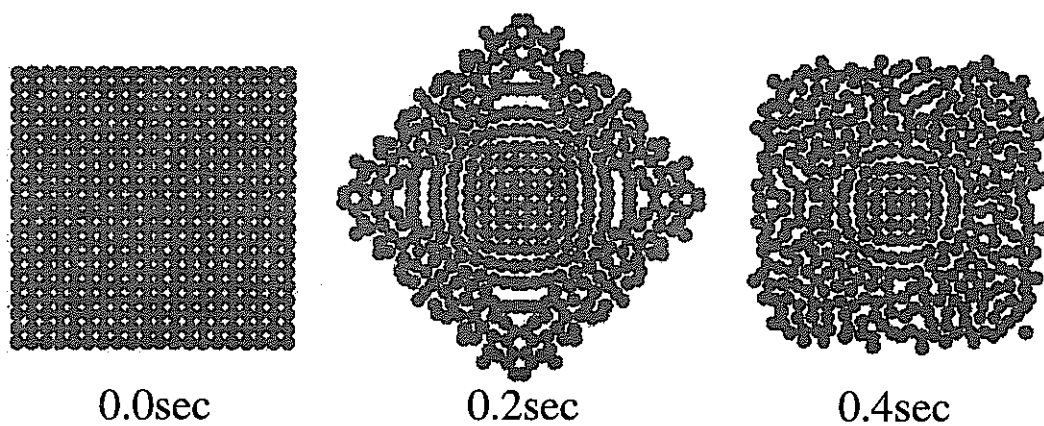


図2 表面張力によるエタノール液滴の振動の計算結果

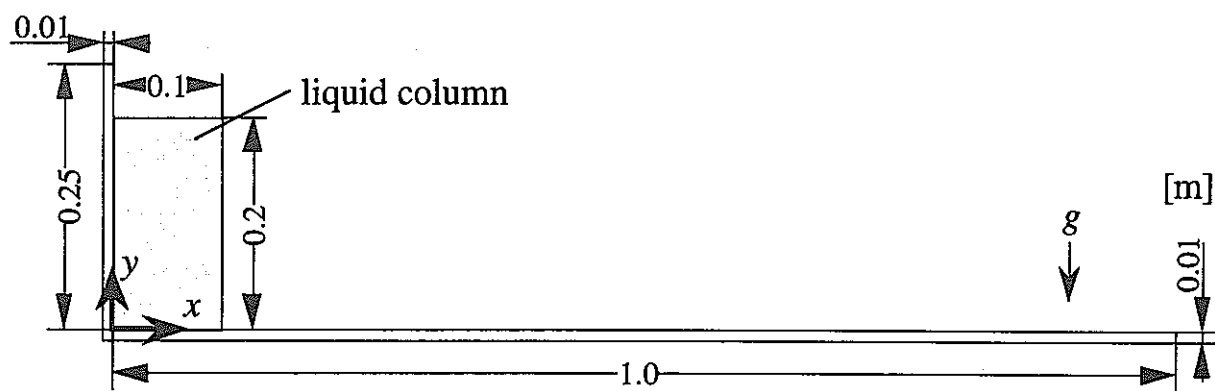


図3 液柱の崩壊の計算体系

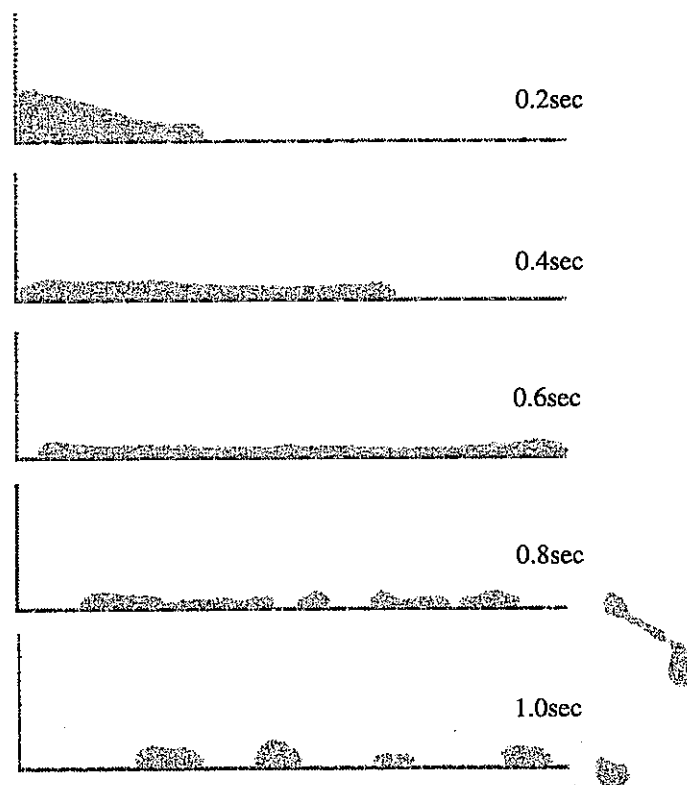


図4 表面張力が卓越する場合の液柱の崩壊の計算結果

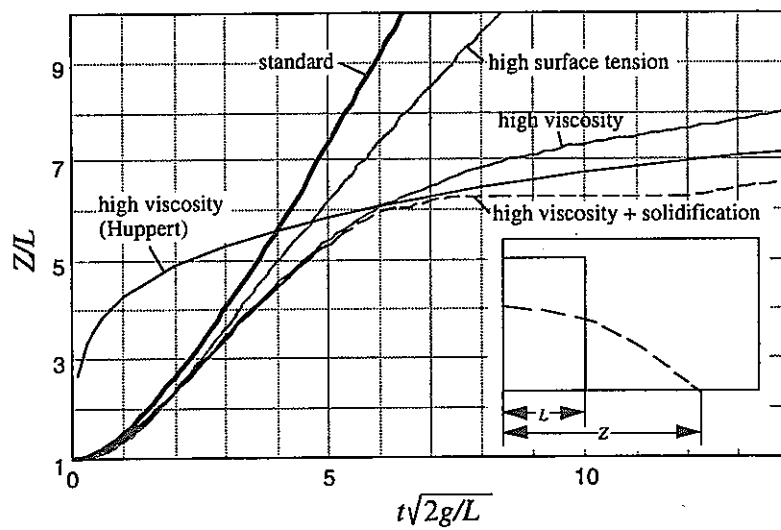


図5 広がりの先端位置の変化

先行基礎工学研究に関する平成 11 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	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	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">東京大学 大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設 助教授 越塚誠一</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">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</td> </tr> </table>			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 助教授 越塚誠一			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		
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 助教授 越塚誠一										
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 機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第 3 試験室										
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 11 年 9 月 7 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日								
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究										
【研究目的】 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、現状ではほとんどない。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。											
【研究内容 (概要)】 弥生炉を用いた崩壊熱の測定は、過去に秋山らによって U-233, U-235, Pu-239 等の測定が行われている。本実験は秋山らの手法を踏襲し、照射時間や測定時間についてはパソコンによる制御を行うことで、精度向上を図る。 実験手法は以下の通りである。測定試料を照射用カプセルにセットし、気送管を用いた照射システムによって弥生炉のブランケット部を貫くグレージングホール中心で照射する。照射時間や測定時間はパソコンで制御し、カプセルは所定時間照射した後、自動的に計測部に回収する。回収された試料は、鉛遮蔽箱の中でプラスチックシンチレーションカウンタ及び β-γ 線弁別用比例計数管を用いた β 線測定、あるいは NaI (Tl) シンチレーションカウンタを用いた γ 線測定を行う。測定結果は、アンフォールディングコードで処理して照射試料のエネルギースペクトルを求め、対象核種 1 核分裂あたりに規格化し、エネルギーで積分して崩壊熱を求める。照射中の核分裂数は、鉛遮蔽箱内での測定終了後、Ge 検出器によって得られる γ 線エネルギースペクトル測定結果から算定する。											
【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弥生炉											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 10 年度は以下の測定を実施した。

- ・ U-235 β 線測定；照射時間 10 秒, 原子炉出力 500W 及び照射時間 100 秒, 原子炉出力 500W
- ・ U-235 γ 線測定；照射時間 10 秒, 原子炉出力 500W 及び照射時間 100 秒, 原子炉出力 500W
- ・ Np-237 β 線測定；照射時間 100 秒, 原子炉出力 1900W 及び照射時間 500 秒, 原子炉出力 1900W
- ・ Np-237 γ 線測定；照射時間 100 秒, 原子炉出力 1900W 及び照射時間 500 秒, 原子炉出力 1900W
- ・ 照射中の核分裂数評価のための Ge 検出器による γ 線エネルギースペクトル測定
- ・ 環境バックグラウンドの測定

【研究成果（当該年度）】

＜実験実施状況＞

平成 11 年度は、平成 10 年度に測定していない以下の測定を実施した。

- ・ U-235 照射前試料の β 線及び γ 線測定
- ・ Np-237 照射前試料の β 線及び γ 線測定
- ・ 試料が電着してある Ti 板のみの放射化による影響を見るための測定（ β 線測定及び γ 線測定）

＜核分裂数の評価＞

Ge 検出器による γ 線エネルギースペクトルの測定結果から U-235 と Np-237 の核分裂数を求めた。測定結果の一例を表 1 に示す。

＜アンフォールディングコード“FERDO”の入手と整備＞

高度情報科学技術研究機構（RIST）よりアンフォールディングコード“FERDO”を入手し、EWS にインストールした。サンプルインプット及び標準線源（Co-60, Cs-137, Na-22）の γ 線エネルギースペクトルをテスト入力とすることで、コードが正常に流れることを確認した。これによりアンフォールディングが上手く出来ていること及び γ 線応答関数が使えることを確認した。

＜FERDO インプットデータ作成プログラム＞

実験データは、試料照射データ、試料照射前データ、Ti 板照射データ、環境バックグラウンドデータの 4 種類がある。照射された試料の測定データから、照射前の試料自身からの放射線と試料が電着してある Ti 板の放射化に伴う放射線、環境バックグラウンドを引いてやると試料が照射されたことによる放射線が求まる。測定データは 1024 チャンネルのデータであるが、応答関数は 340 群なのでそれに併せてバンチングする必要がある。FERDO のインプット作成にはこのような煩雑な作業が伴う。そこで、膨大な測定データを正確に素早く処理するために、FERDO インプット作成プログラムを整備した。これにより、1 つのインプットを作成するのに数時間要していたのが、数秒で出来るようになった。

＜有限時間照射崩壊熱と瞬時照射崩壊熱の結果＞

有限時間照射崩壊熱 $F(T_R, t)$ は、 1fission/s の割合で T_R 時間照射した後の冷却時間 t におけるエネルギー放出率として定義される。瞬時照射崩壊熱 $f(t)$ は、1 核分裂が発生した後の t の関数としてのエネルギー放出率である。実験結果からすぐに得られる崩壊熱は、有限時間照射崩壊熱である。しかし、照射時間の異なる他の実験値あるいは計算値と比較できないので、瞬時照射崩壊熱に変換しておく方が便利である。そこで、初めに有限時間照射崩壊熱を求め、その後瞬時照射崩壊熱に変換した。U-235 γ 線の有限時間照射崩壊熱の結果の一例を表 2 に示す。また、U-235 γ 線瞬時崩壊熱の結果の一例を図 1 に示す。U-235 の結果を比較したところ、秋山らの結果と $\pm 9\%$ の範囲で一致しており、実験の再現性が確認された。Np-237 の解析は現在進行中であるが、U-235 による実験手法の妥当性が確認できたことで、Np-237 の崩壊熱を精度良く求められると考えている。

表1. U-235,10秒照射,原子炉出力500Wの核分裂数結果

試料番号	Xe-135	Y-91m	Nb-97	Nb-97m
No.3-1	6.726E+06	7.412E+06	6.176E+06	7.826E+06
No.3-2	5.157E+06	7.029E+06	6.197E+06	6.621E+06
No.15-1	7.822E+06	8.965E+06	9.477E+06	8.401E+06
No.15-2	7.516E+06	9.398E+06	9.338E+06	9.236E+06
No.15-3	7.595E+06	9.702E+06	8.910E+06	7.912E+06
No.15-4	7.516E+06	9.489E+06	9.285E+06	7.796E+06
No.15-5	8.267E+06	9.390E+06	9.635E+06	1.154E+07
No.15-6	7.373E+06	9.943E+06	8.921E+06	8.444E+06
No.15-7	7.550E+06	9.582E+06	8.806E+06	7.189E+06
No.15-8	7.121E+06	9.274E+06	9.933E+06	8.725E+06
No.15-9	6.585E+06	1.072E+07	9.661E+06	8.546E+06
No.15-10	7.492E+06	8.780E+06	9.881E+06	9.069E+06
No.15-11	6.926E+06	8.603E+06	7.961E+06	8.285E+06
No.15-12	6.965E+06	1.068E+07	8.293E+06	8.631E+06
No.15-13	6.938E+06	8.197E+06	8.946E+06	8.705E+06
No.15-14	7.065E+06	9.875E+06	9.487E+06	7.580E+06
No.15-15	6.894E+06	8.319E+06	9.711E+06	8.188E+06
No.15-16	6.629E+06	7.858E+06	1.066E+07	1.010E+07
No.15total	7.291E+06	9.234E+06	9.028E+06	8.730E+06
No.14-1	6.874E+06	1.197E+07	9.545E+06	9.959E+06
No.12-1	6.970E+06	9.591E+06	9.334E+06	9.297E+06

表2. U-235,10秒照射,原子炉出力500Wの有限時間照射崩壊熱の結果

測定待ち時間 (秒)	測定時間 (秒)	冷却時間 (秒)	有限時間照射崩壊熱 (MeV/fission)	
			JNC測定結果	秋山の測定結果
11	6	19	0.226	0.213
25	10	35	0.205	0.195
45	10	55	0.126	0.126
75	20	90	0.159	0.150
115	40	140	0.193	0.180
195	60	230	0.147	0.146
315	80	360	0.117	0.116
495	100	550	0.0915	0.0916
795	200	900	0.116	0.115
1395	400	1600	0.137	0.132
2195	500	2450	0.105	0.103
3195	600	3500	0.0813	0.0807

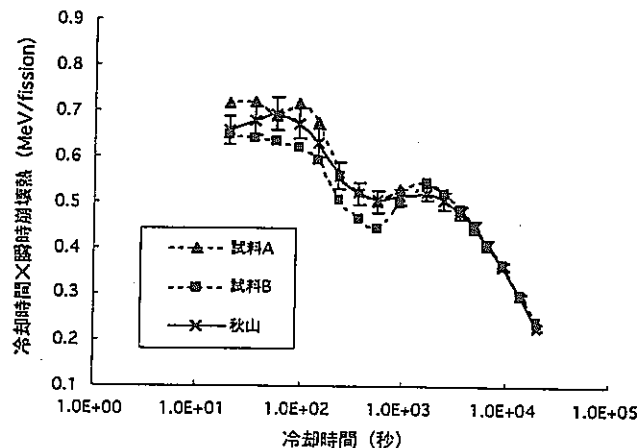


図1 U-235 γ 線崩壊熱測定結果

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

- ・ U-235 及び Np-237 の追加測定 (必要に応じて)。
- ・ Np-237 γ 線測定結果の解析。
- ・ U-235 β 線測定結果による β 線測定実験手法妥当性の確認。
- ・ Np-237 β 線測定結果の解析。
- ・ 実験誤差の評価及び冷却時間が短いデータに必要な補正量の検討。
- ・ U-235 と Np-237 の結果を比較することにより、核種による崩壊熱データの相違を考察する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

2000 年学会秋の大会での口頭発表予定

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	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">大阪大学 大学院工学研究科 原子力工学専攻 山中伸介, 宇埜正美, 黒崎健</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室 阿部和幸</td> </tr> </table>			大 学 側	大阪大学 大学院工学研究科 原子力工学専攻 山中伸介, 宇埜正美, 黒崎健			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 阿部和幸		
大 学 側	大阪大学 大学院工学研究科 原子力工学専攻 山中伸介, 宇埜正美, 黒崎健										
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 阿部和幸										
研究協力実施場所	大阪大学 大学院工学研究科 山中研究室 機構 大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料試験施設										
通算研究期間 (予定)	平成10年11月 ~ 平成13年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年12月13日 ~ 平成12年3月31日								
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究										
【研究目的】 高速炉燃料の高燃焼度化達成には、高燃焼度における MOX 燃料の熱物性及び機械的性質（以降物性等とする）を評価する必要があるが、照射試験を含め試験技術上困難な課題が多く、150GWd/t を超える燃焼度の物性等測定データは非常に限られている。本研究は、このような高燃焼度の測定データを補完する手段として計算機シミュレーションに着目し、模擬燃焼燃料を用いた物性等の測定及び照射後試験による燃焼燃料の組織に関する知見に基づいて、計算機シミュレーションによる熱伝導率、比熱、熱膨張率及び弾性率の予測評価手法の技術的見通しを得ることを目的とした基礎的研究である。											
【研究内容（概要）】 高燃焼度燃料の物性等を評価する上では、MOX 燃料自体の物性に対して、燃料マトリックスに固溶する FP の効果、一般に灰色相と呼ばれる複合酸化物相あるいは白色金属相と呼ばれる白金族元素の金属間化合物相として燃料マトリックスから析出する FP の効果、そして柱状晶や FP ガスバブルの形成によるポロシティ分布の効果という、3つの要素が重要である。近年の計算機の進歩により、様々な現象を計算機シミュレーションによって評価することができるようになってきたが、物質の物性等を評価する手段としては、分子動力学法によるシミュレーション解析が有力である。また、複合的な組織を持つ物質の物性等を評価する手段としては、有限要素法による解析が良く用いられる。 本研究では、上述のような高燃焼度燃料に関する3つの要素について、分子動力学法及び有限要素法によるシミュレーション解析を適用し、計算機シミュレーションによる物性等の予測評価手法の技術的見通しを得ることを目的とし、主に照射後試験では測定が困難な熱伝導率、比熱、熱膨張率及び弾性率に絞って研究を進める。大学では、上述した計算機シミュレーション解析の豊富な経験と UO_2 をベースとした燃料の各種物性等測定装置があるため、分子動力学法でキーとなる原子間ポテンシャルを模擬 MOX 燃料及び模擬燃焼 MOX 燃料の物性等測定結果を用いて評価するとともに、高燃焼度燃料のシミュレーション解析を実施する。サイクル機構では、MOX 燃料の熱伝導率測定及び照射済燃料の金相組織観察や元素分布の分析の経験とデータ蓄積があるため、MOX 燃料の熱伝導率測定及び「常陽」照射燃料に関する灰色相、白色金属相の析出分布並びにポロシティ分布を得るための試験を実施し、大学側で実施するシミュレーション解析に反映させる。											
【使用主要施設】 ・高温 X 線回折装置、超音波音速測定装置（大阪大学） ・熱伝導率測定装置（サイクル機構 大洗工学センター 照射燃料試験施設）											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 10 年度は、 UO_2 燃料と MOX 燃料、さらに燃料マトリックス中に固溶する FP の原子間ポテンシャルを決定するため、 UO_2 に PuO_2 の模擬物質である CeO_2 を添加した試料、さらに燃焼による収率の大きい Nd と Zr を添加した燃焼模擬試料について熱伝導率、比熱、熱膨張率及び弾性率を測定した。また、その結果から求めたポテンシャルを用いた分子動力学 (Molecular Dynamics :MD) 解析により、熱伝導率のシミュレーションを実施した。

【研究成果】

高燃焼度燃料の物性等を評価する上では、MOX 燃料自体の物性に対して、燃料マトリックスに固溶する FP の効果、一般に灰色相と呼ばれる複合酸化物相あるいは白色金属相と呼ばれる白金族元素の金属間化合物相として燃料マトリックスから析出する FP の効果、そして柱状晶や FP ガスバブルの形成によるポロシティー分布の効果という、3つの要素が重要である。

昨年度より燃料母材に固溶する FP が燃料の諸物性に与える影響について模擬 MOX 燃料を用いた物性測定と計算機シミュレーションによる物性予測から評価を行っているが、今年度はこれを継続実施し、燃料固溶相の物性予測についての最終結果を得るとともに、酸化物となるが酸化物燃料母材と固溶体を形成しないで析出相として存在する Ba, Zr, Sr 等の複合酸化物相に着目して、これらの代表としてペロプスカイト型 BaUO_3 を選定し、熱伝導率、熱膨張率などの熱物性および弾性定数、硬度などの機械的特性、さらに電気抵抗率などの電気的特性を測定した。

(1) 酸化物析出相の基礎物性評価

測定試料は、出発物質として二酸化ウラン (UO_2) と炭酸バリウム (BaCO_3) を用い、化学両論比で出発物質を混合、大気中にて混合粉末を焙焼 (950 °C)、プレス機にて加圧成形した後、再焼結 (1500 °C) して作製した。作製後、試料は X 線回折法で同定し単相の BaUO_3 の合成を確認した。

室温から約 1300 K までの温度範囲でレーザーフラッシュ法により BaUO_3 の熱拡散率を測定した。次に熱伝導率を熱拡散率と密度、比熱から評価した。ここで熱拡散率は実験で得られたものを、密度は X 線回折から得られた格子定数を基に評価した実測密度を用いた。また比熱は BaO と UO_2 の比熱から Kopp の法則により評価した。さらに、試料中に含まれる気孔の影響を除くために得られた熱伝導率の値を Schulz の式で 100 % T.D. に補正した。図 1 に BaUO_3 の熱伝導率の温度依存性を示す。比較のため UO_2 (95 % T.D.) の熱伝導率も同時に示す。 BaUO_3 の熱伝導率の値は UO_2 と比べて約一桁近く低い値であることが確認できた。このことから高燃焼度時に酸化物析出相が燃料ペレット内に分散した場合、燃料ペレット全体の熱伝導率が減少する可能性があることが判った。また BaUO_3 の熱伝導率の温度依存性は UO_2 と比べてほとんど無く、温度上昇とともに僅かに増加する傾向が見られた。熱伝導機構、つまり熱のキャリアに関する理論モデルによる解析結果から、このペロプスカイト型 BaUO_3 の熱伝導率は、低温では主にフォノンが寄与しているが、800 K を超えると、電子はまだ伝導帯まで励起されておらず、いわゆる電子伝導状態にはないが、電子と正孔の対 (励起子) が形成されるようになり、この熱伝導への寄与が顕著になることが示された。

次に、室温から約 700 K までの BaUO_3 の線熱膨張率を測定し、 BaUO_3 の線熱膨張率は UO_2 とほぼ同程度であることが確認できた。またビッカース硬度を室温で評価し BaUO_3 の硬度は UO_2 と同程度であることが確認できた。室温における試料中の音速から各種弾性定数を評価した結果を表 1 に示す。比較のため UO_2 と昨年報告した $(\text{U}_{0.8}\text{Ce}_{0.2})\text{O}_2$ のデータも合わせて示す。 BaUO_3 の弾性定数は UO_2 および模擬 MOX 燃料である $(\text{U}_{0.8}\text{Ce}_{0.2})\text{O}_2$ の弾性定数よりも小さいことが判った。これより高燃焼度時に酸化物析出相が燃料ペレット内に分散した場合、特に偏析した場合は、燃料ペレット全体としての応力状態が不均一になり機械的特性が低下する可能性があることが判った。

(2) 計算機シミュレーションによる物性予測の総括

図 2 のような +4 価の U イオンの 108 個と -2 価の O イオン 216 個を初期座標として CaF_2 型に配置した体系で、3 次元周期的境界条件の下で分子動力学計算を行った。各ステップ毎の積分時間間隔は 2fs としている。計算には分子動力学プログラム mxdortho をカスタム化したものを用い、Helmholtz の自由エネルギー F を Planck 定数で展開した表式を用いる準古典的分子動力学計算を行っている。また、分子動力学法では入力情報として相互作用力を表すポテンシャル関数を設定するため、精度の高いシミュレーションを行うには精密な相互作用力を表すポテンシャル関数が不可欠である。そこで、 UO_2 および PuO_2 の格子定数、膨張率、圧縮率を入力情報として用いてポテンシャルパラメーターを決定した。ポテンシャル関数の妥当

性は、格子定数(密度)-温度-圧力関係の再現性で確認した。

本研究では、 UO_2 、 PuO_2 、および Pu 濃度 20 mol% の MOX 燃料について、MD 法により非経験的に熱物性を評価することを試みた。MOX 燃料は MD セル中で 108 個の U 原子中 22 個をランダムに U 粒子を Pu 粒子に置換することで、 UO_2 系を MOX 化した。上述のポテンシャル関数を用いたシミュレーションによって得られる、格子定数は Vegard 則が成り立っており、温度依存性もよく再現できる。また、MOX の圧縮率に関する報告はほとんど無いが、図 3 に示すように Nutt による実験値に近く、ばらつきがあるものの、 UO_2 や PuO_2 の場合と同程度であり、温度の上昇と共に増大することが示された。

MOX 燃料や燃焼により FP が蓄積した UO_2 燃料などで、熱伝導度が低下することはよく知られている。これは結晶欠陥として不純物原子がフォノンの散乱中心として作用するためである。図 4 に、これを MD で計算し得られた MOX の熱伝導度の温度依存性と文献値の比較を示した。また比較のため UO_2 の計算値及び文献値も示した。 PuO_2 及び UO_2 系での熱伝導度の計算値はほぼ同じであったが、MOX 系では UO_2 よりもやや低下し文献値とよい一致が得られた。

蛍石型化合物では、一般にその融点の約 80 % 付近の温度点において Bredig 転移と呼ばれる拡散転移が起こることが知られている。これはアニオン副格子のみが熔融状態になるもので、転移が生じると、アニオンの拡散係数やイオン電気伝導度等が異常に増大するなどの変化が観測される。 UO_2 では中性子回折実験や比熱の解析結果から、2610 K (融点の約 84 %) において、この Bredig 転移が生じることが報告されている。また UO_2 は融点に近い高温では圧縮率及びクリープ速度が急激に増大することが知られており、Bredig 転移によるアニオンの拡散がカチオンの移動を助ける様に働くためと報告している。図 5 に MD 計算から得られた UO_2 の圧縮率の温度依存性を示した。この図から判るように、 UO_2 の圧縮率の計算値は 2000 K から著しく増大する。これは MD セル中で Bredig 転移が起きているためと考えられる。 UO_2 中の各イオンの運動の軌跡を図 6 に示したが、この図から 2500 K では Bredig 転移が起こっていて、系は 0 イオンのイオン伝導体になっていることが判る。 UO_2 の Bredig 転移が MD 計算により再現されていることが判る。さらに UO_2 の定積モル比熱(C_v)でも Bredig 転移によるものと思われるピークをある程度再現できることを確認している。過去の文献でも、 UO_2 の MD 計算によってこの Bredig 転移を再現できたことが報告されているが、MD 計算により圧縮率や比熱への影響までトータルに評価し得た例は本研究が初めてである。MD 計算では 0 イオンの動きを一つ一つ追っていくことが可能であるので、転移の発生の様子やメカニズムを理解するのに非常に有効であると考えられる。

PuO_2 については、過去の文献データでも、Bredig 転移の存在は確認されていない。MD 計算上では PuO_2 は 2500 K (融点の 93 %) においても、0 イオンは格子内に留まっており Bredig 転移が起こっていないことが判る。比熱(C_v)や圧縮率にも UO_2 の時に見られたような変化は見られなかったことから、 PuO_2 の場合は Bredig 転移が生じる前に融点に達してしまう可能性があると考えられる。一方、MOX 固溶体 (Pu20 mol%) の圧縮率及び定圧モル比熱の計算から、MOX 中では Bredig 転移が起こり、Bredig 転移後の 0 イオンの拡散が MOX 中では UO_2 中より抑制されていることが示された。

以上、高速炉用高燃焼度 MOX 燃料の挙動を評価するにあたり、MD 法を用いて燃料の物性予測を行った。MD 計算により UO_2 、 PuO_2 の格子定数、熱膨張率といった基礎的な物性データから、比熱、熱伝導率といった種々の物性を評価することができ、さらに MOX 固溶体の熱物性、機械的特性も評価し、その結果は実験値と良く一致した。MD 計算によりこれほど多くの PuO_2 や MOX 固溶体の物性を系統的に評価した例は今までない。今後熱伝導率の定量的評価に関して若干の改良が必要であるもの、高燃焼度 MOX 燃料の物性を評価するにあたり MD 法は有効なツールとなり得ると考えられる。

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

平成 12 年度は、本共同研究の最終年度である。相平衡計算コードにより燃料と FP の多元系状態図を作成し高燃焼度燃料中の析出相成分についての知見を整理するとともに、灰色相の模擬物質として BaZrO_3 や照射燃料中に存在している複合酸化物により近い模擬物質の物性等測定を行う。また、照射燃料の灰色相、白色金属相の析出分布データ、ポロシティ分布を基に有限要素法解析モデルを設定し、これらが熱伝導率、比熱、熱膨張率及び弾性率に及ぼす効果を有限要素法によって評価する。最後に、これらの物性等について分子動力学解析と有限要素法解析を組合わせて評価し、高燃焼度燃料に対する予測評価手法としての技術的見通しについて検討する。また、以上の成果をまとめ、最終報告書を作成する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1. JNC TY9400 2000-004 “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 -先行基礎工学分野に関する平成 10 年度報告書（中間報告）-”
2. 山田 和弘, 他, “分子動力学法を用いた (U_{1-x} , Pu_x) O_2 固溶体の熱伝導度の評価”, 日本原子力学会 1999 年秋の大会
3. 大嶋 涼, 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
4. 吉田 伸司, 他, “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
5. JNC 共同研究報告書 “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 -先行基礎工学分野に関する平成 11 年度報告書（中間報告）-” 資料登録手続き中

表 1 音速と各種弾性定数および硬度

		BaUO ₃ (81 %T.D.)	UO ₂ (100 %T.D.)	(U _{0.8} Ce _{0.2})O ₂ (95 %T.D.)
縦波音速	V _L (m/s)	3416	5288	3826
横波音速	V _S (m/s)	1993	2718	2323
音速異方性係数	A	1.011	0.890	1.051
ヤング率	E (GPa)	66.02	213.9	126.3
剛性率	G (GPa)	26.58	80.99	52.26
体積弾性率	κ (GPa)	42.63	198.5	72.14
圧縮率	β (GPa)	0.023	0.005	0.014
ポアソン比	σ	0.242	0.320	0.208
デバイ温度	θ_D (K)	255.7	379.6	321.0
ビッカース硬度	H _v (GPa)	5.464	6.353	5.430

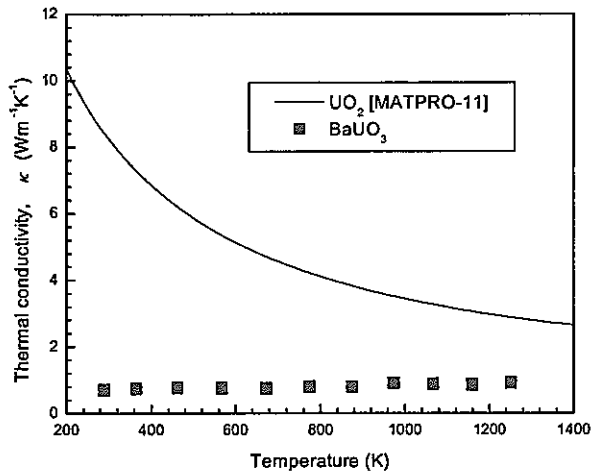


図 1 BaUO₃の熱伝導率の温度依存性

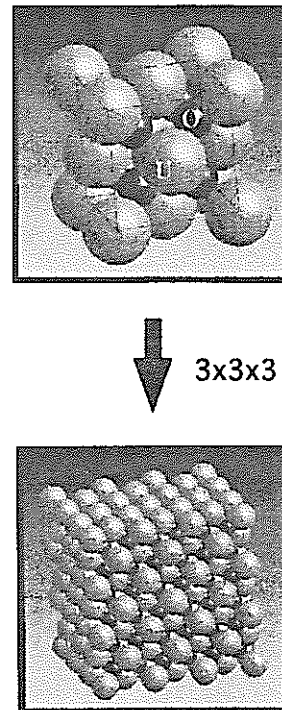


図 2 計算体系 (UO₂ 初期配置)

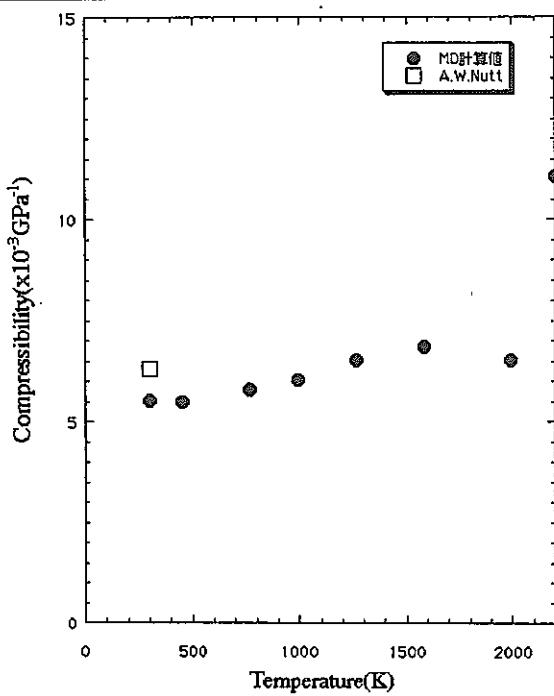


図-3 MOX(20 mol%Pu)の圧縮率の温度変化

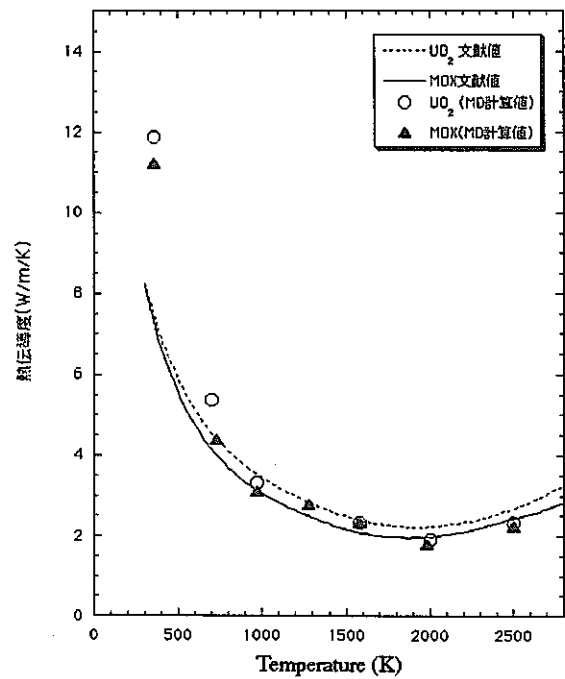


図-4 熱伝導度の温度依存性
(UO₂ と MOX の比較)

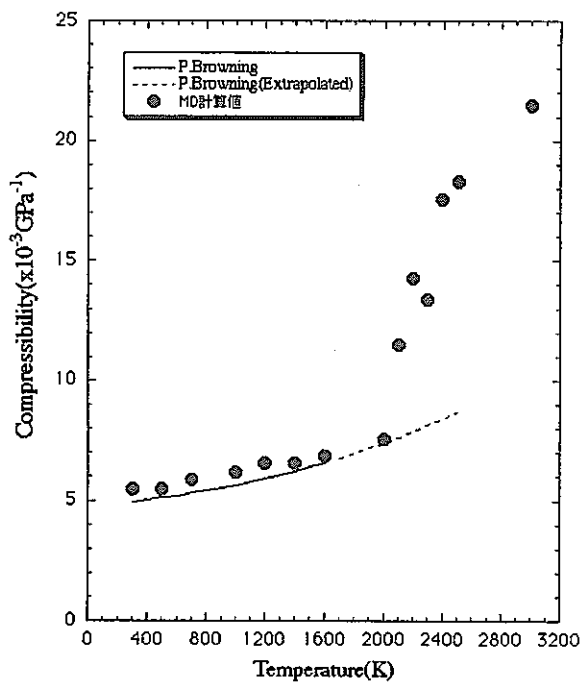


図-5 UO₂ の圧縮率の温度変化

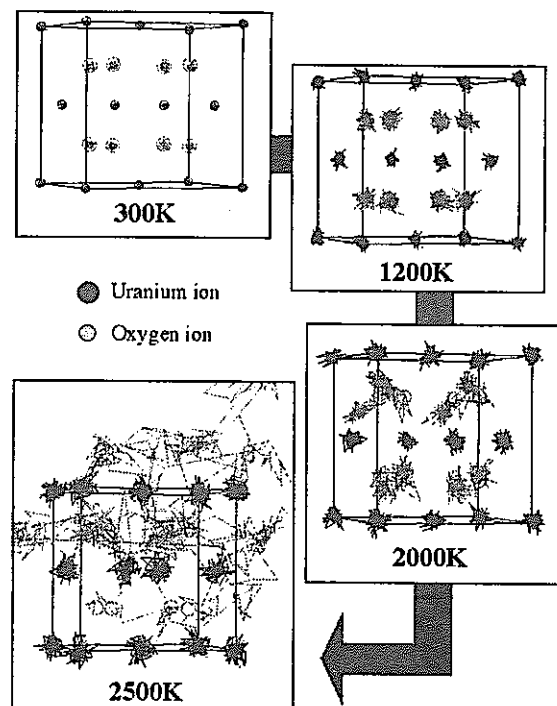


図-6 各温度における UO₂ 中のイオンの軌跡

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	配管系サーマルストライピングの乱流特性に関する基礎研究		
研究協力課題	配管合流域における複雑乱流場の流動特性に関する研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	広島大学 工学部 第一類(機械系) 教授 須藤浩三, 助教授 角田勝, 助手 檜原秀樹		
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 Gr 主任研究員 村松壽晴		
研 究 協 力 実 施 場 所	広島大学 工学部 第一類 流体工学研究室(G 5 棟) 機構 大洗工学センター ナトリウム流動伝熱試験室		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 4 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 11 月 11 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 高温と低温のナトリウムが混合する領域において機器や配管に高サイクルの熱疲労が生じる現象は、サーマルストライピングと呼称され、き裂発生の要因となる可能性があることから高速炉プラントの設計では十分な留意が必要となる。このため高速増殖炉の設計では、炉容器内構造物に耐熱応力材料を貼る等の設備対応がなされるのが一般的である。一方、フランス高速原型炉「フェニックス」等の海外炉において、サーマルストライピングに起因したナトリウム漏洩事象が主冷却系配管合流域において実際に発生し、この原因が従来の知見のみでは十分に説明しきれない状況が生じている。我が国における高速実証炉以降の後続炉プラント設計を合理的な知見を用いて行うため、現時点では蓄積が不十分な配管合流域におけるサーマルストライピングに対する情報を早急に得る必要がある。 このため本研究では、配管系合流域におけるサーマルストライピングの流動上の特徴を空気および水を作動流体として実験的に確認し、流体の乱流混合メカニズムに影響を与える主要因子を抽出するとともに、それらの一般化を通じてプラント設計の合理化検討に資する。			
【研究内容 (概要)】 配管合流域における複雑乱流場の流動特性を把握するためには時間平均速度およびレイノルズ応力等の時間平均量の分布を明らかにすることに加えて時々刻々と変化する流れ場の様子を流れの可視化あるいは速度の瞬時値の計測等により明らかにし、サーマルストライピングにおいて問題となる低周波のゆらぎ成分の特性ならびにその原因をつかむ必要がある。そこで本研究ではまず始めに、主配管内流れに枝管より流れが流入する場合の配管合流領域の流動現象は、枝管からの流れを円柱に置き換えた流動モデル、すなわち主配管内に円柱を設置した場合の流れと類似した現象を示すと考え、直管内に円柱を設置した場合の流れについて作動流体に常温の水を用いた流れの可視化ならびに作動流体に常温の空気を用いた流速測定を円柱径を変えて行い、流れ場の流動特性ならびに円柱より放出される渦の挙動に及ぼす管路の閉塞効果の影響について調べる。次に、直管内流れに枝管より流れが流入する場合について、流速測定ならびに流れの可視化を主配管と枝管の流速比ならびに口径比を変えて行い、配管合流領域の流動状態に及ぼす各パラメータの影響について調べる。その後、本研究の主目的である主配管エルボ下流側に接続してある枝管より主配管内に流れが流入する場合について、作動流体に空気を用いた乱流状態量の計測実験ならびに流れの可視化を枝管の入射角度を変えて行い、配管合流領域の流動状態に及ぼす二次流れおよび枝管入射角度の影響について調べる。最後に得られた実験結果に基づいて配管合流部下流側における流体混合メカニズムを推定し、その一般化を図る。			
【使用主要施設】 三次元流速計測システム(熱線流速計, パーソナルコンピュータを含む) 周波数解析システム(F F Tアナライザを含む)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は以下のことを実施した。

1. 供試管を含む実験装置の製作。なお、供試管には計測の簡便さを考え、正方形管を採用した。
2. 40mm×40mm の正方形断面を有する直管内に円柱を設置した場合の流れについてレイノルズ数 $Re=30\sim5000$ の範囲において作動流体に常温の水を用いた流れの可視化実験を行い、流れ場の概略を把握した。流れの可視化には水素気泡法ならびに色素流脈法を使用し、円柱は直径 10,20,30mm の 3 種類を用いた。これにより円柱より放出される渦の挙動を調べた。
3. 80mm×80mm の正方形断面を有する直管内に円柱を設置した場合の流れについてレイノルズ数 $Re=50000$ (断面平均流速 $Wa=9.5\text{m/s}$) の下で作動流体に常温の空気を用いた熱線による流速計測実験を行い、流れ場の平均流特性ならびに乱流特性について調べた。その後、速度波形ならびにそのパワースペクトル分布を求め、円柱背後に形成される渦の周波数ならびに渦放出による速度変動について調べた。なお、円柱径は供試管の水力直径と円柱径の比が実際に使用されている主配管と枝管の配管口径比と一致する $d=16,20,26\text{mm}$ の 3 条件とした。
4. 3 の結果をサイクル機構にて行った計算結果と比較検討した。
5. 2,3 の結果より、流れ場の流動特性に及ぼす管路の閉塞効果について評価を行い、今後実験を行う主配管内に枝管より流れが流入する場合において枝管からの流れが主流に及ぼす影響について検討を行った。

【研究成果（当該年度）】

平成 11 年度は正方形断面を有する直管内に円柱を設置した場合の流れを取り上げ、作動流体に常温の水を用いた流れの可視化実験ならびに作動流体に常温の空気を用いた速度計測実験を実施した(実験条件については進捗状況の項を参照)。以下に平成 12 年 3 月までに得られた成果の概要を示す。

(1) 流れ場の概略について

流れ場の概略を把握するために行った流れの可視化実験から管中央部では円柱背後に渦列がみられ、円柱より渦が放出されていること、上下壁付近では円柱後方に首飾り渦が生じることがわかった。また、円柱の背後に最初に形成される渦の位置は、双子渦が形成される低レイノルズ数領域ではレイノルズ数が増大するにつれて下流側に移動するが、カルマン渦が形成される高レイノルズ数域ではレイノルズ数の増大とともに渦の位置は上流側に移動することがわかった(図 1)。この原因として以下のことが考えられる。双子渦の場合、レイノルズ数の増大とともに渦が下流方向へ細長く伸びていくため、渦の位置はレイノルズ数の増大とともに下流方向に移動することになる。一方、カルマン渦の場合にはレイノルズ数の増大とともに円柱背後の領域における横方向の速度差が大きくなり渦が形成されやすくなるため渦の位置は上流側に移動することとなる。

次に、カルマン渦の放出周波数、ストローハル数とレイノルズ数との関係を調べると管路内に設置した円柱より放出される渦の周波数 f およびストローハル数 $St(=f \cdot d/Wa)$ は、一様流中に円柱を設置した場合よりも高く、その傾向は閉塞率 $K(=d/B)$ が大きくかつ高レイノルズ数になるほどより顕著となることがわかった(図 2)。従って、配管合流域下流において枝管からの流れにより誘起されるカルマン渦のストローハル数は主配管と枝管の口径比が小さくなるほど高くなることが本年の実験結果から予測できる。

(2) 乱れのエネルギーおよび変動速度の相互相関に及ぼす円柱の影響について(図 3)

乱れのエネルギー k と変動速度の相互相関の断面内最大値は、いずれの場合も円柱後方の $Z/B=0.5$ 付近で最も大きくなり、その値は、case S,M,L の順、すなわち円柱径が大きくなるほど大きくなる。その後、断面内最大値は下流に進むにつれて急速に減衰するが、その値は依然として円柱径が大きいかほど大きく、 k については $Z/B=8$ 付近で、相関 $\overline{w'u'}$ については $Z/B=5$ 付近でようやく円柱径によらずほぼ同じ値を示すようになる。以上のことから乱れの強さおよび変動速度の相互相関に及ぼす円柱の影響は、円柱径が大きいかほど大きくかつより下流側まで及ぶことがわかる。これは、円柱径が大きいかほど円柱後方にできる速度せん断層の速度勾配は大きくなり、乱れおよび変動速度の相互相関の生成項の寄与が大きくなるためだと考えられる。

(3)円柱より放出される渦の周波数および渦による速度変動に及ぼす円柱の影響について

円柱の下流側の位置($X/B=0.25, Z/B=1$)における軸方向速度の速度波形には周期的な低周波成分の波がみられ(図4)、速度波形の結果から速度変動のパワースペクトル分布を求めると、いずれの場合も明らかに卓越した周波数 f_0 の存在が認められる(図4)。そしてこの卓越した周波数 f_0 で円柱より渦が後方へ放出されることがスモークワイヤー法による流れの可視化からも確認された。なお、この卓越周波数 f_0 は円柱径が大きくなるにつれて低くなる。

次に、円柱から放出される渦の周波数 f_0 よりストローハル数 $St(=f_0 \cdot d/Wa)$ を求めるとストローハル数 St は、閉塞率が大きくなるほど(すなわち円柱径が大きいほど)大きな値を示し、その値は一様流中に円柱を設置した場合に放出される渦のストローハル数 $St=0.17$ よりも大きいこと、すなわち、ストローハル数には前述の可視化実験の結果と同様に管路の閉塞による影響がみられることが確認できた(図5)。また、核燃料サイクル開発機構において同条件で行った数値計算より求めたストローハル数は、本研究の測定結果と同様な傾向を示すがその値は少し大きい(図5)。

卓越周波数 f_0 における速度変動のパワースペクトルの断面内最大値は、いずれの場合も円柱すぐ背後で最も大きな値をとり、その値は円柱径が大きいほど大きくなる。その後、下流に進むにつれてパワースペクトルの断面内最大値は減衰するが、依然として円柱径が大きいほど大きな値を示し、乱れのエネルギーの断面内最大値の場合よりもさらに下流の $Z/B=13$ 付近においてようやく円柱径によらずほぼ同じ値となる(図6)。よって渦放出による速度変動は円柱径が大きいほど大きくかつより下流側までみられることがわかる。

以上のことから配管合流域の下流では、主配管と枝管の配管口径比が小さいほど、枝管の流れにより誘起される渦の周波数は低いこと、渦による速度変動は大きくかつより下流側までみられることが予測される。

【今後の予定(翌年度以降の概要)】

平成12年度は、直管内流れに枝管より流れが流入する場合について、作動流体に空気を用いた流速測定ならびに作動流体に水を用いた可視化実験を主配管と枝管の流速比ならびに口径比を変えて行い、配管合流域の流動状態に及ぼす各パラメータの影響について評価する。その後、90°ベンド下流に枝管が接続してある場合について作動流体に空気を用いた流速測定を行い、配管合流域の流動状態に及ぼす二次流れの影響について評価する予定である。

平成13年度は、平成12年度に引き続き90°ベンド下流に枝管が接続してある場合について作動流体に空気を用いた流速測定を主配管と枝管の流速比、口径比、枝管の入射角度を変えて行い、配管合流域の流動状態に及ぼす各パラメータの影響について評価する。その後、得られた実験結果に基づいて曲がり管下流に枝管が接続してある場合の配管合流部下流側における流体混合のメカニズムを推定し、その一般化を図る。最後に、実験結果を核燃料サイクル開発機構にて行った数値計算の結果と比較し、計算結果の妥当性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】

日本機械学会講演会において発表予定

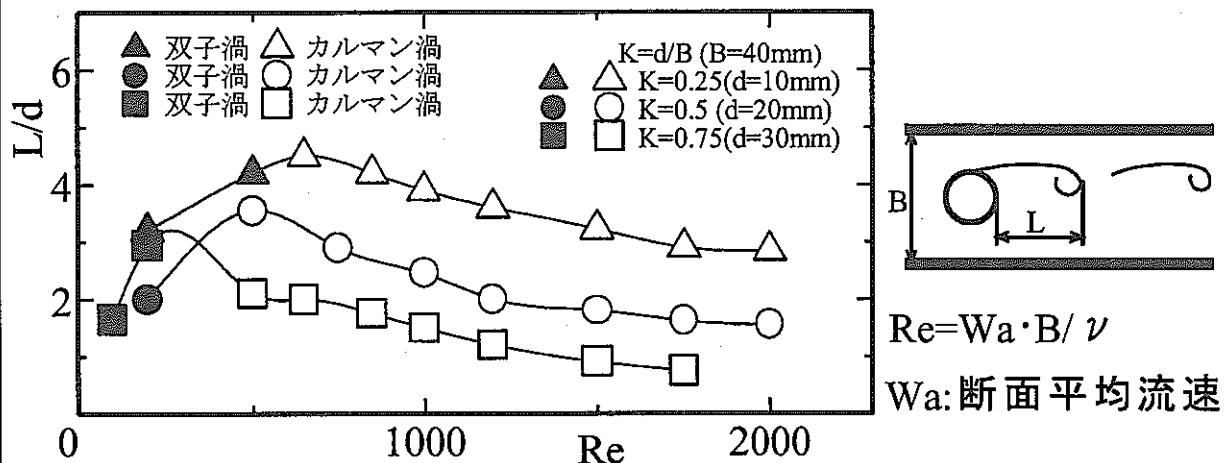
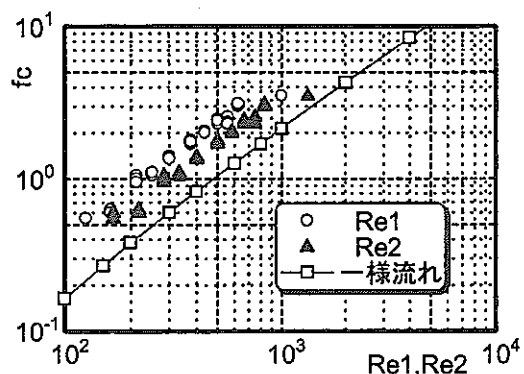
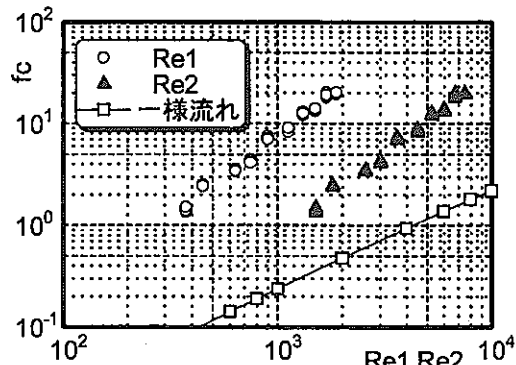


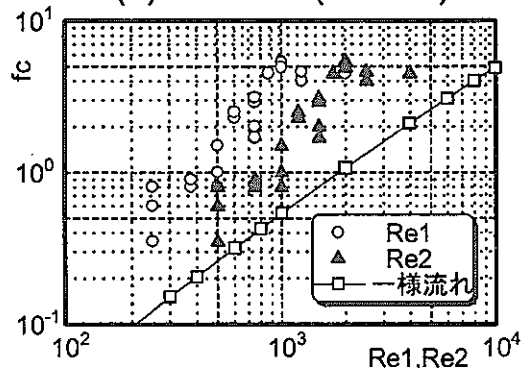
図1 最初に形成される渦の位置



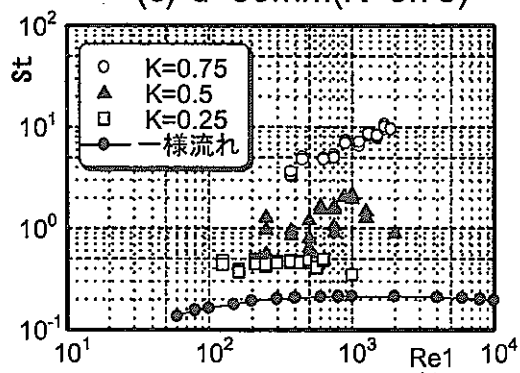
(a) $d=10\text{mm}$ ($K=0.25$)



(c) $d=30\text{mm}$ ($K=0.75$)



(b) $d=20\text{mm}$ ($K=0.5$)



(d) ストローハル数

図2 渦の放出周波数とストローハル数

$$Re_1 = Wa \cdot d / \nu$$

Wa : 断面平均流速

$$Re_2 = Wa_1 \cdot d / \nu$$

Wa_1 : 円柱設置位置での断面平均流速

$$St = fc \cdot d / Wa$$

fc : 渦の放出周波数[Hz]

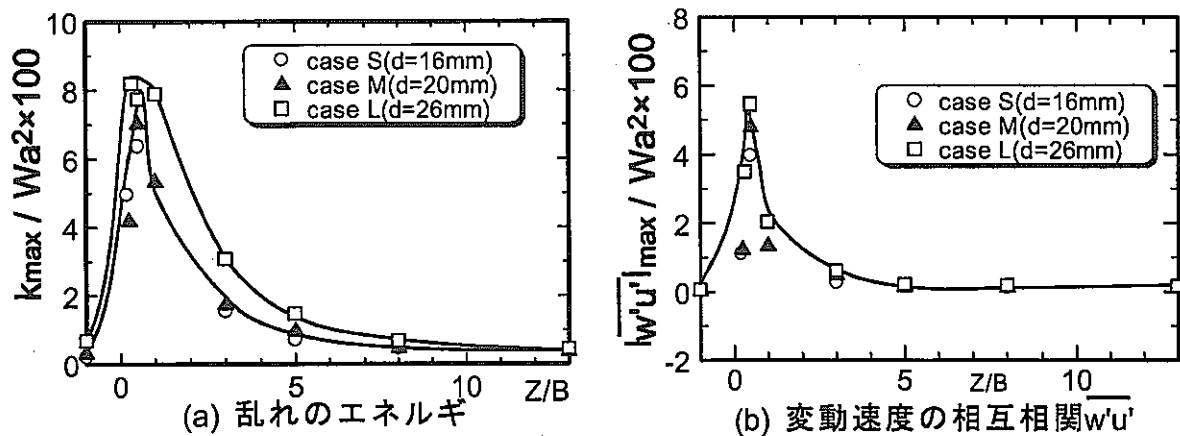


図3 乱れのエネルギーおよび
変動速度の相互相関の断面内最大値の推移

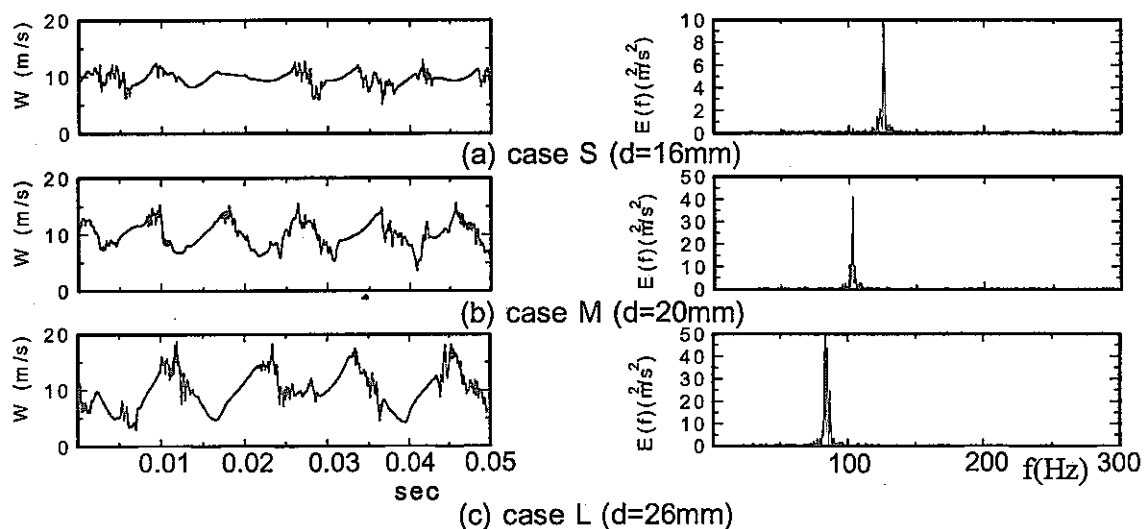
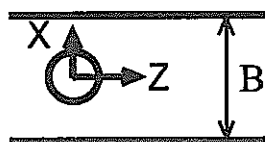
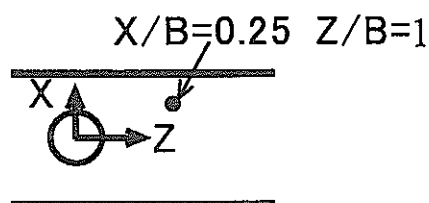


図4 速度波形とパワースペクトル分布
($X/B=0.25$ $Y/B=0$ $Z/B=1$)



$E(f)$: Z軸方向速度の速度変動の
パワースペクトル [m^2/s^2]

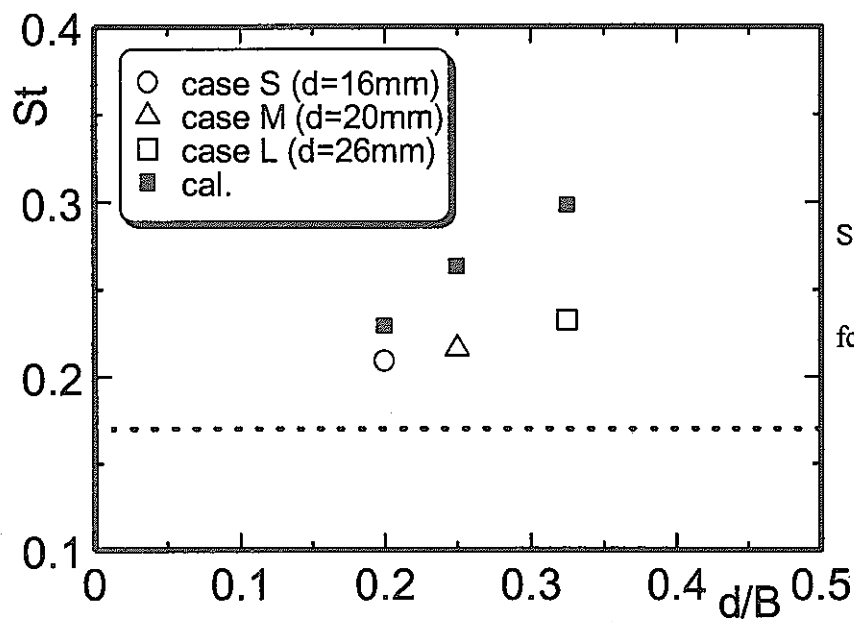


図5 ストローハル数

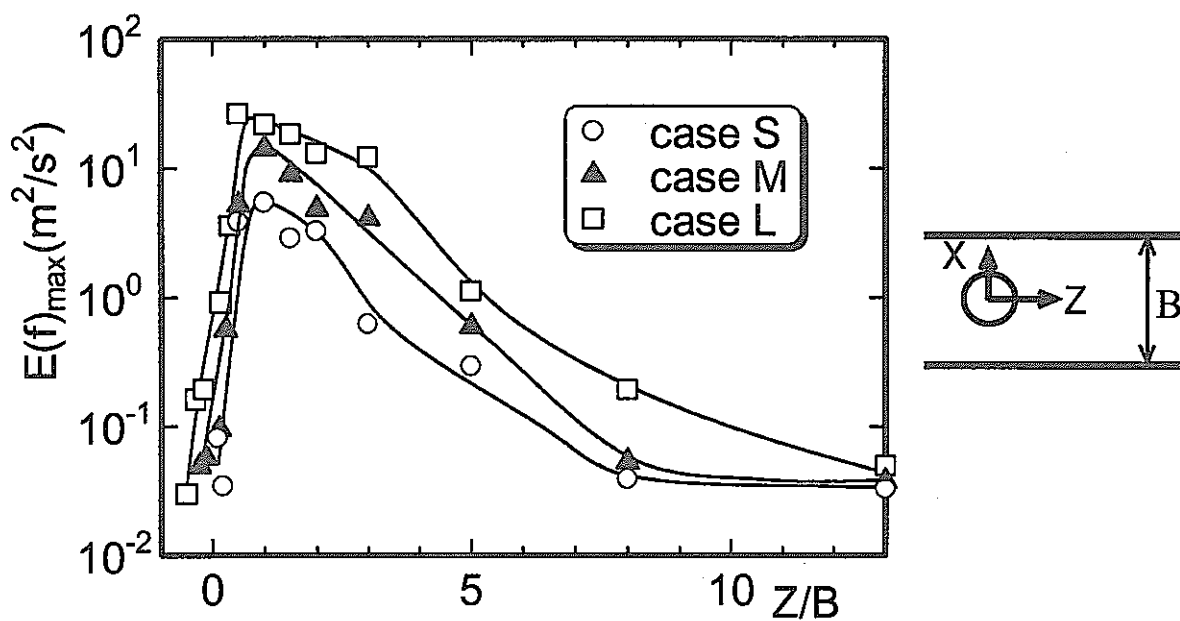


図6 パワースペクトルの
断面内最大値の推移

$E(f)$: Z軸方向速度の速度変動のパワースペクトル

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	配管系サーマルストライピングの乱流特性に関する基礎研究		
研究協力課題	配管合流領域における乱流混合メカニズムの基礎研究		
研究者所属、氏名			
大学側	東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 教授 戸田 三朗, 教授 橋爪 秀利, 助手 結城 和久, 学部4年 奥山 圭太		
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 Gr 主任研究員 村松壽晴		
研究協力実施場所	東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻棟 熱流体実験室 機構 大洗工学センター ナトリウム流動伝熱試験室		
通算研究期間 (予定)	平成11年4月 ~ 平成14年3月	当該年度 研究期間	平成11年7月22日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 異なる温度を持つ流体が混合する領域では、流体の混合に伴う非定常の温度変動が発生し、周囲の構造材が熱疲労によって損傷されるサーマルストライピング現象が問題となっている。高速増殖炉フェニックスの配管損傷や昨年に起きた敦賀2号機の冷却水漏れは、同現象が主原因と考えられており、今後、配管系での高サイクル熱疲労挙動に関する研究解明が社会的にも望まれている。本研究では主に実験（付加的に数値計算）によりサーマルストライピング現象に対する主要因子を抽出し、更にそれらを一般化することで新型炉等のプラント設計の合理化に貢献することを目的とする。			
【研究内容（概要）】 サーマルストライピング現象の詳細な物理機構を把握するためには、平均流れ場に加えてレイノルズ応力や温度変動、乱流熱流束等の乱流熱流動特性を評価する必要がある。本研究ではこれらの乱流諸量を実験および数値的に解析するため、レーザーによる非接触型の測定手法であるPIV (Particle Image Velocimetry)とLIF (Laser Induced Fluorescence)による可視化実験、およびLES (Large Eddy Simulation)を用いた数値解析により、それらの混合特性を明確にする。実験では基本的にフェニックス高速増殖炉における配管合流部の模擬体系、及び他の原子炉配管合流系を対象とし、流体混合に対する主配管と枝管の流速比、口径比および上流ベンドで形成される二次流れ（枝管の主配管に対する入射角）の影響を詳細に評価する。 測定手法であるPIVは流れ中にトレーサ粒子を混入させ、レーザーにより流れ場の構造を二次元的に可視化する計測システムであり、まず最初に等温場実験により現象を特徴付ける主用因子の抽出と詳細な乱流諸量を計測する。この後、主配管と枝管の温度差をパラメータとして加えた非等温場の実験に移行する。非等温場ではプローブによる直接的測定は付加的な計測手法とし、温度依存性のある蛍光粒子を流れ場中に混入させてその発光スペクトルから流れ場の温度を計測するLIFにより温度変動、乱流熱流束を計測する。この計測手法の特徴は、非接触型であるだけでなくPIVとの併用により流れ場、温度場の同時計測が可能な点である。非等温場のデータと、先に実施した等温場のデータを比較検討することにより、温度の異なる流体の混合主特性を解明し、加えて機構側で得られる精緻な数値解析データとの比較検討を行う。また混合状態をより定性・定量的に評価するため、必要以上の乱流のモデル化を用いず、かつDNSよりも計算負荷の少ないLESによりサーマルストライピングの数値解析を行い、本実験で得られる実験データとの比較検討を行う。			
【使用主用施設】 流体可視化実験ループ VISI FLOW PIV System			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

以上の研究内容に基づき、研究開始である平成 11 年度の前半においては主に論文検索を中心とした準備に当てられ、同年 11 月の段階で水を作動流体とする等温場対応の実験ループの作製を完了した。装置は主配管が直径 108mm、枝管が 15, 21, 31mm の三種類（口径比 7.2, 5.15, 3.48）の閉ループとなっており、2 個のポンプとバルブにより主配管、枝管の流量が調整される。研究開始となる本年度は、PIV システム操作の習得および測定ノウハウの構築をメインに研究を開始し、加えて混合領域で形成される種々の渦の確認と枝管から主配管流に流出する噴流軸の非定常挙動に対する口径比、流速比および枝管入射角度(0, 90, 180 度)の影響（90 度エルボ領域で形成される 2 次流れの影響）を評価することにより、混合状態を定性的に解析した。

【研究成果】

本研究では、主に流体混合の主要因となる主配管と枝管の流速比、口径比、及び枝管の入射角をパラメータとして等温場実験を実施した。以下に平成 12 年 3 月までに得られた結果の概要を示す。

(1) 流体混合に対する主配管と枝管の流速比の影響

全ての口径比において流速比が増加、すなわち枝管の流量減少もしくは主配管流の流量増加に伴い、枝管からの噴流軸の侵入位置が浅くなることを確認した。これは主流に対する枝管流の慣性力が弱まるためで、逆に枝管の慣性力が大きい場合には噴流軸の侵入位置は深くなる。Fig. 1 は主流速度 0.9m/s ($Re=124,000$) に対して枝管流速が 0.3, 1.2m/s ($Re=11,800, 47,500$) の流れ場の速度ベクトル状態を表している。口径比は 3.48、入射角は 0 度（ベンド流入と同方向）であり、図中の実線が時間間隔約 0.07[s] 毎 (14Hz) の噴流軸挙動を表している。噴流軸は枝管出口近傍の慣性力が強い噴流領域と、主配管流に大きく依存して揺らぐ振動領域に分けられ、流速比が小さい場合に噴流領域が長くなるのに対し、振動領域に関しては複雑な乱流混合により明確な規則性を確認するには至らなかった。より短い時空間スケールでのデータ蓄積および詳細な乱流状態量と混合に影響する主配管側の偏った速度分布の評価が必要である。また枝管噴流の慣性力が強い場合、噴流軸と壁面間に循環流の存在と枝管噴流後方に形成されるカルマン渦列もしくはこれに伴う流体振動を確認した。更に流速比が一定で各流速の絶対値を上げた場合、噴流領域と振動領域における非定常の揺らぎ状態は異なるものの、噴流の侵入位置はほぼ流速比によって決定される事を明らかにした。

(2) 流体混合に対する主配管と枝管の口径比の影響

同じ流速条件で主配管と枝配管の口径比を上げた場合（枝管の口径が減少）、噴流軸の侵入位置が浅くなることを確認した。すなわち口径比の増加は、同じ流速条件であっても相対的な枝管慣性力の減少を招くためである。口径比の影響は、慣性力（または流量）に対し直接二乗で影響するため、その効果は流速比よりも大きい。今回の実験では枝管径が最も大きい口径比 3.48 の殆どの場合において噴流の侵入位置が深く、噴流軸の下流後方側に循環流が形成され、加えて噴流軸が再び管壁に再付着することが無い事を確認した。逆に枝管の口径が最も小さい口径比が 7.2 で流速比が 1 よりも大きい場合、噴流軸の侵入位置は壁のごく近傍であることを確認した。フェニックスの配管合流領域において、クラックの発生ポイントは噴流軸の再付着点近傍である可能性も高く、このため口径比を調整することはサーマルストライピングに対し非常に有効な手段である。

(3) 流体混合に対する枝管の入射角の影響

同じ流速条件で噴流軸の侵入位置は、入射角が 0 度(ベンド流入と同方向)で最も深く、次いで 90 度(ベンドを含む平面に垂直)、更に 180 度(ベンド流入とは逆方向)の場合において、その侵入位置が最も浅くなることを確認した。これは 90 度ベンド領域で形成される偏った主流速度分布と二次流れの影響であると考えられる。枝管の入射角が 0 度の場合、主配管の中心近傍での二次流れの向きと噴流の流入方向は同方向であり、噴流は主配管内部に侵入し易い。これに対し、入射角が 180 度の場合には二次流れ方向と噴流軸の流入方向が逆方向であるのに加え、枝管噴流は 90 度ベンドの遠心力によってベンド外壁側にピークをもつ流速分布に押し戻さ

れる形で混合するため主配管内部への侵入が困難となる。この結果、流体混合は壁のごく近傍で起こるようになりサーマルストライピングを助長する可能性があると考えられる。従って同様の配管合流部を設計する場合、エルボ領域で形成される速度分布と二次流れの助走距離（通常円管の速度分布への発達距離）や枝管の入射角を考慮する必要がある。

(4) 流体混合に対する主用因子の抽出

本実験体系における流体混合の主用因子を検索した結果、枝管の入射角が固定であれば、噴流軸の侵入位置や振動状態等の混合状態が主配管と枝管のレイノルズ数比によってほぼ特徴付けられる事を明らかにした。

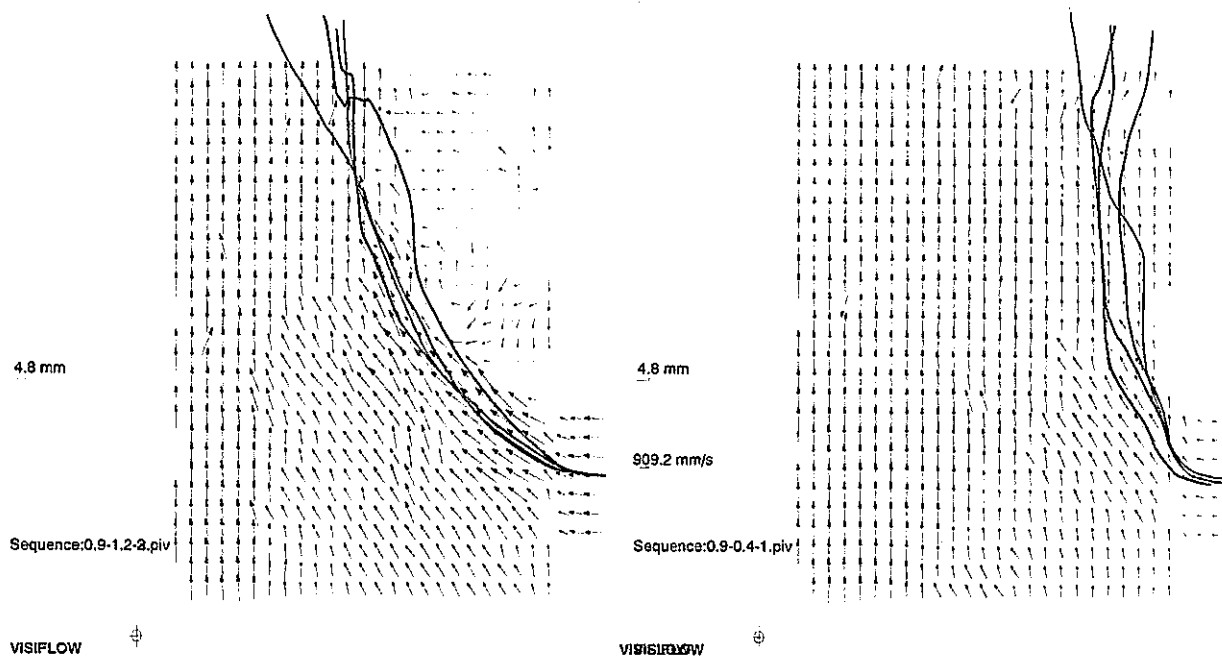
Fig. 2 は各流速及び口径は異なるものの、ほぼ同一のレイノルズ数比の流れ場状態を表している。噴流軸の侵入深さ、噴流領域と振動領域の非定常挙動、噴流軸下流後方側に形成される循環流の様子ともに同様の傾向を示すことを確認した。今後、枝管入射角（もしくは 90 度ベンドを特徴付けるロスビー数等の無次元数）とレイノルズ数比をパラメータとした実験のデータ蓄積により、混合状態の分類を実施する予定である。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 11 年度に引き続き、平成 12 年度は等温場において乱流混合に影響する主配管と枝管の流速比、口径比をパラメータとした実験を行い、まずレイノルズ数比による流れ場の混合形態を分類する。また低周波縦渦の確認と平均流速場およびレイノルズ応力等の乱流状態量評価、さらに混合に対する配管合流部下部の 90 度エルボで形成される二次流れの影響をより詳細に評価する。等温場における実験データの蓄積後、非等温場における実験に移行する予定である。非等温場においては PIV と LIF を用いた流れ場と温度場の同時計測により、温度揺らぎに対する流体混合の影響を評価する。LIF に関しては大学現有のプラズマ分光装置を用いて蛍光粒子からの発光スペクトルを分析することを検討している。非等温場の実験では、等温場の実験と同様のパラメータに温度差を加え、主に温度変動と乱流熱流束の評価を行う予定である。また非等温場と等温場におけるデータを比較検討することにより非等温場における混合の主要因子を抽出する。平成 12 年度においては、これらの実験と並行して数値解析の下準備および混合の数値シミュレーションを実施する。同現象は乱れの強い非等方性や浮力ソースターム等の問題も伴い通常の乱流モデルではシミュレーションが非常に困難であり、特に得られる温度揺らぎは時空間的に平均化されたものとなる。従って今回の計算では必要以上のモデル化を伴わない LES による解析を行い、得られる実験データと比較することにより同現象の定性・定量的な解析および現象に影響を与える主要因子を抽出する。これらの実験・数値解析を 13 年度以降も引き続き実施する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- ・ 日本原子力学会 秋の大会(2000 年)にて発表予定



枝管の流速=1.2 m/s

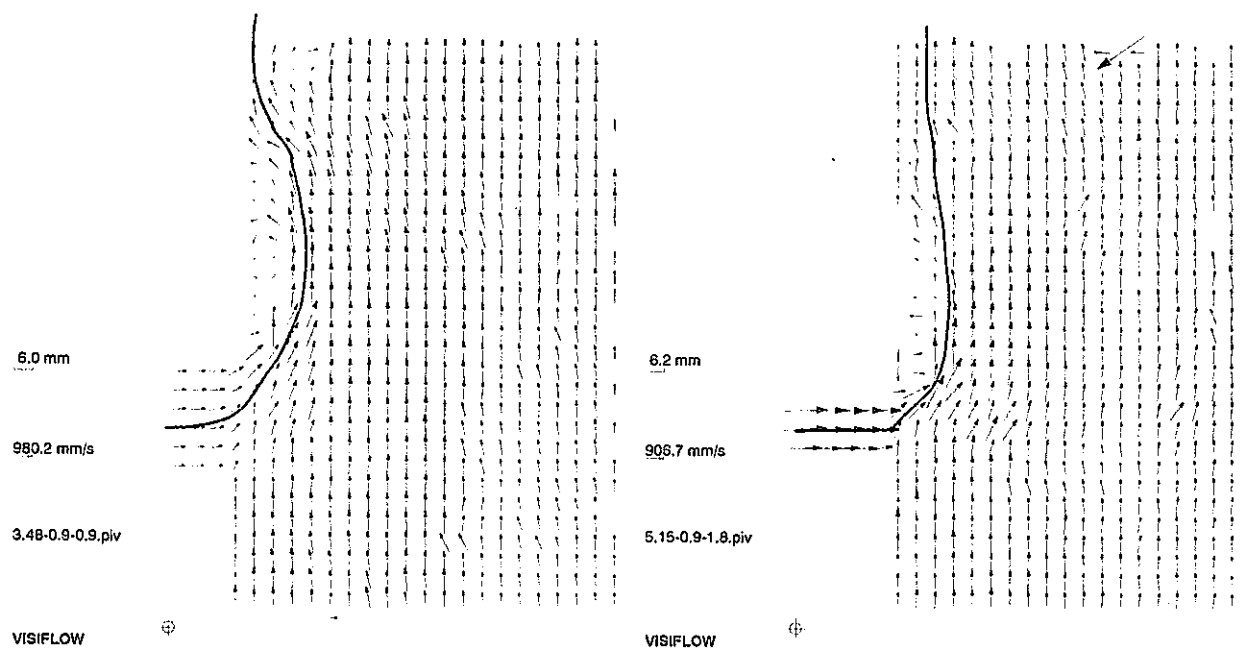
枝管の流速=0.3m/s

主流の流速=0.9m/s

口径比=3.48

主配管角=0 度

Fig.1 混合に対する流速比の影響



口径比=3.48、枝管の流速=0.4m/s、
Re=33383

口径比=5.15、枝管の流速=0.9m/s、
Re=32306

主配管角=180 度

主流の流速=0.9m/s

Fig.2 レイノルズ数による比較

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	FBR 冷却系における流体物性変化を伴う流動現象に関する研究		
研究協力課題	同 上 - 物性変化を伴う流動現象モデル-		
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 助教授 岡本 孝司, 教授 班目 春樹		
機 構 側	大洗工学センター 山口 彰, 飯田 将雄, 高田 孝		
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 機構 大洗工学センター ナトリウム流動伝熱試験室		
通算研究期間 (予定)	平成11年 4月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年11月16日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 FBR 冷却系において、蒸気発生器内でのナトリウム-水反応が安全上問題となる。 この反応では、化学反応による流体の物性変化が流れ場に強く影響するため、 非線形性が大きくその挙動の予測は困難である。 本研究ではこの様に物性変化が大きな、反応性流れ場の挙動解明することを目的とする。			
【研究内容（概要）】 本研究課題では、ナトリウム-水反応を模擬した試験流体の流動特性に関して、実験的 検討、及び数値解析的検討を行う。 実験的検討においては、ホログラム干渉系、LIF や PIV といった計測手法を用いて、密度、 pH、組成などの大幅な変化を伴う流れの挙動を詳細に計測する。まず、化学反応を伴わな い2流体の挙動に関する実験を行い、続いて穏やかな化学反応を伴う流れ場、最終的には 相変化や発熱を伴う化学反応までを検討対象とする。 実験において測定された2流体の挙動に関するデータは、数値解析コードの開発およびシ ミュレーションの検証に用いる。必要に応じて、実験に基づく解析モデルを整備する。			
【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高温力学実験室、水循環ループ			

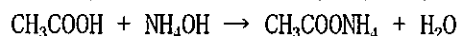
【進捗状況（当該年度までの概要）】

【研究成果（当該年度）】

11年度は研究の初年度であり、緩やかな化学反応を伴う流れ場を計測するための実験装置と計測技術の開発を行った。噴流拡散の挙動をPIVを用いて流速を計測した。二液二層流体の混合において、拡散が抑制されているという結果が得られた。また、DELIFの開発において新しい染料の組合せを選び、これにより局所的なpH分布を精度良く測定できることが分かった。本研究で用いたPIV及びDELIFの計測体系は、化学反応の乱流拡散に対する影響を調べるのに有効なツールであると考えられる。

実験装置

実験装置及び計測システムの概略図を図1に示す。長さ1m、断面0.1m×0.1mの亚克力製テストセクションに噴流ノズルを図の位置に設定する。ヘッドタンクから主流及び噴流にそれぞれ溶液が供給され、主流平均流速は0.05m/s、噴流ノズルは内径d=2mm、外径3mmで、ノズル出口速度を $U = 0.1 \sim 0.5$ m/s と変化させる。このとき噴流におけるレイノルズ数は約200～1000となる。化学反応には、二次の不可逆瞬間反応である酢酸と水酸化アンモニウムとの中和反応、



を用いた。この反応の反応速度係数kは約 $10^8 \text{ m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ であり、 $Sc = 250$ となっている。酢酸を主流とし、噴流ノズルよりアンモニア水が混入する。なお、比較のため、主流/噴流を水/水、酢酸/水の条件でも実験を行った。

可視化はテストセクション下部からNd:YAGレーザーのシート光を入れ、側部からCCDカメラにて撮影を行う。レーザーのパルス間隔は、CCDカメラの信号をパルス発生器に入力し、適宜遅延時間を設定することができる。

PIV実験

ジェット噴流の拡散速度分布を測定するためにPIV(Particle Image Velocimetry)を利用する。図2は噴流流速が45cm/sec、ノズルから60d下流位置における流れ方向の平均流速分布を示しているが、水/水の場合だけ拡散度合が明らかに大きく、水/酢酸の条件においても拡散が抑制されていることが判った。この現象を評価するため、噴流のみに染料を混入してそれぞれの溶液条件についてLIFを用いて噴流拡散を可視化した(図3)。図中で明るい部分が噴流溶液の濃い部分を示しており、水/水の拡散は他の条件に比べ明らかに大きい。追実験として酢酸/酢酸の場合についても実験を行ったが、水/水と同程度の拡散であった。このことから水/水と酢酸/酢酸の場合すなわち噴流/主流が同じ溶液のときには拡散度合は良く似ているが、水/酢酸とアンモニア水/酢酸の場合は明らかに拡散がそれと比べて小さい。これは噴流と主流の溶液が異なるとき、拡散が抑制されていることを示している。

本実験のようなReynolds数の小さい領域では、二液二層流の混合過程において化学反応の影響よりも溶液の違いが支配的だと考えられる。またこのような拡散抑制効果は高分子の場合などで報告されているが、本実験における拡散抑制原因については分子結合等の問題かどうかさらに実験が必要である。

Dual Emission LIF開発

LIFによる可視化計測は過去のいくつかの研究において行われているが、ほとんどが単一の染料を蛍光特性を持つトレーサとして使用している。しかしながら、光源のシート光強度が一様ではないことや、流れによる輝度変化から定量評価を行うのは難しい。そこで、2種類の蛍光染料を用い、これらの発光強度の比をとることで、レーザーの局所強度の条件をキャンセルすることができる。

本研究ではpH分布計測を目的として、DELIF用染料の調査を行った。2種類の染料は、pH依存特性が大きく異なっていると同時に、その発光を分離できることが必要条件となる。数多くの染料の発光特性を分光器により測定した結果、YAG3倍波レーザ(532nm)を光源とし、QuinineとRhodamine6Gの染料を選定した。355nm波長に対するこの染料の発光特性を図4に示す。図において左側にQuinineの発光ピークが、右側にRhodamine6Gの発光ピークが見てとれる。QuinineはpHが低くなるにつれて発光量が大きくなる傾向があるに対し、Rhodamine6Gは、ほぼ一定の発光量を示している。すなわちRhodamine6Gの発光がレーザーシート強度分布を示し、Quinineの発光がpHの変化を示すことができる。

角型容器に一樣に酢酸と染料を溶かし、温度一定の状態ではpHを変化させて撮影し、2つの染料の発光量をフィルターを通して測定する較正実験を行った。このときの光学系は、本実験装置で用いるのと同じものである。図5にpHに対して、QuinineとRhodamine6Gの発光量の比をとったものを示す。発光量比から、pHの値を精度良く求めることができることが判る。この曲線の関数を較正曲線として本実験に応用した。

較正実験と同じ染料濃度、光学系でノズル出口から60dの付近のpH分布を計測した。視野領域が小さいため噴流中心より下にずれた界面を撮影し、輝度比からpH値に較正した。図6は、拡散渦の推移を1/30秒間隔で測定したものを時系列で示してある。

渦の進行方向の境界面では反応が早くpH変化大きいため等高線の間隔が非常に狭い。一方、渦の後ろ側の流れが穏やかな領域ではゆっくりと反応が進み等高線間隔が比較的広がっている。しかしながら、渦の中心付近のpHはより高いはずなのに処理できていない。これは較正曲線上において、pH5.5付近までしか較正できないからである。

まとめ

噴流の拡散をPIVを用いて流速を計測した。二液二層流体の混合において、拡散が抑制されているという結果が得られた。また、DELIFの開発において新しい染料の組合せを選び、これにより局所的なpH分布を精度良く測定できることが分かった。本研究で用いたPIV及びDELIFの計測体系は、化学反応の乱流拡散に対する影響を調べるのに有効なツールであると考えられる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究で得られた、二液二層流体の混合における拡散抑制効果を定量化する。この現象は従来報告されていないためその詳細を調査する必要がある。また、そのメカニズムに関して検討を行い、二流体混合における乱流抑制効果を明らかにする。

さらに、開発した計測ツールを用いて、パラメータを変更しデータの取得を行うとともに、反応性乱流の相互作用に関して検討を実施する。また、数値解析コードを援用し、これらの流れ場の解析を実施し反応が流れ場に与える影響に関して評価を実施する。これらの実験、解析データを用いて、実機ナトリウム-水反応に対するアプローチに関して検討を行う。得られた知見から、新しいナトリウム-水反応の計測手法に関して提案を行うことも視野に入れ、研究を推進する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

佐々木 俊武、班目 春樹、岡本 孝司、「噴流体系における反応性流体の可視化計測」

日本機械学会関東支部講演会 講演論文集, No.000-1, (2000), pp.179-180.

T. Sasaki, K. Okamoto, H. Madarame, "Visualization study on chemical reacting flow using LIF," Tenth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, (2000), submitted.

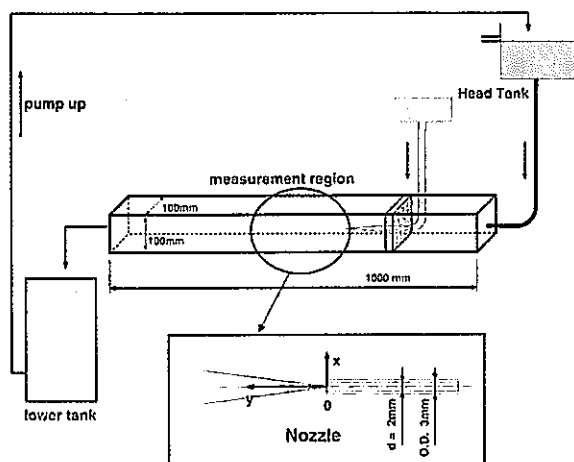


図 1 : 実験装置概略図

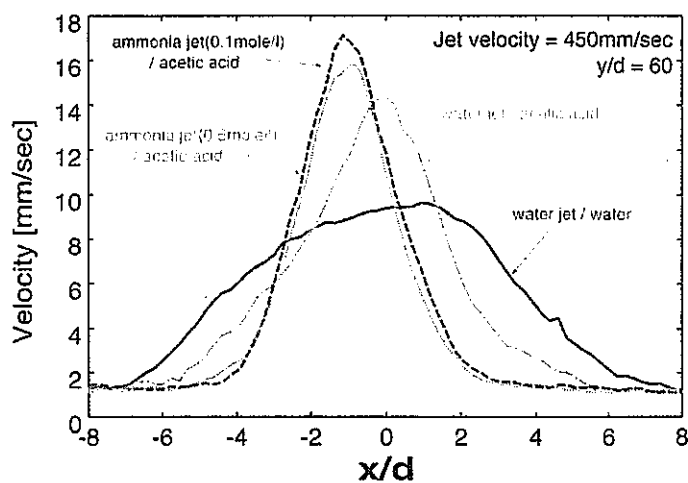


図 2 : 平均流速分布(PIV)

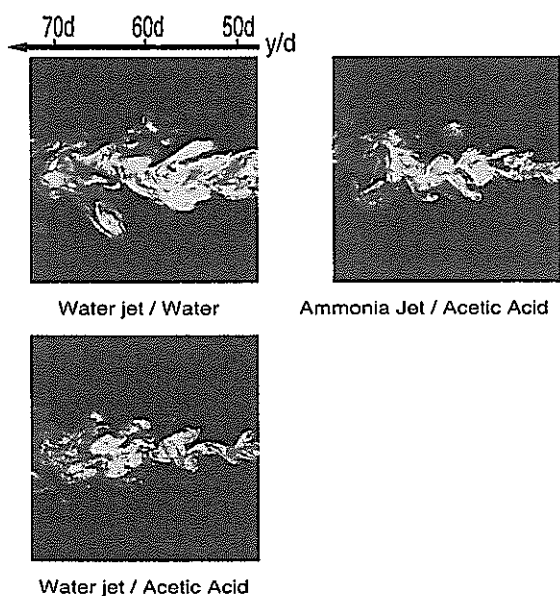


図 3 : 噴流拡散の可視化(LIF)

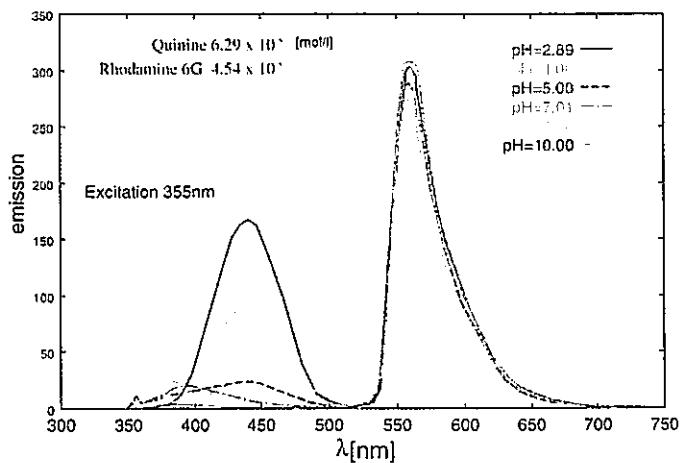


図 4 : 発光強度と pH

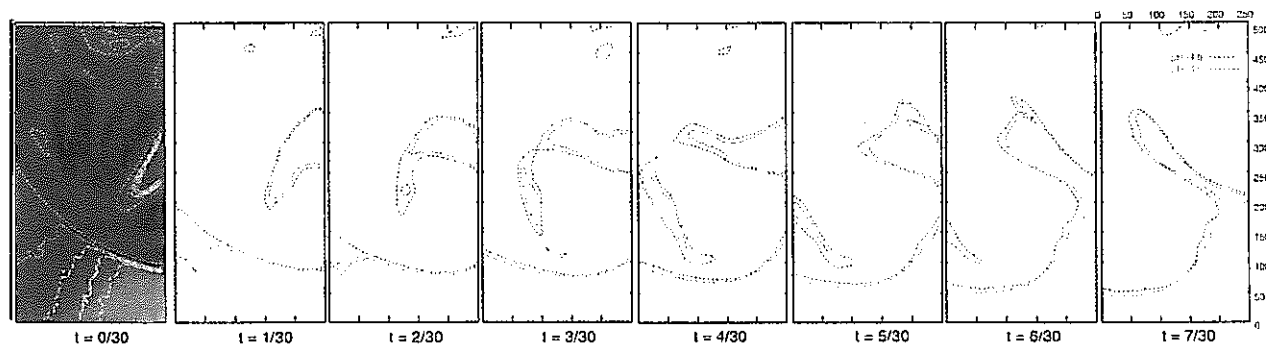


図 5 : アンモニア/酢酸混合の pH 分布(DELIF)

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	液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究（Ⅱ）		
研究協力課題	ナトリウムの沸騰伝熱特性に関する研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	京都大学 大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻 教授 塩津正博，助教授 白井康之 京都大学 エネルギー理工学研究所 助手 畑 幸一，助手 竹内右人，技官 濱 勝彦		
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 Gr 堺 公明		
研 究 協 力 実 施 場 所	京都大学 大学院エネルギー科学研究科 塩津研究室 機構 大洗工学センター ナトリウム流動伝熱試験室		
通算研究期間 (予定)	平成11年 4月 ～ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年 9月 28日 ～ 平成12年 3月 31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
高速炉の受動的な安全特性を強化するための研究の一環として、安全評価上重要なナトリウムの沸騰及び伝熱特性に関する基礎的研究を行う。 受動的な安全特性を強化したプラントでは、温度分布などの状態量変化にともなう自己制御性及び受動的動作の確実さをより詳細に評価する必要がある。そのため、本研究は冷却材であるナトリウムの伝熱特性が大きく変化する沸騰及び沸騰遷移現象に至るまでの熱伝達特性を系統的に求め、データベースを確立すること及び膜沸騰への遷移機構を解明することを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
京都大学エネルギー科学研究科の高温ナトリウム伝熱試験装置を用いて、ナトリウムの沸騰開始及び膜沸騰遷移に至るまでの熱伝達特性についての実験データを取得するとともに、膜沸騰への遷移機構の分析を行う。			
【使用主要施設】			
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			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究（Ⅰ）として、平成7年度～平成10年度まで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に関する研究を実施した。

【研究成果】

平成11年度は、(1)人口キャビティによる伝熱特性改善、及び、(2)強制循環状態の伝熱特性について、実験的研究を実施した。

(1) 人口キャビティによる伝熱特性改善の研究

1. 緒言

これまでの研究（基礎研究（Ⅰ））では、コールドトラップ（以下C/Tと記す）温度を高精度で制御した試験を実施し、沸騰開始過熱度（以下、IB過熱度）及び限界熱流束を測定した。その結果、圧力の比較的低い（3.0kPa）で、IB過熱度に対するC/T温度の影響が顕著に現れ、125℃以下の領域にてIB過熱度は100℃以上に達した。しかし、圧力の高い条件（14kPa）ではC/T温度の影響は現れず、全てのC/T温度で100℃以上のIB過熱度が観察された（図1、2参照）。また、発熱表面を予圧したケースでは、顕著な影響は見られなかった。蒸気を捕捉した活性キャビティが沸騰発生の開始点になっている場合、予圧を実施することによって気泡がつぶされIB過熱度は上昇する。しかし実験では、予圧の影響はほとんど見られないことから、この条件でのIBに対する活性キャビティの影響は小さいと考えられる。

ナトリウムは表面張力が大きいことから、活性キャビティからの沸騰開始は、大きな過熱度が必要となる。100℃以下の過熱度でナトリウムを沸騰開始させるためには、キャビティ径が0.1mm程度以上必要となる。試験体表面は比較的に滑らかであることから、ガスを含んだ活性キャビティからの沸騰開始は生じにくいと考えられる。

平成11年の試験では、表面張力が大きいナトリウム条件にて、100℃以下のIB過熱度で発泡が可能な径のキャビティを人工的に試験体表面に設けることによって、常に活性キャビティが存在する条件でのデータを取得し、IB過熱度のC/T温度依存性等に関するメカニズムを考察することを目的とする。

2. 試験方法

試験体は、図3に示すように、水平円柱の発熱部に人工的にキャビティを設けたものを使用した。キャビティは円筒形であり、径は約0.2mm、加工精度は±0.1mm程度である。深さは0.2～0.3mm程度である。キャビティの設置位置は、ヒータピン表面に軸方向5mm間隔、周方向4箇所であり、計36箇所に設けられている。

C/T温度を110℃に一定とした条件にて、プール内の流体温度を設定し、次に、流量を遮断し試験部のプール液位を測定後、プール上部のカバーガス圧力を調整することによって、系圧力を設定する。その後、熱流束を徐々に上昇させながら、ピン表面温度及び液体温度等を計測する。試験時には、それら過熱度と熱流束の関係（熱伝達曲線）をモニタし、それらの挙動を観察するとともに、プール液位信号の変動等から沸騰開始及び限界熱流束到達を判定した。

3. 試験条件

試験パラメータは、系圧力であり、圧力3kPa及び7kPa条件にて、C/T温度を110℃一定としてIBから沸騰遷移に至るまでの熱伝達特性を測定した。また、従来より、高熱流束条件での試験を実現するため、試験体表面温度をヒータ抵抗値の変化から求める手法を用いている。そのため、圧力依存性に関する試験に先立ち、予め対流熱伝達に関する試験を実施し、表面温度の較正式を決定した。

4. 試験結果

系圧力3kPa（飽和温度622℃）及び7kPa条件（663℃）について、いずれの圧力条件においても、IB過熱度が比較的低いデータと100℃を超えるような大きなIB過熱度を示すデータにばらつく結果となった。また、7kPa条件（663℃）では、膜沸騰への直接遷移も観察された。

人工キャビティに捕捉された蒸気核から沸騰する場合、100℃未満のIB過熱度となることが予測される。しかしながら、本試験結果は、100℃以上のIB過熱度が数多く観察されたことから、その場合の沸騰は、人工キャビティに捕捉された蒸気核からの発泡ではないことが推定される。本試験において、人工キャビティが存在するにもかかわらず比較的高いIB過熱度が観察されたことについて、人工キャビティの深さが比較的に浅く（約0.2mm）、そのため、キャビティが液で満たされたことが原因と考えられる。

(2) 強制循環状態の伝熱特性の研究

1. 試験目的

これまでの試験では、ナトリウムの一般的な沸騰特性データを蓄積する観点から、様々な流体について豊富なデータが得られているプール条件での試験を実施してきた。その結果、コールドトラップ温度依存性に関する系圧力の影響等について新たな知見が得られており、さらに、沸騰開始メカニズムを考察する観点から、人工キャビティによる試験を実施している。

一方、実機において、燃料要素は縦置き円筒体であり、また、プラント全体ループの自然循環を含め、想定されるほとんどのプラント条件において燃料集合体部には流速があり、加熱表面は強制循環条件となっている。平成11年度の本試験では、加熱表面に対するナトリウム流速が沸騰開始過熱度に及ぼす影響について、データを蓄積することを目的とする。

2. 試験方法

試験部は、図4に示すように、垂直2重円管による環状流路において、内筒の円筒型ヒーターを加熱する体系であり、ヒーターの外径は7.6mmである。発熱長は50mmであり、軸方向の10mm毎の4段に2カ所ずつ熱電対が設置されている。垂直円筒のヒーターでは、表面温度が軸方向に沿って変化するため、水平円柱で用いているようなヒータ抵抗値の変化から試験体表面温度を求めることができない。そのため、軸方向に多くの熱電対が設置されている。

操作方法は、C/T 温度を110℃に一定とした条件にて、入口温度を設定し、上部のカバーガス圧力を調整することによって、系圧力を設定する。その後、熱流束を徐々に上昇させながら、ピン表面温度及び液体温度等を計測する。試験時には、それら過熱度と熱流束の関係（熱伝達曲線）をモニタし、それらの挙動を観察するとともに、系圧力信号の変動等から沸騰開始を判定した。

3. 試験条件

試験パラメータは、発熱部のナトリウム流速であり、1.0m/s 及び2.0m/s 条件にて、C/T 温度を110℃一定として沸騰開始に至るまでの熱伝達特性を測定した。

4. 試験結果

試験は8ケース実施した。系圧力30kPa（試験部飽和温度781℃）でのIB過熱度を図5に示す。図から明らかなように、IB過熱度は流速の増加にともなって低下する傾向にあり、ばらつきも比較的小さなデータが得られた。しかしながら、流速条件を3m/sに増加させて実験を開始した時点で、ヒーター電流に異常がみられたことから実験を中断した。

既存の研究では、流速の増大に伴って沸騰開始過熱度が低下することが報告されているが、これが非凝縮性カバーガス巻込みによる見かけ上の現象であるのか、例えば、Pezzili等のモデルのような本質的な現象なのか確かめられないままになっている。非凝縮性カバーガス巻込みの影響である場合は、沸騰開始位置は軸方向に分散すると予測されることから、今後、試験部の交換を実施後、さらにデータの蓄積を進め、沸騰開始位置の統計的な評価を進める予定である。

以上

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成12年度

人口キャビティによる表面状態の影響等

平成13年度

パルスX線による沸騰状態の観察

【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書」,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書」,PNC TN1430 97-004(1997)
- (3) 塩津正博, 畑幸一, 竹内右人, 濱勝彦, 堺公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束」, 京都大学エネルギー理工研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告書, (1997)
- (4) 塩津正博, 白井康之, 畑幸一, 竹内右人, 濱勝彦, 堺公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束」, 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, 堺公明, 「ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱

流束」，京都大学エネルギー理工研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究報告書，(1998)

- (6) 塩津正博，畑幸一，竹内右人，白井康之，濱勝彦，堺公明，「液体ナトリウム中の水平円柱における沸騰開始過熱度」，第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1998)
- (7) M.Shioitsu, K.Hata, Y.Takeuchi, K.Hama and T.Sakai, "Incipient Boiling Superheat in Liquid Sodium", Proc. of 11th Int. Heat Transfer Conf., Taylor&Francis, USA(1998)
- (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書」,PNC TN1430 98-002(1998)
- (9) 「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書」,JNC TN1400 99-016(1999)

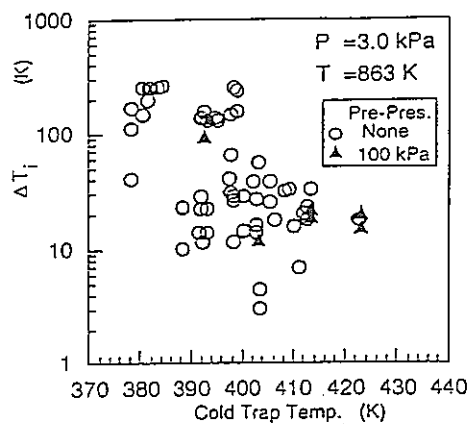


Fig. 1 Incipient Boiling Superheat for 3.0 kPa

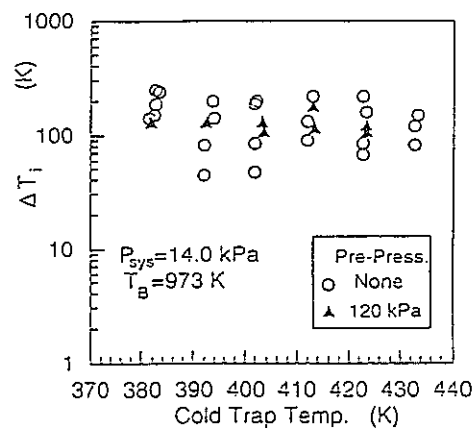


Fig. 2 Incipient Boiling Superheat for 14.0 kPa

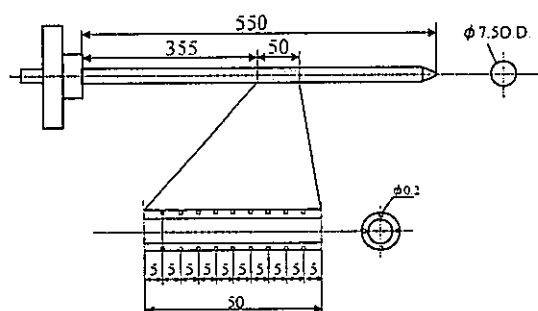


Fig.3 Heater pin with artificial cavities

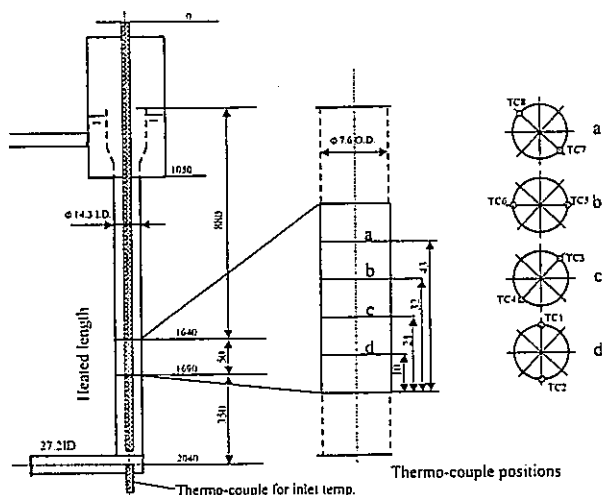


Fig.4 Test section for the forced flow circulation

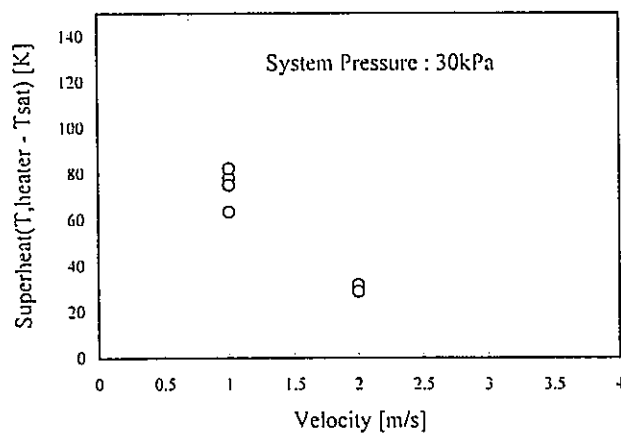


Fig. 5 Effect of Flow Velocity on Incipient Boiling Superheat

先行基礎工学研究に関する平成 11 年度研究概要報告書

研究協力テーマ	形状記憶合金を利用した炉心変形模擬試験法の研究		
研究協力課題	形状記憶合金の機械的特性モデル化		
研究者所属、氏名			
大 学 側	法政大学工学部機械工学科機械デザイン研究室 教授 直井久, 助手 伊庭由秀, 大学院修士課程 井出雄介		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発 Gr 研究主幹 月森和之 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器・構造安全工学 Gr 副主研 堀切守人		
研 究 協 力 実 施 場 所	法政大学 工学部 機械工学科 直井研究室 機構 大洗工学センター メカトロニクス応用研究棟		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 4 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 9 月 10 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
高速炉炉心の安全性、経済性を追求するための炉心変形挙動の解析評価手法開発において、炉外における検証試験として、形状記憶合金を利用した炉心の変形挙動の模擬試験を計画している。本研究は、この試験を実現するために必要となる形状記憶合金の熱的、機械的挙動の把握およびそのモデル化を大学との共同研究によって完遂することを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
加工性の良好な鉄系形状記憶合金をターゲットとして、材料の変形特性に関する熱的、機械的荷重の影響、また加工の影響などを材料試験により把握し、数値解析に展開するために有効な構成モデルを構築する。一方、炉心を構成する燃料集合体を模擬する試験体の仕様を検討し、鉄系形状記憶合金を使って試作を行う。作成した試験体を使って、曲げ、変形抵抗、変形回復挙動などに関する基本的な試験を実施し、開発した構成モデルによる解析との照合を行い、モデルの妥当性あるいは改良点等を検討し、形状記憶合金による模擬試験の解析評価の妥当性から実事象解析の妥当性を推論する評価体系構築の見通しを得る。 大学側は、形状記憶合金候補材の基礎物性、加工性の影響も含めて熱的・機械的特性の解明、把握およびモデル化を主に担う。 機構側は、材料の加工性の検討、試験体仕様の検討・試作を主に担う。			
【使用主要施設】			
インストロン型引張り試験機(法政大学) 加工フォーマスター試験機 (同上)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度では鉄系形状記憶合金の機械特性を明らかにするため以下の試験研究を行った。

- (1)単純引張り特性調査
- (2)単純圧縮特性調査
- (3)応力・歪み線図比較調査
- (4)高温引張り特性調査
- (5)その他基本材料特性調査

【研究成果（当該年度）】

平成 12 年 3 月までの研究成果の概要をまとめる。

供試材は最近開発された 28%Mn-6%Si-5%Cr-Fe の鉄系形状記憶合金(以下 FSMA と呼ぶ)で、鍛造後 1150℃加熱、圧延し 950℃で 1 時間熱処理しオーステナイトとしたもので、その化学組成は表 1 に示す。本供試材を用いて形状記憶合金の機械的性質を調査するため、(1)単純引張り特性、(2)単純圧縮特性、(3)応力・歪み線図比較、(4)高温引張り特性、(5)その他基本材料特性について調査した。

(1)単純引張り特性調査(Fig. 1)

インストロン型試験機を使用し単純引張りにより最大 16%までの引張り歪みを与え、FSMA の変態加工歪み量と形状記憶歪み量の関係について調べた。単純引張り加工によりオーステナイト相から ϵ マルテンサイト相への応力誘起変態を生じさせ、その後 400℃×10 分の Ar 雰囲気中加熱条件による ϵ マルテンサイト相からオーステナイト相への逆変態をはかり形状記憶特性を把握した。また 5%予歪み後、600℃×10 分の Ar 雰囲気中加熱条件による Training 処理を 1 回行なった場合と行なわない場合とで比較した。トレーニング処理を一回行なった時の形状回復歪み特性は単純引張り試験(Training なし)と同様の傾向を示し、加工歪みの増加と共に形状回復歪みは増加し、Training なしでは加工歪み 5.0%で最大値 2.0%となり、以降加工歪み 16%まで漸減した。形状回復率は加工歪み 5%の時 40%であった。Training 処理を行ったものは、加工歪み 5%で最大値 3.7%となり、以降加工歪み 16%まで漸減した。形状回復率はトレーニングなしの時より大きくなり 74%となった。Training を行なったものが行なわなかったものより全体的に形状記憶歪み量が大きかったことから Training 処理の効果が確認された。また、形状記憶歪み量は Training の有無に関わらず変態加工歪み量 5%において最大値を示している。これはマルテンサイト変態に優先してオーステナイトのまますべり変形を起こしているためにこれ以上の変態加工歪み量では回復量が下がっていくと考えられる。

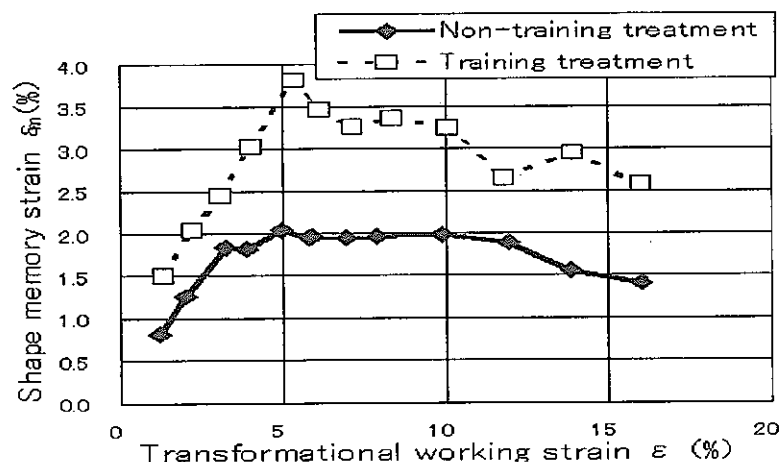


Fig. 1 Shape memory strain vs. working strain at tensile test with training

(2) 単純圧縮特性調査(Fig. 2)

8mm 外径、12mm 長さの円柱試験片を加工フォーマスター試験機により圧縮し最大 16% の圧縮歪みを与え、オーステナイト相から ϵ マルテンサイトへの応力誘起変態を生じさせ、引き続き $400^{\circ}\text{C} \times 10$ 分のオーステナイト熱処理を行なった。単純引張り試験と同様に単純圧縮による変態加工歪み量と形状記憶歪み量との関係を把握するが、Training 処理は無しとした。引張り試験同様、圧縮試験も加工歪みの増加と共に形状回復歪みが増加した。圧縮試験では、加工歪み約 6% で最大値 1.9% となり、引張り試験同様加工歪み 16% まで漸減し、形状回復率は 6% の時約 31% となった。圧縮による形状加工歪み量が若干低い値を得た理由については、単純引張り試験では最大 16% 歪みまで均一変形と考えて良いが、圧縮試験においては工具と材料の摩擦により樽型の不均一変形となり、結果として両者の加工歪み分布の違いが応力誘起マルテンサイトの分布の違いとなるため、単純引張りと圧縮の形状記憶特性に差異が生じた為と推定する。

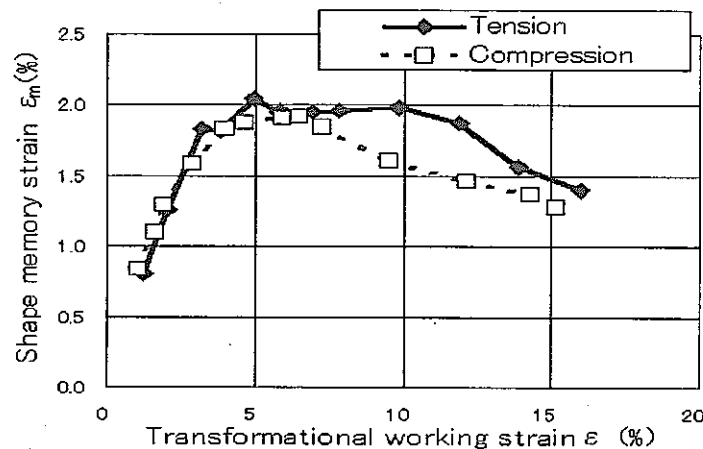


Fig. 2 Shape memory strain vs. working strain for tensile and compression test without training

(3) 応力・歪み線図比較調査(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5)

FSMA の引張り特性を調べる為、FMSA の Stress-Strain 曲線の特徴を炭素鋼 (SS400) と比較した(Fig.3)。FSMA、SS400 共に 5% 引張り試験後除荷し、その立ち上がり部、除荷部の挙動を比較した(Fig.4)。FSMA と SS400 の応力・歪み線図を比較した結果、応力・歪み線図に FSMA 特有の挙動が認められた。FSMA の負荷の際、立ち上がり部から得られるヤング率は SS400 とほぼ等しいが、両者の立ち上がり曲線はひずみの増加とともに外れてくる。これは FSMA が変態後すぐに比例限界を迎え、その後は主に応力誘起マルテンサイト変態によって変形が進行して行く為である。次に除荷時にも同様な傾きが見られた。この理由は明らかになっていないが、(1) 応力除去により、常温近傍でもオーステナイト変態が生じたため、(2) 応力除去により、 ϵ マルテンサイトが移動して結晶方向が変化して、変位の大きくなったため等の仮説が考えられる。圧延、熱処理後の供試材と 5% 歪みを与えた供試材の断面組織写真を比較した結果、5% 加工の組織にははっきりした双晶みられ結晶方位は 3 方向であるので ϵ マルテンサイトであることが確認された(Fig.5)。一方バーজন材にも少量の双晶が見られるが、その理由は、組織写真を撮影するための試験片の加工する際、応力誘起マルテンサイト試験片表面に出現したためであると考えられる。

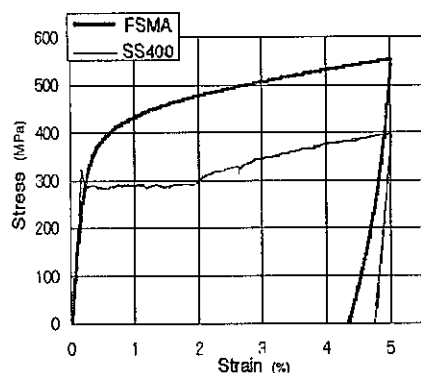


Fig. 3 Stress-Strain curves of FSMA and SS400

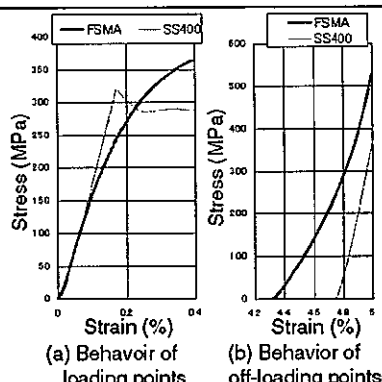
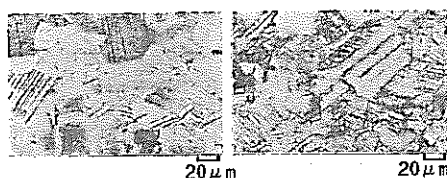


Fig. 4 Details of Stress-Strain curves of FSMA and SS400



(a)specimen which was rolled and heat-treated (b)specimen which was given 5% work strain

Fig. 5 Microstructures of as heated and 5% strain

(4)高温引張り特性調査

形状記憶合金の常温及び 400℃までの高温特性が得られた。引張り強さは温度上昇と共にほぼ一直線上に減少し、常温で 792MPa が 400℃で 553MPa まで減少した。

0.2%耐力は 100℃～250℃で減少が顕著で、その後は温度上昇にあまり影響されず常温で 273MPa が 400℃で 158MPa となった。

全伸びは温度上昇に従って増加し、常温で約 40%が 400℃で約 64%となった。

(5) その他の基本材料特性調査

ヤング率 E は 170.0GPa、横弾性係数 G は 65.0GPa、ポアソン比 ν は 0.359、熱膨張係数 α は $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の値を得られた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 11 年度に引き続いて鉄系形状記憶合金の機械的特性をモデル化するために下記に示す実験的研究を進め、その定式化を行う。次に、形状記憶合金の簡単な構造体のモデルを製作し、得られた定式を用いて有限要素法等を用いて変形解析する。

- (1) 応力-歪特性に及ぼす熱処理と加工処理の条件を明らかにし定式化する。特に弾性比例限以降の応力緩和挙動を示す応力誘起変態、除荷後の変形特性を調査する。
- (2) 形状記憶合金の梁で 4 点曲げ試験を行い、除荷後 400℃の熱処理を行い形状回復させて変形挙動を有限要素法等により解析する。

以上により鉄系形状記憶合金を用いた高速増殖炉の炉心を模擬する実験とその構造解析の基礎調査資料とする。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) ASME, 5th International Biennial Conference On Engineering Systems Design & Analysis, ESDA2000, July 10-13, 2000, Montreux, Switzerland(予定)
- (2) 日本機械学会講演会, 第 4 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム、2000 年 11 月 6 日-8 日、(予定)

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	移動熱荷重と減肉プロセスを受ける材料の変形挙動		
研究協力課題	熱荷重と材料変形の連成場に関する研究		
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 譲		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 FBRGr 一宮正和		
研究協力 実施場所	横浜国立大学 酒井研究室 機構 大洗工学センター 重水炉工学試験棟		
通算研究期間 (予定)	平成11年 4月 ~ 平成13年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年11月18日 ~ 平成12年 3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 高速炉で想定されるナトリウム漏洩事故では、床板鋼板が熱変形と高温腐食による減肉を受ける可能性が指摘されている。本研究では、高温流体の流動とともに床材料がどのように熱変形・減肉を受けるか、またその結果としてどのように材料破壊が生じるかを、比較的小規模の実験により検証し、安全設計に反映することを目的とする			
【研究内容（概要）】 高速炉もんじゅで起こったナトリウム漏洩事故では、床ライナーに落下したナトリウムは床上で固化したが、環境条件によっては燃焼し、その化合物が熔融状態となる場合がある。このとき金属製の床ライナーは激しく腐食を受け急速に減肉する可能性があり、同時に熱応力により床ライナーが変形し、変形に依存してナトリウム化合物は移動することになる。そこで本研究では、以下のような計測実験を行った。 本年度の実験モデルは、より熱変形が顕著に現れるプラスチック板（500 mm×500 mm、板厚 6 mm）を用い、その中央部上に高温液状化した鉛を漏洩させた。 高温流体の漏洩による板の変形はレーザーにより計測し、コンピュータにより処理したのちグラフィックス化した。また液状鉛の流れる挙動はビデオ撮影し、これもコンピュータ処理をおこなった。プラスチック板を用いた場合、中央部に鉛が注がれると、瞬時に板は熱応力変形を生じて反り返る挙動が現れ、（レーザー計測によればほぼ対照的な凸型、最大変形 5 mm程度）その変形にともなって液状鉛が流れる様子が確認できた。 一方、熱流体の拡大による熱応力分布と、それらによる板の変形を有限要素法で解析した。熱境界条件は、ビデオ撮影された流動状況から求めたデータを与えた。 数値解析と、実験結果を比較すると両者の時間的な挙動はほぼ一致した。また変形量は実験結果の方が30%ほど大きく求められた。			
【使用主要施設】			
【進捗状況（当該年度までの概要）】			

【研究成果（当該年度）】

1. 実験装置と方法

この項では実験装置と方法に関して述べる。まず、以下に使用した材料と器具を示す。

〔実験に使用した器具、材料〕

アクリル板：400×400×5(mm)

はんだ

レーザー式変位センサ（キーエンス社製 LB-1200）

PC カード（キーエンス社 NR-110）

ノートパソコン

〔実験方法〕

拘束をつけたアクリル板の上から溶かしたはんだを流すと、板には熱応力が発生し、板は変形する。そこで、変形した板の各点の変位を下からレーザーを用いて測った。

測定ははんだをアクリル板の上からかけて変化が収まったところ（1分後）で全体の測定を行った。また、それとは別に同じ条件で実験を行い、中心の高さのみを測り続けることで変位の最大値を測った。

レール上でレーザーを手動で動かしている間に200msec 間隔でデータを採った。変位はレーザーによってまず電圧として測定し、それを変位に変換した。変換式は次式で表される。

$$X \text{ (mm)} = 20V \text{ (V)} + 300$$

X はレーザーからの距離であり、このレーザーでは一番誤差の少ない距離がレーザーから 300mm であるため、レーザーから 300mm のところで電圧が 0V となるようにした。図 1 に実験装置を示す。

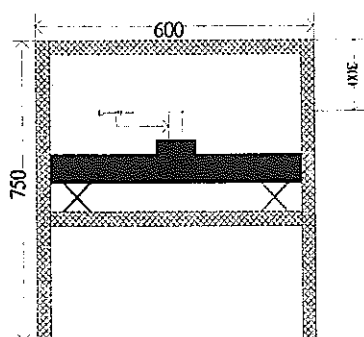


図 1. 実験装置図（横から見た図）

2. 実験結果

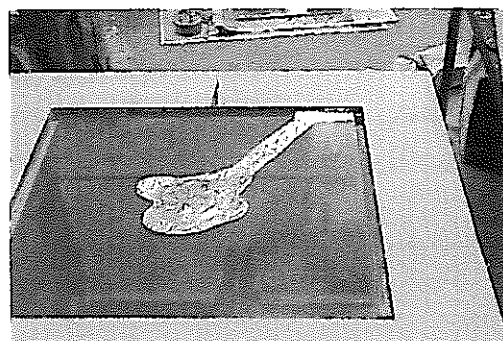


図 2. はんだが流れる様子

アクリル板の中心部分に溶かしたはんだを流すと、熱応力によってアクリル板が上に膨らむように変形し、表面に傾斜ができたために液体のはんだがそれに沿って流れた（図 2）。

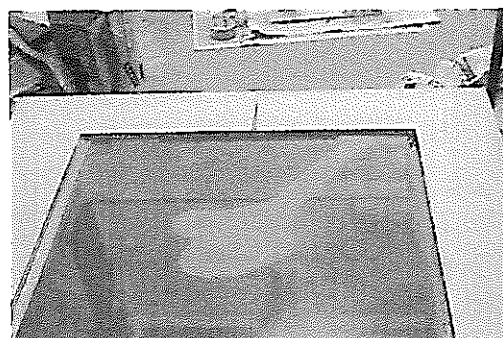


図 3. 減肉の様子

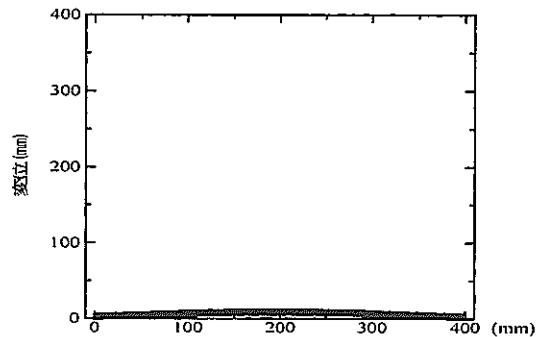
熱応力による変形が終了し、はんだが冷えて固まったあとでアクリル板からはんだを取り除くと、アクリル板の減肉の様子が確認できた（図 3）。はんだを流した中央部の減肉は激しかった。もんじゅの事故でははんだよりもはるかに高温であるナトリウムが溶けて流れたため、減肉を考慮した構造解析は重要であろう。



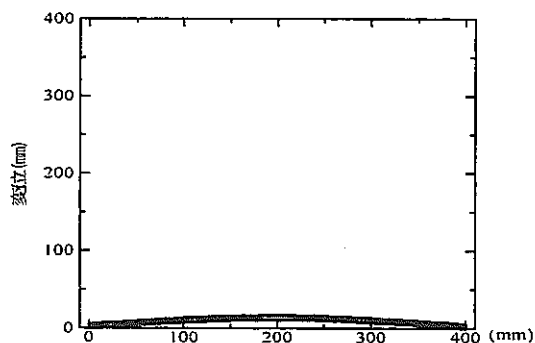
図 4. 測定結果を用いた 3 次元グラフ（全体図）

図4は実際に2cm間隔で測定した実験結果を基に2cm四方のメッシュにするためのデータを補間して作成したグラフである。また、変形が分かるように鉛直方向の長さを2倍にして表した。これにより、熱応力によるアクリル板の変形挙動を再現することができた。

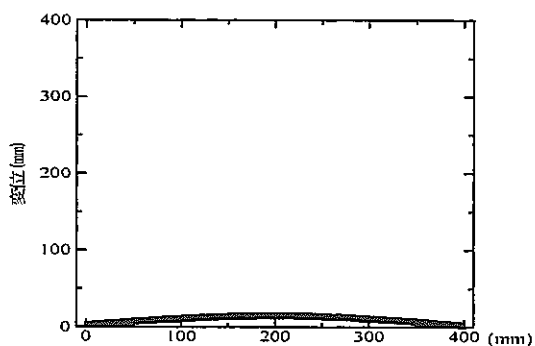
図5は板中央部の最大変形の時間変化挙動(測定値)を示す。



(a) アクリル板の変形 (5sec)



(b) アクリル板の変形 (30sec)



(c) アクリル板の変形 (60sec)

図5. アクリル板の変形

3. 解析結果

3.1 非定常熱伝導解析

解析は2次元熱伝導解析プログラムを用いた。解析

の前に解析対象の有限要素モデルを作成した。モデルの大きさは実験の条件に合わせて縦がアクリル板の厚さである5mm、横はアクリル板の幅である400mmのものを用いた。解析に用いた要素は4節点アイソパラメトリック要素である。以下に、解析に用いたアクリル板の物性値を示しておく。

比重量 : 1190 Kg/m³

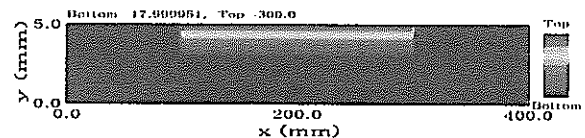
比熱 : 1470 J/kg·K

熱伝導率 : 0.189 J/m·sec·K

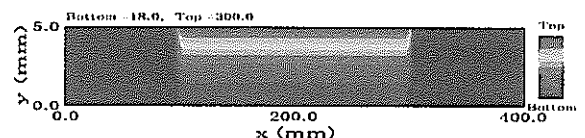
初期温度(室温) : 18°C

このモデルではアクリル板上部の中央(横150mm~250mm)に高温のはんだ(300°C)が付着したと考えその部分の境界条件を300°Cとした。

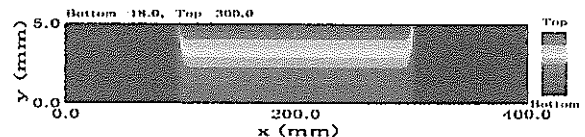
実験では1分後のアクリル板の変形を測定したので、それに合わせて時間ステップ1secで60ステップまで解析を行った。その結果を図6に示す。



(a) 5th steps (5.00E+00 sec)



(b) 30th steps (3.00E+01 sec)



(c) 60th steps (6.00E+01 sec)

図6. 温度分布図

3.2 熱応力解析

解析は熱伝導解析と構造解析を結合させて行った。まず熱伝導解析を行ってアクリル板の温度分布を求めから熱ひずみによる節点荷重を計算し、変位を求めた。構造解析は変形した形を維持したまま次のステップに進む。

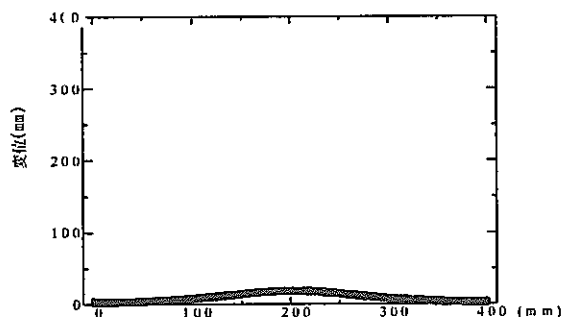
また、物性値は熱伝導解析同様アクリル板の物性値を用いた。その物性値を次に示す。

ヤング率 : 330kgf/mm^2

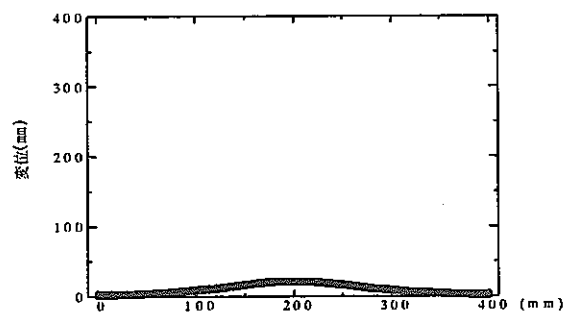
ポアソン比 : 0.4

線膨張係数 : $7.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

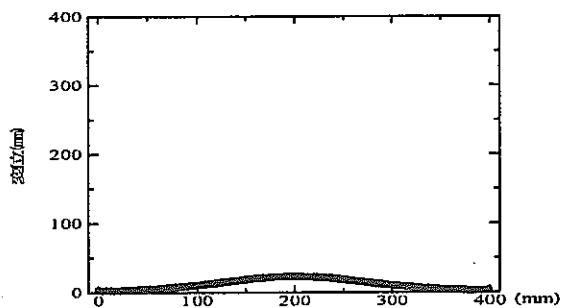
この解析を時間ステップ 1sec で 60sec まで行った。その結果を図 7 に示す。



(a) アクリル板の変形 (5sec)



(b) アクリル板の変形 (30sec)



(c) アクリル板の変形 (60sec)

図 7. 熱応力変形解析図

4. 実験結果と解析結果の比較

本研究では数値シミュレーションによる解析のみ行われてきた熱応力による固体の変形という問題に関して検証実験を行うことによって解析の結果をより確信の持てるものにするという事が目的である。解析結果のみで判断するのは安全性が最重要視されるような建造物の設計に関しては問題がある。やはり、実際の周辺物に熱が加わったときにどのような挙動を示すのかを実際に確かめることで把握する必要がある。

図 8 には実験結果と解析結果のアクリル板の中心部分の変位を時間をパラメータとしたグラフで示した。

実験結果と解析結果には約 15% のずれが生じた。しかし、解析結果で求められたようなアクリル板の熱応力による変形挙動は十分に確認することができた。

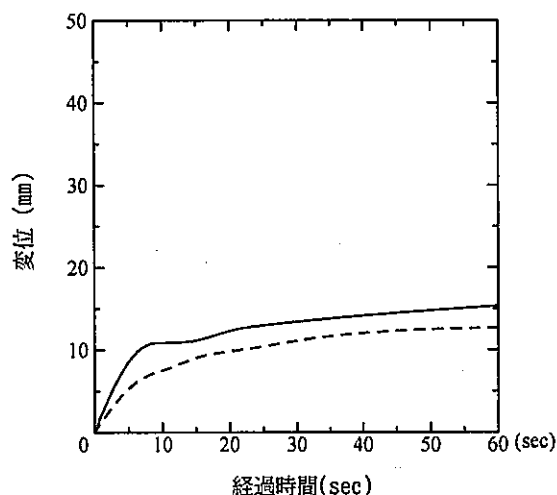


図 8 アクリル板の中心点の変位の推移

実線 : 解析結果
点線 : 実験結果

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

熱流動による板変形の挙動を 3 次元で計測してグラフィクス化する。さらに SPH 法による 3 次元流動解析・熱伝導・変形解析をおこない実験結果と比較検討する。

【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11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	ナトリウム化合物の熱力学特性変化に関する基礎的研究		
研究協力課題	NaFe 複合酸化物の化学熱力学特性変化に関する基礎的研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 教授 山脇道夫 東京大学 大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設 助教授 山口憲司, 助手 小野双葉		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器構造安全工学 Gr 青砥紀身, 上野文義, 古川智弘		
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 機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第1試験室		
通算研究期間 (予定)	平成11年4月 ~ 平成13年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年12月 7日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 「もんじゅ」事故において当該配管室に備えられていた炭素鋼製の構造物の一部に損傷あるいは減肉が認められた。これらの損傷部近傍対象とした材料分析では、NaFe 複合酸化物が検出されている。サイクル機構による「燃焼実験ⅠおよびⅡ」では、生成した NaFe 複合酸化物の種類や鉄の価数等も異なることが確認されている。腐食機構の解明や、今後の構造物損傷抑制を適切に行う為には、生成した各種 NaFe 複合酸化物の信頼性の高い熱力学データが必要である。			
【研究内容（概要）】 「もんじゅ」事故および「燃焼実験ⅠおよびⅡ」で確認された、NaFe 複合酸化物は Na_4FeO_3、NaFeO_2、Na_3FeO_3 および Na_5FeO_4 と多種に及ぶ。本研究では、夫々の化合物に対して以下の熱力学的特性など基礎的なデータ整備に関わる以下の試験・測定技術の汎用性の確認、および試験の実施、評価ならびに検討を行う。 (1) NaFe 複合酸化物(Na_4FeO_3、NaFeO_2、Na_3FeO_3、Na_5FeO_4 など) を単独で合成する手法の確立：極低酸素ポテンシャルで生成する Na_4FeO_3 をはじめ、NaFe 複合酸化物を研究室で合成する技術を開発する。 (2) 合成した上記 NaFe 複合酸化物について、熱力学特性データの取得：Na_4FeO_3 の融点(分解点)、高酸素ポテンシャル下における Na_4FeO_3 生成(安定性) の確認をはじめ、合成した NaFe 複合酸化物について熱力学的データの取得など試験評価を行う。 (3) 熱力学データベース(MALT2)により検討され、提案された $\text{FeO}\text{-Na}_2\text{O}$ 状態図の確認：MALT2 により検討・提案された $\text{FeO}\text{-Na}_2\text{O}$ 状態図には「もんじゅ」事故および「燃焼実験ⅠおよびⅡ」で確認されなかった Na_2FeO_2 化合物の存在など不確かな問題も多く残している。また、これまでに提案された文献値にも整合性がない。このことから Na_2FeO_2 化合物の存在を確認するなど基礎データの取得によりデータベースを整備する。			
【使用主要施設】 x 線回折装置 (サイクル機構) 熱分析装置 (東京大学)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

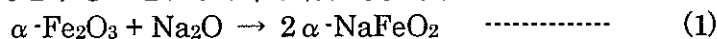
これまで、これらの複合酸化物について、単体の Na_2FeO_3 の製造法を確立した。また、入手し易く、比較的安定である市販の NaFeO_2 について TG・DTA(熱重量・示差熱分析)および DSC (示差走査熱量計) による熱分析を実施し、 1000°C 付近での NaFeO_2 の転移温度を $1000.7 \pm 3.1^\circ\text{C}$ 、転移熱を $2.48 \pm 0.04 \text{ cal/g}$ と評価した。しかし、文献値に見られる、 $\sim 750^\circ\text{C}$ 付近での転移温度、分解温度および融解温度に関してはさらに詳細な検討が必要であることが分かった。さらに、アルミ反応管及びアルミボートを使用し、バッチ式加熱法により 1250°C でアルミボートとの固溶反応、あるいは試料の熱分解の可能性が観察され、熱分析容器として白金容器が適していることが分かった。

【研究成果】

1、 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ の生成実験

NaFeO_2 は、 760°C を境に高温相で生成する $\beta\text{-NaFeO}_2$ と低温相で生成する $\alpha\text{-NaFeO}_2$ の 2 形が存在する。しかし、出発原料として Na_2CO_3 と $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の混合物を用いた場合、たとえ $\alpha\text{-NaFeO}_2$ の安定領域である 760°C 以下の温度で長時間焼成しても生成相は殆ど $\beta\text{-NaFeO}_2$ であると報告されている。市販の NaFeO_2 はその製造方法（約 800°C で焼成）から $\beta\text{-NaFeO}_2$ であることを XRD により確認した。

前述のように、 NaFeO_2 の生成には出発原料として炭酸塩 (Na_2CO_3) が用いられているが、漏洩ナトリウムと構造材の鉄鋼材料との反応を考慮して、出発原料として Na_2O を使用し (1) および (2) の反応式に従い $\alpha\text{-NaFeO}_2$ の生成実験を行った。文献より出発原料を $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ あるいは $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ とすることにより、生成温度が異なることを予測し (2) の反応についても検討した。



ここでは、出発原料をアルゴン雰囲気グローブボックス（以下「G.Box」と記す）内（露点： -80°C 、酸素濃度：1ppm 以下）で当量を秤量し、さらに瑪瑙乳鉢で混合した。混合試料は、当該 G.Box 内で反応容器（4 分の 1 インチ SUS 製スエジロック）に密封した。

反応容器を電気炉内で所定の温度（ $400, 450, 500, 550$ および 600°C ）で所定の時間加熱した。反応生成物は、JNC において X 線回折 (XRD、理学電機：RINT2500) を実施した。XRD 結果の一例を X 線スペクトルの最強強度カウント数で規格化して図 1 に示す。図中には参考として α および $\beta\text{-NaFeO}_2$ の JCPDS カードピークを ∇ および $\blacktriangledown$ で示す。図より 450°C 、5 時間加熱での XRD では $2\theta = 20^\circ$ 付近に $\beta\text{-NaFeO}_2$ のピークが認められる。

式 (1) および (2) の反応による反応生成物に対する XRD 結果の一覧を、表 1 および 2 に示す。表 1 および表 2 から混合出発原料を低温 ($400 \sim 550^\circ\text{C}$) あるいは短時間 (5 時間) 加熱した場合には中間生成物として、(1) および (2) の反応において $\beta\text{-NaFeO}_2$ が生成することが分かった。また $600^\circ\text{C} \cdot 10$ 時間加熱で均一な $\alpha\text{-NaFeO}_2$ が精製できること、さらに出発原料を $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ とした場合 $550^\circ\text{C} \cdot 5$ 時間加熱でも $\beta\text{-NaFeO}_2$ は痕跡程度であり反応条件は $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と比べて低温・短時間で $\alpha\text{-NaFeO}_2$ を生成することが予測できた。しかし、文献で示されるほど顕著な差異は認められなかった。これは、出発原料として Na_2CO_3 の代わりに Na_2O を使用したことが一因と考える。今後、結晶構造の観点からの検討もする必要がある。

出発原料を $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ とした場合は、反応温度が低くても $\alpha\text{-NaFeO}_2$ の生成が可能であろうと予測できるが、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (強磁性) は砂鉄状であるため混合が困難であった。このことから、混合が容易である $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を出発原料として (1) の反応により $\alpha\text{-NaFeO}_2$ を精製した試料について以下の実験を行った。

2、 α および $\beta\text{-NaFeO}_2$ の室温での安定性確認実験

精製した $\alpha\text{-NaFeO}_2$ および市販の $\beta\text{-NaFeO}_2$ について、室温・大気中およびアルゴンガス流内での安定性を熱重量分析 (TG) により確認した。TG による重量変化量を百分率で示した結果を図 2 に示す。図より α および $\beta\text{-NaFeO}_2$ は 15 時間大気中に放置した場合でもそれぞれ 0.2 および 0.8% の増加が認められた。また高純度のアルゴンガス流中では、約 0.5% の重量減少が確認された。これは試料表面に物理吸着した水分が脱離し試料が乾燥したためと考える。

このことから α および β -NaFeO₂は室温・大気中で比較的安定であり、試料調整後の取扱は容易であることが分かった。

3、 α -NaFeO₂の熱分析実験

反応式(1)により精製(550℃、10時間加熱)した α -NaFeO₂について、熱分析実験を行った。測定結果の一例をDSCに関して β -NaFeO₂の結果と共に図3、TG-DTAに関して図4に示す。

図3から β -NaFeO₂の測定では観測されなかった低温部800℃でのピークが確認された。しかし、降温時には当該ピークは出現しなかった。このことから、 α -NaFeO₂は一旦高温部での相転移により、 β -NaFeO₂に結晶構造が変換した場合には、もとの α -NaFeO₂構造には戻らないことが分かった。昇温後の α -NaFeO₂が β -NaFeO₂になることはXRD回折により確認できた。

文献値によれば低温部の転移温度は759.85℃であるが、本実験ではブロードなピークに続いて高いピークが認められるが、試料の純度などの影響が考えられることから今後詳細な検討が必要である。

図4では、前述の試料について室温から1370℃までTG-DTA測定を行った結果であり、容器は白金容器を使用した。試料重量は約7mgとした。これは、試料の融解などにより測定子の破損を防ぐための措置であったが、試料量が少ないためか、低温および高温における相転移温度でのピークは小さかった。また昇温時には1250および1300℃付近で吸熱反応が確認された。また、降温時には1250℃でのピークは消失し1100℃で新たな吸熱反応が認められた。TG測定の結果から、1250℃付近以上で急速な重量減少が観測されることから、 α -NaFeO₂の熱分解が考えられる。文献値によれば分解温度は、1350℃付近であることから文献値よりも低い温度での熱分解が予測できる。しかし、降温時の1100℃付近のピークについても、白金との反応が予測出来るなど不明な点も多いことが分かった。

以上の結果を踏まえて、平成12年度の研究計画を進める予定である。

【今後の予定(翌年度以降の概要)】

- 1、NaFeO₂について、Na漏洩時の条件を模擬してNa₂OおよびFe₂O₃を混合して作成する条件が確立できたことから、この試料に対する熱力学データを整備する。
- 2、前述のように、単体のNa₄FeO₃製造が可能となったため、同試料について熱分析(TG-DTAおよびDSC)などを行い、熱力学データを入手・評価する。
- 3、JNCによる燃焼実験により得られたNa₅FeO₄などの複合酸化物の生成条件を確立、化学熱力学的安定性などを検討する。

以上の実験により得られた熱力学データについて、これまで報告されている実測値および計算によるシミュレーションデータとの比較検討を行う。このことにより化学熱力学的計測技術の確立と信頼性の高い熱力学データを提供すると同時に、腐食機構の詳細な解明、腐食の抑制および防止対策に有用な情報の提供が可能となる。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1、山脇 道夫, 山口 憲司, 小野 双葉, 利根川 雅久, 青砥 紀身, 古川 智弘, 榊原 安英, 「NaFe 複合酸化物の合成と物性測定 - NaFeO₂ の熱化学的特性 -」, 東京大学工学部総合試験所年報 58 (2000) 133-137.
- 2、小野 双葉, 利根川 雅久, 山口 憲司, 山脇 道夫, 「Na-Fe-O 系化合物の化学熱力学的特性に関する研究」, 日本原子力学会「1999年秋の大会」予稿集(III), 柏崎, 1999年9月10-12日, (1999) 631.
- 3、小野 双葉, 利根川 雅久, 山口 憲司, 山脇 道夫, 「Na 漏洩反応生成物の熱化学的特性」, 日本熱測定学会「第35回熱測定討論会」講演予稿集, 東京, 1999年11月10-12日, (1999) 272-273.
- 4、小野 双葉, 山口 憲司, 山脇 道夫, 「NaFeO₂(s) の化学熱力学的特性に関する研究」, 日本原子力学会「2000年春の年会」要旨集 (III), 松山, 2000年3月28-30日, (2000) 1083.

表1 α -Fe₂O₃ と Na₂O の混合物加熱処理実験
(α -Fe₂O₃ + Na₂O → 2 α -NaFeO₂ (1))

Temp. (°C)	Holding time(hr)	XRD 回折相対強度	
		α -NaFeO ₂	β -NaFeO ₂
400	5	++++	+
400	5	++++	+
450	5	++++	+
500	5	++++	+
550	5	++++	+
550	8	+++++	(+)
550	10	+++++	(+)
550	24	+++++	(+)
600	5	+++++	(+)
600	10	+++++	-

表2 γ -Fe₂O₃ と Na₂O の混合物加熱処理実験
(γ -Fe₂O₃ + Na₂O → 2 α -NaFeO₂ (2))

Temp. (°C)	Holding time(hr)	XRD 回折相対強度	
		α -NaFeO ₂	β -NaFeO ₂
400	5	++++	+
450	5	++++	+
500	5	++++	+
550	5	+++++	(+)

(+: XRD 微量検出, (+): XRD 痕跡)

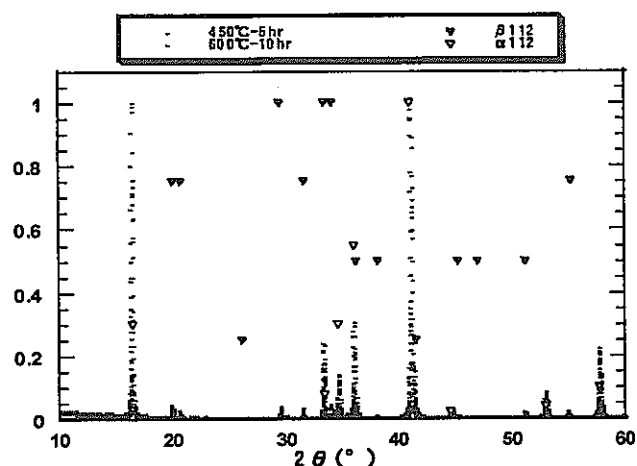


図1 反応式(1)による反応生成物のX線回折結果

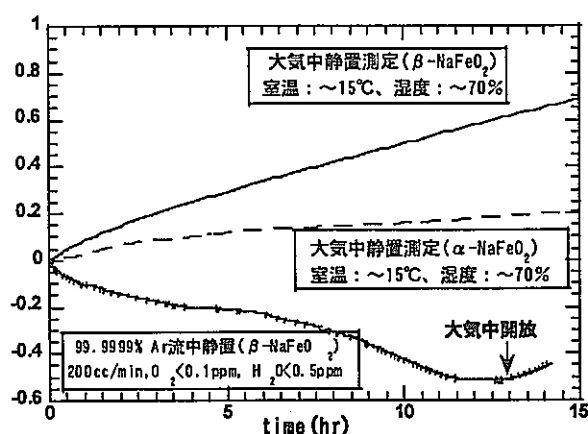


図2 α および β -NaFeO₂の室温での安定性確認。

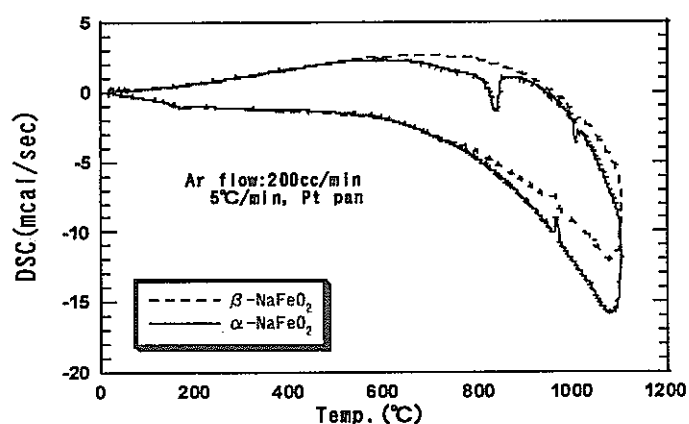


図3 α および β -NaFeO₂のDSC測定結果

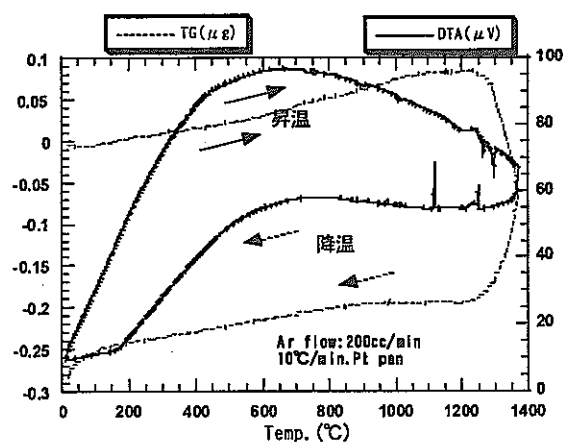


図4 α -NaFeO₂のTG-DTA測定結果

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	高温高腐食性溶融体の構造解析に関する研究										
研究協力課題	ラマン分光法による金属ナトリウムを起源とする高温高腐食性酸化物及びその溶融体の化学種分析										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3">新潟大学 大学院自然科学研究科 助教授 大鳥範和* [*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 ナトリウム・安全工学試験部 機器構造安全工学 Gr 上野文義</td> </tr> </table>			大 学 側	新潟大学 大学院自然科学研究科 助教授 大鳥範和* [*客員研究員 **研究生]			機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器構造安全工学 Gr 上野文義		
大 学 側	新潟大学 大学院自然科学研究科 助教授 大鳥範和* [*客員研究員 **研究生]										
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器構造安全工学 Gr 上野文義										
研究協力実施場所	機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第1試験室										
通算研究期間 (予定)	平成11年4月 ~ 平成14年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年4月1日 ~ 平成12年3月31日								
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究										
【研究目的】 本研究は、高温で高腐食性を有する溶融体と金属材料との化学反応メカニズムを、ラマン分光法による構造解析によって明らかにすることを目的とする。 特に、大気中でのナトリウム燃焼によって生成するナトリウム化合物高温溶融体 (Na, Na₂O, Na₂O₂ などを含む) と鉄基材料との化学反応メカニズムは未解明であり、溶融体中に存在する化学種の構造に関するデータを取得することを目的とする。											
【研究内容 (概要)】 ナトリウム化合物をはじめとする高温高腐食性溶融体は、ラマンスペクトルなどの基礎物性データがほとんどない上に、化学的活性であり実験そのものが困難である。そのため本研究では、再現性・信頼性の高いデータが取得できる試験技術を開発する。また、溶融体に含まれる成分 (Na₂O, Na₂O₂ 等) の他、金属材料との反応生成物 (Na₄FeO₃, Na₅FeO₄, Na₃FeO₃ 等の NaFe 複合酸化物等) の構造の温度依存性に関する基礎的なデータを取得し、化学的な構造の変化を調べて、反応に寄与する化学種を明らかにする。											
【使用主要施設】 Na 化合物溶融体構造解析装置 (ラマン分光分析装置、機安 Gr. 所有)											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、腐食性の物質であるナトリウム酸化物系において高温で強い酸化力を持つとされる過酸化ナトリウムに着目し、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故後の燃焼実験 II で指摘された「熔融塩型腐食」での主生成物と考えられる熔融 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_2$ 混合系と、それに加えて $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ 混合系の広範な温度で測定を実施し、存在する化学種について検討し新規な知見を得た。また、腐食による生成物であるナトリウム鉄複合酸化物系では、 $\beta\text{-NaFeO}_2$ と共に基本的物質と位置づけられる $\alpha\text{-NaFeO}_2$ について合成と測定を試みた。

【研究成果】

平成 12 年 3 月までの研究成果の概要をまとめる。

（1）ナトリウム酸化物系

大気中に漏洩した金属ナトリウム(Na)が酸素や水蒸気と反応して生成する化合物は、酸化物、水酸化物、炭酸塩、過酸化物などであるが、中でも過酸化物は高温で強い酸化力を持つとされている。例えば、「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故後の燃焼実験 II では主生成物は熔融 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_2$ 混合系と考えられ、過酸化物 (O_2^{2-}) イオンが腐食の活性化学種である「熔融塩型腐食」と位置づけられ、その挙動が注目されている。一方、過去の研究¹⁾から、市販の過酸化ナトリウム中に不純物として通常含まれる超酸化物 (O_2^-) イオンが 500℃でも安定に存在することが示された。また超酸化カリウムでは熔融 $\text{KOH}+\text{KO}_2$ 混合系において、超酸化物イオンが 500℃で安定に存在することが示されている²⁾。これまでのところ、金属 Na の漏洩に際して生成する Na 酸化物としては超酸化物イオンの存在は考慮されていないが、過酸化物イオンより強力な酸化物とされており、存在すれば腐食に大きな影響を及ぼす可能性がある。したがって、現段階でその存在の有無を明らかにしておくことは緊急かつ重要である。そこで、本研究では熔融 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_2$ 混合系について存在する化学種を解明することを目的としてラマンスペクトルの測定を行った。その結果、図 1 に示すようなスペクトルが得られ、 1140cm^{-1} に明瞭なピークが観測された。このピーク位置は市販の NaOH に含まれる炭酸 (CO_3^{2-}) イオンのピーク位置（純粋な Na_2CO_3 中では 1180cm^{-1} ）に近いと、それがシフトした可能性も考えられた。そこで熔融 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ 混合系についても測定を行ったところ、 1180cm^{-1} のみに明瞭なピークを確認して上記の可能性は否定された。以上により、熔融 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_2$ 混合系において、少なくとも 500℃までは超酸化物 (O_2^-) イオンが安定に存在できることが示された。また 500℃におけるピークは超酸化物イオンの方がむしろ過酸化物イオンよりも明瞭であることもわかった。一方、500℃を超える温度では試料が黒変し可視光レーザーを透過せず、現在のところスペクトルの測定に成功していない。来年度以降導入予定の紫外線レーザーの適用によってより高温状態での測定が望まれる。また、熔融 $\text{Na}_2\text{O}_2+\text{Na}_2\text{O}$ 混合系などの他の 2 元混合系への適用を検討し、より現実系へ近づけていくことも今後の課題である。

（2）ナトリウム鉄複合酸化物系

ナトリウム酸化物系による鉄基材料の腐食生成物として種々のナトリウム鉄複合酸化物 (NaFeO_2 , Na_4FeO_3 , Na_5FeO_4 , Na_3FeO_3 など) が存在しうると考えられている。従来この種の複合酸化物は調製が容易とはいえず、ラマンスペクトルの測定例はほとんど知られていない。また温度や酸素分圧の依存性は全く知られていない。結晶構造も $\alpha\text{-NaFeO}_2$ と $\beta\text{-NaFeO}_2$ については明らかにされているが、その他は回折パターンが報告されているものの、試料の調製条件から推察して信頼性の乏しいデータであると考えられる。一方、 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ と $\beta\text{-NaFeO}_2$ の結晶構造は酸素原子の最密充填構造を基本としている点で、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ や $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の構造と類似している。これまでの測定結果¹⁾からは、 $\beta\text{-NaFeO}_2$ と $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ のラマンスペクトルの間にも類似性が認められた。今年度はこれまで整備してきた鉄酸化物系のスペクトルのデータベース化¹⁾をさらに進める目的で、 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ の調製とラマンスペクトルの測定を試みた。調製方法として 500℃にて $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3+2\text{NaOH}$ の反応により得られた試料について測定を行った結果、図 2 に

示すスペクトルが得られた。特に 355, 565, 1135 cm^{-1} のピークは他の系では観測されなかったユニークなピークであり、 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ に由来するピークと考えられる。しかしながら、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ は NaOH に比較して非常にかさ高く、完全に均一な反応が達成できていない可能性があるので、今後さらに調製方法に検討を要する。

- 1) 大鳥、梅咲、Na 化合物高温熔融体の化学種分析に関する基礎的研究(2)、動燃委託研究報告書、1999 年 3 月
- 2) 大鳥他、熔融水酸化物中の超酸化物イオンのラマンスペクトル、電気化学会第 65 回大会 1998 年 4 月

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、ナトリウム酸化物系では熔融 $\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{Na}_2\text{O}$ 混合系などの他の 2 元混合系への適用を検討し、ナトリウム鉄複合酸化物系では純度の高い $\alpha\text{-NaFeO}_2$ や Na_3FeO_3 を調製し、スペクトルの測定を実施する予定である。また腐食生成物として注目されている Na_4FeO_3 が生成する組成である $\text{Na}_2\text{O} + \text{FeO}$ の熔融体についての測定を実施する予定である。また 12 年度後半に導入される紫外線レーザーによってより高温状態での測定を開始し、主要な系において 800 $^{\circ}\text{C}$ 以上へ測定領域の拡大を実施する予定である。

平成 13 年度は、500 $^{\circ}\text{C}$ 以上で紫外線レーザーの熔融 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{O}_2$ 混合系への適用を試みると共に、より現実の反応系に近い複雑系への適用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) 大鳥他、ラマン分光法による高温下でのナトリウム鉄複合酸化物の分析(1)、日本原子力学会「2000 年春の年会」K52
- 2) N. Ohtori *et al.*, RAMAN STUDY OF Na_2O_2 AT HIGH TEMPERATURE, The 18th EUCHEM Conference on Molten Salts (EUCHEM2000)、平成 12 年 8 月発表予定

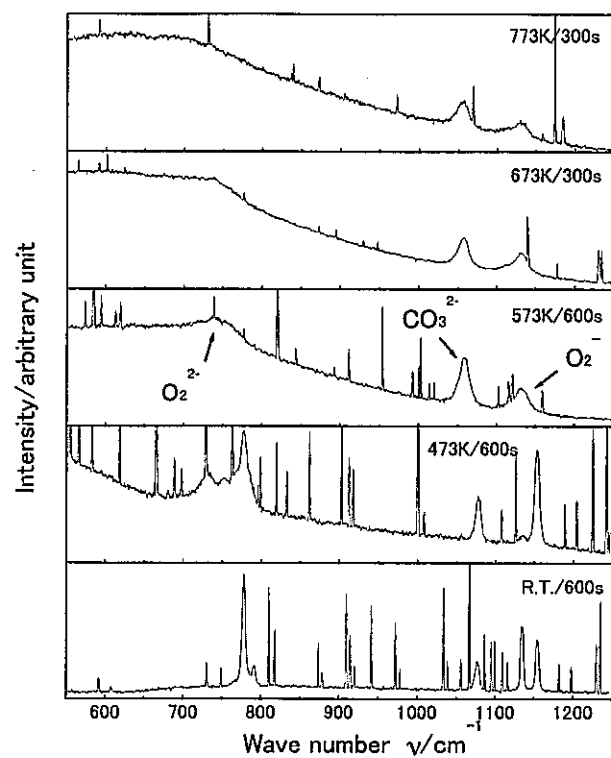


図1 溶融 $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_2$ 混合系のラマンスペクトルの温度変化

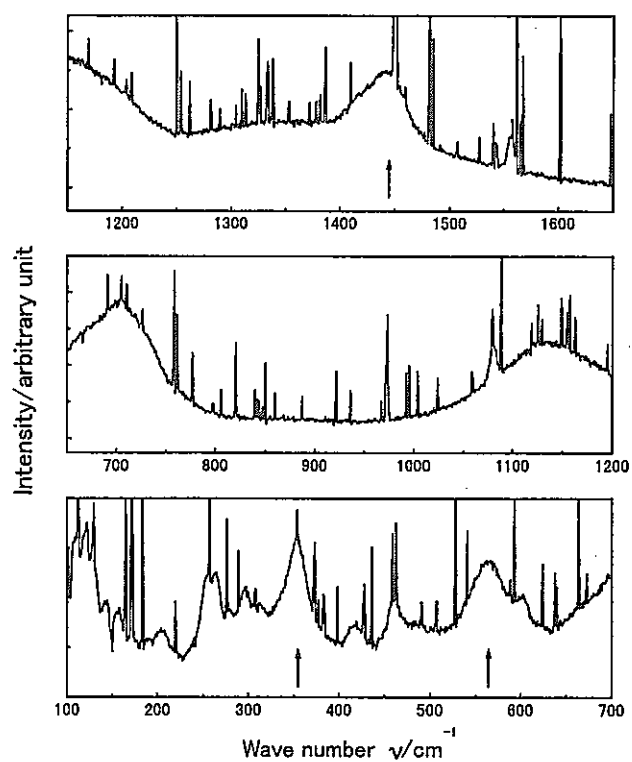


図2 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3+2\text{NaOH}$ 混合焼成物のラマンスペクトル

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	鉄鋼材料におけるき裂発生以前の疲労損傷検出技術の研究		
研究協力課題	磁性材料の磁気特性と破壊挙動に関する研究		
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 宮 健三*, 助教授 出町 和之* [* 客員研究員]		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器・構造安全工学 Gr GL 青砥 紀身, 研究員 加藤 章一		
研 究 協 力 実 施 場 所	機構 大洗工学センター ナトリウム技術開発第 1 試験室		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 4 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 4 月 1 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】			
準静的あるいは繰返し負荷による塑性変形が、材料の磁気的特性変化に及ぼす効果を計測評価することにより、従来技術では検出困難であった、微小き裂発生以前の損傷前駆段階の評価への適用可否を検討する。 - 一 塑性変形（含準静的及び繰返し負荷条件）と材料の磁気特性変化との相関性の把握 - 一 損傷分布と磁気特性変化の分布との相関性把握 - 一 主要高速増殖炉構造材料（弱磁性体）への適用性検討 - 一 磁気測定結果から磁化分布を得る逆問題解析手法の開発、及び材料の塑性変形（量）、あるいは損傷分布評価手法の提案			
【研究内容（概要）】			
研究期間数年を目途に以下の研究、検討を行う予定である。しかし、本研究課題は、技術的にも斬新な点が多々あるため、各年度毎に知見や成果を評価したうえで、次ステップ（次年度）研究内容の改廃、確認を行なう。 1) 平成 11 年度 ① オーステナイト系鋼（以下実用鋼と総称）についての室温及び高温引張、並びに低サイクル疲労試験の実施と磁気センサー（フラックス・ゲート型）によるその場、及び途中止め磁化測定技術の確立 ② 非接触局部ひずみ分布計測技術の確立 ③ 実用鋼における準静的負荷による塑性、あるいは繰返し負荷による塑性変形とひずみ分布並びに磁気特性変化の分布との相関性評価 ④ 上記データを含む蓄積データに基づき、塑性変形あるいは塑性仕事材料の磁気特性に及ぼす影響を記述する解析モデルを構築。具体的には磁気特性変化計測値から材料中の磁化（分布）を求める逆問題解析モデルを作成 2) 平成 12 年度 ① 前年度確立した手法に基づく局所磁気特性変化挙動の経時観察技術の開発 ② 予き裂材におけるき裂近傍の磁気特性変化の特異性と磁化形態、あるいはき裂進展挙動との相関性確認			

3) 平成13年度

- ①き裂発生前損傷段階からき裂発生・成長段階までを検出可能とする、実用材料についての標準的な磁気変化による塑性・疲労損傷評価計測技術を開発
- ②提案モデルにき裂形状逆問題解析手法を統合し、試験片レベルにおける塑性（塑性仕事）による損傷と磁化の逆問題解析に基づく余寿命評価法の提案

【使用主要施設】

- 1) 大気中材料強度試験設備（引張試験機、低サイクル疲労試験機等）
- 2) フラックス・ゲート型磁気測定システム
- 3) 計算機資源

【進捗状況（当該年度までの概要）】

1. はじめに

非磁性鉄鋼材料において、疲労き裂が発生するとその近傍に磁束漏洩が生じることが実験的に知られている。本研究では、この現象を利用した非破壊検査手法の妥当性と有効範囲を検討するため、SUS304 ステンレス鋼を対象とし、疲労試験により発生した磁化分布を構成する逆解析手法の開発を行なった。

2. 解析手法

2.1 磁化の作る磁場

本研究では、材料内部の磁化分布が作る漏洩磁場を以下のようにして求めた。まず、磁化の再構成領域を立方格子により n_s 個の立方体要素に分割する。次に各格子点上に磁化 M を配置する。要素内の磁化は、格子点上の各値から線形的に内挿する。これから測定点 i ($= 1, 2, \dots, n_r$) における磁束密度 B_i は、Biot-Savart の法則より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} B_i &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{(\nabla \times M) \times R}{R^3} dv \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^{n_s} \int_{w_j} \frac{(\nabla \times M) \times R}{R^3} dv \\ R &= R_{sj} - R_{fi}, \quad i = 1, n_r \end{aligned}$$

ここで、 w_j はガウス積分をおこなう領域を示し、 j 番目の要素の領域に対応する。また、 R_s, R_f はそれぞれ各磁化、測定点の位置ベクトルである。磁化 M から磁場を求めるこのモデルは、磁荷や磁気モーメントから求めるモデルと異なり、磁化分布を連続的に仮定することができ、また領域内でなめらかに値が変化するために、実際のモデルにより近いと思われる。

2.2 ニューラルネットワークを用いた逆問題解析手法

漏洩磁束密度から材料内部の磁化分布の再構成を行なうために、入力層、中間層、出力層からなる断層構造ニューラルネットワークを用いた。入力が磁束密度分布、出力が磁化分布である。ニューラルネットワークは逆問題のように原因と結果との因果関係が明確な形で定義できない場合の情報処理に有効であることが知られている。本手法では効率の良い入力を行なうために主成分分析、および入力層および出力層のノード数を減らすために Shifting Aperture 法を用いた。

3. 解析結果

以上の手法を用い、磁束密度の測定結果を用いた磁化分布の再構成を行なう。これによって、疲労試験が試験片に与えた影響を明確にとらえることができると考えられる。

3.1 磁束密度測定結果

疲労試験実施時の試験片の形状を Figure 1 に示す。試験片の平行部中心には $3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ のスリットが放電加工により入れられている。試験片は、まず単純引張り型試験（ひずみ速度 $0.01\%/s$ 、最大ひずみ 3% ）により予ひずみが与えられた後、さらにひずみ速度 $0.1\%/s$ 、ひずみ範囲 0.5% の条件で両振り疲労試験が行なわれた。これらの疲労試験により、スリットの両先端にはき裂が生じている。磁束密度測定結果を Fig. 2 に示す。(a) が y 成分、(b) が z 成分についての測定結果である。測定領域はスリットを中心にして $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、測定間隔は 1 mm である。図中に試験片領域およびスリット、き裂部分を示す。 y, z 成分ともにき裂付近で磁束密度が大きくなっていることが分かる。

切断前の磁束密度分布は、あまりノイズを含んでいないことから、ニューラルネットワークへの入力前のフィルタリングによるノイズ除去は行なわなかった。

3. 2 磁化分布再構成結果

Fig. 3～磁場分布測定結果からの磁化の絶対値 ($|M| = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$) の分布である。き裂部分およびその先端で高い値を示していることがわかる。Fig. 4～6 は磁化の x, y 成分のベクトル表示、絶対値 ($\|(M_x, M_y)\| = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$)、および z 成分である。この分布もき裂およびき裂先端部において高い値を示しており、また $x=0\text{ mm}$ に対する対称性がみられる。

3. 3 磁化分布再構成結果の妥当性

得られた磁化分布再構成結果の妥当性を確かめるために、漏洩磁束密度分布を求め、測定データとの比較を行なった。Fig. 7 に再構成結果から得られた磁束密度分布を示す。(a) が磁束密度 y 成分 (b) が z 成分である。き裂近傍で磁束密度が非ゼロとなっており、定性的には正しいと思われる。

次に、Fig. 8－9 に、 $y = -2.0, 0.0, 2.0\text{ mm}$ における得られた磁束密度分布と測定データとの比較を示す。ここで $y=0.0\text{ mm}$ にスリットおよび、き裂が存在する。 y 成分に関しては、測定結果と比べ全体的に少し負の方にずれているが傾向はとらえられており、 z 成分については測定データと良く一致していることがわかる。

4. 結論

漏洩磁束密度測定結果 (y, z 成分) から材料内部の磁化分布の再構成を行なった。得られた磁化分布はき裂およびき裂先端において高い値を示し、また x 軸、 y 軸に関して対称性を持つことがわかった。再構成された磁化分布から求めた磁束密度分布と測定データの比較を行ない、 y 成分に関しては値が少し負にずれているものの、似た傾向を示し、 z 成分に関しては、良く一致することが確認された。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

研究内容の欄に記載の平成 12 年度～13 年度計画に従い、研究を実施する予定

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1. 東京大学大学院工学系研究科修士論文

“材料劣化診断のための漏洩磁束からの磁化分布再構成” 高屋茂

2. 高屋茂、Gabriel Preda、出町和之、内一哲哉 and 宮健三：“非磁性鋼疲労診断のための磁化分布逆解析”、Proc. of 9th Conference of Electromagnetic Phenomena and Dynamics, (2000) PP. 120－123.

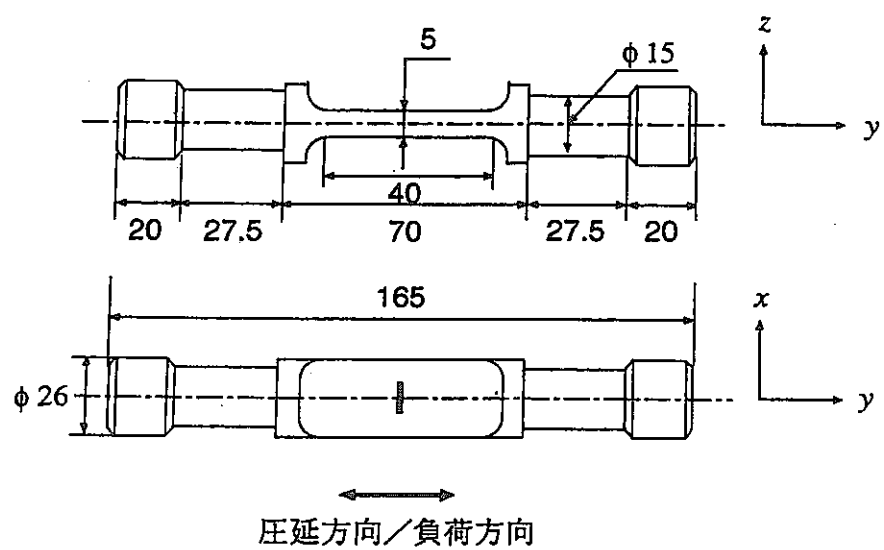
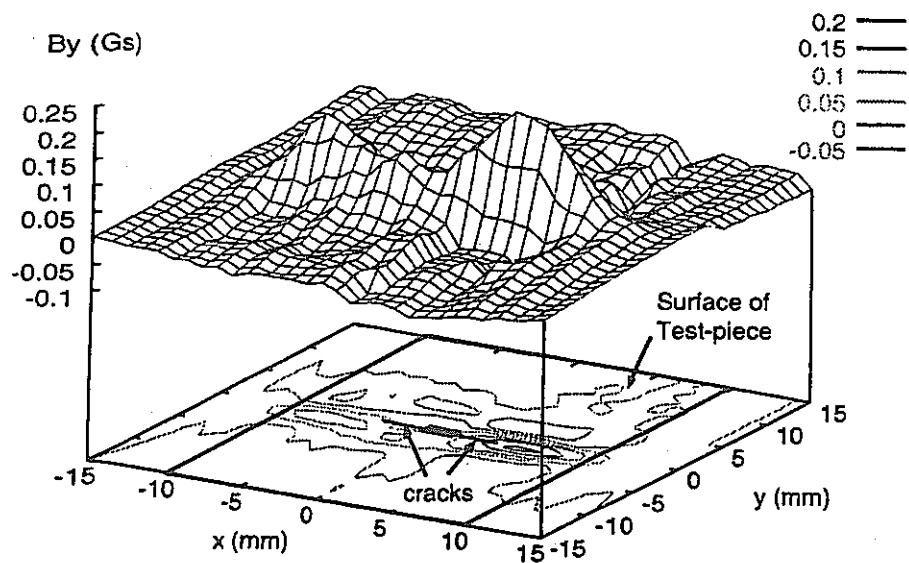
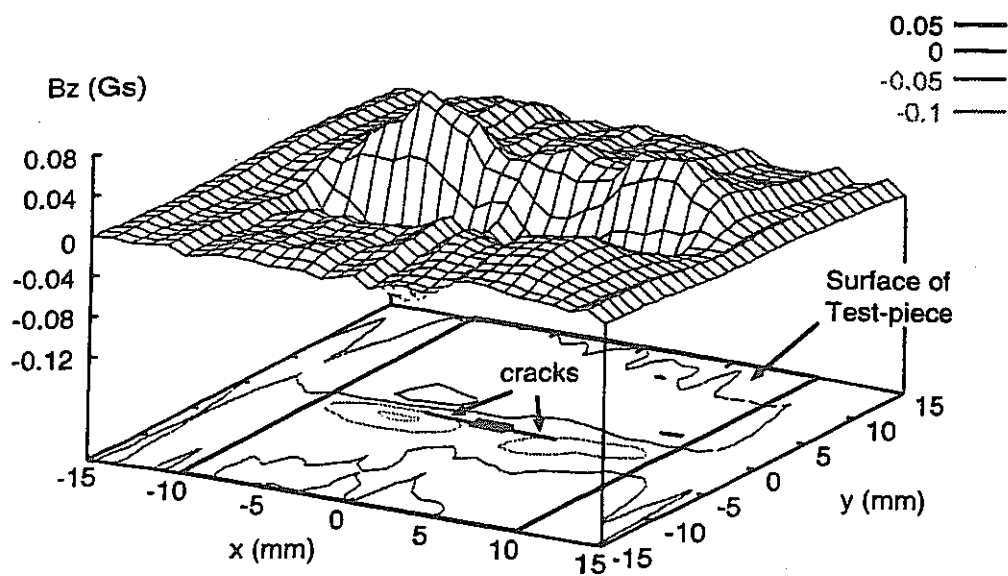


Fig. 1 : 試験片形状



(a) 磁束密度 y 成分 (B_y) 測定結果



(b) 磁束密度 z 成分 (B_z) 測定結果

Fig. 2 : 切断前における磁束密度測定結果

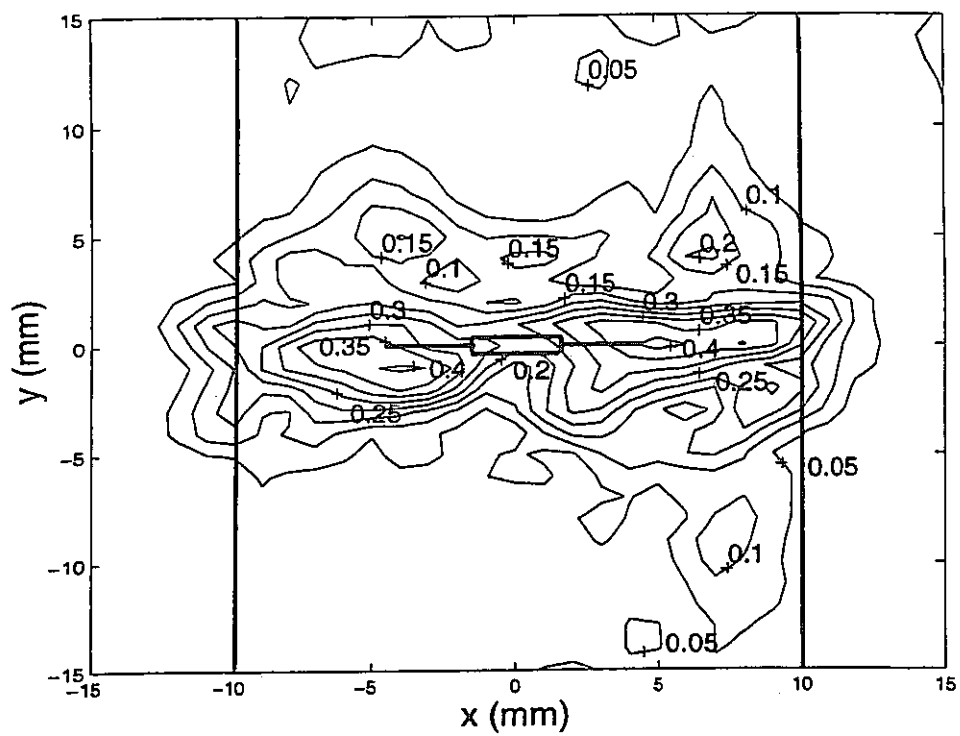


Fig. 3 : 磁化分布 ($|M|$)

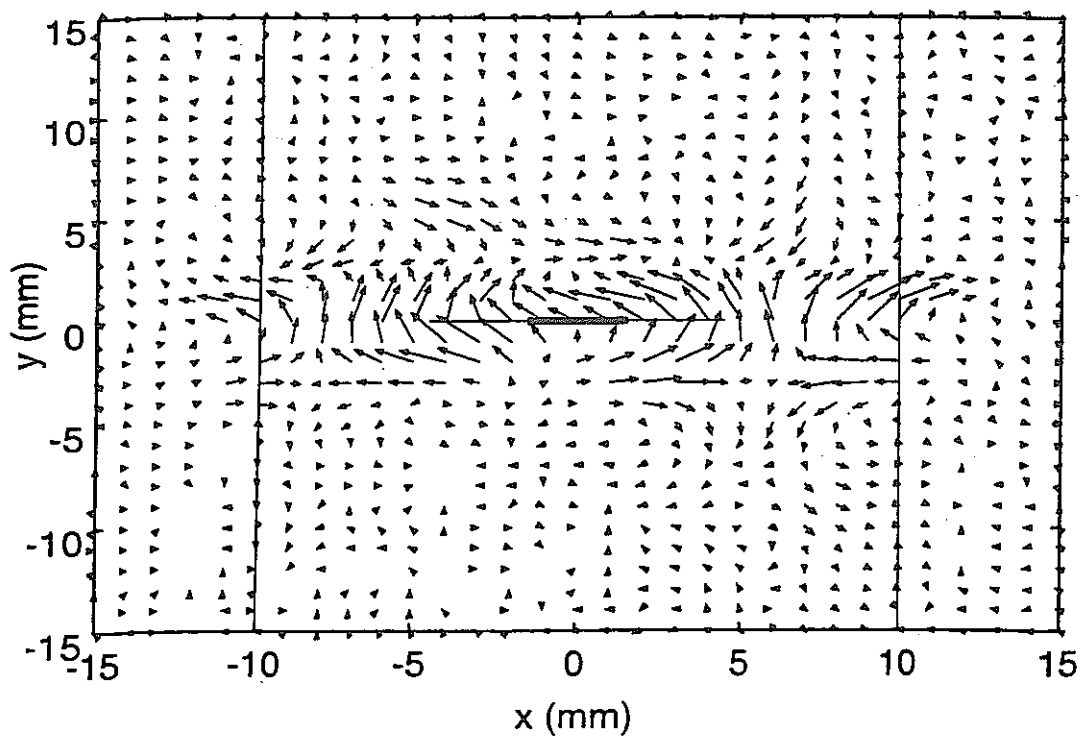


Fig. 4 : 磁化 x, y 成分 (M_x, M_y)

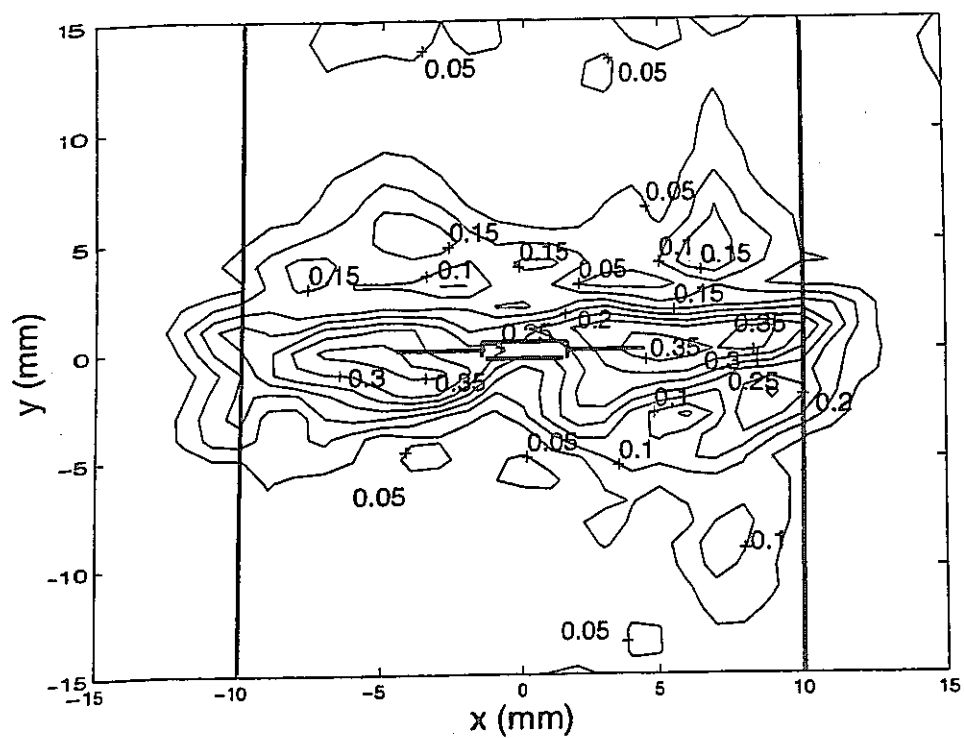


Fig. 5 : 磁化 x, y 成分 ($\parallel M_x, M_y \parallel$)

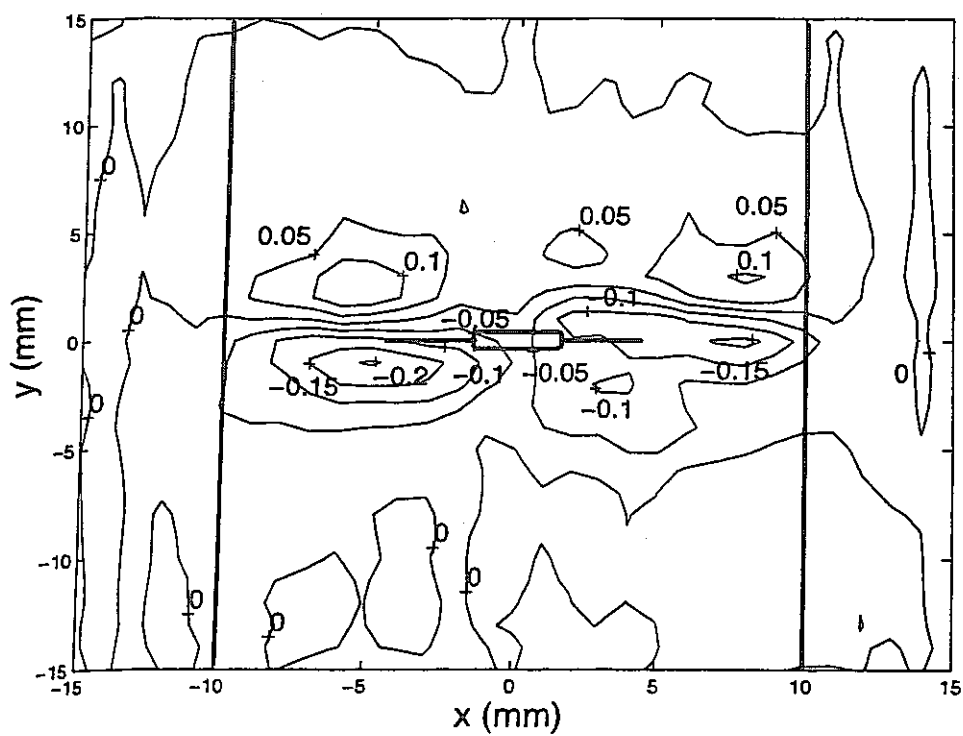
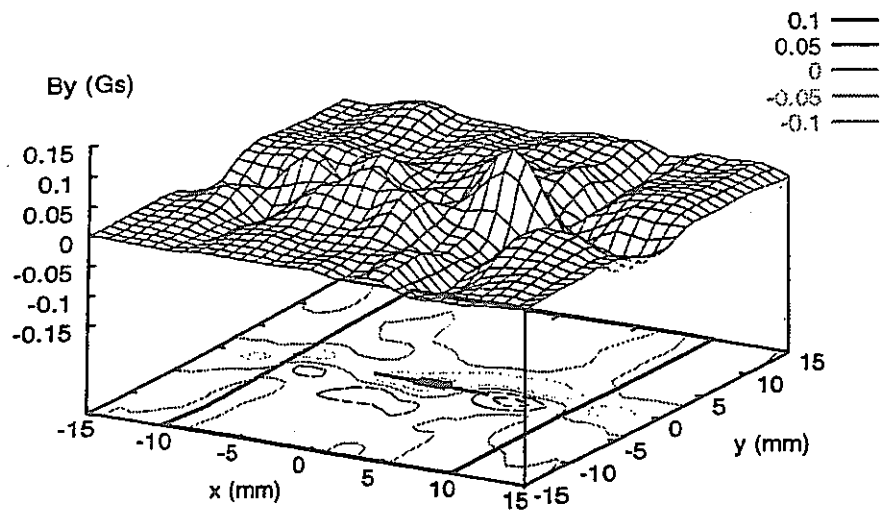
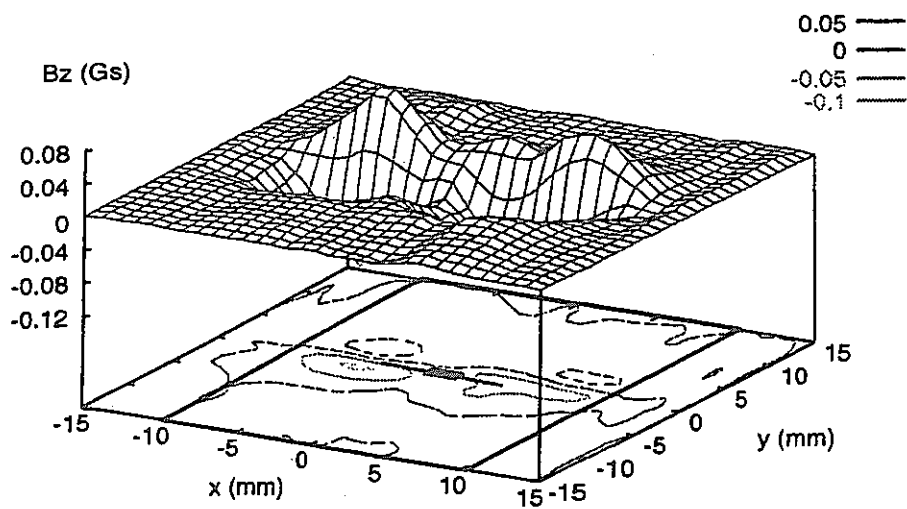


Fig. 6 : 磁化 z 成分

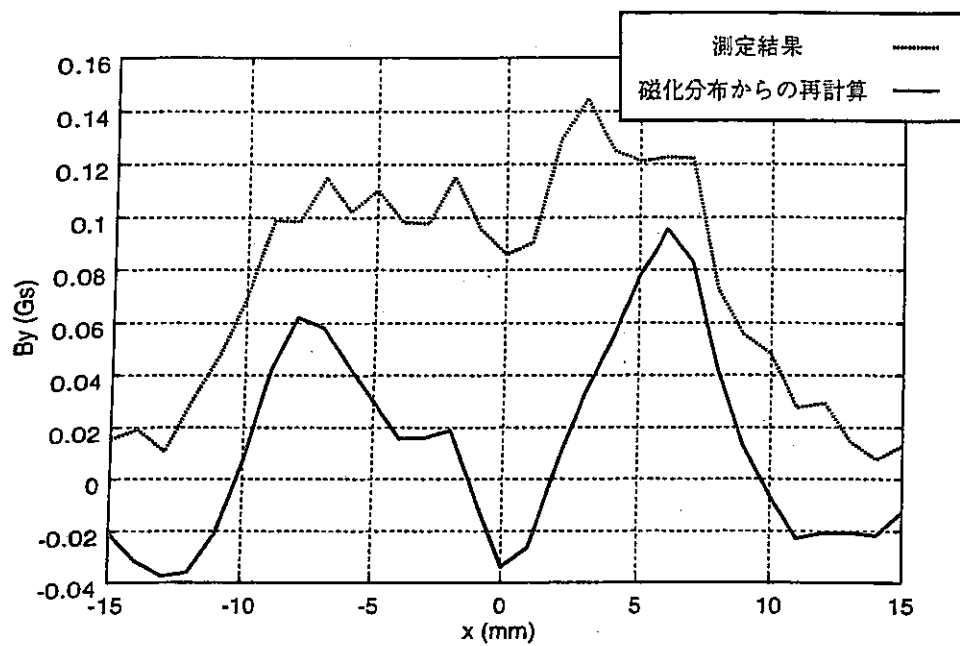


(a) 再構成磁化分布より求めた
磁束密度 y 成分 (B_y)

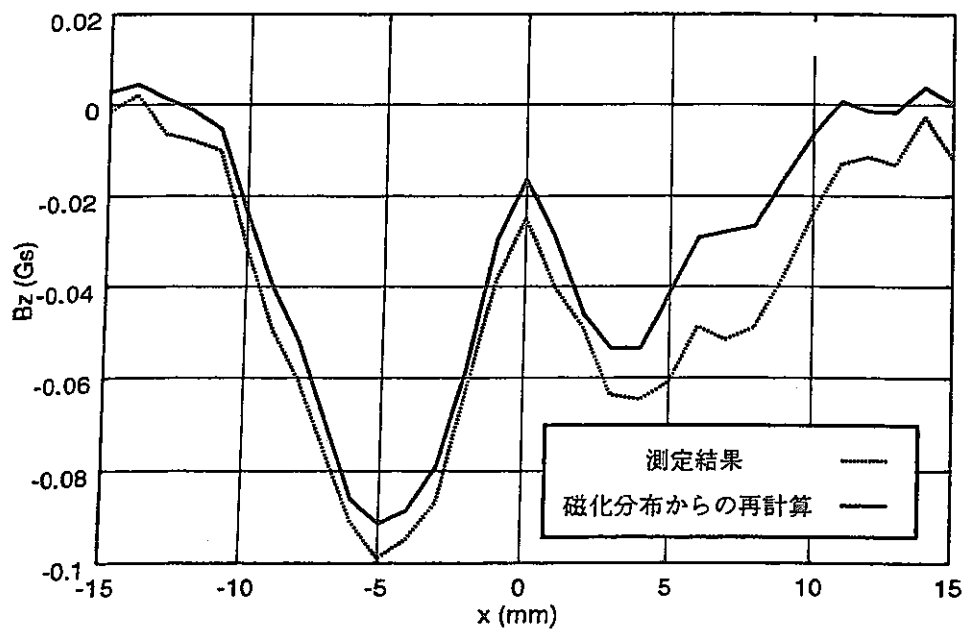


(b) 再構成磁化分布より求めた
磁束密度 z 成分 (B_z)

Fig. 7 : 再構成磁化分布より求められた漏洩磁束密度分布

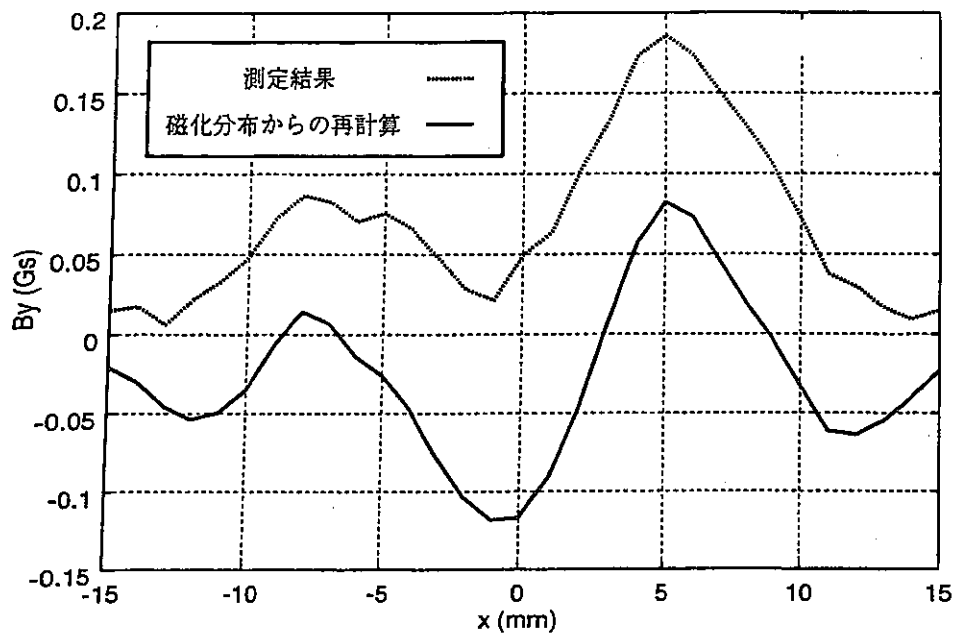


(a) 磁束密度 y成分 (B_y) の比較

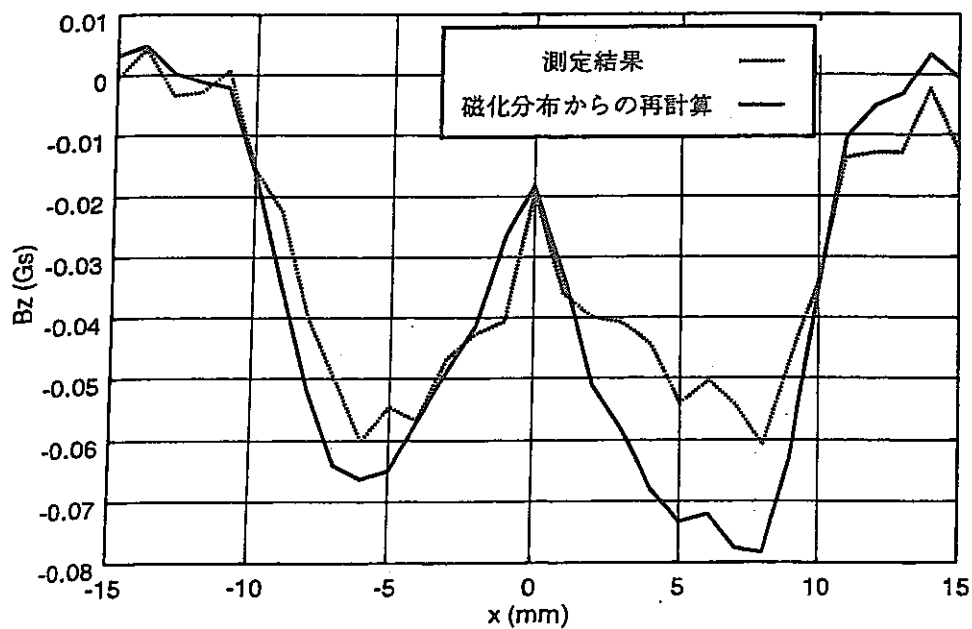


(a) 磁束密度 z成分 (B_z) の比較

Fig. 8 : $y = -2.0\text{mm}$ における磁束密度分布の比較

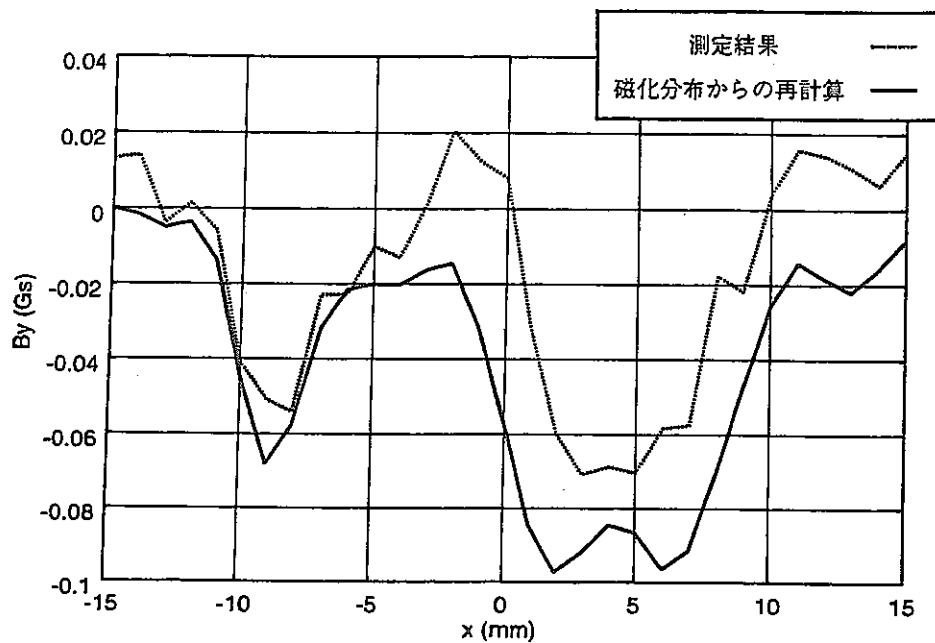


(a) 磁束密度 y成分 (B_y) の比較

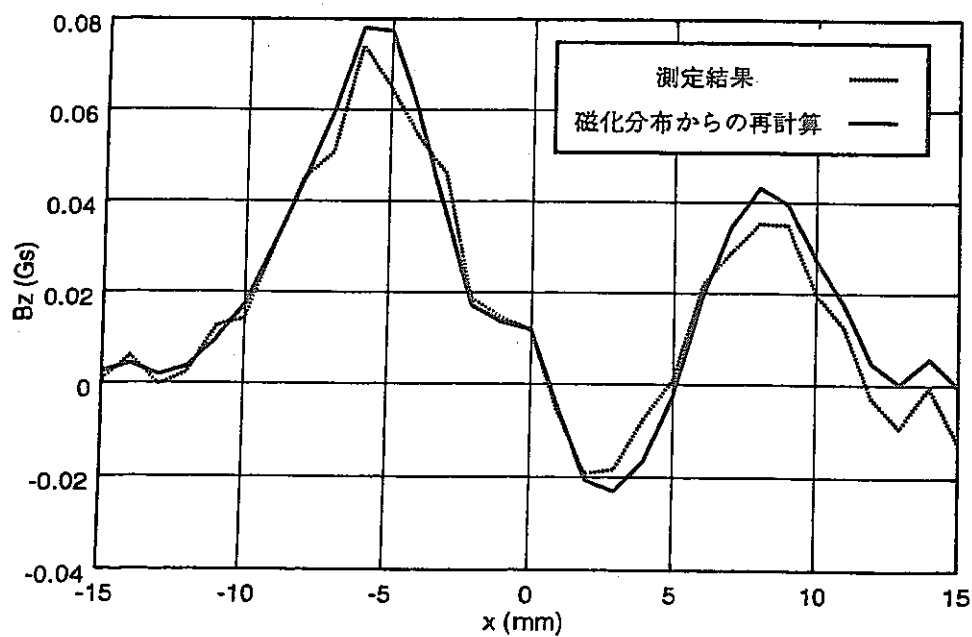


(b) 磁束密度 z成分 (B_z) の比較

Fig. 9 : $y = 0.0\text{mm}$ における磁束密度分布の比較



(a) 磁束密度 y成分 (B_y) の比較



(b) 磁束密度 z成分 (B_z) の比較

Fig.10: $y = 2.0\text{mm}$ における磁束密度分布の比較

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	多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに関する研究		
研究協力課題	相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発		
研究者所属、氏名			
大 学 側	九州大学 大学院工学研究科附属環境システム科学研究センター 教授 福田研二, 助教授 守田幸路, 助手 藤本登 (現:福岡教育大学)		
機 構 側	大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 高速炉安全工学 Gr 近藤 悟, 飛田 吉春, 山野 秀将, 鈴木 徹		
研 究 協 力 実 施 場 所	九州大学 大学院工学研究科附属環境システム科学研究センター 機構 大洗工学センター 高速炉安全性第4試験室		
通算研究期間 (予定)	平成11年10月 ~ 平成14年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年10月25日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 原子炉の炉心崩壊事故時に炉心内で生ずる多相・多成分の流動・伝熱・相変化の複合現象に対する数値計算手法の高度化を図ることは、安全評価の信頼度を向上し、原子炉の安全性を実証する上で重要な課題の一つである。本研究では、損傷炉心の熱流動現象を支配するミクロな挙動に着目した機構論的モデルの提案・開発を行い、炉心損傷事故の安全解析コードにおける多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーション技術の高度化を図ることを目的とする。			
【研究内容（概要）】 本研究では、相変化を伴う多成分多相流における相間および物質間の界面挙動を記述する要素物理モデルの高度化を図ることで、多相・多成分の流動・伝熱・相変化の複合現象を精度良く模擬できる数値計算手法を構築する。このため損傷炉心の熱流動現象を解析・評価する上で重要な界面挙動である 1) 拡散律速挙動を伴う多成分蒸気の蒸発／凝縮 2) 相変化／流動変化に伴う相間の界面積変化 に着目し、これらのミクロな挙動を記述するための機構論的モデルの提案・開発を行う。 また、高度化されたモデルを複合現象の解析に適用することで、その妥当性を検証するとともに、安全評価における改善効果を評価する。			
【使用主要施設】 SIMMER-III コード及び関連システム (FBR 安全性第4試験室) 多次元固気液混相流流動場計測システム (九州大学)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、損傷炉心の熱流動現象の数値解析において、物理モデルの高度化が必要かつ有効な支配機構について検討し、以下の課題を実施した。

- 1) 多成分蒸発／凝縮モデルの開発：多成分蒸気に含まれる非凝縮性ガスの蒸発／凝縮挙動に及ぼす影響を扱うための拡散律速モデルについて検討した。
- 2) 相間界面積変化モデルの開発：流動変化に伴う気泡や液滴の界面積変化の挙動に関して広く文献をサーベイし、高速炉安全解析コードのモデル検証・改良の指針について検討した。
- 3) 検証実験の実施：相変化を伴う多成分多相流について、開発モデルおよび高速炉安全解析コードの妥当性を検証するための予備的な実験を実施した。

【研究成果】

（1）多成分蒸発／凝縮モデルの開発

SIMMER-III コードでは、成分間の接触境界面で生ずる相変化挙動を界面での温度勾配に依存した熱収支に基づいて定式化している。この伝熱律速型相変化モデルの妥当性については、これまで、いくつかの検証解析によって確認されているが、非凝縮性ガスが混在する場合の凝縮過程が適切に模擬できないことも指摘されている (Kondo et al., 1997)。従って、ここでは、多成分系における蒸発／凝縮現象を適切に記述するため、界面での各蒸気成分の濃度勾配に基づく拡散律速型の相変化モデルの適用を試みた。

炉心損傷時に炉心物質（燃料、スチール、ナトリウム、FP ガス）は、異なる熱力学的状態にある蒸気成分として存在し得る。このため、固／気／液相間の各接触境界面では複数の蒸発／凝縮が同時に生じ、一方で相変化を起こさない成分も存在し得る。この場合、 N 成分からなる混合蒸気における成分 k の単位体積当たりの蒸発／凝縮率 Γ_k （正が凝縮、負が蒸発）は、従来の伝熱律速型モデルに加え拡散律速型モデルを用いることで次式で表される。

$$\sum_{j=1}^N \Gamma_j i_{g,j} = a_i [h_g(T_i - T_g) + h_o(T_i - T_o)], \quad \Gamma_k = -a_i k_k (\omega_{k,i} - \omega_{k,\infty}) + \omega_{k,i} \sum_{j=1}^N \Gamma_j$$

ここで、 a_i ：単位体積当たりの接触境界面積、 h ：熱伝達係数、 k ：物質伝達係数、 ω ：質量分率、 i_g ：潜熱、添字 i, ∞ ：界面およびバルク、添字 g, o ：蒸気および凝縮側 である。

上式は、 N 個の多成分蒸気のうち成分 k のみが相変化する場合、他の成分を非凝縮性ガスとして扱い、物質輸送の影響が無視できない場合の物質伝達係数に対する補正を用いることで

$$\Gamma_k = -a_i k_k \ln \left(\frac{1 - \omega_{k,\infty}}{1 - \omega_{k,i}} \right) = -a_i k_k \ln \left(\frac{\omega_{ng,\infty}}{\omega_{ng,i}} \right), \quad \Gamma_k i_{g,k} = a_i [h_g(T_i - T_g) + h_o(T_i - T_o)]$$

となる。更に、成分 k の蒸発／凝縮における非凝縮性ガスの影響は、 $T_i = T_s$ とし計算される質量移行率に対して、境界面積への修正係数 R を乗ずることで

$$\Gamma_k = \frac{Ra_i [h_g(T_s - T_g) + h_o(T_s - T_o)]}{i_{g,k}}, \quad R = \left(1 + \phi \frac{h_{g,i}^* + h_{i,g}^*}{i_{g,k}} \right)^{-1} \quad \text{ここで、} \quad \frac{1}{\phi} = \frac{1}{a_i} \left. \frac{d\Gamma_k}{dT_i} \right|_{T_s}$$

と表される。これらの式を質量およびエネルギー保存式と結合して解くことで、蒸発／凝縮に伴う熱および質量移行量を得る。

本モデルの基本的な妥当性を検証するため、乾き蒸気 (408 K, 1.1 bar) 中に置かれた銅球 (直径 2.5 cm, 初期温度 303 K) 表面への蒸気凝縮実験 (Suo-Anttila, 1978) を解析した。本実験では、蒸気中に混在する非凝縮性ガス (空気) の割合をパラメータとし、その凝縮速度への影響が銅球温度の時間変化の違いとして測定された。図 1-1 に示すように、本モデルは、実験結果を良く再現しており、非凝縮性ガスが混在する場合の熱伝達が蒸気側の拡散抵抗の存在によって純蒸気の場合に比較して著しく低下する現象を適切に模擬している。

図 1-2 に銅球表面上での非凝縮性ガスの質量分率の時間変化を示す。凝縮開始直後は、金属球と蒸気との大きな温度差のため急激な凝縮が生じ、結果として、金属球表面上の空気の割合は、蒸気中のそれに比べて非常に大きくなっている。これにより、蒸気／液膜界面温度が飽和温度に比べて著しく低下する様子が、図 1-3 から分かる。図 1-4 に凝縮面積に対する修正係数 R の時間変化を示した。この図からも、凝縮過程における不凝縮性ガスの存在が、その混合割合に比してかなり大きく影響することが確認できる。

以上のように、本課題では、多成分蒸気に含まれる非凝縮性ガスの蒸発／凝縮挙動に及ぼす影響を扱うための拡散律速モデルについて検討した。この結果、2 成分系での蒸発／凝縮挙動に適用可能な物理モデルを開発し、高速炉安全解析コード SIMMER-III に組み込んだ。さらに、非凝縮性ガスの影響を受けた凝縮現象の解析によって、その基本的な妥当性を確認した。

(2) 相間界面積変化モデルの開発

多成分多相流での相間の界面積の変化挙動は、流動様式の変化や相変化によって複雑に変化するため、現象に応じた気泡／液滴の密度、形状等の過渡挙動に関するモデル化が必要となる。相間の界面積濃度の変化履歴を扱う境界面積対流モデルは、多成分多相流における境界面積の対流を追跡して流動の履歴の影響を考慮することで、気泡や液滴の変化挙動を現象に応じて適切に記述できることから、近年、多流体モデルの構成式として用いることが試みられている。

本検討では、これまで解析コードや実験解析で検討された境界面積対流式のソース項の分類と機構について整理すると共に（表 2-1）、流動変化に伴う気泡や液滴の界面積変化の挙動に関する過去の実験データ、各種相関式等について広く文献をサーベイした。この結果、界面積濃度の対流方程式におけるソース項について、高速炉安全解析コードで用いられているモデル化手法の妥当性について検討し、以下のモデル検証・改良の指針を得た。

1) 乱流による合体モデル

粒子が衝突する際の衝突頻度については、何れの手法においても分子運動論とのアナロジーに基づいてモデル化されており、定式化の詳細度に差違はあるものの、合体確率を支配する物理量には類似した関係が用いられている。しかしながら、「film thinning model」に基づくモデル化が提案されている合体確率については、Wu ら(1998) による気泡流実験解析では、その不適切さが示唆されている。一方、Wu らが提案するソース項モデルは、この実験から合体確率を含む経験定数を定めている。従って、SIMMER-III コードの乱流による気泡合体モデルについては、管内流であることを考慮した上で Wu らのモデルと定量的な比較が可能であると考えられる。

2) 乱流による分裂モデル

乱流による分裂モデルでは、何れのモデルでも液相乱流における気泡分裂の臨界ウェーバー数 については、ほぼ同程度の値が用いられている。一方、分裂時定数 あるいは分裂頻度 については、それぞれモデル化の方法が異なっている。ここでも、Wu ら(1998) が提案するソース項モデルのみが、気泡流実験によってその経験定数が定められており、SIMMER-III コードの乱流による気泡分裂モデルとも定量的な比較が可能であると考えられる。但し、管内流であること、乱流変動速度 の評価式の違いに注意する必要がある。

3) 加速による気泡分裂モデル

SIMMER-III コードで用いられている加速による気泡分裂モデルは、臨界ウェーバー数、分裂時定数ともに気相中の液滴分裂の経験値あるいは経験式に基づいており、気泡分裂に対する外挿性については注意が必要である。しかしながら、他に一般的なモデル式を提案した例はなく、また、鉛直管内気泡流解析において実験結果との良い一致を得ることに成功した Wu ら(1998) のモデルでも、このメカニズムは考慮されていない。本ソース項については、気泡柱実験の解析などを通じて、他のソース項とのバランスも考慮した上で、その感度を確認しておく必要がある。

(3) 検証実験の実施

相変化を伴う多成分多相流について、開発モデルおよび高速炉安全解析コードの妥当性を検証するための予備実験を実施した。すなわち、本年度は、定量的な実験データを得るための実験技術、条件などを確認するための予備的な実験として実施した。実験装置の概略を図 3-1 に示す。

本実験では、上部を大気開放した幅 30cm 高さ 28cm 奥行き 3cm の水プールの底部から気泡流として 400L/h の流量で水蒸気を吹き込み、プール内での気泡流の凝縮挙動を観察した。実験パラメータは、水蒸気内に混入させる非凝縮性ガス（窒素）の割合（0, 15, 30L/h）および水プールのサブクール度（10, 20, 50℃）である。水蒸気の吹き込み口は、水プールの底部中央に配置し、直径 0.5mm の細管を 7 本束ねたものである。図 3-2、図 3-3 に実験で観察された気泡流の様子を示す。純蒸気を吹き込んだ場合、サブクール度に応じて気泡の上昇距離は変化するが、プール底面から数 cm 以内に完全に凝縮している。一方、窒素を混入させた場合、気泡は完全な凝縮には至らず、また、気泡径も窒素の混入割合に応じて大きくなる様子が観察された。このように、本実験では、定性的には予め予測された気泡流の凝縮挙動を観察する事ができた。

本実験結果と開発モデルを組み込んだ高速炉安全解析コードとの予備的な比較も合わせて実施した。図 3-4 に純蒸気を吹き込んだ場合の解析によるボイド率分布を示す。この場合、気泡の上昇距離距離については、ほぼ一致していることが分かる。一方、窒素を混入させた場合については、気泡径の軸方向変化により比較したものを図 3-5 に示す。実験結果は異なる時間で撮影した複数の可視化写真から測定したものであり、気泡の上昇とともに気泡径が小さくなる挙動が有意なデータとして定量化されている。しかしながら、気泡の合体の影響や読み取り時の誤差が大きいことなどによって、解析結果との精度良い比較はできていない。

以上より、本年度実施した予備の実験から、開発モデルおよび高速炉安全解析コードの検証データとして有用な定量データを取得するために以下を今後の研究の課題として摘出した。

- 1) 気泡の合体の影響が少ない気泡流での凝縮挙動を対象とする必要があることから、水蒸気の吹き込み方法を工夫するなどの改善が必要である。
- 2) 気泡の凝縮に伴う気泡径の変化については、可視化写真の画像処理などによって、精度良く定量化する必要がある。
- 3) 凝縮量そのものを定量化するために、プール界面からのオーバーフロー量、あるいはプールの体積増加などを測定する。

参考文献

- Sa. Kondo et al., 1997, Proc. 8th Int. Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8), Vol. 3, pp. 1340-1348, Kyoto, Japan, Sept. 30-Oct. 3, 1997.
- A. J. Suo-Anttila, 1978, Quarterly Progress Report, October 1-December 31, 1977, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-7195-PR, Apr. 1978.
- Q. Wu, S. Kim, M. Ishii, S. G. Beus, 1998, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, Nos. 8-9, pp. 1103-1112.

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、多成分蒸発／凝縮モデルについては開発モデルの多成分系への拡張および検証実験、相間界面積変化モデルについては相変化に伴う気泡や液滴の界面積変化の挙動に関するモデル検証・改良の指針について検討する予定である。

平成 13 年度は、本研究において高度化された物理モデルを複合現象の解析に適用し、総合的なモデル検証によって安全評価における改善効果を評価するとともに、その成果を高速炉の安全解析コード SIMMER-III へ反映する予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 守田幸路 他 5 名：炉心損傷時の多成分蒸発／凝縮現象のモデル化手法に関する研究、日本原子力学会「2000 年春の年会」予稿集、N24, 2000 年 3 月
- 2) 守田幸路 他 6 名：多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに関する研究 相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発、サイクル機構資料、2000 年 4 月（登録中）

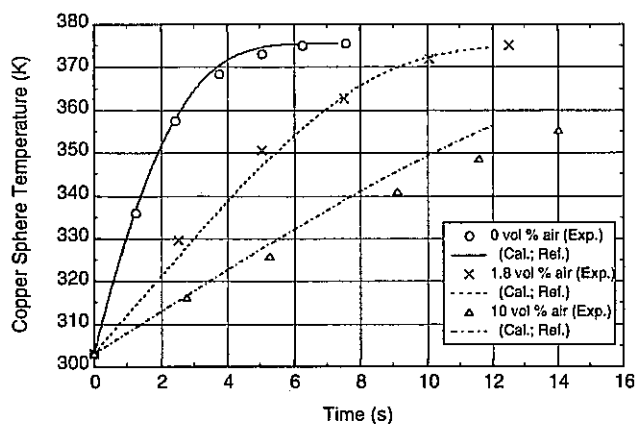


図 1-1 蒸気凝縮に伴う銅球温度上昇

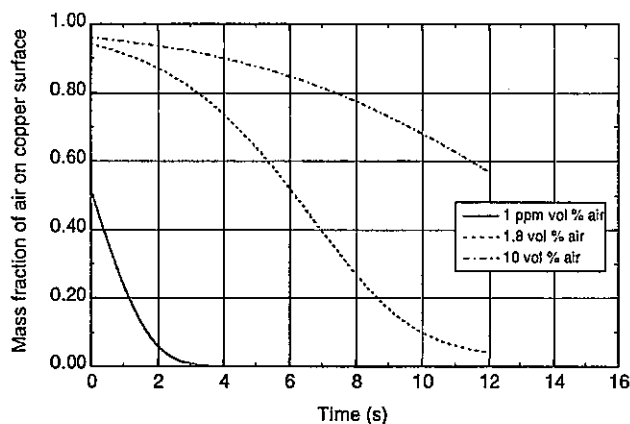


図 1-2 銅球表面での空気質量分率

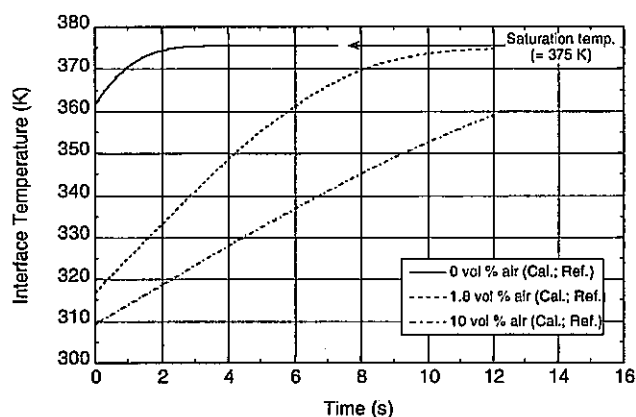


図 1-3 液膜 蒸気界面温度の時間変化

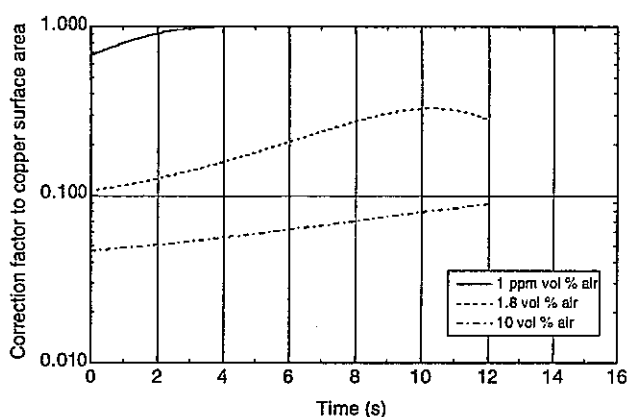


図 1-4 液膜 蒸気界面積の修正係数

表 2-1 ソース項に関する既存モデル

機構	AFDM / SIMMER-III モデル (Wilhelm, 1990)		Kolev モデル (Kolev, 1991; 1993; 1995)		Städtke らのモデル (Blahak and Städtke, 1996; Städtke et al., 1997)		Wu らのモデル (Wu and Ishii, 1997; Wu et al., 1998)		
分裂	気泡 液滴	Breakup by dynamic forces	気泡 液滴	Acceleration-induced fragmentation	液滴	Breakup due to Kelvin-Helmholts and Reyleigh-Taylor instabilities	気泡		
	気泡 液滴*	Buoyancy-driven turbulence breakup		Turbulence-induced fragmentation	気泡	Turbulence-induced fragmentation		Bubble breakup due to turbulent impact	
合体	気泡 液滴	Coalescence due to random collision	気泡 液滴	Oscillatory coalescence : Turbulence-induced coagulation	気泡 液滴	Turbulence-induced coalescence	気泡	Random collision induced bubble coalescence	
				Spectral coalescence : Local velocity differences					
				Non-oscillatory coalescence : Spectral velocity differences	気泡	Two-dimensional effects on collision rate			
									Wake-entrainment induced bubble coalescence
相変化	気泡	Bubble nucleation in pool flow	気泡						
		Heterogeneous nucleation at walls **		Heterogeneous nucleation at walls					
	液滴	Flashing of droplets							
備考	* 気泡流のみ ** Morita (1998)						キャップあるいはスラグ気泡を含まない気泡流のソース項		

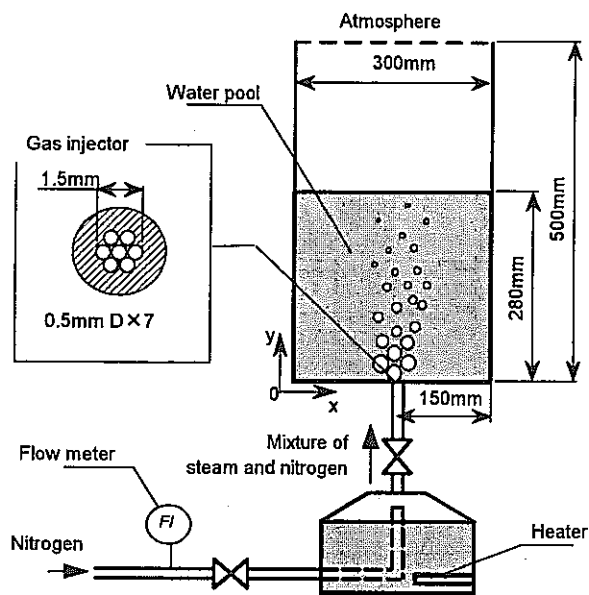


図 3-1 凝縮実験装置の概略

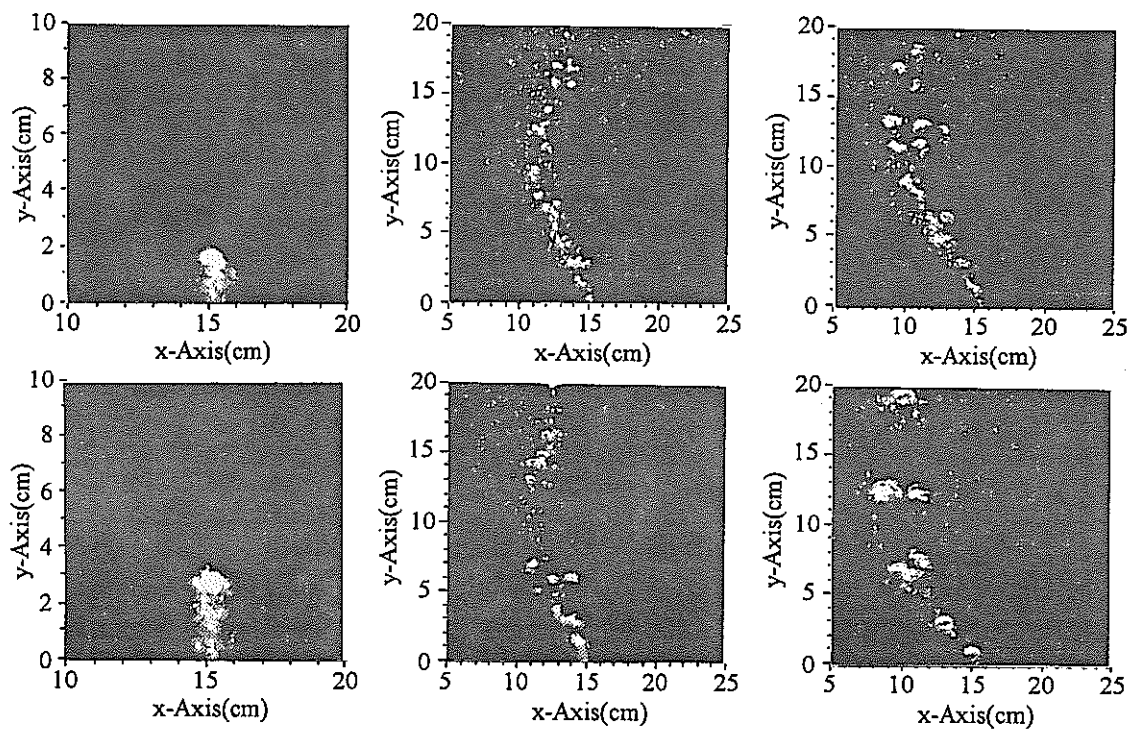


図 3-2 水プール中の気泡凝縮挙動（水蒸気中の窒素混入量の影響：水蒸気流量 400 L/h）

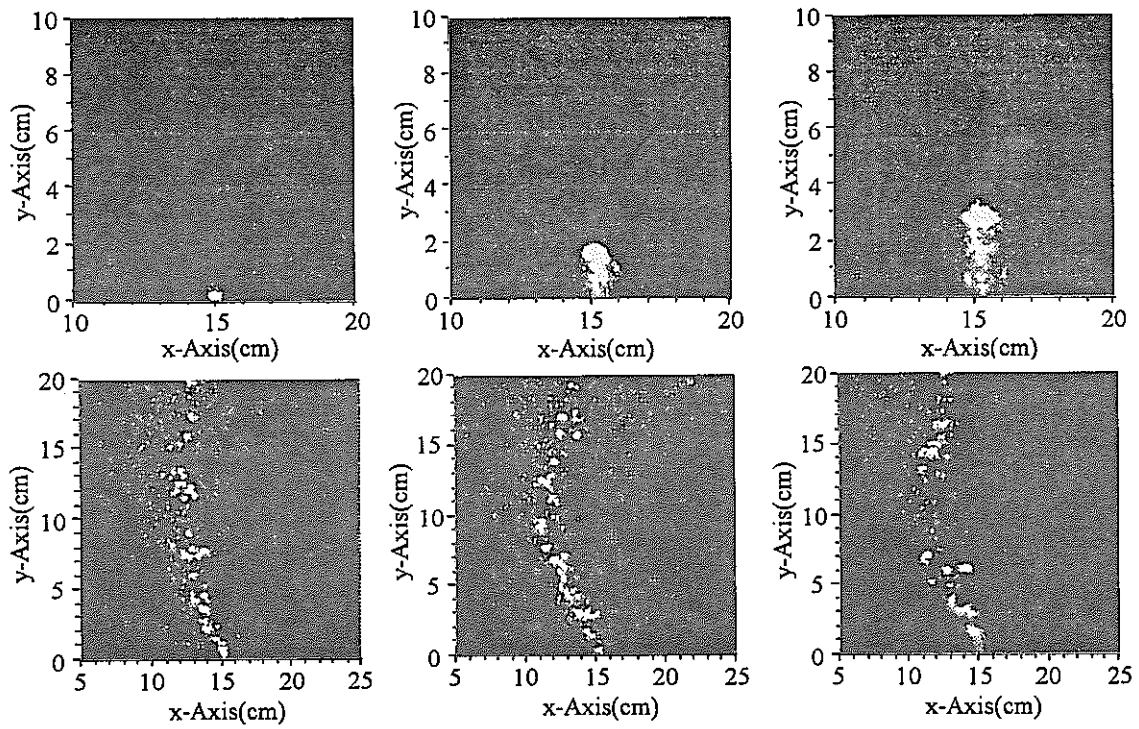


図 3-3 水プール中の気泡凝縮挙動 (サブクール度の影響: 水蒸気流量 400 L/h)

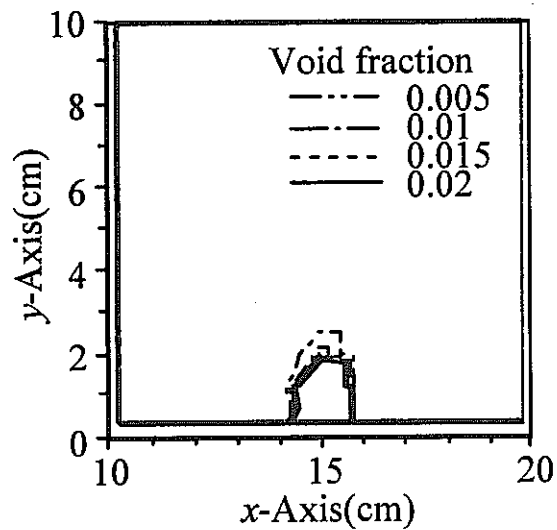


図 3-4 解析による水プール中のボイド率分布
(サブクール度 20°C, 窒素流量 0 L/h)

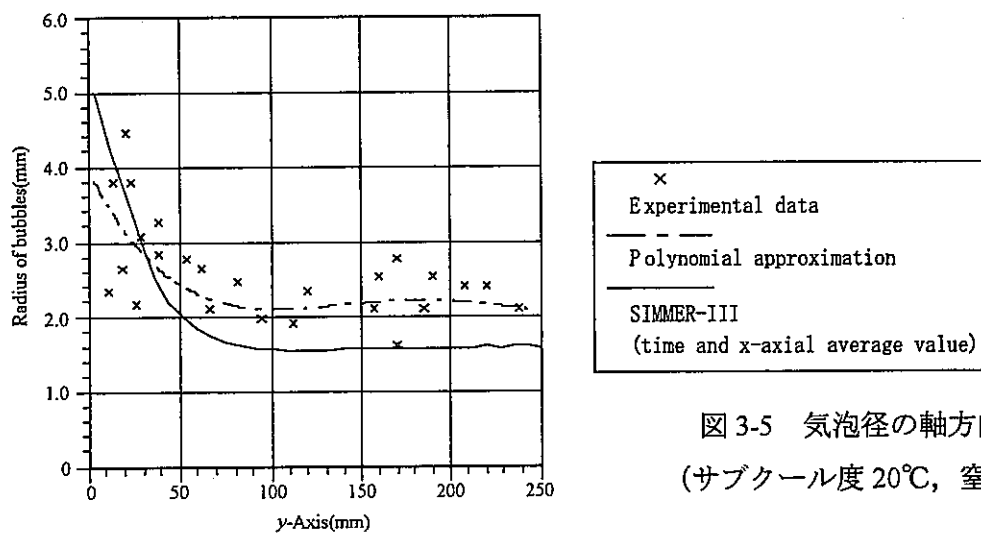


図 3-5 気泡径の軸方向変化の比較
(サブクール度 20°C, 窒素流量 15 L/h)

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	プルトニウム利用シナリオの総合評価手法に関する研究		
研究協力課題	数理計画法を応用した経済性解析手法の開発		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 教授 鈴木篤之、講師 大森良太、大学院修士課程 小田潤一郎		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 FBR サイクル解析 Gr 平尾和則、小野清、小藤博英		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京大学 大学院工学系研究科 鈴木研究室 機構 大洗工学センター 動特性解析室		
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 1 月 ~ 平成 13 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 12 年 1 月 24 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 サイクル機構が FBR 開発を進めるにあたっては、様々なプルトニウム利用オプションを多角的にしかも定量的に評価することが求められており、そのためのプルトニウム利用シナリオの総合評価手法の開発が重要となっている。現在、冷戦の終結に伴い米露両国で余剰になった兵器級プルトニウム(WPu)の処分が国際的に大きな関心事となっている。これらの WPu を MOX 燃料に加工して原子炉で再利用しながら処分するオプションは最も有望な処分方法の一つに考えられているが、長期的な原子炉処分戦略の選定に際しては、核不拡散性や環境調和性と共に経済性を考慮することが重要である。 そこで本共同研究では、主に経済性の観点から WPu 処分の最適シナリオの選択に着目し、線形計画法により WPu の長期的な原子炉処分コストを解析し、その構造を明らかにすることを目的とする。			
【研究内容(概要)】 本研究では、長期的な WPu の原子炉処分戦略の選択問題をトータルコスト最小化を最適化原理とする線形計画問題としてモデル化する。主として線形計画法を用いるが、動的計画法や遺伝的アルゴリズム等の手法も開発の視野に入れる。最適化する変数は、処分に用いる原子炉の炉型、基数、導入時期とし、複数の炉型を組み合わせたシナリオを考慮する。 研究は平成 11~12 年度の 2 年間に渡って行う。平成 11 年度は、まず対象とする原子炉の炉特性データや経済性等に関する基礎情報を収集、整理し、最適化の際に考慮すべき制約条件、各コスト項目および目的関数を定式化する。次に線形計画法を用いた計算コードを開発し、余剰 Pu 処分問題に関する最適シナリオを求める。 平成 12 年度においては、11 年度に開発した線形計画法を応用した計算コードをより一層精緻化し、汎用性を高め、感度解析や双対性解析を通じて、Pu 利用の長期的コストの構造を明らかにする。また、線形計画法の特徴を考察し、動的計画法や遺伝的アルゴリズム等のその他手法の適用性を検討し、各種の数理計画手法の比較評価を行う。			
【使用主要施設】 東京大学側：ワークステーション・システム (HP ATA-64-G200 相当) サイクル機構側：大洗 情報センター 大型計算機			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

ロシアの余剰兵器級 Pu についての原子炉処分シナリオの最適化問題を、トータルコストコストを最小化する線形計画問題としてモデル化し、最適化の際に考慮すべき制約条件（原子炉導入時期、処分速度等）を線形制約式として定式化した。また、線形計画法の数値計算ライブラリーおよびマトリックスジェネレータを編入した解析コードを開発し、VVER-1000, BN-600, BN-800, CANDU を組み合わせた処分シナリオを様々な条件下で最適化し、トータルコストを算出した。Pu 価値の計算においては、デリバティブ理論の応用も図った。

【研究成果】

1. 線形計画モデルによる Wpu 処分戦略最適化

1.1 Wpu 処分問題の線型計画モデリング

Wpu 処分炉として、ロシア国内の既存の VVER1000 と BN600、新規に建設する VVER1000 と BN800、さらに国外炉としてカナダの CANDU とウクライナの VVER1000 を考慮した。ただし、BN600 については、MOX 燃料を 1/5 装荷可能な hybrid core とこれを改造することにより全装荷可能な full MOX core を考えた。目的関数は、計画期間の各年で発生するコストを計画初年度に現在価値換算した値の合計とした。コストについては、各原子炉の O&M 費、MOX 燃料費、売電収入、さらに新規の炉の建設費、BN600 の改造費を考慮した。また、制約条件としては、計画期間を通じての Wpu の総処分量、各炉の Wpu の年間処分量、各年の新規炉建設の設備投入量を考慮した。各炉の Wpu の年間処分量の上限については、現在ロシアに存在する基数やそれらの寿命、今後の導入計画を考慮して表 1 のように仮定した。設備投入の上限は新規の VVER1000 は 0.6 基/年、BN800 は 0.2 基/年とし、設備投入した分はその 5 年後から Wpu 処分に用いることができると仮定した。カナダの CANDU 炉で処分する際には、ロシアで MOX 燃料に加工した Wpu をカナダが同一燃焼度となるようなウラン燃料の価格から輸送費を引いた価格で買い取ると仮定した。

以上のモデルに基づく計算機コードを作成した。最適化コードには IMSL ライブラリに組み込まれている線形計画法プログラムを用いた。

1.2 解析結果

1.2.1 基準ケース

基準ケースでは、計画年数を 2001~2030 の 30 年、割引率を 5%、Wpu の総処分量を 50MT 以上、売電単価を \$0.015/kWh とした。図 1 に計画期間中の各炉の処分量を示す。新規の炉の建設はなされず、既存の炉のみで 50MT の Wpu を処分することがコスト的には最適となった。従って、処分は既存の炉の寿命年限である 2020 年までに終了する。また、BN600 は、hybrid core で用い、full MOX core への改造は行わない。BN600(hybrid core)及び CANDU は、制約式の限度まで使用し、残りをロシアの既存の VVER1000 と、ウクライナの既存の VVER1000 で処分する。図 2 に各炉の総処分量を示す。処分量が多いのは、ロシアの既存の VVER1000、CANDU、ウクライナの既存の VVER1000、BN600(hybrid core)の順である。図 3 に各年のコストを示す。図 4 には各炉の限界価値（双対解）を示す。これは、制約条件のうち各炉の毎年の Wpu 処分量の上限を定める制約式に対するもので、上限値を下げたときの総コストの増加分を意味する。処分量がゼロであるものは限界価値がゼロであり、表示していない。限界価値の大きさは、BN600(hybrid core)、CANDU、ロシアの既存の VVER1000、ウクライナの VVER1000 の順であった。

1.2.2 国外炉使用の効果

基準ケースから、国外の炉を除外したものをケース 1、CANDU だけを除いたものをケース 2、ウクライナの VVER1000 だけを除いたものをケース 3 とし、それぞれのケースの総コストを比較した結果を図 5 に示す。国内だけで Wpu 処分を行う場合（ケース 1）の総コストは基準ケースと比較して約 80%高くなっている。これは、国外炉を使用しない場合には、基準ケースでは必要のなかった BN600 の full MOX core への改造や新規の VVER1000 の導入が必要となるためである。

1.2.3 Wpu 総処分量の影響

Wpu の総処分量を、35~135MT まで変化させたときの、最適な目的関数の値と Wpu 総処分量に対する双対解の変化をそれぞれ図 6、7 に示す。図 6 より、Wpu の総処分量が増えるにつれて、

総コストは急激に増加していくことがわかる。図7では70MT、85MTで、WPu処分の1MT当りの限界コストが、顕著に増加している。これは、70MTでBN600の改造が必要となり、85MTで新規のVVER1000の導入が必要となるためである。

2. デリバティブ理論によるWPuの価値計算

ロシア国内のWPuの処分に関しては、ロシアはWPuの核燃料としての価値を重視し、原子炉処分オプションを指向している。現在、解体核から製造したPuO₂の入手コストをゼロと仮定してもWPuを用いたMOX燃料による発電はUO₂燃料によるそれに比べ、経済的に不利とされているが、将来、天然ウラン価格が上昇した際にはこの限りではない。つまり、WPuの保持はこのような場合に対する一種の「保険」であり、将来の天然ウランの価格に応じてWPuを燃料として用いるか否かを選択できる点で、ウランのコールオプションと考えることができる。ロシアと西側諸国とのWPu処分に関する交渉における客観的評価基準として、このWPuのウランデリバティブとしての価値を明らかにする必要であり、本研究では金融工学の分野で広く用いられている以下のブラック・ショールズ式を用いてWPuのコールオプション価格を計算した。

$$d_1 = \frac{\ln(S/K) + (r + \frac{\sigma^2}{2})(T-t)}{\sigma\sqrt{T-t}}, d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T-t}$$

ここで、 C : コールオプション価格、 S : 原資産価格、 K : オプション行使価格、 r : 連続複利利率 (5%)、 T : オプションの満期日、 t : 現在時点、 $N(x)$: 標準正規分布の累積密度関数、 σ : ボラティリティ (0.164) である。本計算では S を天然ウランの現在価格 (2000年の天然ウラン価格→\$33.1/kgU₃O₈)、 t を2000年、 T を2020年とした。 K は2020年の天然ウランの理論価格であり、ウラン価格がその値以上になったら、WPuが経済性を有する値 (ウラン燃料とWPuによるMOX燃料の価格が等しくなる値) と考えられる。本研究では次式より、 $K = \$55.4/\text{kgU}_3\text{O}_8$ とした。

(U₃O₈費) + (転換費) + (濃縮費) + (燃料製造費)
= (WPu費=0) + (PuO₂への転換費) + (劣化ウラン費) + (MOX加工費)

以上の仮定とブラックショールズ式より、天然ウランのコール・オプション価格は\$15.5/kgU₃O₈と計算された。さらに same fissile atom density を基準にして、WPuのオプション価値に変換した結果、ウランデリバティブとしてのWPuの価値は\$146.9M / 50MT WPu (\$2.97 × 10³/kgWPu)と計算された。図8-10に天然ウラン価格、MOX燃料加工コスト、ボラティリティに対する感度解析結果を示す。WPuのオプション価値はMOX燃料加工費や天然ウラン価格に特に大きく依存するが、本研究での感度解析結果においては、WPuの処分コストに対して、数十パーセント程度であった。

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

WPuの貯蔵コストや資源価値などを考慮することなどにより、平成11年度に開発した計算コードをより一層精緻化し、汎用性を高める。経済性の観点から見た最適シナリオを、広範な条件下で計算すると共に、感度解析や双対性解析を通じて、兵器級プルトニウムの処分・利用の長期的コストの構造を明らかにする。特に、国際援助などロシア側のコストを低減するための政策的手段について、その効果や必要性を検討する。さらに、核不拡散性や環境安全性の観点からの評価を制約条件式として組み込んだ計算や、実際の国家間の戦略的な駆け引きを考慮してゲーム理論を線形計画モデルに組み込む可能性についても検討する。最後に、線形計画法の特徴を考察し、他の数値計画手法との比較を実施する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

日本原子力学会「2000年春の年会」

- ・ B28 ウランデリバティブとしての兵器級プルトニウムのオプション価格と原子炉処分コスト (東京大学)
- ・ B29 余剰兵器級プルトニウムの原子炉処分コストに関する数値計画解析 (東京大学)

表 1 各炉における毎年の WPu 処分量の上限（基準ケース）（MT of WPu /yr）

	2003~2006	2007~2010	2011~2020	2021~2030
existing VVER1000	$I_1 \times 4$	$I_1 \times 4$	$I_1 \times 7$	0
new VVER1000	0	0	$I_1 \times 3$	$I_1 \times 6$
BN800	0	0	I_1	I_1
BN600(hybrid core)	I_2	I_2	I_2	0
BN600(full MOX core)	0	I_3	I_3	0
CANDU	0	0	$I_5 \times 2$	0
VVER1000 in Ukraine	0	0	$I_1 \times 6$	0

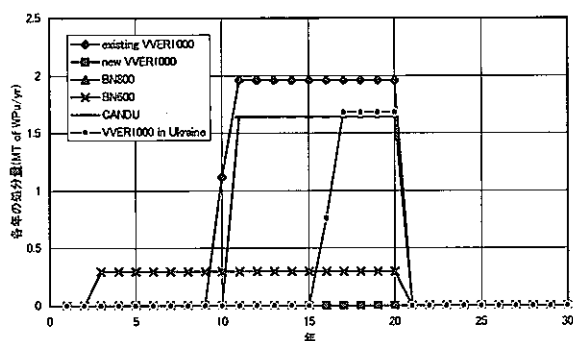


図1 計画期間中の各炉のWPuの処分量

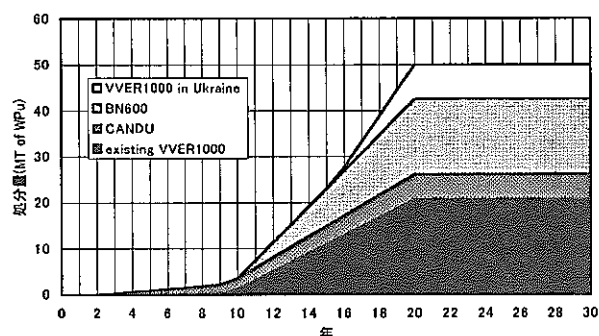


図2 計画期間中の各炉のWPu処分量の積算値

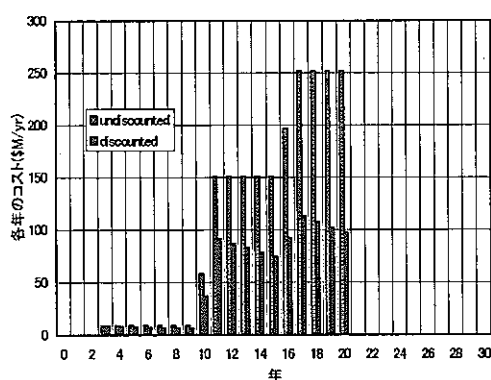


図3 計画期間中の各年のコスト

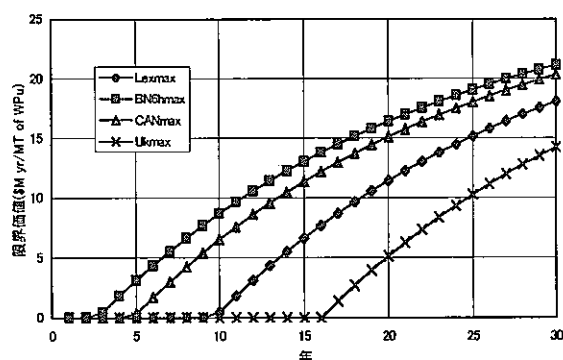


図4 計画期間中の各炉の限界値

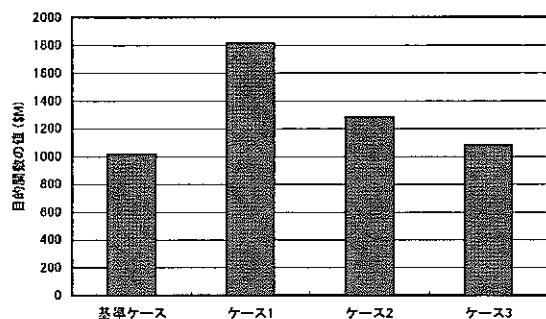


図5 国外炉使用の効果

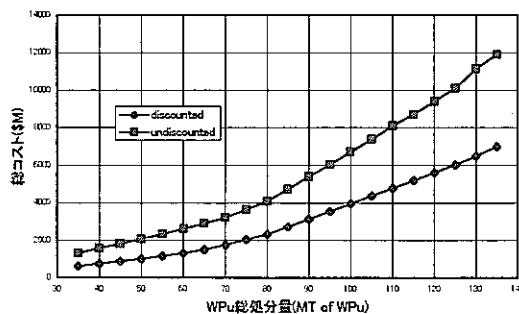


図6 WPu総処分量と総コストの関係

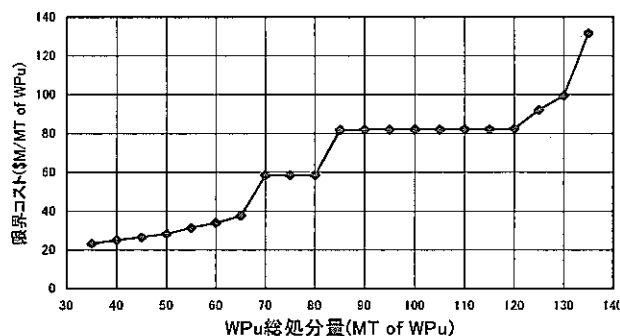


図7 WPu総処分量に対する制約式の双対解

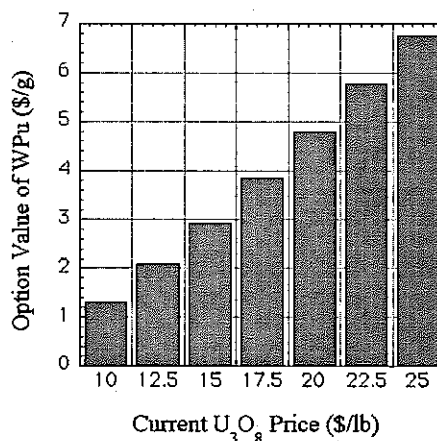


図8 WPuの価値の天然ウラン価格依存性

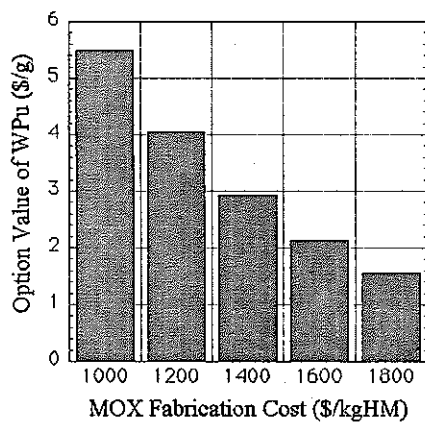


図9 WPu 価値の MOX 加工費依存性

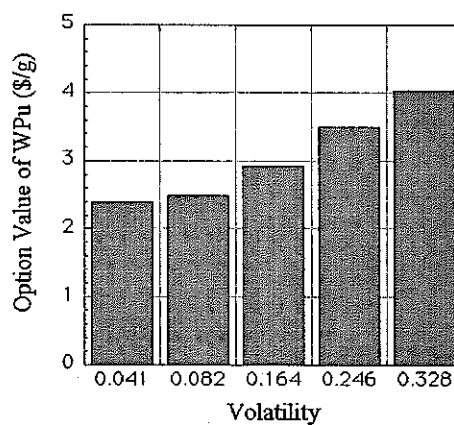


図10 WPu 価値のボラティリティ依存性

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	原子力関連材料の電子線照射効果に関する基礎研究		
研究協力課題	Fe-Cu、HOPGの電子照射効果の陽電子消滅寿命測定		
研究者所属、氏名			
大 学 側	九州大学 応用力学研究所 蔵元英一, 安部博信, 大沢一人, 竹中稔, 堤哲男, 大窪秀明, 鬼塚貴志, 福里宏史		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発 Gr 長谷川信, 遠山伸一, 平野耕一郎		
研 究 協 力 実 施 場 所	九州大学 応用力学研究所 機構 大洗工学センター 量子工学試験施設		
通算研究期間 (予定)	平成11年11月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年11月15日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 原子力関連材料の照射によるマクロな材料特性変化を引き起こすミクロな原子レベルの諸過程を明らかにすることを目的とする。			
【研究内容（概要）】 電子線加速器を利用した低温照射実験により、原子力関連材料（SUS、Fe-Cu系合金、グラファイトなど）に照射欠陥を一樣に導入し、その基本特性を陽電子消滅寿命測定等の物理手段、計算機シミュレーション等を併用して明らかにする。また、ボイドスエリングなどの高温重照射効果の研究において、その初期段階（核発生段階）に関する情報を得ることが重要である。そこで、中性子照射との比較実験としてのバルク試料に対する低照射速度の電子線照射実験等によりバイアス機構を明らかにする。このため、電子線照射実験を行うための電子線加速器の整備検討を実施する。			
【使用主要施設】 量子工学試験施設			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

従来、欠陥集合体は単一体に比して移動エネルギーは増加する、すなわち動きにくくなるのは当然であるとの暗黙の理解の上に立って照射効果全体が理解されてきたが、格子間原子に関してはこのことが必ずしも正しくないとの新しい事実を認めざるを得ない状況になってきた。さらに格子間原子（クラウディオン）の集合体はその大きさの増大とともに完全転位ループへと移行し、極限において直線状刃状転位となることへの再確認を迫られる結果となったことは、点欠陥と転位という一見相容れない2種類の異種構造をもつ結晶内欠陥が連続的につながっているという新しい認識へと導くものである。このことは点欠陥の移動エネルギーと転位のパイエルスポテンシャルが全く別ものではないことを示唆するものであり、格子欠陥の学問の進歩に対して新たな局面を切り開くものである。

本研究でもこのような最近の欠陥、欠陥集合体に対する研究の進歩に対応して計算機シミュレーションを進めていき、照射効果の基礎的理解に寄与する結果を得ることを一つの目的としている。

また、原子レベルのミクロな側面の理解における進歩とマクロな材料特性変化を結びつける試みが非常に重要になってくるが、最近の研究から得られている原子レベルの新しい描像は、ボイドスエリングや照射硬化などに対してもこれまでとは異なった見方を与えられている。すなわちボイドスエリングにおける生成バイアス、照射硬化におけるカスケード起因転位源硬化などこれまでとは異なった考え方が提案されている。これらの新しい考え方に対する基礎的側面からの情報を得ることも本研究の一つの目的であり、マクロな材料特性変化の解釈、ひいては原子炉材料開発に寄与していくことを試みている。

(1) 照射欠陥の基本特性の研究

具体的な材料としては最近広く研究されている Fe-Cu 合金の問題に対して電子線低温照射を行い、照射欠陥を凍結して導入し、その後の等時焼鈍回復実験により Cu 原子、照射欠陥からなる集合体形成に関して原子レベルの情報を得た。測定手段としては電気抵抗測定、陽電子消滅寿命測定などを用いて行った。後者の陽電子消滅寿命測定は原子空孔などの欠陥に対して非常に敏感であり、Cu の照射誘起析出に関する情報を得た。この際平行して種々の欠陥サイトにおける陽電子寿命の計算を行い、実験、計算の比較を通して欠陥挙動を解明した。寿命計算に先立ち欠陥を含むモデル格子の格子緩和の計算も行った。

(2) バイアス機構の解明

バイアス効果に関して、その原子的側面を明らかにするために計算機シミュレーションを行った。第一に転位バイアスに関して Fe 中の刃状転位と照射欠陥の相互作用を、また、格子間原子集合体の挙動をサイズの関数としてモデル Fe 結晶中で行った。

転位バイアス、生成バイアスなどの基礎過程を明らかにすることを目的とし、十分に大きな Fe モデル結晶を作製して、その中で刃状転位と格子間原子、原子空孔などとの相互作用、格子間原子集合体の構造、動的挙動などを詳細に調べた。計算方法は上述の陽電子消滅寿命計算の多体ポテンシャルを用いた。Fe モデル結晶中に直線状刃状転位を弾性論の解により導入し、その周囲の各格子位置に格子間原子また原子空孔を置き結晶全体を緩和して相互作用エネルギーマップを求めた。転位との相互作用の強い範囲を各欠陥に対して見積もるために、点欠陥の形成エネルギーの位置依存性を求めた。このことは転位バイアスを評価する際に非常に重要である。次ぎに、格子間原子の集合体をモデル Fe 結晶の中に作製し、その構造、動的挙動を調べた。これらは生成バイアスの基礎過程につながるものである。

微小な格子間原子集合体（転位ループ）が応力下で容易に移動することが生成バイアス（production bias）の基盤となるため、この際の必要応力、エネルギーなどに関する情報を得た。

【研究成果】

照射導入欠陥の基本特性、すなわち格子間原子、原子空孔などの挙動を電気抵抗測定、陽電子消滅寿命測定などの実験、陽電子寿命計算などを通して明らかにしてきた。とくに Fe 中の欠陥と Cu 原子の相互作用は压力容器鋼の脆化現象の基本的要因であり、その原子論的描像を明らかにすることは不可避の課題である。これに答えるべく実験、計算を通して研究を進めてきた。電気抵抗測定からは格子間原子と Cu 原子の相互作用が明らかになり、陽電子消滅寿命測定からは原子空孔と Cu 原子の相互作用に関する情報が得られた。すなわち照射促進析出の基礎要因となることが明らかになった。この研究の基礎を支えたのは Fe-Cu 間のポテンシャルの開発であり、それをもとに陽電子寿命計算、運動転位と Cu 原子の相互作用のシミュレーションなどを行った。運動転位に対する障害物としての働きが原子レベルで明らかになった。

また、刃状転位と点欠陥の相互作用から転位バイアスに関する基本情報が得られた。すなわち Fe 中の刃状転位と格子間原子の相互作用は、刃状転位と原子空孔の相互作用よりも遥かに強いことを示した。このことは刃状転位の格子間原子に対する選択吸収性を示すものであり、転位バイアスの基本概念を支持するものである。

さらに、Fe 中の格子間原子集合体 (<111>クラウディオンの束、転位ループ) の動的挙動を明らかにするための計算機シミュレーションを行い、生成バイアス (production bias) の成立要件について研究を行った。転位ループを移動させるに必要な応力、転位ループのパイエルズ応力はループサイズの増大とともに減少し直線状刃状転位の値に漸近する。図 1 に活性化エネルギーの転位ループのサイズ依存性を示す。活性化エネルギーを求めてみると、0.2eV と非常に小さい値であることが判明した。このことは高温照射環境下では容易に一次元運動が可能であることを支持しており生成バイアスの成立要因を満たすと考えられる。

このような Fe, Fe-Cu を中心とする原子力関連材料の基礎をなす物質中での欠陥の原子レベルでの挙動の研究を通して基礎的情報を引き出し、高温照射環境下で使用する材料中の挙動の研究に寄与することが可能になってきた。ミクロな原子レベルから現実のマクロレベルまでの一連の解釈には非常に困難な部分も多い。とくに材料の強度、脆化現象には素過程である転位の運動の蓄積としての複雑な過程が存在しており、今後も相当量の研究が実験、計算両面において必要とされる。

【今後の予定 (翌年度以降の概要)】

加速器開発は平成 11 年度をもって中止とされた。また、平成 12 年度については維持管理のみとされたため、JNC 加速器を利用した本共同研究を継続することができなくなった。

よって、本共同研究は平成 11 年度をもって中止する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 蔵元英一、"反跳粒子検出法、陽電子消滅測定法による黒鉛中の水素、重水素と欠陥の研究"、真空、Vol. 42, No. 10 (1999) pp897-904.
- 2) T. Onitsuka, "Positron Lifetime Calculation for a Vacancy and Vacancy Clusters in Graphite", Trans. Mat. Res. Soc. Japan, Vol. 24 (1999) pp237-240.
- 3) E. Kuramoto, "Computer Simulation of Fundamental Behaviors of Interstitial Clusters in Fe and Ni", J. Nucl. Mat., 276 (2000) pp143-153.
- 4) E. Kuramoto, "In-situ Measurement of Lattice Parameter Change on Pd and Ni during Cathodic Hydrogen Charging", J. Alloys and Compounds, 293-295 (1999) pp174-177.
- 5) K. Ohsawa, "Flexible Boundary Condition for a Moving Dislocation", J. Appl. Phys., 86 (1999) pp179-185.
- 6) H. Abe, "Interaction of Solutes with Irradiation-Induced Defects of Electron-Irradiated Dilute Iron Alloys", J. Nucl. Mat., 271&272 (1999) pp209-213.
- 7) E. Kuramoto, "Computer Simulation of the Interaction between an Edge Dislocation and Interstitial Clusters in Fe and Ni", J. Nucl. Mat., 271&272 (1999) pp26-29.
- 8) E. Kuramoto, "Positron Lifetime Calculations on Vacancy Clusters and Dislocations in Ni and Fe" Computational Materials Science, 14 (1999) pp28-35.

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	高品質・高輝度電子ビームの研究		
研究協力課題	光陰極電子銃による高輝度電子ビームの研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	姫路工業大学 高度産業科学技術研究所, 工学部電気工学科* 望月孝晏教授, 宮本修治助教授, 天野壮助手, 井上隆博 工学部研究科大学院生 八束充保教授*		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発 Gr 長谷川信, 野村昌弘, 山崎良雄		
研 究 協 力 実 施 場 所	姫路工業大学 高度産業科学技術研究所 機構 大洗工学センター 量子工学試験施設		
通算研究期間 (予定)	平成11年 8月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年 8月 2日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 光電子放出型電子銃を用いて高品質電子ビームを発生させるために、電子銃の特性とダイナミックスを計算機シミュレーションおよび実験研究により調べ、光電子放出型電子銃の応用の可能性を評価することを目的とする。			
【研究内容（概要）】 光電子ビームは高エネルギー純度、高輝度電子ビームを発生できるため、放射X線装置や非破壊検査等の分析装置に応用することで機器の高性能化を図ることができる。さらに機器をコンパクトに構成でき、低コスト化も可能となる。 本研究では、光電子放出型電子銃の特性とダイナミックスを調べ、高エネルギー純度、高輝度電子ビームを用いた機器（放射X線装置や非破壊検査等の分析装置）への応用上必要なデータを供給するとともに、従来にない超高エネルギー純度、超高輝度電子ビームを発生するための光電子銃の可能性を探る。			
【使用主要施設】 量子工学試験施設			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

電子ビーム品質の改善・高輝度化は、自由電子レーザー等の応用上、性能を決定する主要な項目で各種の方法が試みられている。レーザー光陰極を用いた電子銃は、短パルスレーザーによる制御性の向上も加えて、電子銃の大きな改善を可能とすると期待されている。光陰極を利用する電子源は、古くから利用されてきているが、近年の安定なモードロックレーザー技術の進歩により、高周波電子銃に安定に同期した発生が可能となり、新しい展開が開けている。本研究では、光電子放出をニードル陰極先端の高電界条件で行うことにより、光電子放出の量子効率を大幅に改善されることを、実験的に示すとともに、高周波電子銃の計算機シミュレーションでパラメーターサーベイを実施した。実験では、DC 電圧での予備試験を小半径ニードルを用いて、実際の高周波電子銃に導入した場合のニードル先端電界を模擬して実施した。本年度は特に以下の研究を進めた。

- (1) 量子効率測定実験の装置の開発と測定方法の確立
- (2) LEENA における RF 電界による電子の加速特性の評価
- (3) ニードルカソードの 1 次元熱伝導計算による熱問題の評価

【研究成果】

- (1) 量子効率測定実験の装置の開発と測定方法の確立

ニードルカソードは、直径 $100\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーを電解エッチング法によってニードル先端半径は約 $0.5\mu\text{m}$ 以下で製作した。このニードルカソードを用いて、量子効率の電界強度依存性を測定した。真空度は 10^{-9}Torr 以下、ニードルカソードに印加する直流電圧は 3kV 以下（可変）の条件で、ニードル正面から各種パルスレーザー（Nd:YAG: 355nm , ピーク強度 $22.6\text{kW}/\text{cm}^2$, Nd:YLF: 351nm , ピーク強度 $825\text{MW}/\text{cm}^2$, および ArF: 192nm , ピーク強度 $300\text{MW}/\text{cm}^2$ ）を照射した。

測定方法として、まずレーザーの照射および未照射時の放出電流を微小電流計（分解能 10fA ）を用いて測定して、これらの電流値の差分を光放出電流と考え、光放出電流の増加を量子効率の増加によるものとした。電界強度の増加に従って、量子効率が増加するが、依存性としては比例的でない。低電界において量子効率が電界強度に比例することは、実験的にも理論的にも確認されているが、GV/m オーダーの高電界領域におけるこのような量子効率の依存性は、現在までに明確な実験や理論的な報告はなく、現在理論モデルの検討を行っている。本研究により、電界強度が $2\sim 3\text{GV}/\text{m}$ の間に量子効率が 2 桁程度（ $10^{-3}\sim 10^{-1}$ ）の改善が見込まれることがわかった。

- (2) LEENA における RF 電界による電子の加速特性の評価

LEENA では、RF 電界と同期したレーザー照射によって電子をカソードから放出させ、電子を RF 電界によって加速する。FEL 高出力化には、電子源の高輝度化とともに、RF 加速電界の最適な相に電子を供給することが重要である。そこで、LEENA における基本的なパラメータを用いて、電子ビームの加速特性を評価した。ニードルカソードに Nd:YLF レーザー（ 351nm , $360\text{MW}/\text{cm}^2$ ）を照射し、最大電界強度 $40\text{MW}/\text{m}$ の RF 電界によって電子ビームを加速した場合に、RF-GUN 空洞終端部（RF 線形加速管に入射される手前）における、電子ビームのパラメータを観測した。先端半径をパラメータとして、レーザー照射位相（initial phase）に対する出力ピーク電流の依存性を求めた。エネルギー広がり等も考慮すると、次のような範囲が高周波電子銃の運転動作範囲として選定された。

先端半径 : $d < 15\mu\text{m}$
initial phase : $0\sim 30\text{deg}$

(3) ニードルカソードの1次元熱伝導計算による熱問題の評価

ニードル先端半径が小さくなると、電流密度が増加し、ジュール加熱による先端の温度上昇がニードル先端半径の制限条件に寄与してくる。また先端から離れたカソード部分では、電界強度が低く量子効率も低いと考えられ、照射したレーザーのエネルギーを吸収して加熱される。このような熱問題はニードルカソードにおいて本質的である。簡単な1次元熱伝導計算によって、先端半径と先端の温度上昇との関係を求めた。ここでは簡単のために、表面からの熱輻射による冷却は無視しており、軸方向に対して電流および熱流が均一に流れるものと仮定した。レーザーによる温度上昇度はタングステンの融点(3683K)に対して十分小さいが、一方ジュール加熱による温度上昇度は、先端半径が小さいほど熱的影響が現れ、先端半径 $8\mu\text{m}$ 以上の条件が課せられる。

【今後の予定(翌年度以降の概要)】

加速器開発は平成11年度をもって中止とされた。また、平成12年度については、維持管理のみとされたため、JNC加速器を利用した本共同研究を継続することができなくなった。

よって、本共同研究は平成11年度をもって中止する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1)電子線形加速器(LEENA)による自由電子レーザーの研究 III

宮本修治, 井上隆博*, 天野壮, 福田啓介, 八束充保*, 望月孝晏

物理学会第54回年会、28pXH-5、広島大学、1999.3.28

2)自由電子レーザー用レーザー励起光陰極の開発

井上隆博、宮本修治、八束充保、望月孝晏

物理学会第54回年会、28pXH-6、広島大学、1999.3.28

3)自由電子レーザー用レーザー励起光陰極の開発 II

井上隆博、宮本修治、八束充保、望月孝晏

物理学会1999年秋の分科会、27aYF-1、岩手大学、1999.9.24

4)LEENA-FELによる高ピークパワーTHz光源

宮本修治、井上隆博、天野壮、望月孝晏

レーザー学会第20回年次大会、20aIII-5、アクロス福岡、2000.1.20.

5)自由電子レーザー用レーザー励起高輝度ニードル電子源の研究

井上隆博、天野壮、宮本修治、望月孝晏

レーザー学会第20回年次大会、20aIII-6、アクロス福岡、2000.1.20.

6)FEL用光励起高輝度電子源の開発 III～フォトニードル電子源の特性～

井上隆博、宮本修治、八束充保、望月孝晏

物理学会春の分科会、24aB-2、吹田市、2000.3.24.

7)LINAC-FEL用ニードルRFガン

井上隆博、宮本修治、八束充保、望月孝晏

第9回FELとHigh Power Radiationに関するTopical Meeting

大阪大学産業科学研究所、1999.12.10.

8)"Development of a high repetition rate Nd:YAG slab laser and soft X-ray generation by cryogenic target."

S.Amano, A.Shimoura, S.Miyamoto, T.Mochizuki

Fusion Engineering and Design, vol.44, pp.423-426(1999).

9)"X-ray emission from laser plasma of cryogenic mixture targets"

A.Shimoura, T.Mochizuki, S.Miyamoto, S.Amano and T.Uyama

Appl. Phys. Lett., Vol.75, pp.2026-2028(1999).

10)"Soft x-ray spectra from laser-heated cryogenic raregas targets"

A.Shimoura, T.Mochizuki, S.Miyamoto, S.Amano and T.Uyama

Review of Laser Engineering, Vol.27, pp.787-789(1999).

11)(予定)"Free Electron Laser and Advanced Light Source Studies on Electron Storage Ring and Linac at LASTI", S.Miyamoto et al., "13th International Conference on High-Power Particle Beams", Nagaoka, Japan, 2000.6.26-30.

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子照射したオーステナイト鋼の基礎物性に関する研究						
研究協力課題	合金元素のスエリング挙動に及ぼす影響						
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td><td>東北大学金属材料研究所 松井秀樹, 福元謙一, 北海道大学 高橋平七郎, 東京大学 関村直人, 核融合研究所 室賀健夫</td></tr> <tr> <td>機構側</td><td>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 堂野前貴子, 山県一郎, 赤坂尚昭</td></tr> </table>			大学側	東北大学金属材料研究所 松井秀樹, 福元謙一, 北海道大学 高橋平七郎, 東京大学 関村直人, 核融合研究所 室賀健夫	機構側	大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 堂野前貴子, 山県一郎, 赤坂尚昭
大学側	東北大学金属材料研究所 松井秀樹, 福元謙一, 北海道大学 高橋平七郎, 東京大学 関村直人, 核融合研究所 室賀健夫						
機構側	大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 堂野前貴子, 山県一郎, 赤坂尚昭						
研究協力 実施場所	東北大学 金属材料研究所 機構 大洗工学センター 照射材料試験施設						
通算研究期間 (予定)	平成11年4月 ~ 平成14年3月	当該年度 研究期間	平成11年11月24日 ~ 平成12年3月31日				
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究						
【研究目的】 オーステナイト鋼被覆管のスエリングは、FBR 燃料の寿命決定因子として重要である。従来の研究では照射条件、試料材質の違いなどに起因するデータのばらつきが大きく、適切な寿命評価が困難であった。オーステナイト鋼に対する照射関係のデータは比較的多く、Ni, Cr 等の主要な合金元素濃度がスエリング等の照射効果に及ぼす影響などは系統的な研究が行われているが、Si, P, Ti 等の微量元素の効果については、イオン照射による結果があるものの中性子照射の場合については未知な部分も多い。また従来の照射研究の大部分は一定温度下での照射を意図してきたが、実際の照射条件は必ずしも一定・定常でない場合が多く、しかも照射条件における履歴に関して十分な記述の無いデータが大部分である。このことが、スエリング等の照射データにばらつきが生じる一因になっている可能性がある。本研究においては常陽での照射における履歴効果を正確に把握した上でその影響を可能な限り評価することを意図している。供試材としては、常陽照射材であるオーステナイトモデル合金 (Ni, Cr 量を系統的に変化させたもの) および純金属を用い、透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察を行う。その際組織の定量的計測を実施し、臨界バブル径、照射下拡散係数、自由点欠陥生成率、表面効果などの合金元素に対する依存性を把握する。							
【研究内容 (概要)】 実験研究の主要な部分は Ni, Cr を系統的に変化させたオーステナイト鋼モデル合金 (純金属並びに合金元素及び溶質元素を変化させた合金) の常陽による照射材に対して、TEM 観察と EDS による局所分析を用いて、損傷組織発達過程を詳細に調べる。特に純金属 (Fe, Cr, Ni)、モデル合金 (15Cr- (15~30) Ni 系) および PNC316 鋼について組織の定量的計測を重点的に行い、臨界バブル半径、転位ループの発達状況などについて個々の合金元素に対する依存性を明らかにする。							
【使用主要施設】 東北大学金属材料研究所 大洗施設 東北大学金属材料研究所 仙台片平キャンパス α放射体実験室 大洗工学センター 照射材料試験施設							

【進行状況（当該年度までの概要）】

機構から東北大金研大洗施設へ供試材のうち、リン添加モデル合金の CMIR-4 照射材及び 15Cr-20Ni-0.06C 材と改良型オーステナイト鋼の CMIR-2,3 照射材（TEM 試料計 39 枚）を搬送した。大洗搬送後仕分けを行い、炭素添加材及び改良オーステナイト鋼試料を東北大金研片平の α 放射体実験室へ搬送した。搬送した試料を電解研磨処理後、TEM 観察を行い微細組織情報の収集を行った。また、CMIR-4 で照射した PNC316 鋼 He 予注入材の一部について、照射材料試験施設（MMF）にて微細組織観察を行った。

【研究成果】

平成 12 年 3 月までの研究成果の概要をまとめる。

〔1 5Cr-20Ni-0.06C 材及び改良オーステナイト鋼〕

核燃料サイクル機構から提供された供試材のうち 15Cr-20Ni-0.06C 材と改良型オーステナイト鋼の Joyo-CMIR-2,3 照射材の TEM 観察を行った。

図 1 は Fe-15Cr-20Ni-0.06C の転位像写真による損傷組織の温度依存性を、図 2 には改良型オーステナイト鋼のボイド像写真による損傷組織の温度依存性を示す。

Fe-15Cr-20Ni-0.06C では観察を行った $>5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ 、 $>470^\circ\text{C}$ 以上でキャビティー形成が観察された。照射温度の上昇とともにキャビティー数密度が減少し、直径が増加する粗大化傾向が見られた。キャビティー形成とともに転位や転位ループが観察された。転位ループには積層欠陥コントラストからフランク型部分転位ループも観察されていることが確認された。粒界および粒内に析出物は観察されず、炭化物形成は見られなかった。

改良型オーステナイト鋼でも観察した試料全てにキャビティー形成が見られたが、Fe-15Cr-20Ni-0.06C に比べ数密度は小さかった。転位密度は Fe-15Cr-20Ni-0.06C に比べ高く、タングルした転位組織が観察された。またキャビティー形成とともに 100-200 nm 程度の大きさの析出物が観察された。析出物の同定は行っていないが形状および過去の文献などから M_6C あるいは M_{23}C_6 の炭化物であると考えられる。

図 3 に TEM 観察から求められたボイドスエリング温度依存性について示す。Fe-15Cr-20Ni-0.06C では改良型オーステナイト鋼に比べボイド径が大きい大きなスエリングを示していることが特徴として上げられる。 $>5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ 以上の中性子線量では Fe-15Cr-20Ni-0.06C では 20% 以上のスエリングを示していた。Fe-15Cr-20Ni-0.06C にくらべ改良型オーステナイト鋼は高温側にスエリングピークがあることが明らかとなった。改良型オーステナイト鋼において 500°C 以下ではスエリングは発現していないが 500°C 以上ではキャビティーの成長が著しく大きくスエリングを示した。

また両試料において微細な転位ループと積層欠陥四面体（SFT）が観察された。転位ループおよび SFT の分布は均一であり、ボイドや析出物周辺に局所的に形成されているものではなかった。照射温度が 500°C 以上の高温領域であるためこのような微細な損傷組織、特に SFT に関しては Joyo の定常運転中に形成された組織であるとは考えにくい。

この微細な損傷組織形成には Joyo の運転履歴、特に照射温度履歴が影響を与えていると考えられる。運転終了時の炉の出力低下時に原子炉の出力低下とともに試料のガンマ加熱も低下することにより試料の温度が低下し、定常運転温度よりも低い温度で試料が中性子照射を被る。このため比較的低い温度（ $<300^{\circ}\text{C}$ ）での中性子照射により微細な転位ループや SFT が形成され、定常運転下で形成される粗大化した転位とボイドの損傷組織と重畳して現れると考えられる。このため運転履歴および試料の温度履歴について、十分な考察が必要になると考えられる。

現在、析出物や転位ループの定量的な情報についても解析を進めている。

[PNC316 鋼 He 予注入材]

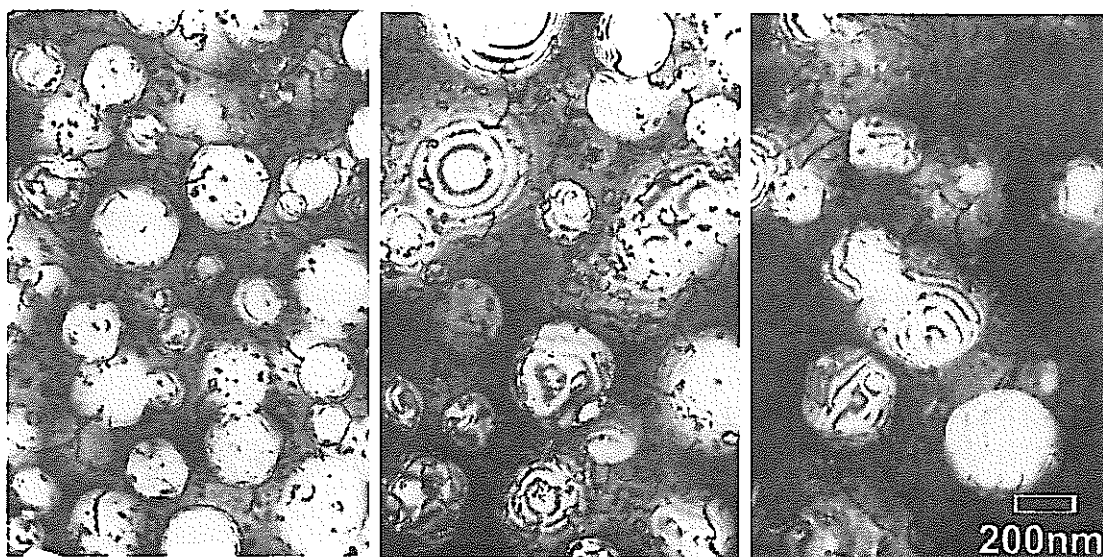
MMF にて、CMIR-4 で照射した PNC316 鋼 He 予注入材 (He 注入レベル; 0, 50, 100 appm) の試料仕分けを行い、一部の試料について透過型電子顕微鏡による予備観察を行った。現在データの整理を行っている。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

東北大学金研大洗施設及び片平 α 放射体施設で組織観察を行う予定の試料のうち未搬送分を MMF から大洗施設へ搬送し、それらの材料を大洗施設内にて電解研磨処理する。研磨した試料の一部は東北大学金研片平 α 放射体施設で、その他は大洗施設にて TEM 観察を行う。また MMF にて TEM 観察予定である試料の試料調整を行い、順次 TEM 観察を行う。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文など】

なし



572°C

9.5×10^{26}

589°C

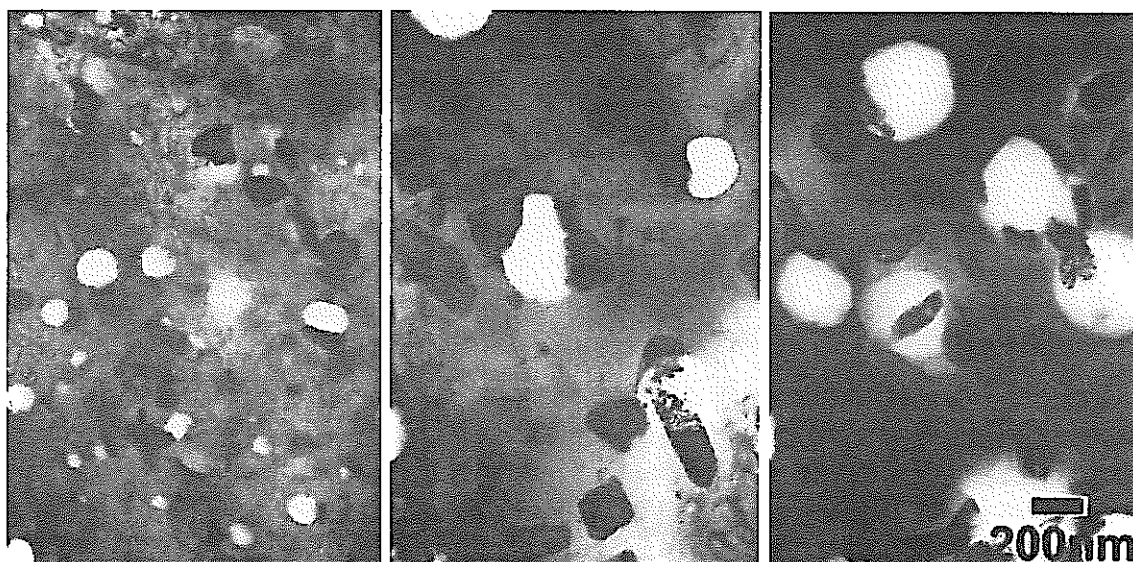
1.1×10^{27}

621°C

6.5×10^{26} (n/cm²)

Fe-15Cr-20Ni-0.06C

図1: Fe-15Cr-20Ni-0.06C の CMIR2,3 照射による損傷組織の温度依存性



572°C

9.5×10^{26}

589°C

1.1×10^{27}

621°C

6.5×10^{26} (n/cm²)

改良型オーステナイト鋼

図2: 改良型オーステナイト鋼の CMIR2,3 照射による損傷組織の温度依存性

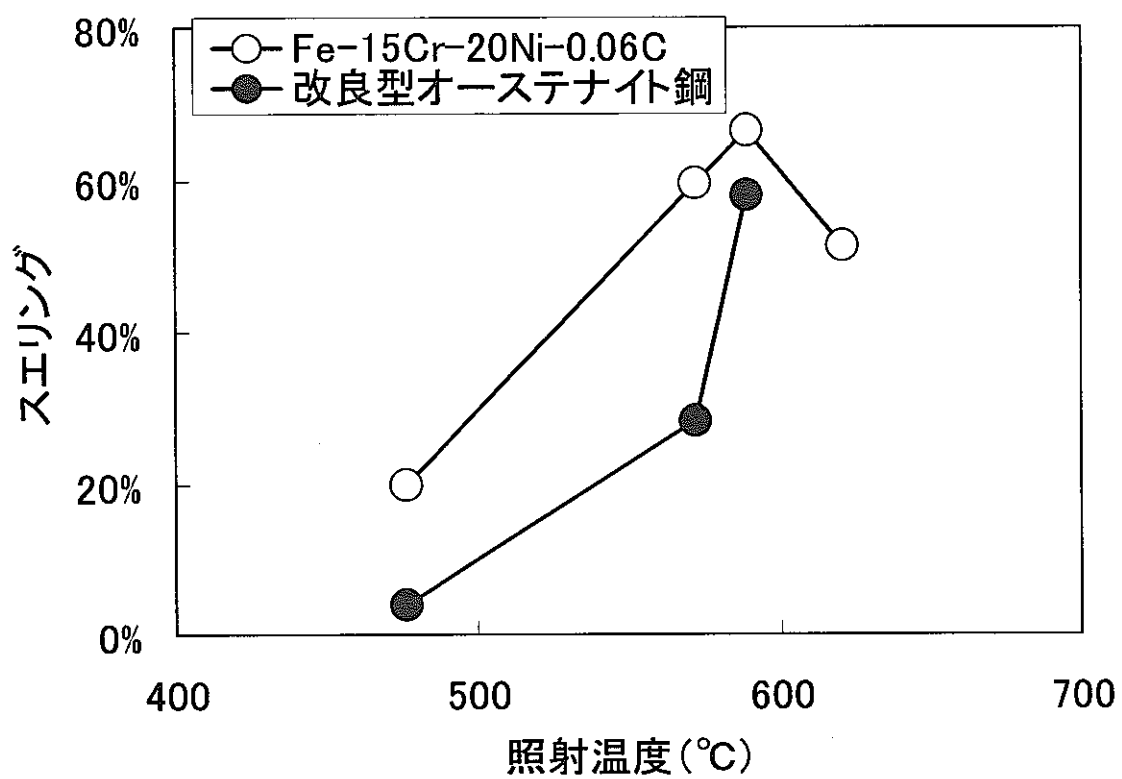


図3:CMIR-2,3 照射材のポイドスエリングの温度依存性

先行基礎工学分野に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	不活性母材用セラミックス材料の照射効果に関する研究		
研究協力課題	核変換ガス原子の効果に関する研究		
研究者所属、氏名			
大学側	東北大学 金属材料研究所 助教授 四竈樹男 東京工業大学 原子炉工学研究所 助教授 矢野豊彦		
機構側	大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発 Gr 研究主幹 鶴飼重治 大洗工学センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 副主研 小野瀬庄二		
研究協力実施場所	東北大学 金属材料研究所附属材料試験炉利用施設 東京工業大学 原子炉工学研究所 機構 大洗工学センター 燃料材料試験部 照射材料試験施設		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 11 月 ~ 平成 14 年 3 月	当該年度 研究期間	平成 11 年 11 月 24 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
プルトニウムおよびマイナーアクチニド(MA)の消滅処理では、ウランを含有しない不活性母材マトリックス材中にPuやMAを分散して原子炉照射する方法が効果的である。PuやMAの消滅処理のための不活性母材としては、熱伝導性に優れ、耐熱性やNaとの両立性が良好なAlNセラミックスが有望であるため、AlNに着目してその照射効果を研究する。また本研究は、消滅処理用不活性母材としてだけでなく、核融合炉へのセラミックスの応用の観点からも有効である。			
【研究内容（概要）】			
窒化アルミニウムの消滅処理用不活性母材としての適用に際しては、$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$の核反応で生成する放射性物質である$^{14}\text{C}$と水素の影響を評価する必要がある。 そこで、窒素の同位体を調整したAl^{15}NとAl^{14}N試料を作製して、はじき出し損傷が主体の高速実験炉「常陽」と(n, p)反応が主体のHFIR（米国のオークリッジ研）での照射試験を行い、スエリング、熱伝導度、損傷組織変化等を評価するとともに、中性子照射に伴う核変換効果を明らかにする。 これら一連の試験により、窒化アルミニウムの不活性母材としての可能性を探る。			
【使用主要施設】			
東北大学 金属材料研究所附属材料試験炉利用施設の照射後試験設備（透過電子顕微鏡、熱伝導度測定装置、強度試験装置、他） 東京工業大学 原子炉工学研究所（透過電子顕微鏡、熱伝導度測定装置、他） 機構 大洗工学センター 燃料材料試験部 照射燃料集合体試験施設、照射材料試験施設（熱伝導度測定装置、他）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

N-14 と N-15 で同位体調整した評価用窒化アルミニウム (AlN) 焼結体から照射試料を作製して、「常陽」MK-II と米国オークリッジ国立研究所の高出力混合スペクトル原子炉 HFIR (High Flux Isotope Reactor) での照射を実施した。

【研究成果】

1. 照射試料の作製

N-15 を 99.2 at%まで濃縮した Al^{15}N と天然窒素の Al^{14}N からなる寸法が $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ の高純度窒化アルミニウム焼結体を作製した。焼結体の密度はそれぞれ 97.3 %TD、93.5 %TD であり、それらの化学成分を Table 1 に示す。

これらの板状焼結体から照射試験に供するため、透過電顕観察用に $3\phi \times 1\text{mm}$ の TEM ディスク、熱伝導測定用に $10\phi \times 1.6\text{mm}$ の TC ディスク、及び曲げ試験用に $1.6\text{mm} \times 2.0\text{mm} \times 20\text{mm}$ 角棒状試料（ベンドロッド）を作製した。

2. 照射試験

2.1 「常陽」MK-II 照射試験

同位体組成比を変えた Al^{15}N と Al^{14}N 焼結体から作製した TEM ディスク、TC ディスク、及びベンドロッドの 3 種類の試験片をキャプセルに装填して、SVIR-1 サーベイランス照射リグに組み立てた。SVIR-1 照射リグは「常陽」MK-II の炉心中心（0 列）で、34 サイクル（平成 11 年 11 月開始）から照射を継続中で、35 サイクル終了（平成 12 年 6 月）まで照射される予定である。照射条件は以下の通りである。

温度：500℃（TEM ディスク、TC ディスク、ベンドロッド）

中性子フラックス：

Total $3.95 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$

$E > 0.1\text{MeV}$ $2.70 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$

35 サイクル終了時までの累積照射日数は、100MW 相当にして約 120 日であり、予想される高速中性子照射量は $2.8 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1\text{MeV}$) である（dpa 換算は評価中）。

2.2 HFIR (High Flux Isotope Reactor) 照射試験

HFIR 照射についても、同位体組成比を変えた Al^{15}N と Al^{14}N 焼結体から作製した TEM ディスク、TC ディスク、及びベンドロッドの 3 種類の試験片を計装キャプセルに装荷して、平成 11 年 9 月より照射を開始し、平成 12 年 9 月までの予定で照射が継続されている。照射条件は以下の通りである。

照射温度：300℃（TEM ディスク）、500℃（TEM ディスク、TC ディスク、ベンドロッド）

中性子フラックス：

Total $2.26 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$

Thermal($E < 0.5\text{eV}$) $9.71 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$

$0.5\text{eV} < E < 0.1\text{MeV}$ $4.93 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$

$E > 0.1\text{MeV}$ $1.89 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$

平成 12 年 9 月までの累積照射日数としては、約 25 日／サイクルで 10 サイクルの照射を当初予定していたが、若干の照射計画の遅れが生じている。最終的な積算はじき出し線量としては、窒化アルミニウム換算で 8.5～9.0dpa 程度と見積もられる。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、「常陽」MK-II 及び HFIR での照射を終了して、最終的な照射条件を評価すると共に、キャプセル解体、試料取り出しを実施する予定である。ただし、HFIR 照射試料に関しては、同じキャプセルに入っている金属試料の誘導放射能が高い場合には、キャプセルの解体は遅れる可能性がある。

平成 13 年度は、本格的な照射後試験と熱アール試験、及び試験全体の解析・評価を予定している。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

Table 1. Chemical analysis and some properties of sintered Al^{15}N and Al^{14}N plates.

	Al^{15}N	Al^{14}N
density (%TD)	97.3	93.5
open porositu (%)	0.8	6.8
^{15}N enrichment (at%)		
as-sintered	99.2	----
after 20 days	99.4	----
composition (mass%)		
C	0.17	0.23
O	1.14	1.13
Y	1.20	0.62
Fe	< 0.001	< 0.001
Si	0.042	0.068
Ca	0.002	0.002

Ⅱ 先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告

2. 核燃料サイクル関係

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	電子線を用いた放射線材料照射の基礎研究		
研究協力課題	金属表面における放射線分解反応と腐食		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京工業大学原子炉工学研究所 教授 藤井靖彦, 助教授 赤塚洋, 助手 野村雅夫, 助手 鈴木達也, 大学院博士課程 佐分利禎, 大学院修士課程 徳浪理恵		
機 構 側	大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発 Gr 田中拓		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京工業大学 原子炉工学研究所 機構 大洗工学センター 量子工学試験施設		
通算研究期間 (予定)	平成11年10月 ~ 平成14年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年10月30日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 再処理プロセスにおける構造材のように、 β 線照射下にある金属材料は電子に起因する化学作用が想定される。特に、硝酸溶液中では種々の分解生成物が生じ、金属材料に作用するおそれがある。このような分野の研究の手段として核燃料サイクル開発機構の大電流電子線加速器を用いたシステムの構築を行い、材料腐食機構の解明を目的とする。			
【研究内容（概要）】 原子炉内や再処理施設のような強放射線場の極限環境下に耐えうる高性能材料の開発にあたり、当該環境における材料の表面反応の促進や材質変化などの基礎現象の解明が必要とされている。この現象の解明のために核燃料サイクル開発機構の大電流電子線加速器を用いる予定であるが、今回はその予備実験として東京工業大学に設置されているヘリコン波励起のプラズマ発生装置を利用してプラズマ腐食試験装置を整備し、目的とする強放射線環境を模擬するプラズマと物質表面との相互作用について研究を行った。			
【使用主要施設】 ヘリコン波励起プラズマ発生装置(東京工業大学)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

東京工業大学に設置されているヘリコン波励起のプラズマ発生装置を放射線環境場における材料の腐食試験に利用できるよう改良を行った。このプラズマ材料腐食試験装置で酸素プラズマを発生させ、SUS304の酸化試験を行い、電子が酸化反応を促進することを明らかにした。

【研究成果】

今年度の研究成果の概要をまとめる。

(1) プラズマ発生装置の改造

東京工業大学では今までにプラズマ存在下における水素の金属透過現象について研究を行っており、プラズマ中の水素の金属透過現象が、気体中での透過現象と比べて格段に大きな透過率を示すのはプラズマ中で水素分子が解離して原子やイオンになるためだけではなく、プラズマ中の電子が水素の金属透過現象に大きく寄与することを明らかとした。本研究では電子線環境下における材料腐食機構解明のためこの東京工業大学に設置されているヘリコン波励起プラズマ発生装置に電子を引き出せるようバイアス電圧を付加でき且つ温度制御可能な試料取り付け部を設置することにより高 β 放射線場の極限環境を模擬する材料腐食試験装置への改造を行った。実験装置の概略図を図1に、装置に付加した試料取り付け部を図2に示す。

(2) 酸素プラズマを用いた材料試験法の確立

(1)で示した材料腐食試験装置を用いて材料腐食機構解明のための試験を行った。本装置は放電気体として酸素を用いたとき、 $10^{-1} \sim 10^2$ Paと言う広い圧力領域で放電を行うことができ、圧力を調整することにより種々条件を模擬、この酸素プラズマを金属材料に照射して表面にできた酸化膜の厚さを測定することにより材料腐食試験を行った。酸化膜層は二次イオン質量分析計(SIMS)で測定することにより行い、この手法により材料腐食の模擬試験が行えることを確認した。今回は酸素を用いて腐食模擬試験を行ったが、水蒸気や窒素などの種々の気体を用いることにより、様々な腐食条件を作り出すことができるものと思われる。また今回は材料の評価試験としてSIMSを用いたが、SEMなどの表面観察やラマン分光やESCAなどの状態観察を組み合わせることにより更なる知見が得られるものと推測する。

(3) 電子の影響の評価

今回は再処理プロセスの構造材に使われているSUS304を用いて、腐食模擬試験を行った。今回は特に高 β 線影響下における腐食の影響を評価するために、プラズマ条件及び照射時間を一定に保ち、試料バイアスのみを変化させ、電子を引き寄せたときの酸化層の生成について研究を行った。酸化層の評価にはCAMECAのSIMSであるIMS6Fを用いた。分析条件はイオンビームにセシウムを用いたのを始めとして、イオン電流など全て一定で行った。得られた酸化層の深さ分布を図3に示す。図3ではプラズマ照射前の試料、バイアスをかけずに酸素プラズマに照射した試料および正のバイアスをかけて照射した試料の3点を示してある。図3のスputtering時間は厚みに相当するものであり、酸素収量は酸素濃度に相当する。図3からは酸化層の厚みおよび酸素濃度は酸素プラズマを照射すると増加し、電子を当てることにより更に増加することが見て取れる。酸素プラズマ中には酸素分子、酸素原子、酸素イオン、電子などが存在する。酸素プラズマを照射したとき、この中に含まれる酸素ラジカル、酸素イオンが放射線により発生するラジカルを模擬するもので金属材料と反応して酸化膜を形成する。試料に正のバイアス電位をかけたものは試料表面に電子を当てるようにしたもので電子線照射の影響を見たものである。試料にかけたバイアス電位は50Vであり、プラズマ電位から考えると実際には数10V程度のエネルギーで金属表面に衝突していると考えられる。この程度のエネルギーしか持たない電子でも金属表面の酸化層の生成には大きく影響することを明らかにした。

(4)大電流電子線加速器を用いた放射線場における材料腐食機構及び材料評価システムの提案

東京工業大学のプラズマ実験装置により、金属表面近傍に電子があるエネルギーを持って存在することにより、酸化が促進されることが明らかになった。しかしながら、東京工業大学の装置ではプラズマを用いるため、電子以外の要素も影響する。そこで、気体および液体雰囲気にした材料に直接電子を当ててその腐食機構を明らかとするために核燃料サイクル開発機構の大型電子線加速器を用いたシステムを提案した。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

加速器開発は平成11年度をもって中止とされた。また、平成12年度については維持管理のみとされたため、JNC加速器を利用した本共同研究を継続することができなくなった。

よって、本共同研究は平成11年度をもって中止する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

2000年原子力学会秋の大会で発表予定

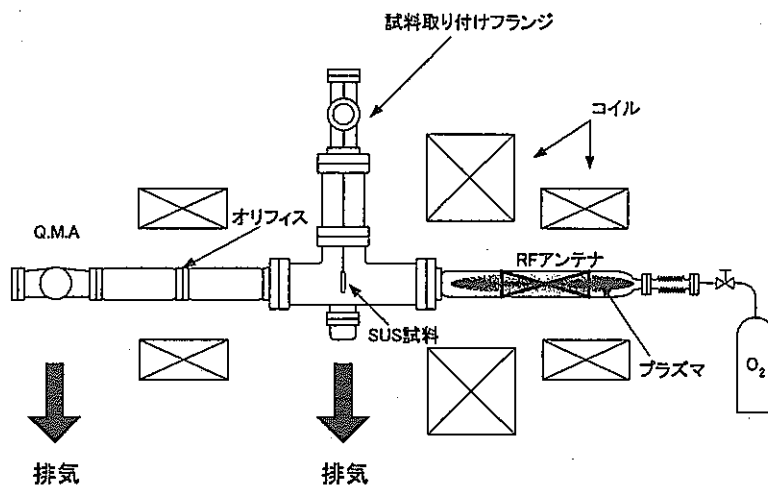


図 1: 実験装置概略図

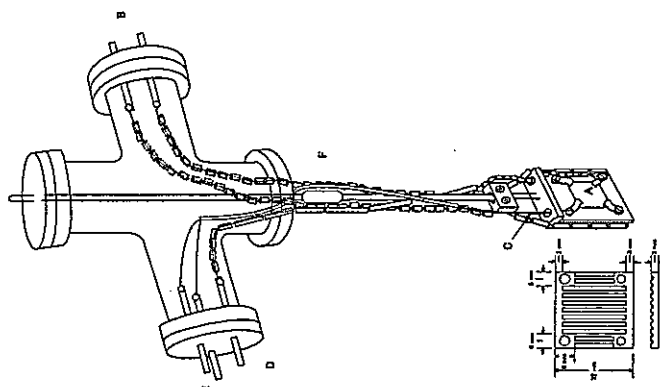


図 2: 試料取り付けフランジ A: 試料、B: 試料加熱用電流導入端子、
C: 熱電対、D: 試料バイアス用端子、E: 熱電対用電流導入端子

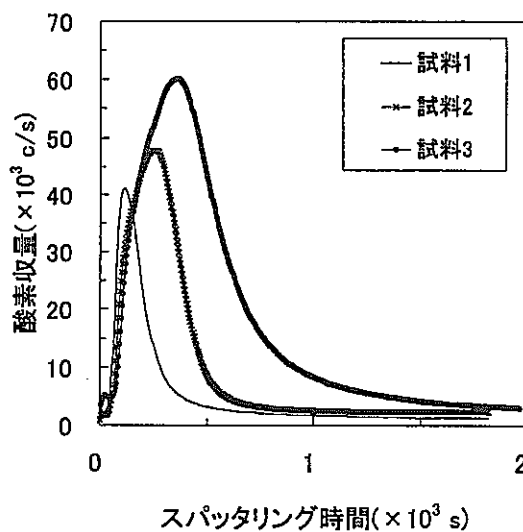


図 3: SUS304 の酸化層の深さ方向分布

試料 1: 照射なし、試料 2: 電位 0V、試料 3: 電位 50V

先行基礎工学研究に関する平成 11 年度研究概要報告書

研究協力テーマ	先進的再処理技術開発における量子化学的研究		
研究協力課題	ランタニド・アクチニド化合物における電子状態の第一原理計算		
研究者所属、氏名			
大 学 側	京都大学 大学院工学研究科 材料工学専攻 足立裕彦, 田中功, 西谷滋人, 小笠原一禎		
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 先進再処理技術開発 Gr 小田好博		
研 究 協 力 実 施 場 所	京都大学 大学院工学研究科 材料工学専攻 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 4 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 8 月 9 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 既存の再処理工程の高度化・最適化や将来の再処理技術の確立のためには、ミクロな現象の理解と量子化学的手法に基づく理論的な評価手法の開発が必要である。相対論 DV-Xα 法は、アクチニドを含む全原子に適用可能であり、実験結果をパラメータとして参照することなしに化合物の電子的物性を解析することが可能である。そこで本研究でランタニド・アクチニド化合物の物性計算に適用可能な相対論的 DV-Xα 法計算プログラムを開発し、解析手法の確立を目指す。			
【研究内容 (概要)】 再処理工程中に現れるランタニド・アクチニド化合物の物性を計算するには、相対論的効果を含む分子軌道を正確に計算することが可能な分子軌道プログラムが必要である。そこで相対論的 DV-Xα プログラムを開発することにより、ランタニド・アクチニド化合物の理論的解析を目指す。 具体的な研究内容としては、ランタニド・アクチニド元素の酸化物について、第一原理電子状態計算を行い、これらの化合物におけるエネルギー準位、化学結合状態を明らかにする。また、得られたデータを詳細に比較、検討することによりランタニド・アクチニド元素相互の、類似性、相違点を電子論的な立場から理解する。			
【使用主要施設】 Concurrent Systems Workstation (APE164-C2-9N-SYS05) 5 台			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、「先進的再処理技術開発における量子化学的研究—ランタニド・アクチニド化合物における電子状態の第一原理計算—」について下記の内容を実施した。

- (1) スピン分極の効果を考慮した拡張版相対論的 DV-X α 分子軌道計算プログラム開発
- (2) XANES シミュレーション用プログラム等、周辺プログラム群の開発
- (3) テスト計算 (MgO 中の Ni²⁺不純物等)
- (4) ランタニド三塩化物の電子状態計算 (継続中)

【研究成果（当該年度）】

既存の再処理工程の高度化・最適化や将来の再処理技術の確立のためには、ミクロな現象の理解と量子化学的手法に基づく理論的な評価手法の開発が必要である。ランタニド・アクチニドのような重元素を含んだ物質の電子状態計算を行う際には、スピン-軌道相互作用などの相対論効果を正確に取り扱う必要があるが、相対論 DV-X α 分子軌道法は、アクチニドを含む全電子に適用可能であり、実験結果を参照する事なしに化合物の電子的物性を解析することが可能である。しかし、既存のプログラムではスピン分極が考慮されておらず、磁性をもつ化合物などへの適用は難しかった。そこで今年度は、プログラム開発等、以下の項目について実施した。

- (1) スピン分極の効果を考慮した拡張版相対論的 DV-X α 分子軌道計算プログラム開発

これまでの相対論的 DV-X α 分子軌道計算プログラムでは、スピン分極の効果が全く考慮されていなかったため、化合物の磁性の解析が困難であった。また、C1 のような対称性の低い分子に関しては、相対論的に計算を行うことができなかった。そこで、クラマース 2 重項の縮重を仮定せず、これらを独立に取り扱い、更にスピンに依存したポテンシャルの表式を用いることによって、スピン分極の計算が可能なプログラムの作成を行い、これまで困難であった系についても計算可能にした。

- (2) XANES シミュレーション用プログラム等、周辺プログラム群の開発

これまで、DV-X α 分子軌道法で計算した結果を、さらに周辺プログラムを用いて状態密度やエネルギー準位等の計算を行い、様々な電子論的物性を計算してきた。今回、上記の拡張版相対論的 DV-X α 分子軌道計算プログラム開発を実施したことにより、これらの周辺プログラムをそのまま利用することが困難になったため、周辺プログラム群の整備を行った。同時に収束を促進するためのプログラムを作成し、これまで作成が面倒であった入力ファイルの自動生成プログラムを作成した。また、実験結果の解析や比較対照として XANES シミュレーション用のプログラムを開発した。

- (3) テスト計算 (MgO 中の Ni²⁺不純物等)

今年度作成した拡張版相対論的 DV-X α 分子軌道計算プログラムについて、MgO 中の Ni²⁺不純物等の簡単な系でテスト計算を行った。その結果、結晶場の分裂 (t_{2g} , e_g) の他に、不純物準位の相対論効果による分裂とスピン分極が同時に再現されることが確認された。つまり、MgO のバンドギャップ中に現れる不純物準位は上から順に $e_g \downarrow$ 、 $t_{2g} \downarrow$ 、 $e_g \uparrow$ 、 $t_{2g} \uparrow$ となり、 $t_{2g} \downarrow$ および $t_{2g} \uparrow$ はスピン-軌道相互作用によってわずかに分裂している。これにより、新しいプログラムがスピン分極と相対論効果を同時に評価できることが示された。

- (4) ランタニド三塩化物の電子状態計算 (継続中)

上記(3)のテスト計算で、相対論効果が適切に計算されていることが示されたことを受けて、より相対論的効果が大きく現れる系について計算を行った。

3 価のランタニドイオンとキレート錯体の錯生成定数は、原子番号とともに一般的には系統的に増加するが、ガドリニウム(4f⁷)のところで系統的変化からのずれがおきることがある。ランタニドでは、原子番号の増加に従い原子半径やイオン半径が減少するランタニド収縮と呼ばれる現象が知られているが、3 価のランタニドイオンの塩基性も原子番号の増加とともに減少する。これを反映して、錯生成定数は原子番号の増加とともに増大する。Gd において見られるこの系統的な傾向からのずれの原因は、ガドリニウムイオンの半径のランタニド収縮からのわずかなずれ、および Gd (f⁷ 配置) の配位子場安定化エネルギーが、他のランタニドイオンとの間にもつわずかな差に基づくものとされているが、定量的な説明は行われていない。

そこで、ランタニド三塩化物について計算を行い、特にこのガドリニウムブレイクについて、新しい計算プログラムでの評価を試みた。

図 1、2 に示すランタニド三塩化物の正味電荷の変化から、旧プログラム(nonspin)では $^{57}\text{La} \sim ^{70}\text{Yb}$ 間で単調な減少が見られるが、新プログラム(spin)では ^{63}Eu と ^{64}Gd において大きなずれが確認され、ガドリニウムブレイクが起きることが確認された。また、 ^{57}La 、 ^{70}Yb 、 ^{71}Lu の正味電荷は、どちらのプログラムでもほぼ同じ値になることが示された。図 3、4 に最高被占軌道を 0 としたエネルギー準位を示す。旧プログラムでも、5d と 4f にエネルギー準位の分裂が認められるが、これらは主に結晶場分裂によるものと考えられる。一方、新プログラムで計算した結果では、5d 及び 4f 軌道が大きく分裂しており、相対論的效果を正確に考慮する必要性が示されている。さらにここでも、 ^{64}Gd を挟んで両側で同様なエネルギー準位の変化が認められ、エネルギー準位においてもガドリニウムブレイクが起きていることが確認された。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、上記のランタニド三塩化物について電子論的な物性の計算を続け、実験結果と比較を実施する予定である。また、ランタニド・アクチニド酸化物についても同様の計算を行い、実験結果の比較及び理論的解析を実施し、必要であればプログラムの改良を行う予定である。

平成 13 年度は、前年度までに改良したプログラムを用いて、実際に核燃料サイクル中に現れるランタニド・アクチニド化合物の物性について解析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】

なし

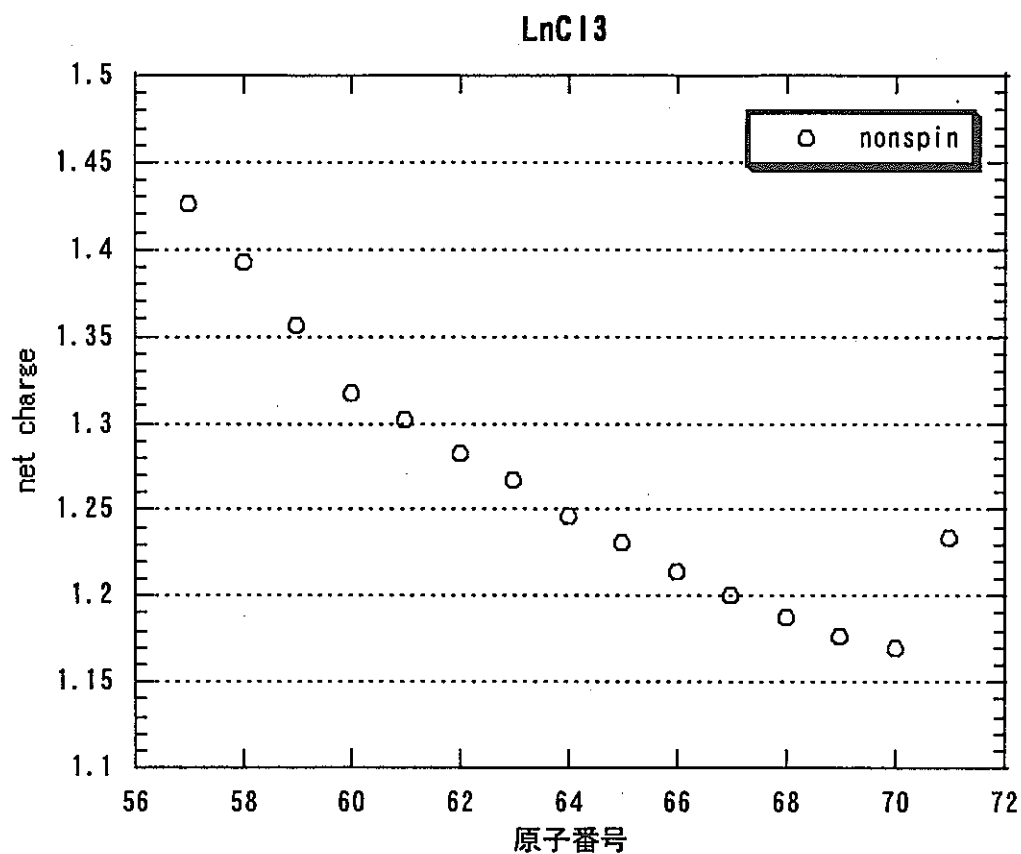


図 1. ランタニド三塩化物の正味電荷の計算結果 (旧プログラム)

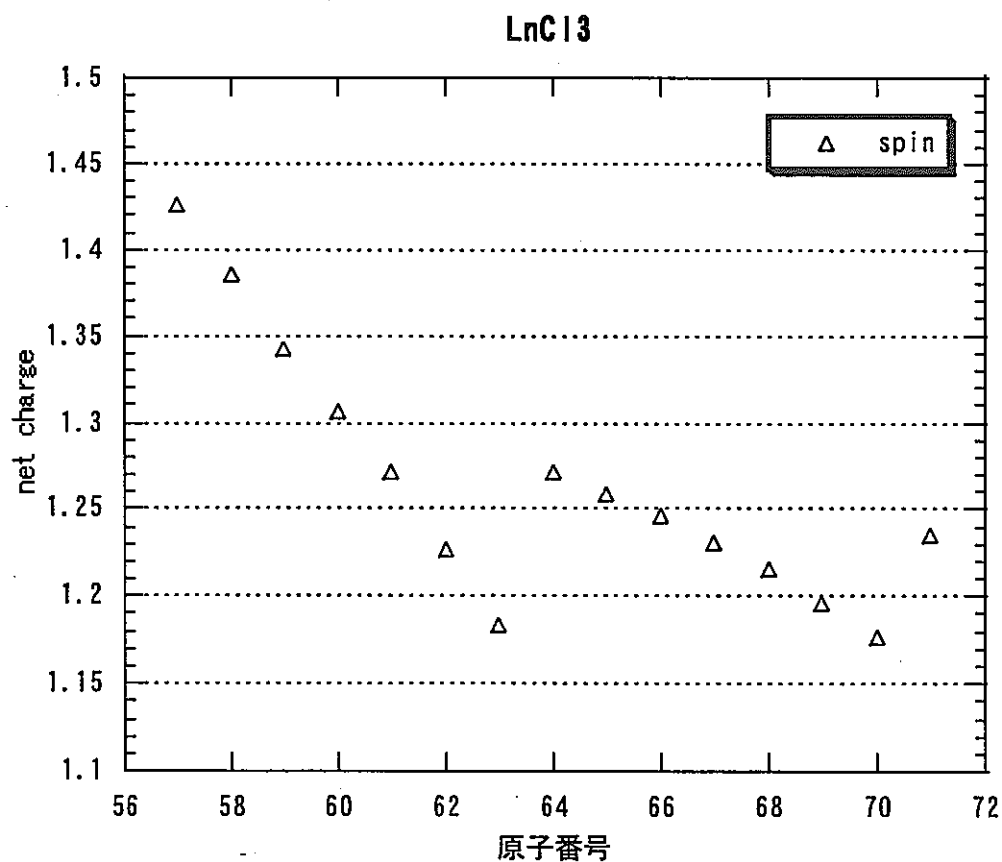


図 2. ランタニド三塩化物の正味電荷の計算結果 (新プログラム)

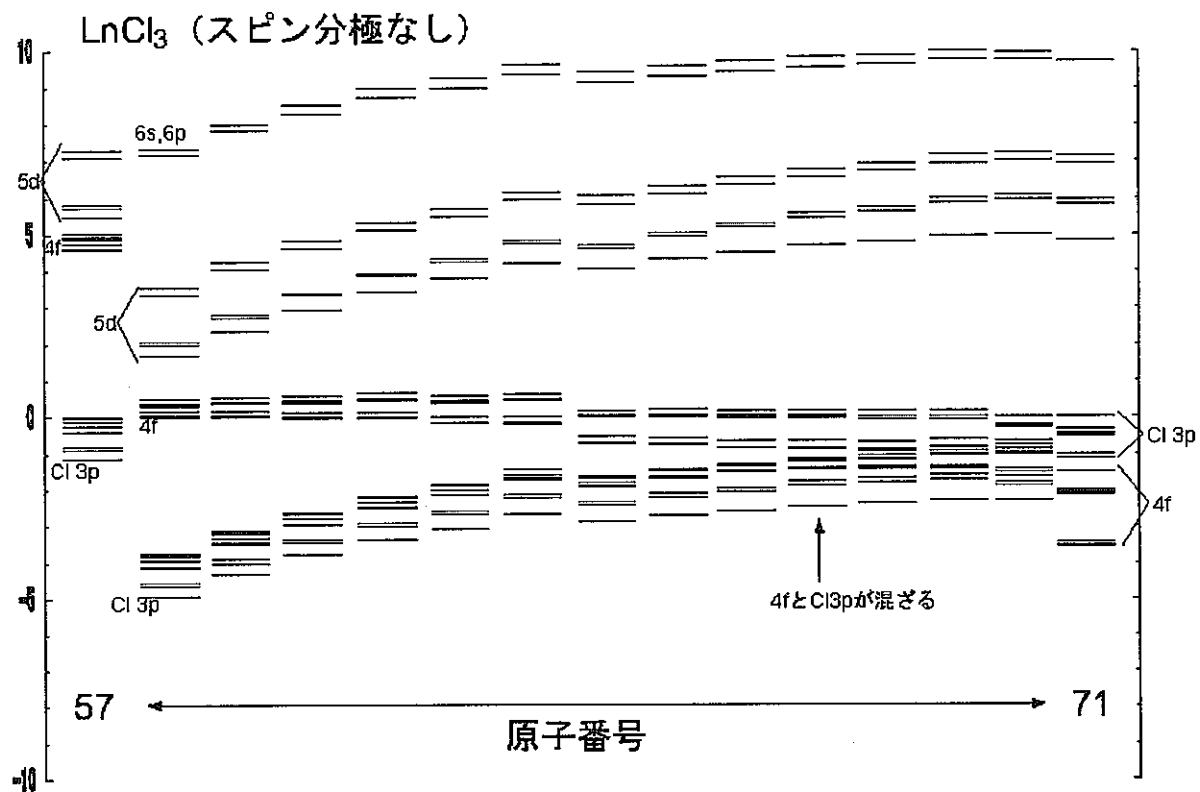


図 3. 最高被占軌道を基準としたランタニド三塩化物のエネルギー準位 (旧プログラム)

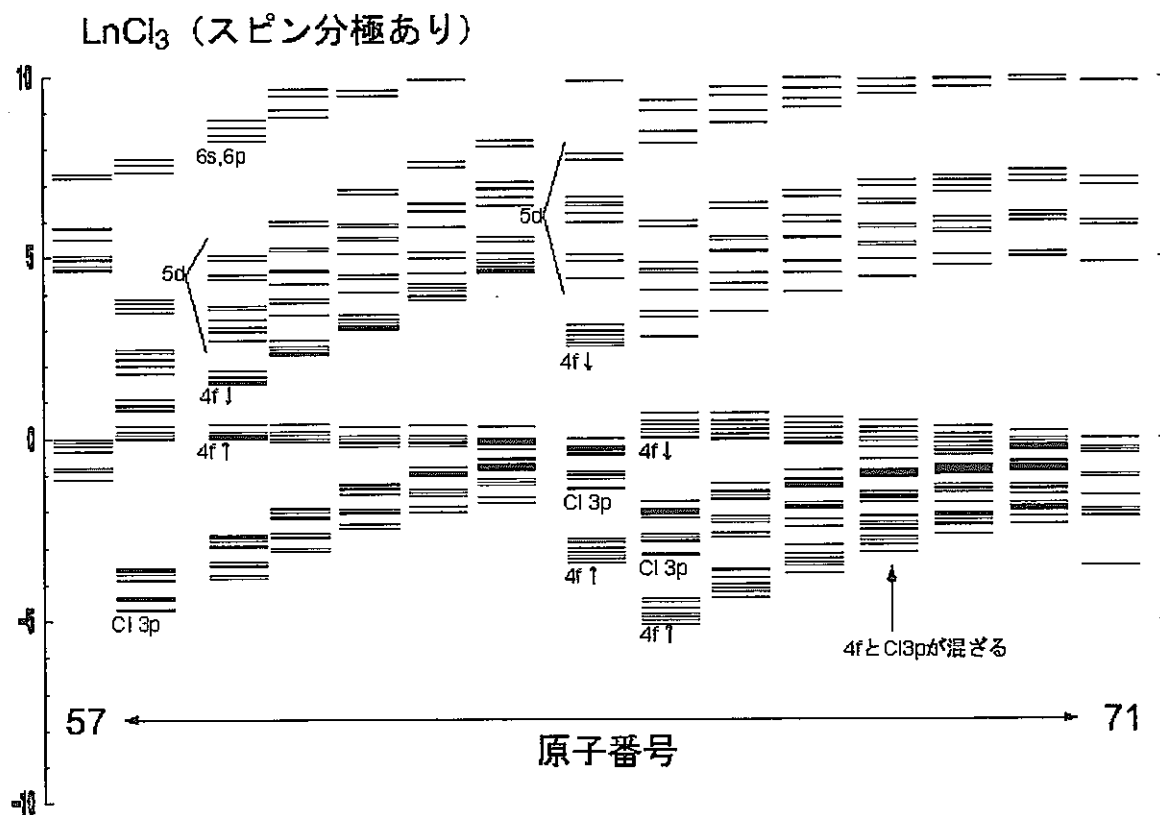


図 4. 最高被占軌道を基準としたランタニド三塩化物のエネルギー準位 (新プログラム)

先行基礎工学分野に関する平成11年度研究概要報告書

研究テーマ	先進的再処理プロセスの安定性に関する研究		
研究協力課題	先進的再処理プロセスに整合する溶媒抽出分離プロセスの検討		
研究者所属、氏名			
大学側	名古屋大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻 教授 山本一良, 助教授 榎田洋一, 助手 小林 登		
機構側	東海事業所 先進リサイクル研究開発部 先進再処理技術開発 Gr 小山智造, 野村和則		
研究協力 実施場所	名古屋大学工学部8号館 核燃料サイクル工学研究室 機構 東海事業所 先進リサイクル研究開発部 A棟		
通算研究期間 (予定)	平成11年10月 ~ 平成14年3月	当該年度 研究期間	平成11年10月5日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 経済性の革新的向上と廃棄物発生量の大幅低減を実現するために提案される先進的核燃料再処理分離プロセスは、晶析法を採用する等により、従来と異なるプロセスパラメータ（重金属負荷度、除染係数、流量率、温度等）で運転されることになるため、実用プロセス条件の選定に先立ち、化学プロセスフローシートに関して十分な変動範囲にわたったさまざまな視点からの基礎検討が必要である。本研究では、先進的核燃料再処理分離プロセスの化学プロセスフローシートに関して、さまざまな変動の及ぼす影響をプロセス試験および理論・計算解析により把握し、より経済性の向上と廃棄物発生量の低減を実現するプロセスとして高い完成度をめざすものである。			
【研究内容（概要）】 1. 化学プロセスフローシートの定常分離特性に関する研究 溶媒抽出分離プロセスでウラン、プルトニウム及びこれらに混入する主要な不純物の定常状態における分離特性（回収率、廃液発生量等）をプロセス計算解析によって明確にする。 2. 化学プロセスフローシートの変動後の分離特性に関する研究 溶媒抽出分離プロセスを代表例として選択し、ウラン、プルトニウム及びこれらに混入する主要な不純物の分離特性（回収率、廃液発生量等）がプロセスパラメータ（重金属負荷度、除染係数、流量率、温度等）の変動によってどの範囲まで変化するかをプロセス計算解析の観点から明確にする。 3. 分離プロセスシステムの微小変動が分離特性に与える影響に関する研究 現実の化学分離プロセスでは、通常の計算機解析では考慮されないような比較的微小な変動を避けることができない。溶媒抽出分離プロセスを代表例として選択し、このようなプロセスパラメータ（重金属負荷度、流量率、温度等）の微小な変動が再処理分離プロセスに与える影響の大きさをプロセス計算解析によって明確にする。			
【使用主要施設】 同位体分離カスケード解析装置（HP EWS C180）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、研究項目「化学プロセスフローシートの定常分離特性に関する研究」について下記の内容を実施した。

① 定常分離特性に関する計算解析コードの整備

溶媒抽出分離プロセスに対して適用可能である MIXSET（サイクル機構）、SEPHIS（Oak Ridge National Laboratory）、SOLE（名古屋大学）等の化学プロセスフローシート計算解析コードの相互比較をプロセスモデル、分配基礎データ、数値計算法の観点から行う。また、定常運転フローシートの一例に関して、ベンチマーク計算を行うとともに、計算コードの特殊性に依存しない評価方法を検討する。また、必要に応じて計算コードを改良し、本共同研究で使用する計算コードの整備を進める。さらに、計算解析と類似したプロセスフローシートについて、過去に実施された試験データを用いて、解析結果に実証性があることを確認する。

② 定常分離特性の把握

溶媒抽出分離プロセスの化学プロセスフローシートの定常分離特性（回収率、除染係数、廃液発生量等）を、①で検討した計算解析コードを用いて明確にする。

【研究成果（当該年度）】

先進再処理プロセスで採用が考えられる晶析法を採用する化学プロセスフローシートの定常分離特性に関して研究を行い、下記の研究成果を得た。

1. 定常分離特性に関する計算解析コードの整備および計算解析の実証性検討

溶媒抽出分離プロセスに対して適用可能である MIXSET（サイクル機構）、SEPHIS（Oak Ridge National Laboratory）、SOLE（名古屋大学）等の化学プロセスフローシート計算解析コードの相互比較をプロセスモデル、分配比モデル、数値計算法の観点から行った（表 1）。

晶析法を採用する先進的再処理プロセスに比較的近い、ドイツにて過去に行われた溶媒抽出実験結果によってこれらの計算機コードによる解析の妥当性を評価した。この結果、プロセス条件によっては、分配比モデルの違いが解析結果に影響するものの、いずれの計算機コードも実験結果を説明できることを確認した（図 1 参照）。また、用いる計算機コードによる結果の差違よりも、比較できる実験値のばらつきが大きく、直接の計算結果との比較が難しい場合もあることがわかった（図 2 参照）。

2. 定常分離特性の把握

晶析法を採用した後の溶媒抽出分離プロセス（図 3）では、有機相中のプルトニウムの濃度が従来プロセス（図 4）より高くなることがわかった。このため、有機第 2 相を形成することのないように考慮しつつ、プロセス条件の最適化が必要である。図 3 および 4 の計算結果における、有機相中のプルトニウム濃度については、図 5 に示すように、有機第 2 相を形成する境界濃度に値が近づいていることがわかった。

晶析法を採用した後の溶媒抽出分離プロセスの化学プロセスフローシートの定常分離特性（回収率、除染係数、廃液発生量等）を 1 で検討した計算解析コードを用いて明らかにした。晶析法を採用した後の溶媒抽出分離プロセスにおいても、ウランおよびプルトニウムの回収率は従来プロセスと比較して遜色がないものと考えられる。

また、FPの除染係数については、単純化したFPに対する分配比モデルを用いる解析により、晶析法を採用した後の晶析法を採用する溶媒抽出分離プロセスにおいても、従来プロセスと比較して遜色がないものと期待できることがわかった。さらに、晶析法を採用する先進的再処理プロセスから直接排出されるFPを含む水相の抽出残液の流量は従来プロセスの1/2にできることがわかった。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成12年度は研究項目「化学プロセスフローシートの変動後の分離特性に関する研究」について、下記の内容を実施する予定である。

① 変動の影響解析に関する計算解析コードの整備

溶媒抽出分離プロセスに対して適用可能であるMIXSET（サイクル機構）、SEPHIS（Oak Ridge National Laboratory）、SOLE（名古屋大学）等の化学プロセスフローシート計算解析コードの相互比較を定常運転フローシートからのプロセス変動（重金属負荷度、除染係数、流量率、温度等）に関して、ベンチマーク計算を行う。また、必要に応じて計算コードを改良し計算コードの整備を進める。

② 変動後の分離特性の把握

プロセス変動後の分離特性（回収率、廃液発生量等）変化を、①で検討した計算解析コードを用いて明確にする。

③ 解析結果の実証性検討

計算解析と同様のプロセスフローシートについて、過去に実施された試験のデータを用いて、解析結果に実証性があることを確認する。

平成13年度は研究項目「分離プロセスシステムの微小変動が分離特性に与える影響に関する研究」について、下記の内容を実施する予定である。

① 微小変動の影響解析に関する計算解析コードの整備

溶媒抽出分離プロセスに対して適用可能であるMIXSET、SEPHIS、SOLE等の化学プロセスフローシート計算解析コードは、そのままでは分離プロセスシステムがもたらす微小変動の影響解析に用いることが困難である。そこで、微小変動のもたらす効果をシミュレーションできる計算システムを開発する。具体的には、実際のプラントで観測される変動を調査し、これを反映した入力を計算コードに与える方法等により計算解析システムを完成する。

② 代表的な微小変動が分離特性に与える影響の把握

経済性の向上および廃棄物発生量の低減を考慮した溶媒抽出分離プロセスの化学プロセスフローシートにおいてプロセスの微小変動が分離特性（回収率、廃液発生量等）に与える影響を、①で検討した計算解析システムを用いて明確にする。

③ 解析結果の実証性検討

計算解析と同様のプロセスフローシートについて、試験データとの比較により解析結果に実証性があることを確認する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

(別添資料)

表 1 MIXSET, SEPHIS, SOLE コードの構成上の特徴

計算機コード名	Revised MIXSET	SEPHIS MOD4	SOLE
解析対象	PUREX 法 溶媒抽出分離プロセス	PUREX 法 溶媒抽出分離プロセス	PUREX 法 溶媒抽出分離プロセス
開発機関	核燃料サイクル開発機構	Oak Ridge National Laboratory	名古屋大学
代表的開発者	権田浩三, 岡紘一郎, 福田章二	W. S. Groenier, G. L. Richardson, A. D. Mitchell	Y. Enokida, I. Yamamoto
抽出溶媒	TBP	TBP	TBP
抽出溶質	硝酸, U(IV), U(VI), Pu(III), Pu(IV)等	硝酸, U(IV), U(VI), Pu(III), Pu(IV)等	硝酸, U(IV), U(VI), Pu(III), Pu(IV)等
分配比モデル	G. L. Richardson のモデル化	G. L. Richardson のモデル化	熱力学モデル ⁸⁾
物質収支計算	溶媒基準濃度に基づく収支計算	溶媒基準濃度に基づく収支計算	溶媒基準濃度に基づく収支計算
長所	使用実績が国内において多数ある。	使用実績が海外において多数ある	熱力学モデルに基づき、活量係数を理論的に取り入れているため、広い濃度範囲での適用が期待される。
短所	平衡分配比の取り扱いが経験的であり、適用範囲が限られる可能性がある。	平衡分配比の取り扱いが経験的であり、適用範囲が限られる可能性がある。	使用実績が少ない

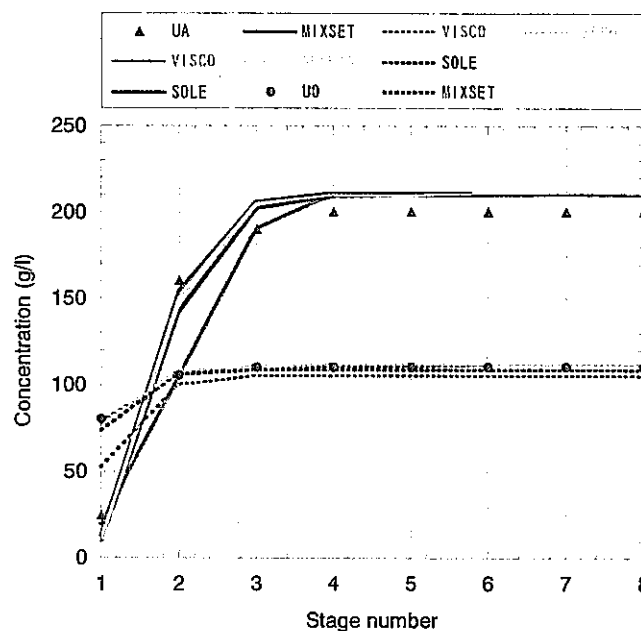


図 1 KfK で実施された 18~20℃でのウラン抽出実験結果の解析
(UA, UO は水相, 有機相 U 濃度の実験値を示す)

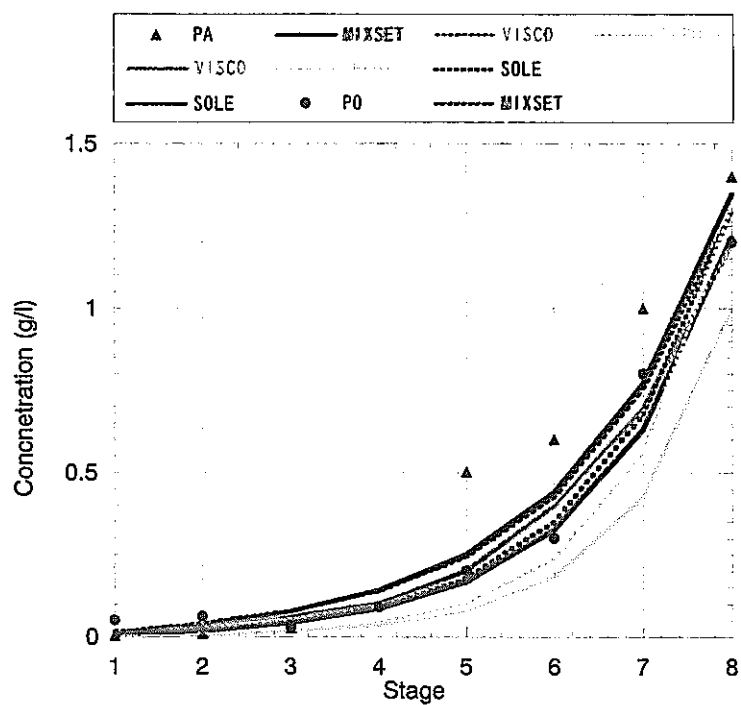


図2 KfK で実施された 50℃での抽出実験結果の解析(プルトニウム)

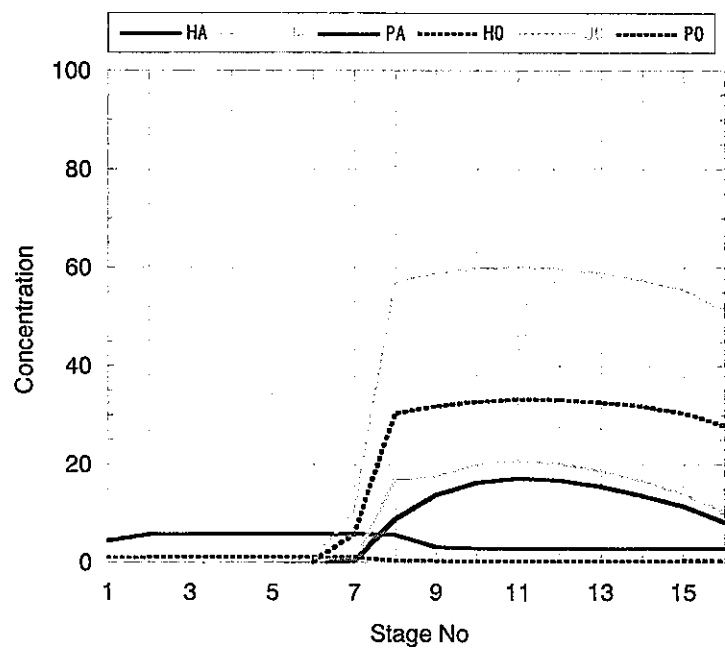


図3 晶析法を採用する溶媒抽出分離プロセスの計算解析結果
(HA, HO は水相, 有機相硝酸濃度 (mol/l), UA, UO は水相, 有機相 U 濃度 (mol/l),
PA, PO は水相, 有機相 Pu 濃度の計算値を示す)

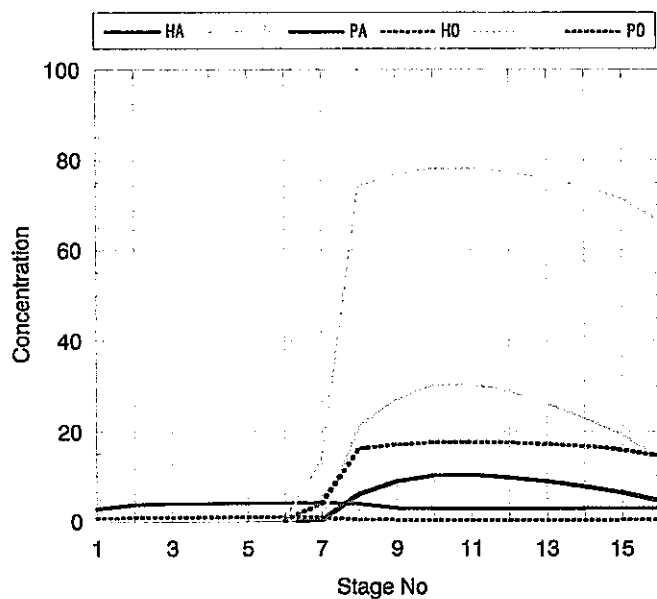


図4 晶析法を採用しない溶媒抽出分離プロセスの計算解析結果
(HA, HO は水相, 有機相硝酸濃度 (mol/l), UA, UO は水相, 有機相 U 濃度 (mol/l),
PA, PO は水相, 有機相 Pu 濃度の計算値を示す)

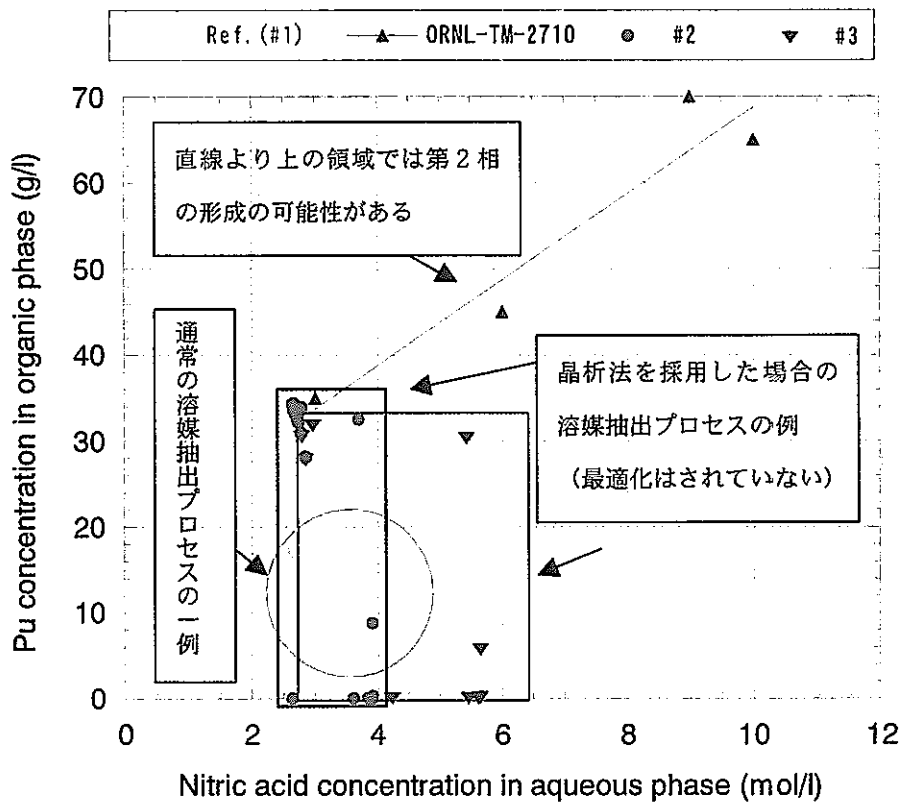


図5 Pu による有機第2相の形成領域と各段の計算された Pu 濃度

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	統括型乾式再処理プロセス研究		
研究協力課題	乾式分離プロセスの研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	京都大学 大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻 教授 岩瀬正則		
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 乾式プロセス Gr 明珍宗孝		
研 究 協 力 実 施 場 所	京都大学 岩瀬研究室 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター		
通算研究期間 (予定)	平成11年 9月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年 9月 6日 ~ 平成12年 3月 31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 使用済み核燃料の再処理技術として適用可能な新たな乾式分離法を開発することを最終目的とし、当面の課題としては、乾式再処理法のうち熔融塩電解法及び液体金属法を取り上げて系統的研究を行い、最適システムを構築する。実験的及び理論的検討を行い、ANL 法、RIAR 法等での欠点を克服できる経済的に優れたプロセスを構築することを目的とする。			
【研究内容（概要）】 本研究は以下の項目よりなる (1) <u>新たな分離系、電解法の探査、構築（平衡論的検討）</u> ：不均一相間における分離対象元素の熱力学的挙動、なかでも使用済み燃料に含まれる元素の酸化物（酸化物融体）あるいはハロゲン化物（ハロゲン化物融体）等の平衡関係を明らかにする。 (2) <u>高温融体を用いる分離工程の非平衡解析手法の確立</u> ：分離プロセスそのものは非平衡プロセスであるが、非平衡熱力学の取り扱いには不均一相相互間の界面における局部平衡を解明しなければならない。そこで均一相内の複数の示強変数相互間の関係を明らかにすることにより、不均一相相互間の界面における局部平衡の取り扱い方法を確立する。			
【使用主要施設】 ICP分析装置（京都大学）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成11年度は、電解法の基礎となるハロゲン化物含有電解質液体に関する状態図データ、熱力学データを得るために、MO-MX₂系（Mは金属元素、Xはハロゲン）における酸化物の相対部分モル自由エネルギーを測定し、これを基に同系の相平衡データを求めた。

【研究成果（当該年度）】

平成11年度に実施した文献調査の結果、本研究における課題である新たな分離系、電解法の探索及び構築、あるいは高温融体を用いる分離工程の非平衡解析手法の確立、いずれにせよこれらの課題を遂行するには、高温における熱力学平衡データとりわけ相平衡データが著しく不足しており、これらのデータを採取することが急務であることが判明した。なかでも電解法の基礎となるハロゲン化物含有電解質液体については、状態図データ、熱力学データの双方ともに欠落しており、これを採録することが急務であるとの観点に立ち、MO-MX₂系中の酸化物の相対部分モル自由エネルギーを測定し、これをもとに、同系の相平衡データを求めた。これらの成果は次項に述べるが、2000年11月開催のPMP2000国際会議にて京都大学と核燃料サイクル機構との共同研究の成果として発表の予定である。以下に発表予定の論文のアブストラクトを掲載する。著者中、下線付きは核燃料サイクル機構所属の研究者である。

Phase Diagrams of FeO-containing Slags Derived From Activity Measurements Y. Uchida, M. Iwase, A. McLean and M. Myochin

Abstract:

By using an appropriate thermodynamic model, it is possible to derive chemical potentials of components in binary, ternary, quaternary or even multi-components systems. In turn, phase diagrams can be derived from chemical potentials of components, determined through appropriate experimental techniques. The present paper is aimed at documenting such derivations of the phase diagrams by using experimental data for the activities of FeO in the systems, FeO-Al₂O₃-CaO, FeO-BaO-BaF₂, FeO-BaO-BaCl₂, FeO-BaO-SiO₂, FeO-CaO-CaCl₂ and FeO-SrO-SrCl₂.

さらに論文の骨子となる部分の抜粋を以下に掲載する。

The activities of FeO for CaO + CaF₂ + FeO ternary slags at 1623 K are shown in Figure 1. As given in this diagram, the FeO activities show significant dependence on the molar ratio of CaO/CaF₂. Within the homogeneous liquid region, the substitution of CaF₂ for CaO has an effect of raising the FeO activity, while the reverse effect is observed for CaO(s)-saturated slags. Similar behavior was also observed for the other MO + MX₂ + FeO systems. The phase diagram of the system CaO + CaF₂ + FeO is given for the temperature interval between 1673 and 1723 K, being based on the compilation of Mills and Keene. At 1623 K no ternary phase diagram has been given. A schematic illustration of the isothermal section at 1623 K, however, can be drawn by using the activity data given in Figure 1 and the binary phase diagrams of the systems CaO + CaF₂, CaO + FeO and CaF₂ + FeO; this is done in Figure 2. The isothermal section of the [CaO + CaF₂ + FeO] phase diagram would consist of the following regions; (1) [CaO(s) + liquid], (2) homogeneous liquid, (3) [CaF₂(s) + liquid], (4) [FeO(s) + liquid], (5) [CaF₂(s) + FeO(s) + liquid], (6) [CaO(s) + CaF₂(s) + liquid]. In addition to these regions, although they were tentatively neglected, solid solutions near CaO and FeO apices would also be possible. Consider, for example, slags of X_{CaO}/X_{CaF₂} = 60/40 at 1623 K. During the experimental run for the slags of this ratio, the slag compositions were changed along the straight line VW of Figure 2(a). The activity-composition relationship along this line determined in this study is shown in Figure 2(b). As illustrated in this diagram, the activities of FeO were unity at the FeO mole fractions between 1 and 0.80, corresponding to the presence of pure solid FeO(s) and liquid slag within this composition range. The presence of FeO(s) was confirmed by X-ray diffraction of the slag samples taken during the experimental runs. Point T' of Figure

2(b) corresponds to the boundary composition, i.e., point T of Figure 2(a). Since the activities of FeO were unity between $X_{\text{FeO}} = 1$ and 0.80, it can be deduced that the conjugation line within the two-phase region of ["pure" FeO + liquid] is given by the straight line TW of Figure 2(a). In Figure 3, open circles indicate the phase boundaries obtained from the activity data, while solid circles are based on chemical analysis.

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度の予定は以下のとおりである。

- (1) 新たな分離系の探査、構築（平衡論的検討）：不均一相間における分離対象元素の熱力学的挙動、なかでもとりわけ使用済み燃料の含まれる元素の酸化物（酸化物融体）あるいはハロゲン化物（ハロゲン化物融体）等の平衡関係を明らかにする。
- (2) 高温融体を用いる分離工程の非平衡解析手法の確立：分離プロセスそのものは非平衡プロセスであるが、非平衡熱力学の取り扱いには不均一相相互間の界面における局部平衡を解明しなければならない。そこで均一相内の複数の示強変数相互間の関係を明らかにすることにより、不均一相相互間の界面における局部平衡の取り扱い方法を確立する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

Y. Uchida, M. Iwase, A. McLean and M. Myochin, "Phase Diagrams of FeO-containing Slags Derived From Activity Measurements", 2nd International Conference on Processing Materials for Properties (PMP 2000), November 5-8, 2000, TMS, USA.

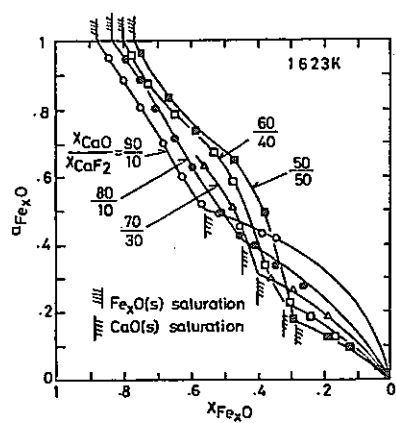


Figure 1

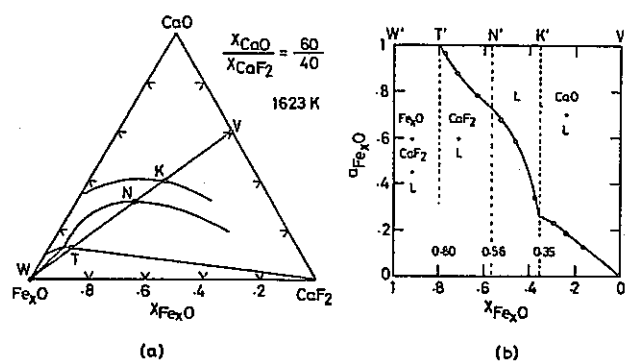


Figure 2

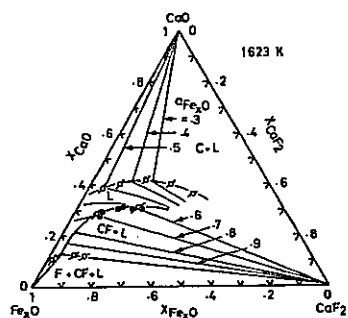


Figure 3

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	バイパック燃料の粒子評価方法に関する基礎研究										
研究協力課題	白色光レーザーによる粒子のリアルタイム 3 次元計測と評価										
研究者所属氏名	<table border="1"> <tr> <td>大 学 側</td> <td colspan="3"> 茨城大学 工学部 メディア通信工学科：教授 藤井寛一，講師 鶴野克宏 電気電子工学科：助教授 辻 龍介 大学院博士前期課程院生：大浦智功，大森智裕 </td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3"> 東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 プルトニウム燃料開発 Gr 鈴木 政浩 </td> </tr> </table>			大 学 側	茨城大学 工学部 メディア通信工学科：教授 藤井寛一，講師 鶴野克宏 電気電子工学科：助教授 辻 龍介 大学院博士前期課程院生：大浦智功，大森智裕			機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 プルトニウム燃料開発 Gr 鈴木 政浩		
大 学 側	茨城大学 工学部 メディア通信工学科：教授 藤井寛一，講師 鶴野克宏 電気電子工学科：助教授 辻 龍介 大学院博士前期課程院生：大浦智功，大森智裕										
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 プルトニウム燃料開発 Gr 鈴木 政浩										
研 究 協 力 実 施 場 所	茨城大学 共同研究開発センター（101 室） 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 乾式・材料試験棟										
通算研究期間 （予定）	平成 11 年 8 月 ～ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 8 月 28 日 ～ 平成 12 年 3 月 31 日								
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受け入れ ☒ 共同研究										
【研究目的】 核燃料リサイクルにおける燃料製造では経済性向上に加え、環境負荷低減及び核不拡散性向上の観点より、バイパック燃料（振動充填燃料）が注目されてきている。バイパック燃料では、1) 燃料粒子形状管理の高度化を基にした充填効率の向上、2) 真球形状燃料製造を目的とした製造条件の最適化、が課題となる。ここでは、燃料粒子形状管理の高度化を大きな研究目的とする。 燃料粒子形状管理とは、粒子の形状（粒径、表面状態、真球度等）を正確に把握し、特定な条件を満足させる粒子を選別することが最終目的である。粒度分布測定を始めとして顕微鏡及び SEM 観察等、粒径と表面観察については測定技術が確立されている。しかし、真球度を測る技術はまだ完成されていない。 本共同研究では、特に粒子径の小さな粒子（サブ mm 領域）を対象として、レーザーを用いた真球度測定手法の技術開発を実施する。											
【研究内容（概要）】 バイパック燃料とは数十から数百ミクロンの粒子状燃料（2～3 種類：大、中、小粒径）を燃料被覆管に振動充填したものである。バイパック燃料に用いる燃料粒子はゾルーゲル法等により製造するが、製造条件により生成される粒子の形状（粒径、真球度、表面状態等）にかなり影響することから、最適な製造条件を把握することが課題となる。また、燃料被覆管へ充填する際にも粒子形状の違いにより充填条件に影響を及ぼすため、対象となる粒子形状を把握することが重要となる。製造条件、充填条件を理解するには、使用している粒子の形状がどのようなものであるかを十分に把握しておくことが前提となる。つまり、粒子形状測定技術と評価手法を確立する必要がある。 現在の測定及び評価は、一部光投影法により粒径を計測しているものの、通常は光学顕微鏡等により粒子を拡大し、画像解析処理により測定している。この方法では粒子の 2 次元の情報しか得ることができないことから、3 次元的（立体的）把握が課題として残る。 そこで、粒子をより正確に評価するために、粒子形状に関する 3 次元情報を高精度・遠隔・迅速に測定することが期待できるレーザーを用いて、単一粒子、多粒子系を対象にした計測手法を開発する。 また、多粒子系では粒子検査及び評価と同時に特定な径を持つ粒子の選別システムについても検討する。											
【使用主要施設（装置）】 He-Cd⁺白色光レーザー（小糸製作所製 KLP-330 型）、3-CCD カメラ（ソニー TRV-900）など											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

研究協力テーマの課題に対応するため、以下の実験項目に従い、実験研究を進めている。

当該年度までの状況の概要を示す。

- (1) 「粒径、真球度の測定」には、白色光レーザーによる回折を応用することで必要な情報取得を目的に、シングルエッジ、2次元エッジ（直交座標）、針（円筒座標）、光沢を有する鉄球（球座標）、非光沢性球体（顆粒状薬品）による回折実験を実施した。白色光レーザー回折パターンから3原色への色分解作業を完了した。そこでの実験から大量の貴重なデータを得た状況である。真球度の判定にアラゴポイントを用いる事の有効性を確認するとともに、粒径の測定に有効な、ダブルアラゴポイント法を発案した。
さらに、シングルスリットによる回折基礎実験を実施し、3原色への色分解作業を完了した。
- (2) 「表面状態の計測」には、フレネル回折及びフラウンホーファ回折を応用しながら、表面状態の粗密、光沢度等の決定法として、回折が有効であるとの確信を得た。
- (3) 多粒子系を対象にした場合の一例として、平面上に敷き詰めた粒子群に関する「配列状態の判定」にはフラクタルオブティックスを応用することの有効性について基礎的な知見を得た。
- (4) 「目的とする粒子の選別」には、白色光レーザーによるマイケルソン干渉計法およびマッハツェンダー干渉計を用いるための基礎的なアプローチとして、シングルスリットにより生ずる干渉縞の幅に関する概念図の作成とコンピュータシミュレーションを進めている。

【研究成果】

当該年度（平成11年度）

研究計画	研究成果
単一粒子の粒子測定 (1) 「粒径、真球度の測定」 (2) 「表面状態の計測」	・シングルエッジ、2次元エッジ（直交座標）、針（円筒座標）、光沢を有する鉄球（球座標）および非光沢性球体（顆粒状薬品）による回折実験完了。 ・アラゴスポットの発生確認。非光沢性球体（顆粒状薬品）による回折実験完了。アラゴスポットは現れず、干渉縞のひずみを確認。 ・表面状態の粗密、光沢度等の決定法として、回折が有効であるとの確信を得た。 ・シングルスリットによる回折実験完了。3原色への色分解完了。 ・シングルスリットにより生ずる干渉縞の幅に関する概念図の作成とコンピュータシミュレーション実施。英文学術誌論文作成中
多粒子系の測定及び選別 (1) 「粒径、真球度の測定」	・多粒子系を対象とした粒子群（平面上）に関する「配列状態の判定」にはフラクタルオブティックスを応用することの有効性。

当初予定した以外の研究成果

- (1) 回折パターンの鏡像による二軸方向同時計測を発案、基礎的な実験により有効性を確認。日本光学会主催 Optics Japan'99 に発表。米国学術誌、“Applied Optics” に投稿中。
- (2) 円盤を回転させた際に生ずる神秘的な回折パターンを観測。アラゴスポットに関する新発見が得られると共に、3次元計測への応用を試行。米国学術誌、“Applied Optics” に投稿中。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

今後の予定としては、次の様な実験項目を考えている。

- (1) 「粒径、真球度、表面状態の測定」：上記白色光レーザ及び3原色分解の有用性に基づき、フレネル回折及びフラウンホーファ回折を厳密に区分した実験を続行する。
- (2) 従来の単色レーザ光では得ることの出来ない明瞭で緻密な3原色分解計測から、リアルタイム3次元可視化表示法を具体化する。
- (3) 「表面状態の計測」には、散乱およびスペックルパターン法を用い回折実験法のクロスチェックを行う。
- (4) リアルタイム3次元の可視化計測の実行を目的として3原色レーザ光によるマイケルソン干渉計実験を実行する。空気流の予備計測実験およびガラス板を重ねてZ軸方向の被測定量を加味した干渉縞の断層からリアルタイム3次元選別への確かな心証を得ている。
- (5) マッハツェンダー干渉計法の応用により、ホログラフィーと同等であり、かつ、リアルタイムの成果を試行する。ホログラフィーによるクロスチェックを準備中。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) “レーザ回折による小粒子充填物の評価”
鵜野克宏、鈴木政浩、藤井寛一
日本光学会主催、Optics Japan '99, ポスターセッション(1999年10月)
- (2) “Rediscover on classical Arago spot for three dimensions measurement with white-light laser”
K.Uno, M.Suzuki and K.Fujii
Graduate school of Science and Engineering, Ibaraki University, Japan
Applied Optics に投稿中
- (3) “Three dimensions measurement of small particle by Fresnel Diffraction with white-light laser”
K.Uno, M.Suzuki and K.Fujii
Graduate school of Science and Engineering, Ibaraki University, Japan
Applied Optics に投稿中

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	加速器を利用した核特性に関する研究		
研究協力課題	光核反応における中性子計測法の開発		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東北大学 大学院理学研究科附属原子核理学研究施設 教授 笠木治郎太, 助手 山崎寛仁		
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 先進リサイクル解析評価 Gr 野村茂雄, 馬場務, 原田秀郎, 中村詔司, 古高和禎		
研 究 協 力 実 施 場 所	東北大学 大学院理学研究科附属原子核理学研究施設 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 実規模試験棟		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 8 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 8 月 17 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
本研究の目的は、将来的に重要な MA 等の中性子放出数データを測定するため、安定原子核を対象に γ 線（または電子線）により原子核を励起し、励起状態から放出される中性子の測定方法の開発を計ることにある。			
【研究内容（概要）】			
原子炉を利用して、超ウラン核廃棄物の消滅・転換のためのシステムを検討するためには、対象とする原子核の励起エネルギーに対する中性子放出数及びエネルギー分布等の中性子データが不可欠である。本研究では、原子核に γ 線を吸収させることにより原子核を励起し、励起状態から放出される中性子のエネルギーと多重度（放出数）の測定を行いその方法を確立する。安定原子核を標的に実験を行うが、将来的には、超ウラン原子核を対象とした測定システムを開発するため、様々な方法を試みる。 原子核励起には、電子線の直接照射による (e,e') 反応、標識化光子の利用、更に、レーザコンプトン γ 線の利用等を行う。中性子測定には、同軸型中性子検出器や、多重中性子検出器を用いた飛行時間測定法等を行う。			
【使用主要施設】			
電子ライナック, 1.2GeV ストレッチャー・ブースタリング, 光子標識化装置（東北大学原子核理学研究施設）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成11年度は、同軸型中性子検出器の整備及び性能試験を行い、更に、東北大学原子核理学研究施設の標識化光子実験コースの整備を実施した。

【研究成果】

平成12年3月までの研究成果の概要をまとめる。

（1）多重中性子計測器の性能試験

今年度は、同軸型中性子検出器の整備を進め、整備された検出器により ^{252}Cf 線源を用いて中性子を測定した。

同軸型中性子検出器は、外径 250mm ϕ 、内径 75mm ϕ 、高さ 400mm のポリエチレンの筒を減速材とし、筒の外周部、中心から半径 102mm の位置に 24 本の ^3He 比例計数管を配置した構造を持っている。比例計数管 4 本を一組の検出器として用い（全体が 6 個の検出器として動作する）、一回の核分裂事象で減速された中性子の検出される個数を測定した。図 1 は検出された熱中性子の頻度と、時間の関係を示したもので、ほぼ 150 μs の幅のピークが存在している。この時間は、中性子が減速されるのに要する時間である。図 2 には、300 μs の間にヒットした検出器数の頻度分布である。 ^{252}Cf の核分裂からの中性子放出数は、平均 3.8 であるが、今回の検出器系により検出された中性子数の平均は 1.2 となり、系の検出効率がかなり小さいことがわかる。今回の結果を説明し、今後より最適な検出器系を検討するため、モンテカルロプログラム MCNP を用いた計算が進められている。

（2）標識化光子実験コースの整備

東北大学原子核理学研究施設の 200MeV 標識化光子実験コースの整備を進め、ストレッチャー・ブースタリングからの 200MeV 連続電子線を第 1 実験室に導き、 γ 線発生標的を照射した。散乱電子は電磁石で運動量分析され、プラスチック検出器で検出される。散乱電子と発生 γ 線を同時に観測し、50 から 200MeV までのバックグラウンドの少ない標識化光子が使用可能であることが判った。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成12年度は、中性子多重度検出器の構築をすすめ、電子線を用いた測定を実施し、中性子多重度計測系の性能評価を実施する予定である。

平成13年度は、様々な原子核を対象に電子線を用いた実験をすすめ、中性子多重度の測定を実施する予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

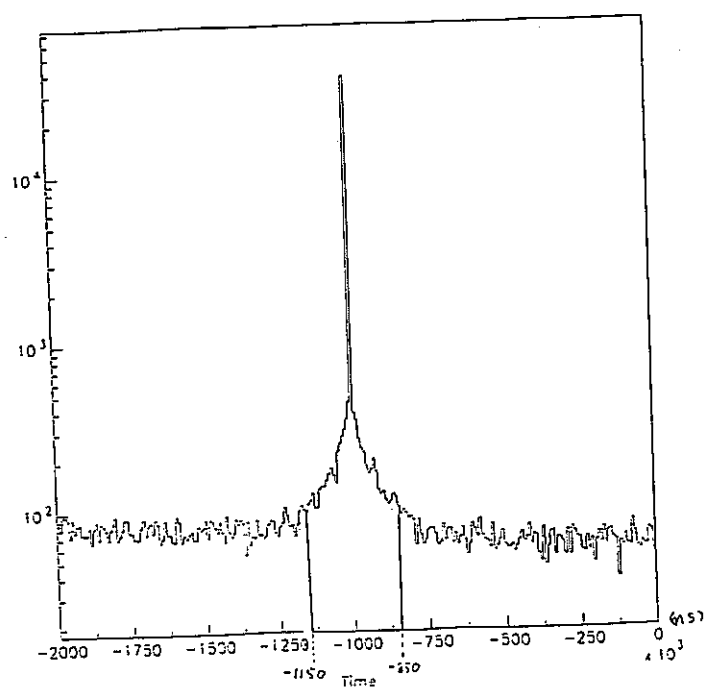


図1 熱中性子計測の時間分布。

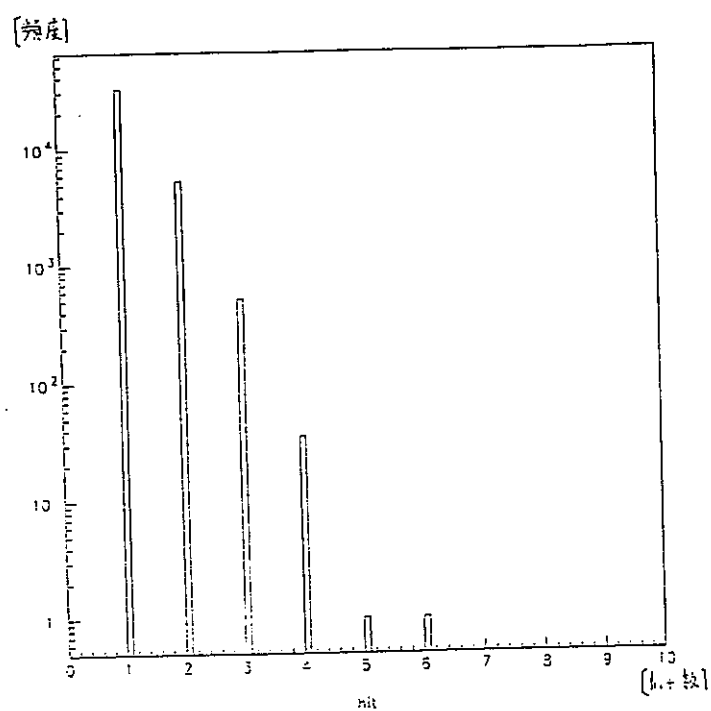


図2 中性子検出器のヒット分布。

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	計算科学的手法による物性研究		
研究協力課題	バンド計算による f および d 電子系物質の物性に関する研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京理科大学 理工学部 教授 浜田典昭 京都産業大学 理学部 助教授 山上浩志		
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 先進リサイクル解析評価 Gr 馬場務, 原田秀郎, 中村雅弘, 手島正吾		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京理科大学 理工学部 物理学科 浜田研究室 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 実規模開発試験室		
通算研究期間 (予定)	平成11年9月 ~ 平成14年3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年9月7日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
当該研究は、先進核燃料サイクルにおいて、核燃料となるアクチニド核種に対する物性データの整備の一環として実施される。ここでは、量子理論に基づくバンド計算法により、核燃料物質がもつ安定な電子状態を数値計算により導出し、さらに物性値の解析を行い、核燃料物性データ整備に反映する。			
【研究内容（概要）】			
核燃料物質を構成するアクチニド系の原子は、原子番号が大きく、5 f 磁性電子が価電子となっている。そのため、これらの化合物は、電子間に強い相互作用が働き、単純金属とは異なる特異な性質（重い電子系、超伝導、磁気秩序など）を示すことが分かっている。 そのため、本研究では、アクチニド系化合物の電子状態を適切に計算するために相対論的バンド計算法を発展させ、高い精度で電子状態の計算を行い、電子散乱を決定するフェルミ面の解析から物性値の導出を行う。 まず微細な実験結果があるアクチニド系化合物に対しバンド計算を行い、エネルギー最大をもつ電子エネルギー面（フェルミ面）の構造を導出し、実験値と比較する。続いて、UO_2、UC 等の核燃料物質に適用し電子状態の解析を行う。 フェルミ面の構造解析から、比熱、圧縮率等（静的物性値）を求め、さらに電子の輸送理論とフェルミ面上の解析から熱伝導率（動的物性値）を求める。 得られた結果を解析することにより、核燃料に関する基礎物性データ整備に必要な情報をまとめる。			
【使用主要施設】			
VP300/16（大洗情報センターの計算機）			
【進捗状況（当該年度までの概要）】			
平成11年度は、LAPW 法における Takeda-Kuebler を基に相対論的バンド計算プログラムの開発を行い、これをウラン化合物の UGe_2 に適用し、物性解析を実施した。			

【研究成果（当該年度）】

相対論的バンド計算法を開発し、ウラン化合物である強磁性体 UGe_2 に適用した。価電子にウランの $5f, 6p, 6d, 7s$ 軌道とゲルマニウムの $4s, 4p$ 軌道を選択した。

(a) フェルミ面について

電子エネルギーバンド解析の結果、フェルミエネルギーを横切るバンドは4本あり、エネルギーの低いバンドから数えて、フェルミ面は、79, 80, 81, 82番目のバンドから作られていることが分かった。すなわち、78番目以下のバンドはすべて電子で占領されていて、83番目以上はすべて電子が空の状態であった。比熱、電気伝導、熱伝導はこの4枚のフェルミ面の構造により決定される。フェルミ面に関する実験結果との比較を行った。計算ではa軸とb軸方向にフェルミ面が開いているが、これは高磁場磁気抵抗測定の実験結果と一致した。ド・ハース-ファン・アルフェン振動数(dHvA振動数)の角度依存性の実験結果と比較したところ、高振動部分は良い一致を示したが、実験結果を全て説明することはできなかった。高振動部分の電子のサイクロトロン有効質量は実験結果と良い一致を示した。

(b) 状態密度と比熱について

電子が散乱して比熱、電気伝導、熱伝導に寄与することができるのは、フェルミ面近傍の電子だけであり、どの電子がこのエネルギー近傍を占めているかが重要となる。よって、エネルギーEの関数で電子の占める個数(状態密度 $D(E)$)を各軌道ごとに計算した。解析の結果、ウランの5f軌道がまさにフェルミエネルギーで極大の状態密度をもち、フェルミ面は5f電子が作っていることが分かった。フェルミエネルギーの状態密度の計算から電子比熱係数は、実験値は $35[\text{mJ/K}^2\text{mol}]$ に対し、計算値は $22.725[\text{mJ/K}^2\text{mol}]$ であった。重い電子系の特徴は通常、数 $[\text{mJ/K}^2\text{mol}]$ の電子比熱係数が数十倍から数百倍になることであり、計算結果は重い電子系であることを示している。

(c) 磁気モーメントについて

ここで用いた相対論的スピン分極密度汎関数法は、相対論を扱っているためスピン自由度が自然に理論の中に現れるため、スピン演算子の期待値の計算から、上向きスピンと下向きスピンのそれぞれの電子の状態密度を得ることができる。その結果、ウランの5f軌道の電子が、スピン軌道相互作用により、上向きスピンと下向きスピンのエネルギー準位が大きくずれ、磁気モーメントの原因であることが分かった。ボーア磁気モーメントを単位として、互いに逆向きで軌道モーメントが2.14、スピンモーメントが1.746と得られた。軌道とスピンの磁気モーメントが逆向きであることは5f軌道の重要な特徴である。全磁気モーメントは0.419が得られた。しかし、実験値は1.43であり理論値はこれの1/3倍にとどまった。

(d) 考察

フェルミ面の詳細な構造と磁気モーメントの結果は、実験とのずれがあった。その理由の1つには、局所密度近似法を用いたことで、軌道角運動量が過小評価されていると考えられる。

軌道磁気モーメントの大きさが実験と比べて小さいようであり今後の課題も残ったが、ウランなどの重い元素を含む化合物についても、相対論的効果を適切に考慮すればバンド計算が物性解明の有効な道具になることが確かめられた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成12年度は、反強磁性絶縁体ウラン酸化物の電子構造を調べ、物性評価を実施する予定である。

平成13年度は、平成12年度の結果をさらに高精度化し、物性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) 手島、山上、浜田、相対論的LAPW法による強磁性 UGe_2 の電子状態とフェルミ面、日本物理学会「1999秋の分科会」岩手大学 26pR-14.

2) Tejima, Yamagami, Hamada, Electronic Structure and fermi Surface of Ferromagnetic UGe_2 by Relativistic Spin-Polarized Linearized APW method, Journal of the Physical Society of Japan. (投稿中)

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	難分解性廃棄物の超臨界水酸化分解に関する基礎研究		
研究協力課題	フッ素系潤滑油の超臨界水による分解に関する研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東北大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 教授 新井邦夫, 助教授 阿尻雅文		
機 構 側	東海事業所 環境保全・研究開発センター 環境保全部 技術開発 Gr 佐々木紀樹		
研 究 協 力 実 施 場 所	東北大学 大学院工学研究科 化学工学専攻 新井研究室 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 工学試験棟		
通算研究期間 (予定)	平成11年 8月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年 8月10日 ~ 平成12年 3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 フッ素系潤滑油等のハロゲン化炭化水素類を含む廃油は、焼却した際の炉壁腐食及びダイオキシン類の発生等の問題があるため、焼却処理を行わずに保管されている。高温高压の水を用いて有機物を分解する超臨界水処理法は、ダイオキシン類を発生することなくハロゲン化炭化水素類を分解できることが知られており、その廃油処理技術としての適用性の評価を目的として、大学との共同研究を実施する。			
【研究内容（概要）】 超臨界水による廃棄物分解技術の放射性廃油処理への適用性を評価するためには、廃油の分解条件に関する評価が必要となる。本研究では、廃油成分のうち特に分解処理が難しいとされているフッ素系潤滑油の分解条件に関するデータの取得を行う。 まず、バッチ式反応装置を用いて分解試験を実施し、フッ素系潤滑油の分解条件を明らかにするとともに、耐食性超臨界反応装置の開発を行う。次に連続式反応装置による分解試験を行い、連続処理した際の問題点を摘出してその解決を図る。			
【使用主要施設】 超臨界水酸化試験装置（東北大学） 表面分析装置（サイクル機構）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成11年度は、バッチ式反応装置による鉍物油及びフッ素系潤滑油の分解試験を実施し、超臨界水によってほぼ完全に分解されることを確認した。

【研究成果】

以下に、平成11年度の研究成果をまとめる。

(1) 鉍物油の分解試験

バッチ式反応装置による鉍物油の分解試験を実施した。

試験装置の概要を図-1に示す。反応容器の加熱に使用したサンドバスは、底面から吹き込まれる圧縮空気により流動化されたアルミナ粉末を電気ヒーターによって加熱し熱媒体として利用する加熱装置であり、バス内の温度の均一性が良いことと高温に加熱できることが特徴である。試験は、SUS316製、内容積6cm³の反応容器に鉍物油0.042g、水0.3cm³、30%過酸化水素水1.8cm³を封入し、所定の温度に加熱しておいたサンドバスに反応容器を浸漬した。予め定めておいた反応時間に達したら、反応容器をサンドバスから取り出し、冷却水の中に浸して反応を停止させた。反応終了後の水溶液は、全有機体炭素計(島津 TOC-5000A)を用いて全有機体炭素濃度を測定し、この値より鉍物油の分解率を算定した。試料には、ネオバック MR200(松村石油)を使用した。

400℃での試験結果を図-2に示す。試験は、圧力30MPa、鉍物油濃度2wt%、過酸化水素濃度26wt%(鉍物油を二酸化炭素と水に分解するために必要な量の2倍量)の条件で実施した。反応時間15分での分解率は、99.7%であり、超臨界水中では鉍物油が短時間で酸化分解されることが明らかになった。

(2) フッ素系潤滑油の分解試験

バッチ式反応装置によるフッ素系潤滑油の分解試験を実施した。

分解試験に使用したフッ素系潤滑油は、ダイフロイル#10(ダイキン)及びフォンブリン Y25/6(Montefluos)の2種類である(図-3参照)。試験は、鉍物油の場合と同様の方法で実施した。ただし、反応容器は、内容積12cm³のものを使用し、フッ素系潤滑油の分解によって発生するフッ酸及び塩酸を中和するため、中和剤として水酸化ナトリウムを反応容器に加えた。反応容器に封入したフッ素系潤滑油、30%過酸化水素水、1MNaOH溶液の量は、それぞれ、450℃の場合には0.036g、0.53cm³、1.3cm³、500℃の場合には0.028g、0.40cm³、1.0cm³、550℃の場合には0.024g、0.35cm³、0.9cm³である。

図-4にダイフロイルの分解試験結果を示す。試験は、圧力30MPa、ダイフロイル濃度2wt%、過酸化水素濃度8.8wt%(ダイフロイル中の炭素を二酸化炭素に酸化するために必要な量の4倍量)、水酸化ナトリウム濃度0.73mol/dm³(加熱前の濃度。ダイフロイルが完全分解した際に生成するハロゲン化水素の量と等量)の条件で実施した。450℃では、反応時間15分で未分解のダイフロイルが1.2%残留したものの、温度を500℃に上げることにより、反応時間15分で99.9%以上の分解率を得ることができた。

次に、図-5 にフォンブリンの分解試験結果を示す。試験は、ダイフロイルの場合と同じ条件で実施した。ただし、フォンブリンの分解率が低かったため、分解率の評価には全有機体炭素濃度を使用せず、試験後反応容器内に残留したフォンブリンの重量から算定した。なお、反応後の水溶液中の全有機体炭素濃度を数点測定したが、10～20ppmと低い値であった。図-5 からわかるように、フォンブリンの分解率は、ネオバック及びダイフロイルに比べてはるかに低く、温度 550℃、反応時間 30 分の条件でも 70%の分解率しか得られなかった。

そこで、フォンブリンの分解率を向上させるための試験として、過酸化水素濃度(図-6)及び水酸化ナトリウム濃度(図-7)をパラメータとした試験を行った。しかし、図-6 及び図-7 からわかるように、過酸化水素濃度及び水酸化ナトリウム濃度を変えることによる分解率の向上はほとんど見られなかった。次に、フォンブリン濃度をパラメータとした試験を実施した。図-8 からわかるように、フォンブリン濃度を 2wt%から 0.5wt%へ減らすことにより、分解率は 70%から 98%へと向上した。

廃油濃度 0.5wt%では、処理量が少なく、装置を大型化する必要性が出てくるため、コスト上の問題となる。しかし、全廃油中に占めるフォンブリンの割合は 10%以下と低いため、ネオバック等と混合して処理することにより、廃油濃度を 2wt%程度に保ったままで処理可能になると考えられる。

以上の試験結果により、廃油の主な成分であるネオバック、ダイフロイル、フォンブリンが超臨界水中でほぼ完全に分解されることが確認された。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、フォンブリンの分解率向上試験と連続式反応装置による模擬廃油の分解試験を実施する予定である。

平成 13 年度は、模擬廃油の連続分解試験で摘出された問題点の解決を図る予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

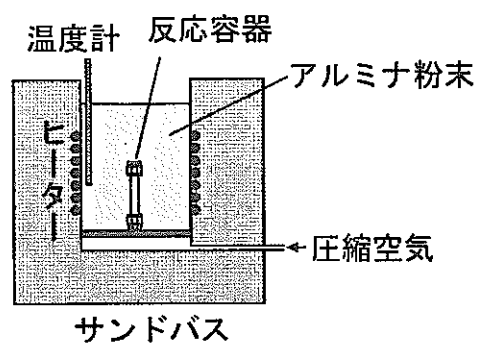


図-1 試験装置の概要

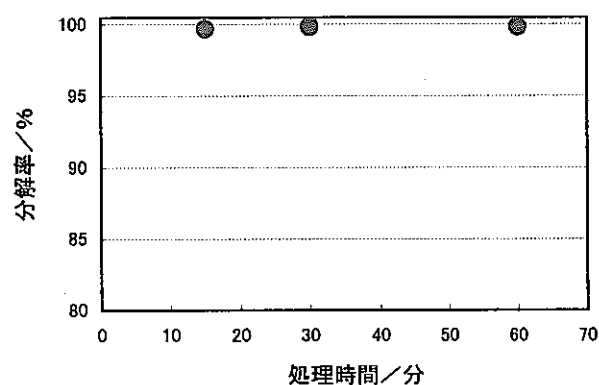


図-2 錫物油分解率の処理時間依存性

処理条件：温度 400℃、圧力 30MPa、錫物油濃度 2wt%、
過酸化水素濃度 26wt%

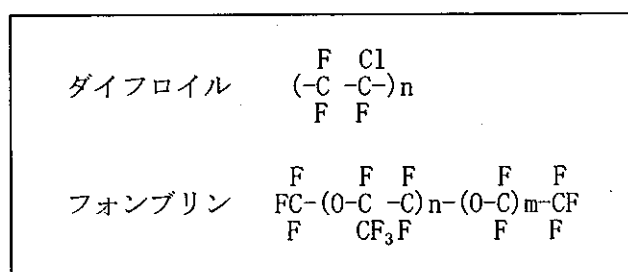


図-3 フッ素系潤滑油の化学式

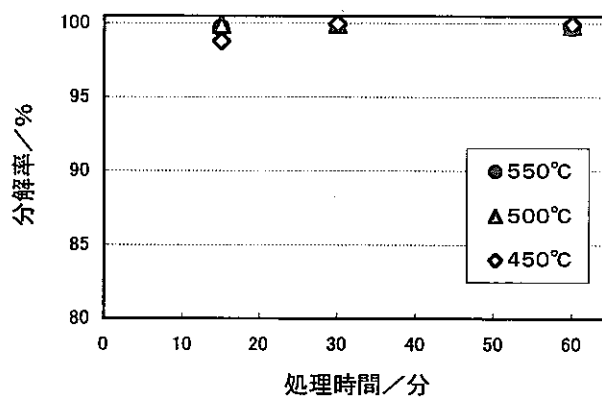


図-4 ダイフロイル分解率の処理時間及び温度依存性

処理条件：圧力 30MPa、ダイフロイル濃度 2wt%、過酸化水素濃度 8.8wt%
水酸化ナトリウム濃度 0.73mol/dm³

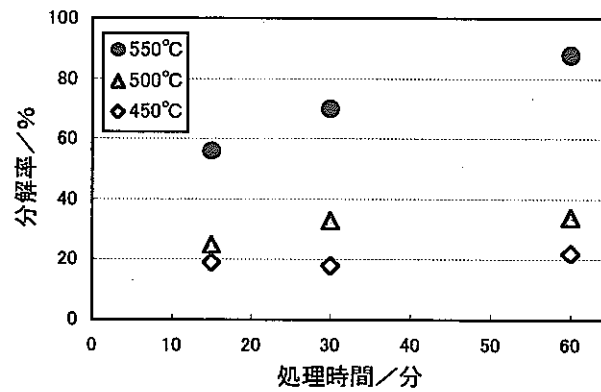


図-5 フォンブリン分解率の処理時間及び温度依存性

処理条件：圧力 30MPa、フォンブリン濃度 2wt%、過酸化水素濃度 8.8wt%
水酸化ナトリウム濃度 0.73mol/dm³

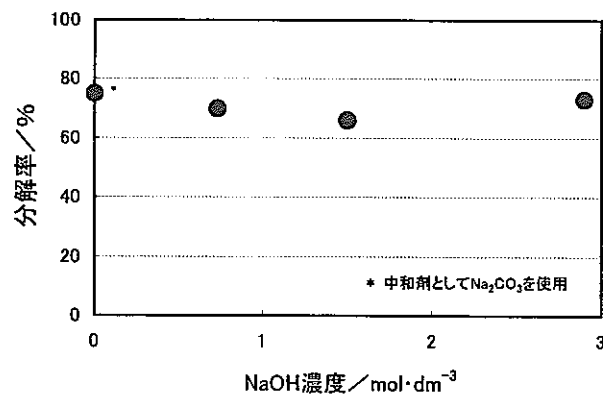
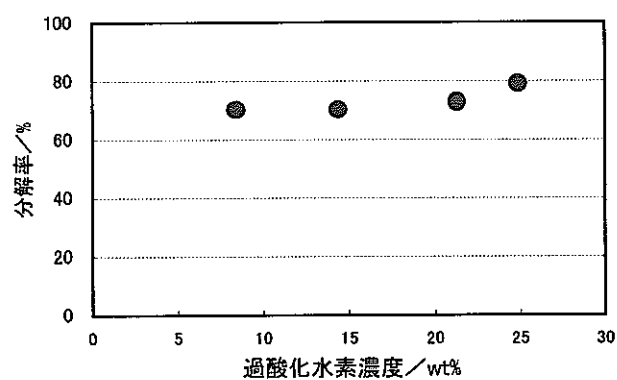
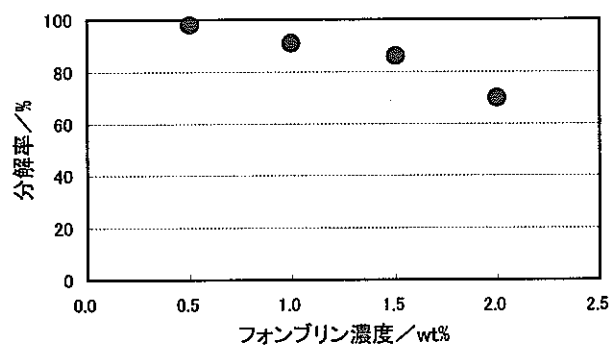


図-6 フォンブリン分解率の水酸化ナトリウム濃度依存性

処理条件：温度 550°C、圧力 30MPa、フォンブリン濃度 2wt%、
過酸化水素濃度 8.8wt%



図－７ フォンブリン分解率の処理時間及び温度依存性
 処理条件：温度 550℃、圧力 30MPa、フォンブリン濃度 2wt%、
 水酸化ナトリウム濃度 0.73mol/dm³



図－８ フォンブリン分解率の処理時間及び温度依存性
 処理条件：温度 550℃、圧力 30MPa、過酸化水素濃度 8.8wt%
 水酸化ナトリウム濃度 0.73mol/dm³

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	内部被ばく線量評価高度化に係る共同研究		
研究協力課題	2次元データ集積装置を用いる $\gamma-\gamma$ 同時計測法による放射能絶対測定 of 検討		
研究者所属、氏名			
大 学 側	名古屋大学 医学部 保健学科 教授 宮原 洋, 助手 成田 憲彦 工学研究科 前期課程 池田 圭一, 加藤 義親		
機 構 側	東海事業所 安全管理部 線量計測課 百瀬 琢磨, 田崎 隆		
研 究 協 力 実 施 場 所	名古屋大学 工学研究科 宮原研究室 機構 東海事業所 放射線保健室		
通算研究期間 (予定)	平成11年10月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年10月18日 ~ 平成12年 3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
体内摂取された放射性物質による内部被ばく線量の評価は重要であるが、従来行われている体外計測法では、一定形状のファントムを用いて得られた検出効率により放射能を決定するため、体格差や分布に対する補正は困難であった。 本研究では、体内摂取された放射性物質の放射能を$\gamma-\gamma$同時計測法により直接絶対測定する体格や分布に依存しない方法について検討することを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
機構にある鉄室内で相対効率 60% の 2 台の HPGe 検出器、及び我々の開発した 2 次元データ集積装置を用いて$\gamma-\gamma$同時計測を行うことにより、カスケードγ線放出核種の放射能を検出効率不明の状態決定することにある。点状線源に対しては$\pm 10\%$以内の精度で、又一定領域に分布した線源に対しても$\pm 20\%$の精度での決定が可能か否かについて検討する。さらに両検出器のピーク強度比及び異なる配置での測定により、分布位置の特定についても研究する。将来的には 4 台の HPGe 検出器の使用により一度の測定でこれらの結果が得られると思われる。発展的には、カスケードγ線放出核種とカスケードにγ線を放出しない核種が同一分布している場合に対して、カスケードγ線放出核種の結果より検出効率を推定してカスケードにγ線を放出しない核種の放射能が算出可能か否かを検討する。			
【使用主要施設】			
2次元データ集積システム（名古屋大学） 放射線保健室（鉄室、全身カウンター）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

【研究成果】

平成12年4月までの研究成果の概要をまとめる。

放射性物質による人体への内部被ばく事故の際には、迅速かつ適切な対応が求められるが、現在モニタリングの一種として実用化されているホールボディカウンターでの測定には、検出効率の決定という問題点が残されている。そこで本研究では γ 線カスケード崩壊核種を対象として、HPGe 検出器を2台使用する γ - γ 同時計測法による崩壊率決定について検討してきた。実験は2次元データ集積システムと相対検出効率 60%の2台の HPGe 検出器を用いて γ - γ 同時計測を行った。計測によって得られた波高、時間情報は PC に送られ、PC はメモリーボードに蓄えられたデータを記録媒体である DAT テープに記録するシステムとなっている。測定終了後、データ処理し得られた崩壊率を予め $4\pi\beta$ - γ 同時計測法で求めた真の崩壊率と比較した。

（1）点状線源の測定

γ 線カスケード崩壊核種である ^{60}Co 点状線源を用いて γ - γ 同時計測法による測定を行った。崩壊率の異なる点状線源の測定では 7kBq から 300kBq までの崩壊率の線源に対して、絶対測定法で決定した崩壊率と約 $\pm 10\%$ 以内で一致し、高計数率での適用性も確かめられた。両検出器を固定し点状線源の位置を変化させた測定では、場所に依存することなく、すなわち2台の γ 線検出器の検出効率に依存することなく $\pm 10\%$ 以内で崩壊率が一致した。

また γ 線放出率が1ではないカスケード崩壊核種についても γ - γ 同時計測法の適用を試みた。核種としては核分裂生成物中にも存在し、605、796keV の γ 線を各々98、85%放出する ^{134}Cs を用いた。この ^{134}Cs の点状線源に対する測定では γ 線放出率を考慮した崩壊率計算式を用いることで、 ^{60}Co と同様に $\pm 10\%$ 以内で崩壊率を決定することができた。結果の例を図で示す。図1の配置で 25.9 kBq 及び 25.6 kBq の2個の ^{134}Cs 点状線源を測定した結果は図2のように真の崩壊率に対してほぼ $\pm 10\%$ で一致した。

（2）仮想分布線源の測定

同じ点状線源を複数個用いた仮想的な分布線源の測定では、線源の配置によって生じる幾何学的検出効率の影響が確認された。具体的には2つの点状線源を配置した仮想分布状態では、両検出器を含む面に対して垂直に線源が配置されれば幾何学的検出効率の影響を受けずに崩壊率を求めることができたが、その面に対して平行に線源が配置された場合は線源間距離が大きいほど計算値も大きい値を示した。しかしながら、両検出器面の端と端に線源が置かれるような極端な分布でない限り点状線源と同等な精度で崩壊率を決定することができた。又、 γ - γ 同時計測法では両検出器のピーク面積の情報だけで崩壊率が求められることから、 ^{60}Co と ^{134}Cs の異なる点状線源を用いた仮想分布線源の測定を試みた。その結果、各々の線源の崩壊率を ^{60}Co では $\pm 15\%$ 以内、 ^{134}Cs では $\pm 10\%$ 以内で崩壊率が決定することができた。この測定により用いる γ 線ピークが重ならなければ、単一線源の場合と同様に崩壊率が求められると考えられる。

（3）線源位置推定

^{60}Co 点線源を図3のように各位置で測定を行った。両検出器の γ 線ピーク面積の比と線源から両検出器までの距離の2乗の逆数比を比較した結果が図4である。このようにピーク面積比と距離の2乗の逆数比は良い一致を示した。これにより例えばピーク面積比が1では線源位置7、8、9のように両検出器から等距離の面に分布していることを示している。同様にピーク面積比が任意の値では、両検出器からの距離の2乗の逆数比がその値となる曲線上に線源があることが推定できる。

(4) 遮蔽実験

線源と検出器の間に主成分が W であるヘビーメタルシートを置き、遮蔽体が測定値に与える影響を実験により確かめた。これによりある程度の厚さの遮蔽体では測定値に影響を与えないことが確認できた。今後、遮蔽実験のデータを用いて、両検出器に対して垂直方向に配置された 2 つの線源のうち一つを遮蔽した状態での測定を試み、遮蔽されていない方の線源の崩壊率が得られるか検証する。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度はヘビーメタルシートを用いた遮蔽実験、及び内部被ばくで問題となる核種の測定を行う。前者は、両検出器に対して垂直方向に配置された 2 つの線源のうち一つを遮蔽した状態で測定であり、後者は ^{24}Na 、 ^{124}Sb 、 ^{192}Ir 等の核種のうちどれかを測定する予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

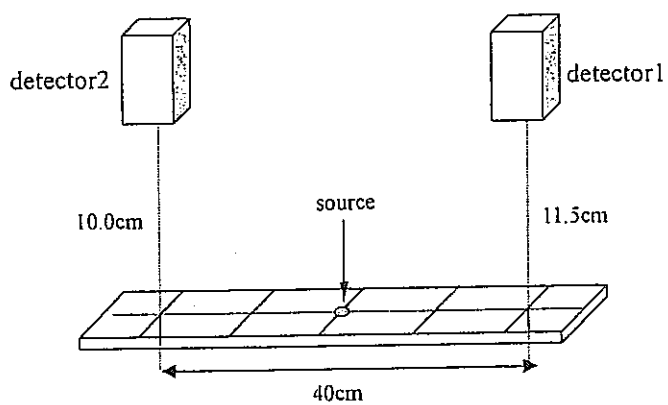


図1 線源と検出器の配置

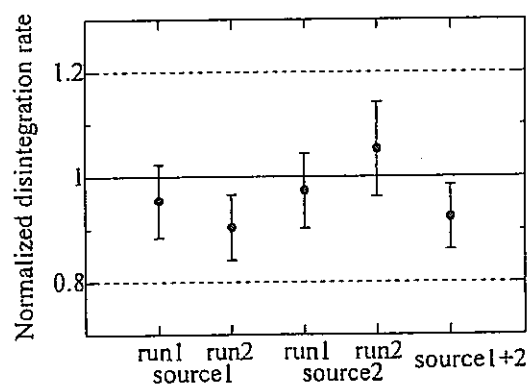


図2 絶対値で規格化した2つの ^{134}Cs 線源の崩壊率の測定値

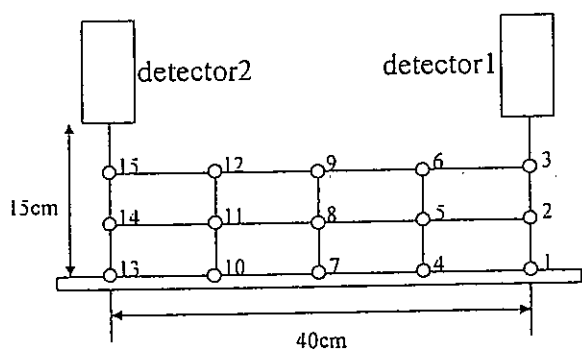


図3 検出器と線源の測定位置

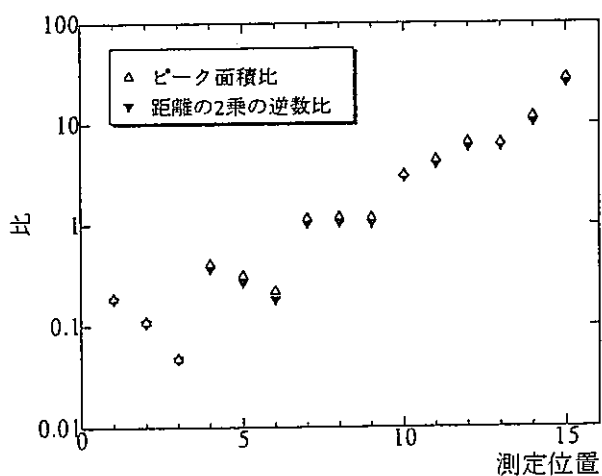


図4 各測定位置におけるピーク面積比と距離の2乗の逆数比

Ⅱ 先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告

3. 環境技術関係

先行基礎工学研究に関する平成 11 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・解析システムの構築		
研究者所属、氏名			
大 学 側	埼玉大学 大学院理工学研究科 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 Gr 三枝博光, 中野勝志		
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		
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 11 年 4 月 1 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】			
地層処分研究開発の基盤研究として位置づけられている地層科学研究では、地表から地下深部までの地下水の流動特性を把握することが重要な研究課題とされている。本研究は、この課題に向けて、地下水流動機構把握のための調査・解析手法の開発と精度の向上、さらにはそれらの体系化を目的に、地下水流動特性評価プロセスの構築に向けた研究を実施する。			
【研究内容（概要）】			
本研究では、上記の目的を受けて以下の研究を実施する。 ① 亀裂性岩盤の割れ目系のモデル化に関する研究 ② 地表部の水収支を把握するための蒸発散計測装置の精度の向上、および現地測定と水分移動解析 ③ 飽和・不飽和領域の地下水解析法の高度化			
【使用主要施設】			
東濃地科学センター, 東濃鉱山, 東濃鉱山周辺, 正馬様用地, 釜石鉱山, 神岡鉱山, 埼玉大学構内			
【進捗状況（当該年度までの概要）】			
- 平成 8 年度は、亀裂性岩盤の割れ目系調査および蒸発散計測装置の改良を実施した。 - 平成 9 年度は、亀裂性岩盤の割れ目系調査および蒸発散計測装置の改良をした。また、改良した蒸発散計測装置を用いて原位置地盤の不飽和特性の把握を試みた。 - 平成 10 年度は、試錐孔内蒸発量測定装置開発に関する基礎的検討および地表部流出現象解析を実施した。 - 平成 11 年度は、地表部流出現象解析を継続した。			

【研究成果（当該年度）】

(1) 目的

地表から地下深部までの地下水流動を把握するための調査研究において、地表部の流出現象の把握は、地下深部への涵養量などを算定する上で重要である。このため、サイクル機構、東濃地科学センターにおいては、降雨流出量や、地表付近の土壌水分量、気象データなどを測定している。また、三次元飽和・不飽和地下水流動解析によって、地表部の地下水流動の評価を実施している。これらの方法では、小さい領域の地下水流動を詳細に評価することは可能であるが、複雑な地形や土壌構造を有している広範囲な領域における、地表部の地下水流動の評価には適していない。そのため、広範囲の領域を対象とした地表部の地下水流動を評価する際には、タンクモデルなどの確率モデルの方が適している。しかし、確率モデルでは、対象流域の物理現象の評価ができない問題点がある。したがって、最終的に広範囲な領域を対象とした地表部の地下水流動を評価するためには、地下水流動解析などの物理モデルと確率モデルを融合した手法を用いる必要がある。

以上のことから、本研究は、まず確率モデルを構築するために、統計学的手法の一つであるニューラル・ネットワークモデル（図1）を用いて、広範囲な領域を対象とした水収支を把握することを目的に実施した。

(2) ニューラル・ネットワークモデルによる河川流量の推定

ニューラル・ネットワークモデルの適用性を検討するために、サイクル機構の東濃鉱山及び正馬様用地周辺において取得されている、表層水理観測データの一つである土壌水分観測結果から河川流量の推定を試みた。解析は、以下の手順で実施した。

- ①ある観測期間の土壌水分観測結果を入力データとし、河川流量観測結果を出力データとして与え、それらの相互関係を学習させる。
- ②この学習した結果を基に、次の観測期間の河川流量を推定する。
- ③推定された河川流量と観測値を比較し、推定結果（解析結果）の妥当性を評価する。

図2に、ある観測期間の土壌水分観測結果を入力データとし、河川流量観測結果を出力データとして与え、それらの相互関係を学習させた結果を示す。学習では、前述したように解析結果が観測結果と比較し、最適なネットワークの重みを調整する。これらの学習結果を基に、次の観測期間における河川流量の推定結果と観測結果の比較を図3に示す。図3に示した推定結果と観測結果は良く一致しており、土壌水分観測結果を用いて、河川流量を推定することが可能であることが示された。また、特に深度40 cmの土壌水分量が河川流量に大きな影響を与えていることが解析結果より示された。

(3) ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果の確認

ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果の確認を行うことを目的として、表層水理観測データが取得されている流域において人工降雨流出実験を実施した。実験は、斜面上の約1×1.5 m、深度70 cmのブロックを対象とした。

実験に先立ち、外側境界条件（不透水境界）を明確にするために、ブロックの斜面の上側及び側方を掘削し、ビニールシートで覆った後に埋め戻した。また、ブロックの斜面下側からの流出量を観測するために、観測用の溝を掘削した。

実験対象ブロック内の土壌の状態を図4に、また、植物の根の分布を図5に示す。これらの図より、実験対象ブロック内の土壌は、上部のレキの少ない層とレキが多数分布する層に区分でき、その境界は深度約40 cmである。

実験では、上述したブロック上面に人工降雨を降らせ、ブロックの斜面の下側からの流出量を測定した。その結果、人工降雨の流出量は、図6に示すように上部層より下部層の方が多いたことが明らかとなった。このことは、深度約40 cmより下部のレキ層での土壌水分状態が流出量（河川流量）に大きな影響を与えていることを示唆している。

この結果から、人工降雨流出実験の結果は、(2)で述べたニューラル・ネットワークモデルによる解析結果と整合的であり、ニューラル・ネットワークモデルの適用性を確認することができた。

(4) まとめ

本研究において、広範囲な領域を対象とした水収支を把握するためのニューラル・ネットワークモデルによる解析手法の適用性が示された。また、同時に地下水モニタリングデータの相互関係等を評価するための解析を行う際に、ニューラル・ネットワークモデルを適用することの有効性が示された。

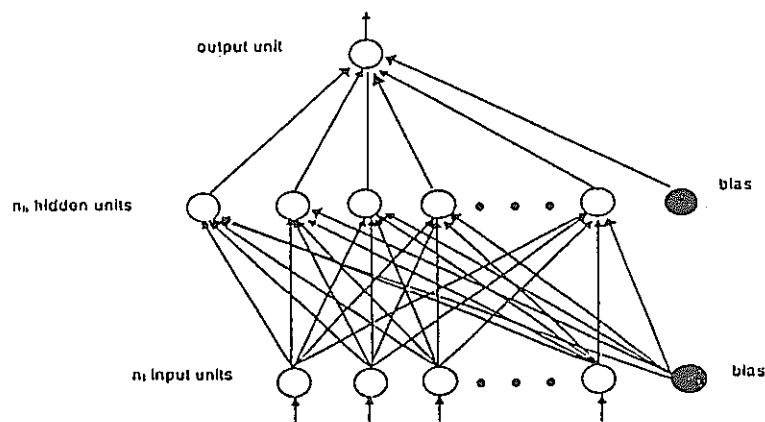


図1 ニューラル・ネットワークモデルの概念

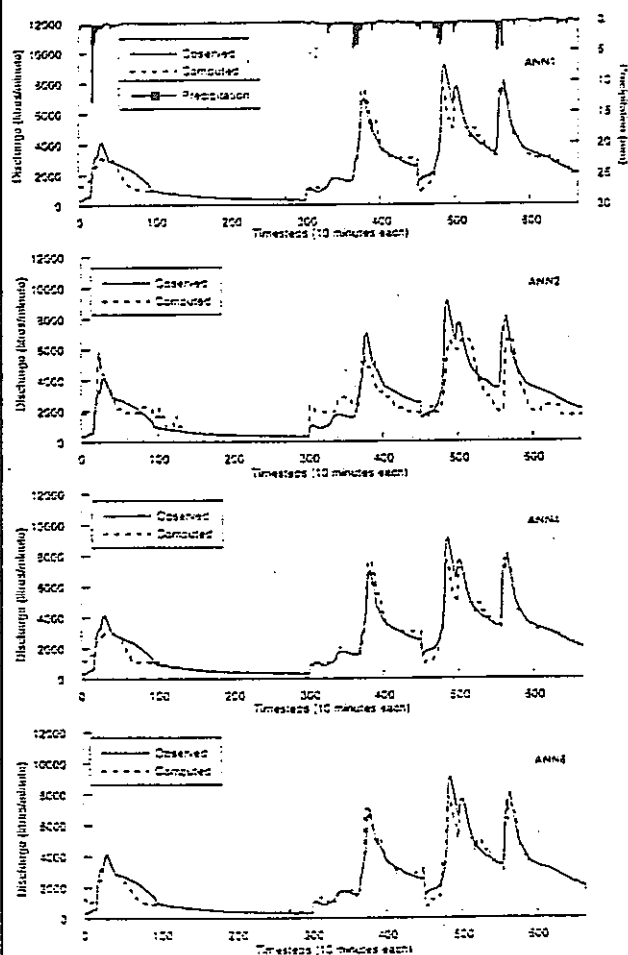


図2 ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果（学習段階）

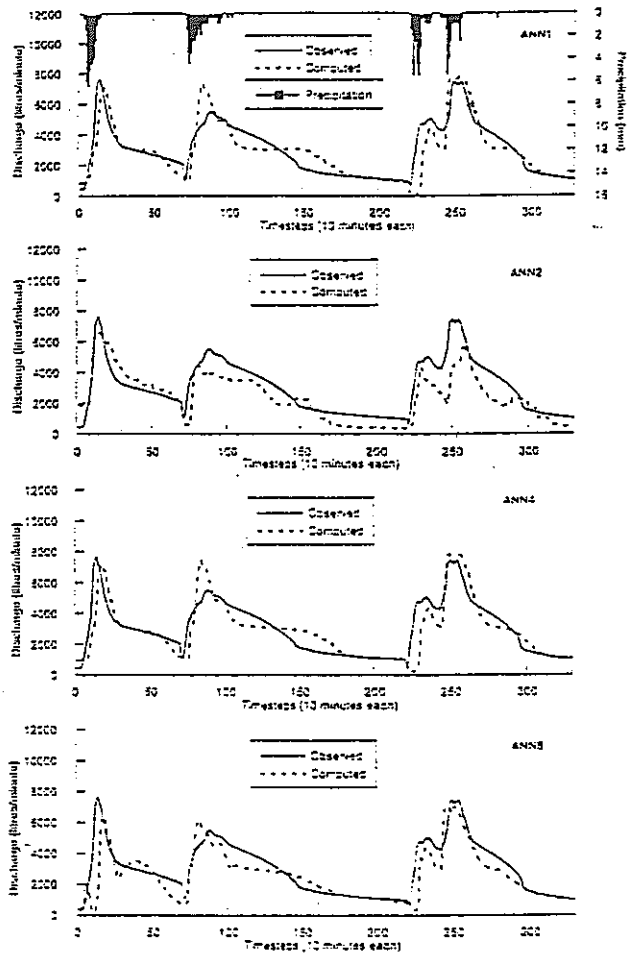


図3 ニューラル・ネットワークモデルによる河川流量の推定結果と観測結果の比較

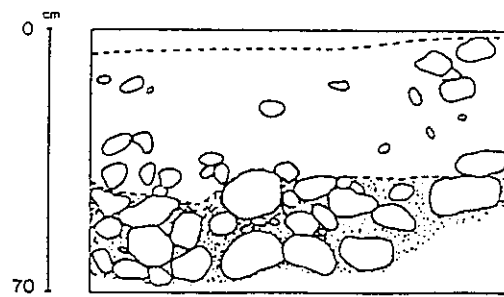


図4 実験対象ブロックの土壌状態

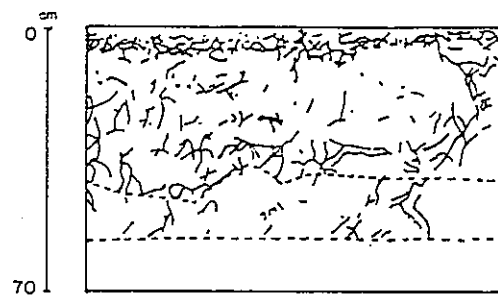


図5 実験対象ブロックの植物の根の分布

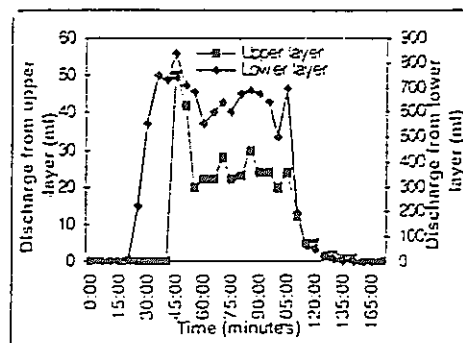


図6 人工降雨の流出量

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

本研究は、平成 11 年度で終了。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- (1) M. R. Gautam, K. Watanabe, H. Saegusa : Field experiment and observations of runoff generation processes in a forested mountainous catchment, Tono area, Japan, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, 2000.
- (2) M. R. Gautam, K. Watanabe, H. Saegusa : Runoff analysis in humid forest catchment with artificial neural network, Journal of Hydrogy, 2000 (投稿中)
- (3) M. R. Gautam, H. Saegusa, T. Kaizuka, K. Watanabe : Runoff characteristics of two sub-catchments in Tono area, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 2000 (投稿中)
- (4) M. Hashem, K. Watanabe, M. Ali, A. Abdel-lah, H. Saegusa : Grain Size Effect on Both Saturation and Pollutant Migration, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 2000 (投稿中)

先行基礎工学研究に関する平成11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	岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科 教授 西垣 誠 岡山大学大学院 修士課程 南部 卓也** [*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 Gr 竹内 竜史, 中野 勝志		
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 西垣研究室 機構 東濃地科学センター		
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12年 2月26日 ~ 平成12年 3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☒ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 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手法による調査結果を組み合わせ、岩盤中の地下水の流動経路や水理特性の空間的な広がりを3次元的に把握するための調査・解析手法の体系化を図る。			
【研究内容（概要）】 研究内容は、以下の3項目に区分される。 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用限界を把握するための検討を行う。 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、さらに短期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。 3. クロスホール水理試験と地球物理学的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手法を組み合わせた調査・解析手法の体系化を図る。			
【使用主要施設】 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、実験設備など） 機構 東濃地科学センター内の施設（解析設備など）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 10 年度までは、評価技術に関する基礎的な研究を主題として以下の項目について実施した。

①クロスホール水理試験装置と試験手法に関する研究

現存データや現場試験で取得したデータを活用して、クロスホール水理試験の調査・解析手法に関する基礎的な検討を行った。具体的な作業内容は以下のとおり。

・正弦波を用いたクロスホール水理試験装置の開発

平成 8 年 8 月までに定圧・定流量・正弦波注水機能を用いた 2 孔間（2 次元）のクロスホール水理試験装置を製作した。また、平成 9 年度には、2 本目の孔内観測装置を製作し、3 孔間（3 次元）でのクロスホール水理試験が可能となった。

・釜石鉱山での現場試験

上記試験装置を用いて、平成 8 年度には釜石鉱山の 550m レベル坑道、平成 9 年度には同鉱山の 250 m レベル坑道で、2 孔間の現場試験を実施し、試験装置の基本性能を確認した。また、これらの試験を通じて、本研究に必要となる現場試験データを取得した。

②クロスホール水理試験データのトモグラフィ解析手法に関する研究

クロスホール水理試験データのトモグラフィ解析手法の開発に関する基礎的検討として、ラプラス空間中での有限要素法解析を行う LTG 法（Laplace Transformation Galerkin Method）による 2 次元、3 次元浸透流解析コードを開発した。さらに、平成 10 年度からは、正弦波水理試験データを用いたトモグラフィ解析コードとして、ラプラス変換場での逆解析を可能としたトモグラフィ解析コードの開発を開始した。

【研究成果（当該年度）】

本研究の目的は、クロスホール水理試験から得られた水頭の経時的变化のデータを用いて、3次元浸透理論から導かれた逆解析コードにより、モデル化した試験区間の岩盤の浸透特性を評価することである。

本研究では、クロスホール水理試験法と本研究で開発する逆解析コードを用いた水圧トモグラフィ手法としての体系化を目指す。また、対象となる亀裂性岩盤の領域をそれと水理学的に等価な均質・異方性を持つ多孔質媒体のブロックの集合体に置換することにより亀裂性岩盤のモデル化を行う。

本年度は、本研究で用いる逆解析手法のアルゴリズムに関する検討を実施し、検討結果を基にトモグラフィ解析コードを構築中である。その概要を以下に記す。

本研究の逆解析手法は、間接法によって浸透特性分布を推定していく。この際、観測圧力水頭値と計算圧力水頭値の差の2乗和を最小化するべき評価関数を用いることにより、解の存在を保証する。この方法は基本的に、①計算圧力水頭値を求める非定常浸透流順解析、②評価関数の勾配計算、③推定値(浸透特性分布)の更新、の3つの柱によって成り立つ。本研究では、それぞれについて以下の手法を用いる。

①については、従来のように有限要素法に領域の分割を行った後に微分方程式における時間的な離散を除去するために、Laplace Transform Galerkin(LTG)法の導入を行う。これにより、時間領域で複雑な問題を周波数領域での簡単な問題に変換することが可能となり、より迅速に、かつ記憶容量を減少できる。更に、この手法の連立一次元方程式の解法としてIUBCG法(Incomplete LU decomposition Bi-Conjugate Gradient；前処理付共役勾配法)を導入し、3次元の多節点問題の解析を行うことを試みた。

②については、順解析計算1回とそれに随伴する初期・境界値問題を1回だけの計算量で評価関数の勾配を算出することのできる最適制御理論を適用した。

③については、少ない計算量で収束性の高い探索方向ベクトルを得られるようにするため、準ニュートン法の1つであるSSVM法(Self-Scaling Variable-Metric method)を用いた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

今後、本研究ではこれらの手法を用いて、

- 1) 上記アルゴリズムの解析コードの開発の継続
- 2) クロスホール試験の測定精度(ボーリング配置位置や観測孔の本数などによる推定値の変化)の検証
- 3) シヌソイダル試験の際に用いるための、ラプラス空間上における最適化手法の開発

これにより、クロスホール試験と本研究で開発した逆解析手法を組み合わせた水圧トモグラフィ手法によって、岩盤の浸透特性分布がどこまで高速・高精度で把握できるか、その可能性を追及していく。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

未 定

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	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, 研究員 田口富美子</td> </tr> <tr> <td>機 構 側</td> <td colspan="3">人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 環境研究 Gr 時澤孝之, 鶴留浩二, 長柄収一</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, 研究員 田口富美子			機 構 側	人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 環境研究 Gr 時澤孝之, 鶴留浩二, 長柄収一		
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, 研究員 田口富美子										
機 構 側	人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 環境研究 Gr 時澤孝之, 鶴留浩二, 長柄収一										
研 究 協 力 実 施 場 所	岡山大学 農学部 生物機能開発学講座 機構 人形峠環境技術センター 開発試験棟, 多目的倉庫										
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 11 年 7 月 15 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日								
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究										
【研究目的】 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。											
【研究内容（概要）】 本研究では、U, Ra を含む土壌等で <i>Arabidopsis thaliana</i> (シロイヌナズナ) 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。											
【使用主要施設】 人形峠 : グロースチャンバー (EYELA FLI-301NH) 岡山大学: 組換え DNA 実験施設, DNA 増幅装置 (PCR Thermal Cyclar), DNA シーケンサー (Perkin Elmar 310 Genetic Analyzer), IP 分析装置 (Fuji BAS 2000)											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成9年度は、鉍さい土壌等に生育させた *Arabidopsis thaliana*（シロイヌナズナ）から DNA 抽出を行い、DNA 増幅の条件を確認した。

平成10年度は、放射性物質及びその放射線に対して変異を受けやすいと思われた遺伝子をモデルとして用いて、DNA 増幅からシーケンス解析を行い、解析した領域について変異は生じなかったことを確認した。また IP（イメージングプレート）を用いて植物体中の放射線強度の分布を定性的な調査した結果、主に葉組織において有意な分布と思われる IP 画像を確認した。

【研究成果】

1. 放射性物質及びその放射線による植物体の遺伝子変異に対する影響

(1) 実験方法

昨年度までに放射性物質及びその放射線による植物体の遺伝子変異に対する影響を調べるため、放射性物質に対して変異を受けやすいと思われる遺伝子モデルとして、*Arabidopsis thaliana*（シロイヌナズナ）のカルコン合成酵素遺伝子を用いて解析を行ってきた。昨年度までの解析結果では、4種の土壌試験区（1. 岡山大学圃場、2. 人形峠試験棟、3. 人形峠-夜次鉍さいダム、4. 人形峠-夜次鉍さいダム+バーミキュライト混合）で生育させた植物由来の本酵素遺伝子は、少なくとも解析した領域（2422-3170 までの 749bp）においては遺伝子の変異が生じなかった。しかし、解析したサンプルは各試験区 1 サンプルと少なかったため、実験の再現性を確認することができなかったため、今年度は解析する植物体を各試験区ごとに 5 サンプルに増加し、計 20 サンプルのシーケンス比較解析を行った。さらに、放射性物質及びその放射線に対して変異の起こる可能性のある遺伝子として、新たにトランス桂皮酸水酸化酵素遺伝子を選び、同様の解析を行った。この酵素は、フェニルプロパノイド合成経路上で、トランス桂皮酸から p-クマル酸への水酸化を触媒する酵素であり 5432bp から成る。本実験で PCR により増幅した領域は、3881-4683 までの 794bp である。トランス桂皮酸水酸化酵素遺伝子に関してもカルコン合成酵素遺伝子同様、各試験区ごとに 5 サンプルずつ計 20 サンプルのシーケンス解析を行った。今回の実験では、解析の簡便化をはかるためベクターへのサブクローニングは行わず、PCR 増幅断片をスピンカラムにより精製した後、オリジナルプライマーを用いたダイレクトシーケンス法に基づいて、オートシーケンサーによる自動解析を行った。

(2) 実験結果

図 1 に鉍さいダム+バーミキュライト混合土壌生育植物由来のカルコン合成酵素遺伝子、図 2 に鉍さいダム土壌生育植物由来のトランス桂皮酸水酸化酵素遺伝子のシーケンス解析で得られたエレクトロフェログラムの一例を示す。

ダイレクトシーケンス法でもベースラインのノイズはほとんどなく、信頼性の高い塩基配列解析結果が得られた。各遺伝子の変異の有無は、前回同様 BLAST を用いて DNA データベースに対し相同性検索を行い解析したが、カルコン合成酵素遺伝子の 2456-3140 までの 685bp 及びトランス桂皮酸水酸化酵素遺伝子の 3880-4683 までの 794bp の領域において、報告されている各遺伝子配列と 100% の相同性を示し、この領域において遺伝子の変異は生じなかったことが確認された。

2. 放射性物質の植物体への濃集に関する調査

(1) 実験方法

昨年度は、鉍さいダム土壌で生育させた *Arabidopsis thaliana*（シロイヌナズナ）を IP（イメージングプレート）に感光させて植物体中の放射線強度の分布について定性的な調査を行った。今年度は、鉍さいダム土壌生育植物と岡山大学圃場土壌生育植物との対比実験を行い、前回確認したものが鉍さい中の放射性物質からのものなのかどうかを確認した。また IP 以外の調査方法として X 線フィルムでの検討も行った。また放射線強度の分布を確認する他に、各フィルムへの感光時間についても検討した。解析前処理としては、各土壌で約 6 週間生育させたシロイヌナズナの表面を純水で洗浄した後、植物全体をラップに挟み、これを各フィルムと接触させて感光を行った。IP 解析はイメージングアナライザを用いて解析を行い、X 線フィルムは RENNDOL 及び RENFIX により現像を行った。

(2)実験結果

図3にIP解析結果を示す。IP解析結果から、岡山大学圃場土壌生育植物と鉍さいダム土壌生育植物の葉部分の両方にIP画像が認められた。またX線フィルムによる調査では、感光時間を変えて行っても放射線による感光はなかった。実験に用いた各土壌中のウラン濃度は、鉍さいダム土壌806ppm、岡山大学圃場土壌0.89ppmで、2土壌中の放射性物質濃度差が約1,000倍あるにも関わらず、IP画像に明確な差異がみられないこと、X線フィルムへの感光がみられないことから、植物体への放射性物質の濃集については、土壌中の放射性物質濃度の差によるような顕著な差異はないことがわかった。今回は鉍さいの溶出液の分析しか行っていないが、これは植物が吸い上げる土壌中の水質に依存しているためと考えられ、鉍さいからの多量な放射性物質の溶出がないことが推測される結果と言える。

IPによるフィルムへの感光時間の検討については、図3右側で感光時間3hrでIP画像を確認でき、感光時間を24hrにすることで画像がぼやけてくることから、IPへの感光時間は3hr迄が適当であると思われる。

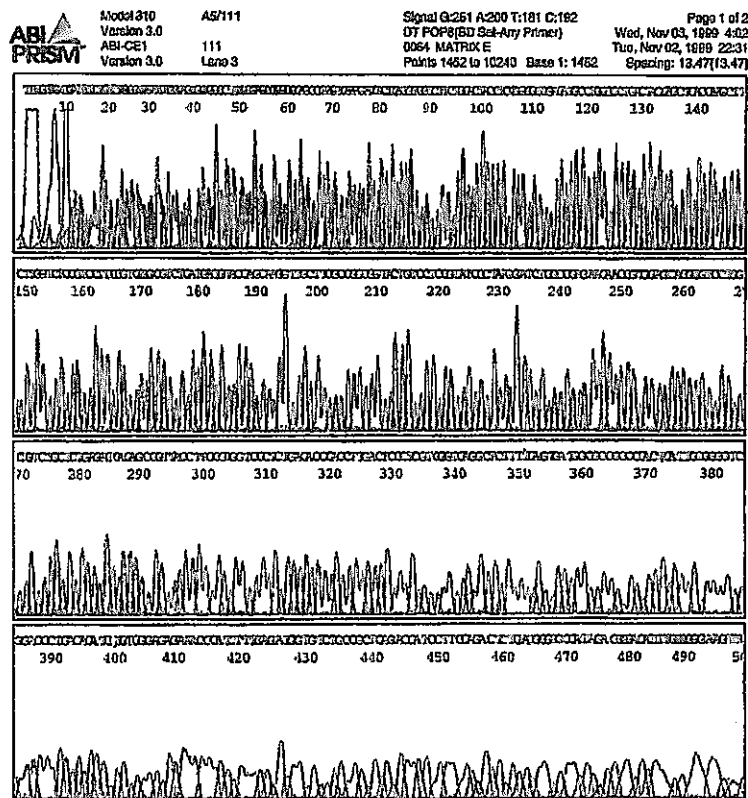
本研究ではIPとX線フィルムを用いて植物体中の放射線強度の分布状態を定性的に求めたが、2手法とも植物体中の放射線を確認できなかった。植物体の吸収等をみるためには通常多量のサンプルを用意し灰化等によって各部位のデータを求めることになるが、今回用いたシロイヌナズナは植物体の中でも小さいため、実験植物の選定や測定手法等の検討が今後の課題と思われる。

なお、本研究の道半ばに、共同研究者であり研究指導頂いた岡山大学山田教授が病床につかれ、まともに至る前に御逝去されました。先生の多大なる御指導、御鞭撻に感謝し、哀悼の意をもってまとめとします。

【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】



[Result of BLAST] (Selected Sequences)

BLASTN 2.0.10 [Aug-26-1999]

Reference: Altschul, Stephen F., Thomas L. Madden, Alejandro A. Schaffer, Jinghui Zhang, Zheng Zhang, Webb Miller, and David J. Lipman (1997), "Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs", Nucleic Acids Res. 25:3389-3402.

Query: query
(486 letters)

Database: ddbjpln.seq
90,682 sequences; 211,363,458 total letters

>H20321ATHCHS A.thaliana chalcone synthase (CHS) gene, complete cds.
Length = 3864

Score = 940 bits (474), Expect = 0.0
Identities = 474/474 (100%)
Strand = Plus / Plus

Query: 1 ctggccaaaggaagcggcagtggaagccatcaaggagtgaggccagcccaagtcgaagtc 60
Sbjct: 2462 ctggccaaaggaagcggcagtggaagccatcaaggagtgaggccagcccaagtcgaagtc 2521

Query: 61 actcatgtcgtctcttctgcaactacctcggcgctgacatgctggtgctgactaccagctc 120
Sbjct: 2522 actcatgtcgtctcttctgcaactacctcggcgctgacatgctggtgctgactaccagctc 2581

Query: 121 accaagctctcttggctcctcctcctcagcagctcctcatgctgaccgaaggttgc 180
Sbjct: 2582 accaagctctcttggctcctcctcctcagcagctcctcatgctgaccgaaggttgc 2641

Query: 181 ttccgcggcggtactgtctcctcgtatcgtatggtatctcgcgagaaacacgtggagca 240
Sbjct: 2642 ttccgcggcggtactgtctcctcgtatcgtatggtatctcgcgagaaacacgtggagca 2701

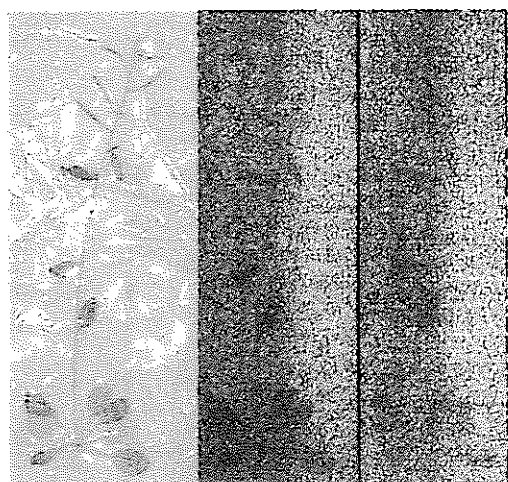
Query: 241 cgtgtcctcgttggctgctctgagatcacagcggtaaccttccgtggtcctctgacacc 300
Sbjct: 2702 cgtgtcctcgttggctgctctgagatcacagcggtaaccttccgtggtcctctgacacc 2761

Query: 301 caccttgactcctcgtcgggcaggctcttttcagtgatggcgccgcgactcattgtg 360
Sbjct: 2762 caccttgactcctcgtcgggcaggctcttttcagtgatggcgccgcgactcattgtg 2821

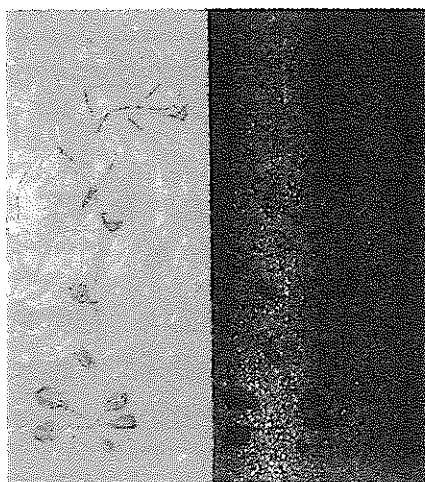
Query: 361 gggctcgaccctgacacatctgtcggagagaaacacatcttggatggtgtctgcgct 420
Sbjct: 2822 gggctcgaccctgacacatctgtcggagagaaacacatcttggatggtgtctgcgct 2881

Query: 421 cagaccatccttcagactctgatggtgccatagacggaattttgaggaagtt 474
Sbjct: 2882 cagaccatccttcagactctgatggtgccatagacggaattttgaggaagtt 2935

図1 カルコン合成酵素遺伝子の塩基配列解析と相同性検索
(鉦さいダム土壌+バーミキュライト混合土壌生育植物)



植物写真 IP 画像 (3hr) IP 画像 (24hr)
 鉾さいダム土壌生育植物



植物写真 IP 画像 (3hr)
 岡山大学園場土壌生育植物

図3 IP 解析結果

先行基礎工学研究に関する平成11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 環境デザイン工学科 西垣 誠 教授, 小松 満 博士3年		
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Gr 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 地層処分基盤研究施設試験棟		
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11年7月7日～ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受け入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 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。			
【研究内容（概要）】 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。			
【使用主要施設】 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研究施設試験棟） 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）			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

・平成10年度までに実施した項目は下記の通りである。

(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。

(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。

(3) 多孔質媒体を用いた不飽和水理試験

多孔質媒体（ガラスビーズ）を用い、水槽Aにおいて、坑道掘削を模擬した不飽和水理試験を実施した。そして、間隙水圧計を用い、多孔質媒体中の水圧低下状況を測定するとともに、FDRを使用し、経時的な水分量の変化を測定した。

【研究成果】

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水分量計測装置（Frequency Domain Reflectometry）の適用性の検討

(1) 各依存性に対する適用性の検討

実際に測定を行う際には、用いる測定機器及び方法、プローブの特性等の影響により、その校正曲線には少なからず誤差が存在すると思われる。したがって、FDR法を用いて実際に土中の水分量を測定する場合、温度や土中に含まれる塩分濃度に影響を受けることが考えられる。そこで、本節では、実際に1)温度、2)塩分濃度、3)土粒子密度の3項目について、これらが変化した場合の測定値の違いについて調査した。

1) 温度

原位置での測定においては、測定時期によって地盤の温度も大きく変化しているものと予想される。特に、水の誘電率は0℃以下で急激に変化するためこの付近の温度で測定する場合には測定結果を過小評価する危険性がある。そのため、温度変化による影響についての把握が必要である。そこで、水溶液と不飽和土の供試体のそれぞれに対して温度を変化させて誘電率を測定した。水溶液の場合の測定結果を図-1に表す。また、不飽和土に対する測定結果を図-2に示す。温度の上昇に伴いわずかに誘電率が低下するという結果が得られた。水溶液の場合と比較してこの値は決して大きいものではないので、温度による変化はないものとして差し支えないと思われるが、より高い測定精度を求めるには温度補正が必要である。

2) 塩分濃度

実際の地盤で測定する場合において、地盤中にイオン性の物質を含んでいる場合も少なく、誘電率に影響を与えることが懸念される。そこでイオン性物質として塩化ナトリウムを用いて塩分濃度を変化させ、誘電率に与える影響を調べた。測定結果を図-3に、各ピーク振幅レベル(電圧)の変化を図-4に示す。その結果、約2000ppmまでの濃度であればピーク間隔に影響なく測定可能であるが、その一方で次第にピークの谷が小さくなり、2000ppm (0.2%) を越えたあたりから検出不可能となった。

3) 土粒子密度

一般に、土粒子、空気の誘電率（土粒子4,空気1）は水の誘電率（ $\epsilon=81$ ）に比べて非常に小さいので誘電率に影響を与えるのは体積含水率だけであるとされている。その確認として体積含水率 θ を一定とし、乾燥密度 ρ_d を変化させた供試体（まさ土、標準砂）の誘電率を測定した。また、高含水量の場合と低含水量の場合での変化も調べるため水分量を変えて行った。得られた結果を図-5に示す。乾燥密度 ρ_d が増加しても誘電率はほぼ一定となっている。この結果より誘電率は土粒子密度の影響を受けることなく、体積含水率により決定されることが確認できた。ただし、水分量が低い場合は、誘電率が低くなるため、この場合土粒子の誘電率への依存性が高くなると考えられる。今回の測定結果からは標準砂ではわずかにその傾向が見られたが、まさ土では見られずその影響は考慮する必要はないと考えられる。

(2) 岩石試料に対する適用性の検討

現在、岩盤中の水分量を非破壊で測定する方法としては、RI法、比抵抗法等が用いられている。しかし、これらの方法は測定装置が大がかりであり、またキャリブレーションが必要である等、非常に扱いにくいものである。そこで、近年では、岩盤内の水分量の測定法の簡便化として、赤外線水分計や誘電法の一つである TDR 法を用いた測定法の開発など、多くの研究がなされてきている。本研究での FDR 装置は、電極が 1 本でも高精度の測定が可能である利点を持っている。ここでは、この FDR 法を用いて岩盤中の水分量測定を行うことを目的として、岩石試料に対するキャリブレーションを行った。なお、試料には凝灰岩（大谷石：乾燥密度 $\rho_d=2.33\text{g/cm}^3$ ）を用いた。

1) 岩石試料の加圧板 pF 試験

FDR 装置によるキャリブレーションの際には供試体内の水分量を均一にすることが必要であるが土質試料とは異なり岩石試料は困難である。そこで、ここでは加圧板を用いて背圧を付加して水分量を調節を行う方法を採用した。図-6 に水分量調整装置の概要を示す。本装置を用い、小さな供試体を使用して岩盤試料に対する pF 曲線を作成し、水分量の調節範囲を把握した。なお、試験は水中脱気によって飽和状態にされた供試体に対して、マルチステップ式に加圧段階を増加する方法を行った。また、加圧する空気圧はセラミックディスクのエアーエントリバーリユーまで（約 0.2MPa）とした。

2) 試料の成形

長さ 100mm、 $\phi 5\text{mm}$ のプローブを用いるため、それにあわせて岩盤試料の形状は、 $130 \times 60 \times 60(\text{mm})$ の角柱に高速カッターを用いて成形した。

3) プローブ（電極）の設置

測定プローブは、長さ 100mm、 $\phi 5\text{mm}$ の棒電極測定タイプと、同軸ケーブルの線心部分とアース部分を銅板に直接取り付け、それを試料の側面に張り付ける板電極タイプを用いる。概要を図-7 に示す。棒電極タイプでは、まず、あらかじめプローブの電極と同じ径、同じ長さの孔をドリルで開け、そこにプローブを挿入する。また、接地部分にも深さ 10mm、径 3mm 程度の孔を開けておき、そこに溶かしたハンダを流し込み、完全な密着を行う。また、板電極タイプでは、試料の側面に銅板を粘着テープで張り付け、それを覆うようにエポキシ系接着剤でコーティングする方法で設置を行った。

4) 供試体の飽和

成形しプローブを設置した供試体を 7 日間の水中脱気により、飽和にした。事前に行なった予備試験によると、約 5 日間の水中脱気で飽和になっている。

5) 誘電率の測定および校正曲線の作成

先に実施した予備実験（pF 試験）のデータをもとに、図-6 に示した加圧チャンバーを用いて水分量の調整を行った。供試体をセラミックディスク上に載せ、密閉された加圧チャンバーの上部より、設定体積含水率になるように背圧を加え、試料下部のセラミックディスクより排水させる。その時の排水量を経時的に測定し、排水量が定常状態になった時点での排水量の合計から試料の体積含水率を算定した。図-8 に加圧板法により求めた負の圧力水頭と体積含水率の関係を示す。実測値のプロットを見ると、試験開始（飽和状態）から終了時までの水分量の変動はかなり狭いものではあるが、良好な結果を示しているのが分かる。試験終了後に試料をハンマーで割り、試料内部の水分量の分布を視覚的に確認したところ、試料内部の水分量はほぼ一様に分布していることが分かった。図-9 に体積含水率と測定された誘電率値との関係を示す。また校正曲線を作成するために、プローブ挿入タイプの場合のみで、炉乾燥後の測定結果を省いた誘電率の平方根と体積含水率の関係で表したものを図-10 に示す。これより、プローブ挿入タイプではある程度良好な結果が得られているが、銅板貼り付けタイプでは水分量の増加による誘電率値の変化がほとんど現れていないのがよく分かる。これは、銅板と試料表面との接地が不完全であったことが問題ではないかと思われる。ただし、加圧板法による水分量調節では、試料内の水分量の変動範囲が狭すぎて、乾燥側のデータが不足してしまう。したがって、体積含水率と誘電率値の関係の全体的な把握は困難であり、本実験における大谷石の乾燥側の校正曲線の作成は不可能であった。つまり、岩石試料の飽和度全領域に対して供試体内で水分量を一定にする均一な調節方法の検討が課題として残った。

2. 媒体（ガラスビーズ）の基礎物性の把握

鉛直2次元水槽における円形坑道周辺での不飽和領域形成試験で使用するガラスビーズについて、飽和・不飽和浸透を支配する基礎物性の測定を行なった。基礎物性の把握のために用いたガラスビーズはいずれも単一粒径で、次の5種である。なお、比重は $G_s=2.49(\text{g}/\text{cm}^3)$ である。

① 0.1mm, ② 0.2mm, ③ 0.8mm, ④ 1.0mm, ⑤ 3.0mm

(1) 水分特性曲線

水分特性測定法としては、土柱法排水試験、加圧板法、吸引法（砂柱法）の3方法を採用し、各粒径のガラスビーズにおける水分特性曲線（体積含水率と負の圧力水頭の関係）の取得を行なった。

(2) 飽和透水係数

飽和透水試験は、JIS A 1218（定水位透水試験）に基づき行なった。供試体は内径 ϕ 100mm、高さ120mmで水中落下で試料を作成した。図-11に飽和透水試験結果を示す。

(3) 不飽和透水係数

瞬時水分計測法を用いて不飽和透水係数を求めた。使用したガラスビーズは粒径0.1mmのものである。計測値を用い算定した不飽和透水係数を図-12に示す。試験データから、飽和度50%以下の不飽和透水係数の値を得ることが出来なかった。さらに、瞬時水分計測試験中の体積含水率と圧力水頭の測定データの妥当性を調べるために、図-13に示すように、定常状態の水分特性曲線との比較を行った。同体積含水率に対する圧力水頭（サクション）の値は、最大でも15cm程度であり、間隙水圧計の精度（ $\pm 1.5\text{cm}$ ：セラミックカップ無し、 $\pm 10\text{cm}$ ：セラミックカップ有り）及びFDR水分計の精度（約5%）を考慮するとほぼ妥当な測定値であると言える。また、非定常状態と定常状態の水分特性曲線はそもそも異なっていることも、接触角の違いから考えられる。さらに、図-14に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重ねている（ $\alpha=0.01685$, $n=12.52$ ）。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。この急激な変化をVGモデルで表現する事は困難である。一方で、不飽和領域では体積含水率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妥当な結果が得られていると言える。したがって、解析上では、飽和透水係数を単独のパラメータとし、不飽和領域ではVGモデルによる推定値を使用するような不連続パラメータとして用いるか、あるいは計測値をそのまま入力データとする必要がある。

3. 鉛直2次元水槽における円形坑道周辺での不飽和領域の形成試験（CLUE：水槽A）

(1) 試験ケース

試験ケースを表-1に示す。試験は全部で11パターン、ケース区分3通り（EX1：予備試験，EX2：水位固定条件，EX3：左右端不透水条件）で行なった。

(2) 試験結果

ここでは、表-1に示す試験ケースのうち、EX3について結果を示す。

1) 不透水条件①内側ビーズ1.0mm（EX3-1：体積含水率測定，EX3-3：圧力水頭測定）

①モデル条件

実験模式図を図-15に示す。坑道部分の境界をステンレスメッシュに変えて透水性を上げ、上端を除く周囲はステンレス板によって、不透水境界とした。モデルは不均質場を対象とし、外側は0.1mmビーズ、内側には1.0mmビーズを用いて模擬試験を行った。図-16にEX3-1：体積含水率測定のセンサーの設置状況を示す。FDRはF01～F18の18個、間隙水圧計はP01～P09の9個設置した。また、図-17にEX3-3：圧力水頭測定のセンサーの設置状況を示す。先のFDRで測定した同じ点にP01～P20の15個設置した。

②試験内容及び観察結果

このモデルで、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。不飽和領域形成の様子を付写真-4.4に示す。今度は坑道部分の水位より飽和領域が約8cmの高さまで立ち上がっており、水分特性曲線の値と比較しても妥当なものと考えられる。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。

【研究成果】

③計測結果

試験ケースEX3-1において計測されたFDRによる体積含水率の経時変化を図-18に示す。この時の圧力水頭の測定結果は図-19である。また、試験ケースEX3-3において計測されたビーズ0.1mm及び1.0mmの部分における圧力水頭の経時変化をそれぞれ、図-20、図-21に、結果を見ると坑道部より排水直後にゆるみ領域に設置した間隙水圧計の測定値が急激に低下している。その他の圧力水頭は緩やかに低下していることから、坑道部の圧力が開放されると供試体は高さ分に相当するサクション状態になるまで徐々に排水することがわかる。また、FDRの測定結果をみると、ゆるみ領域に設置したセンサーのみに変化が現れており、この部分に不飽和領域が発生している。また、図-22に排水量の経時変化を示す。2ケースでわずかに差が生じているが、これは供試体作成時の締固め度の差に起因するものと考えられる。またその量は、坑道部とゆるみ領域から排水された量より多く排水されており、0.1mmビーズ部分も上部がわずかに排水されているものと推測される。

2) 不透水条件②内側ビーズ0.8mm (EX3-2：体積含水率測定, EX3-4：圧力水頭測定)

①センサー配置図

図-23にEX3-2：体積含水率測定のセンサーの設置状況を示す。FDRはF01～F18の18個、間隙水圧計はP01～P09の9個設置した。また、図-24にEX3-4：圧力水頭測定のセンサーの設置状況を示す。先のFDRで測定した同じ点にP01～P20の15個設置した。

②試験内容及び観察結果

このモデルで、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。飽和領域の立ち上がりは約10cmであることを確認した。

③計測結果

EX3-4におけるビーズ0.1mm及び0.8mmの部分の圧力水頭の経時変化をそれぞれ、図-25、図-26に示す。また、試験ケースEX3-2においてFDRにより計測された体積含水率の経時変化を図-27に、間隙水圧計測により計測された間隙水圧の経時変化を図-28に示す。現象をみると、先の1.0mmの場合とほぼ同様であると言える。図-29にはFDRと間隙水圧計の同測定点（同座標点）、同時での測定値と先に測定した水分特性曲線との比較図を示す。わずかにばらつきはあるが、装置の測定精度から考えるとほぼ妥当な値であると言える。図-30に排水量の経時変化を示す。2つのケースでほぼ同一の曲線が示されており、その量も先の1.0mmの場合と同様の結果である。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

（1）FDR等による不飽和領域測定に関する検討

岩石試料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。そのため、対象とする岩石試料に対してキャリブレーションカーブを作成する。

（2）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の水槽Bにおいて岩石を用い坑道周辺への不飽和領域の発生状況を観察し、定性的に現象を把握する。試験においては、岩石内の初期圧力水頭、坑道内のベンチレーション状況等を変化させ、その影響によりどの程度不飽和領域の広がりが異なるのか把握することを目的とする。

（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

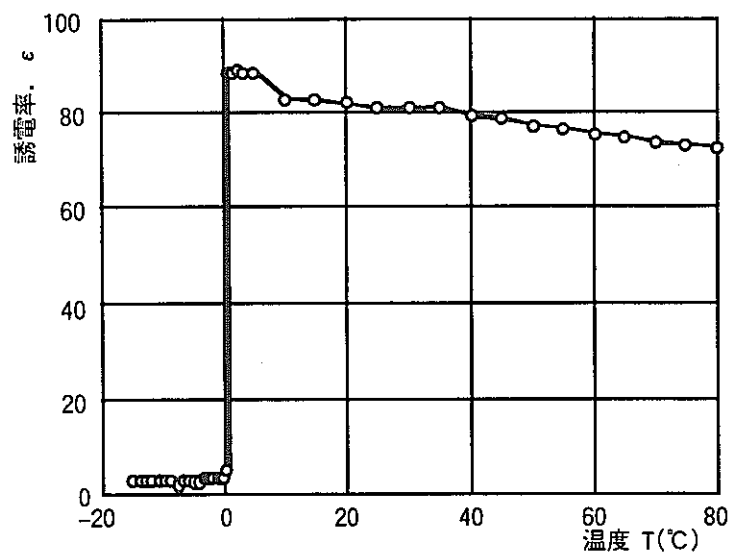


図-1 温度（水温）と誘電率の関係

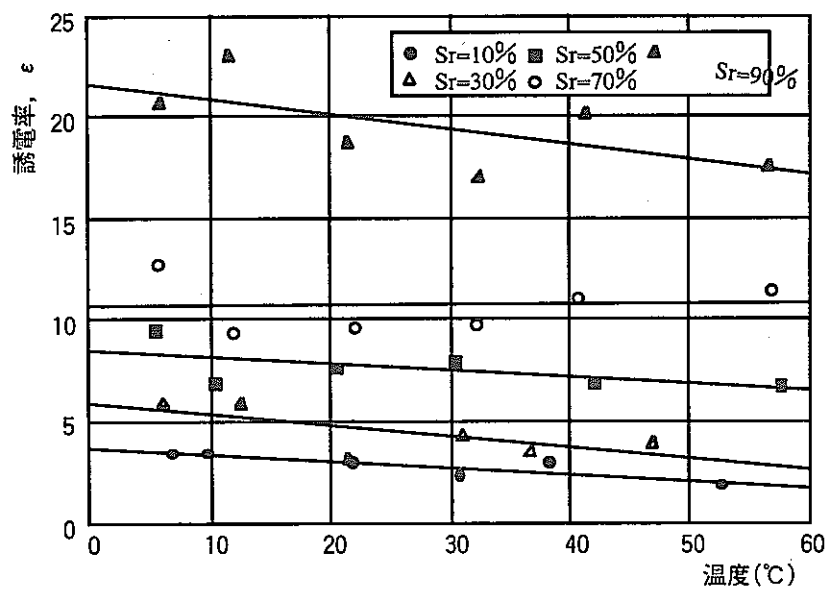


図-2 不飽和土における温度と誘電率の関係

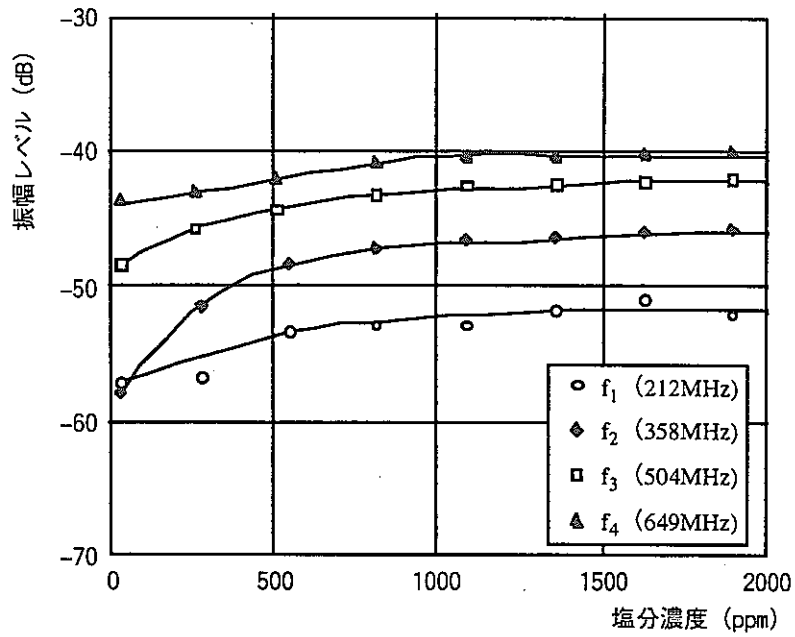


図-3 水溶液の塩分濃度と各ピークの電圧の関係

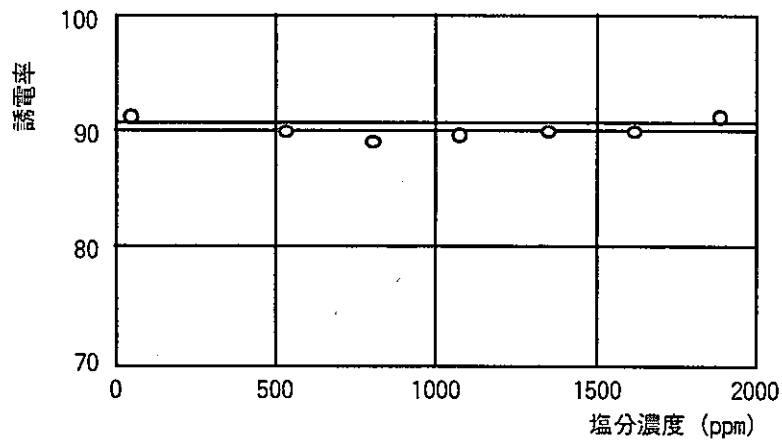


図-4 水溶液の塩分濃度と誘電率の関係

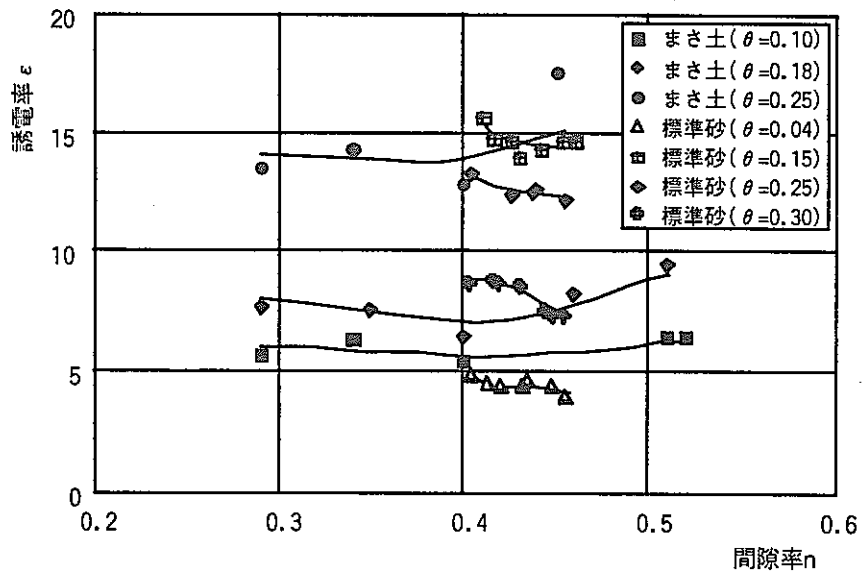


図-5 土粒子密度と誘電率の関係

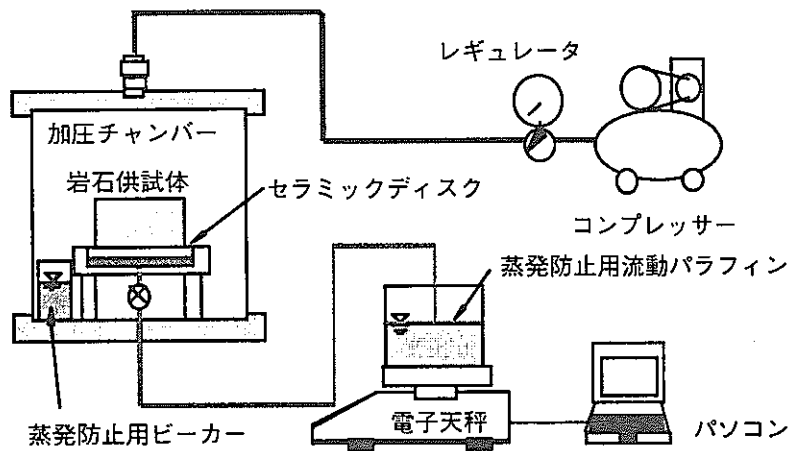


図-6 水分量調整装置の概要

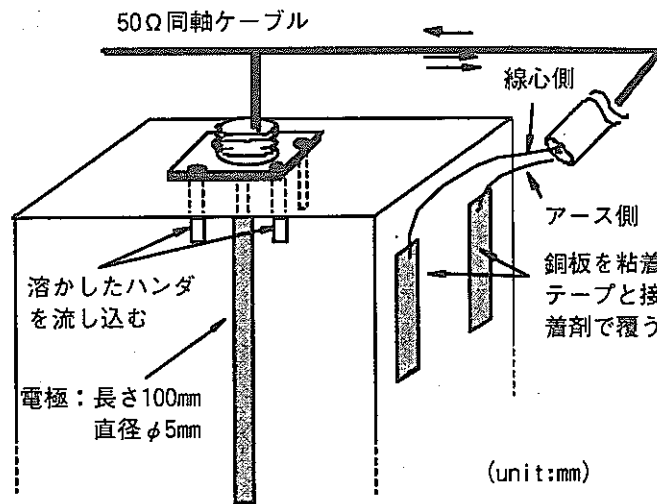


図-7 計測センサーの設置概要図

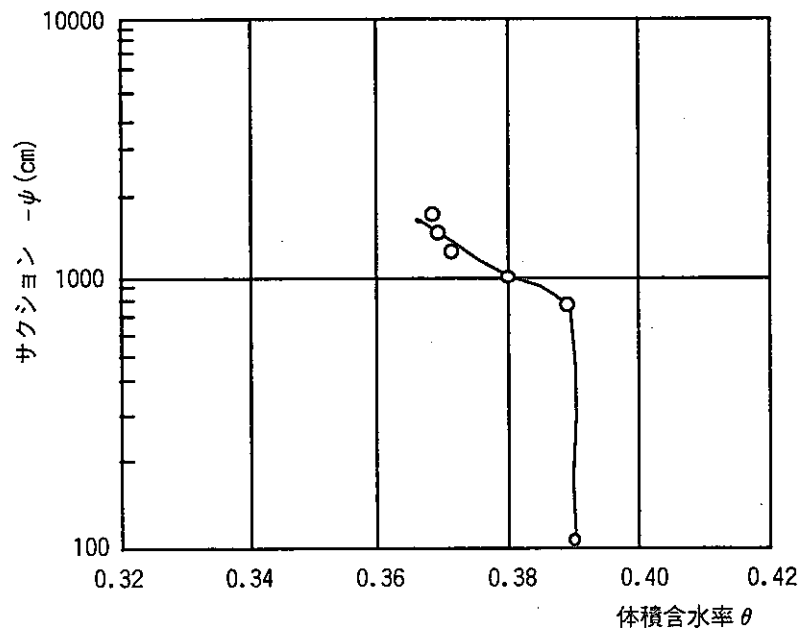


図-8 岩石供試体の水分特性曲線（加圧板 pF 試験結果）

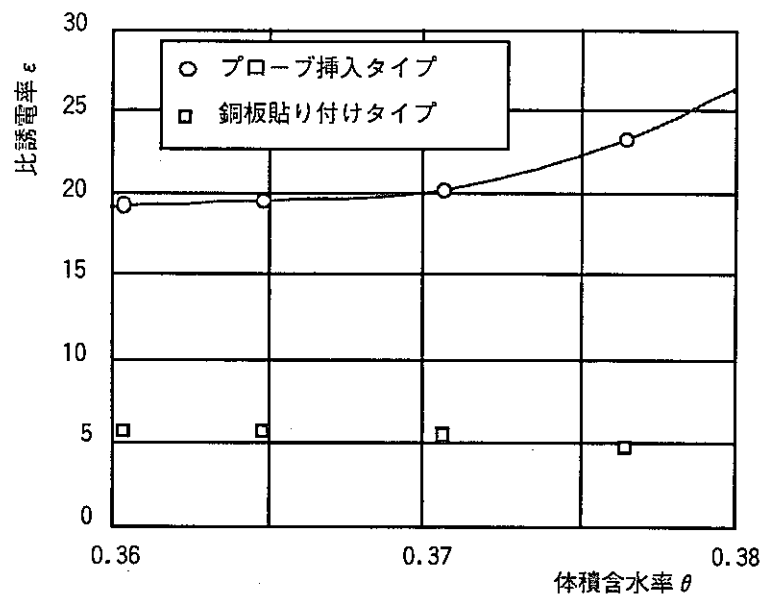


図-9 誘電率測定結果

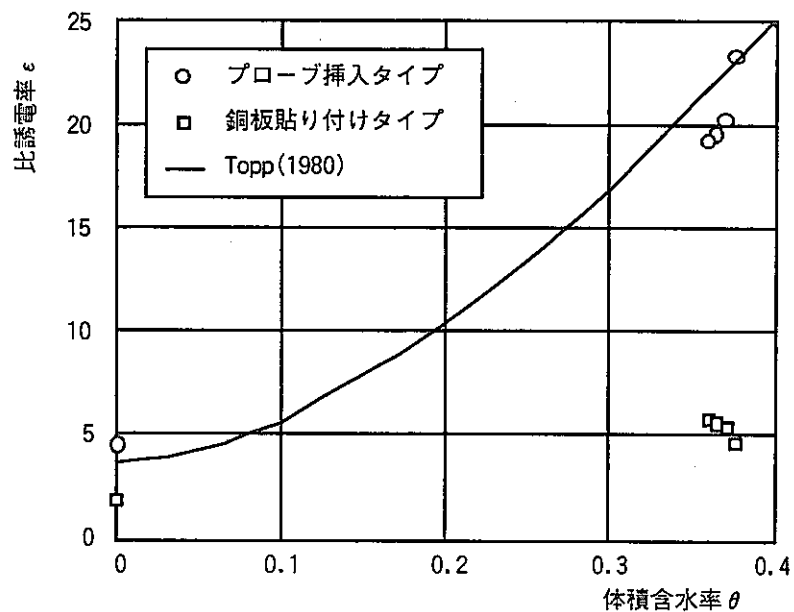


図-10 キャリブレーション結果

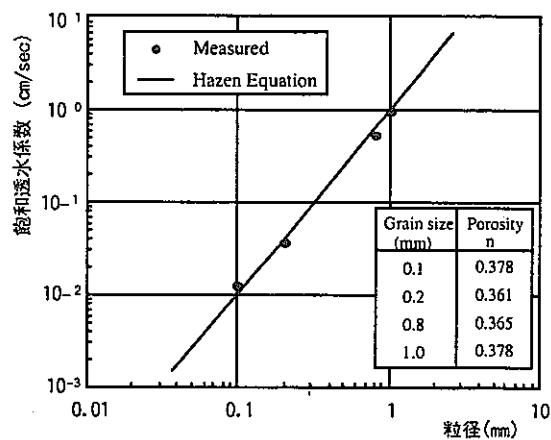


図-11 飽和透水試験結果

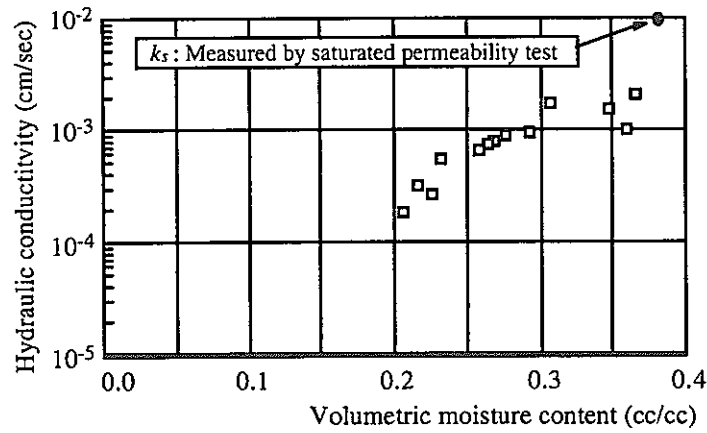


図-12 不飽和透水係数算定結果

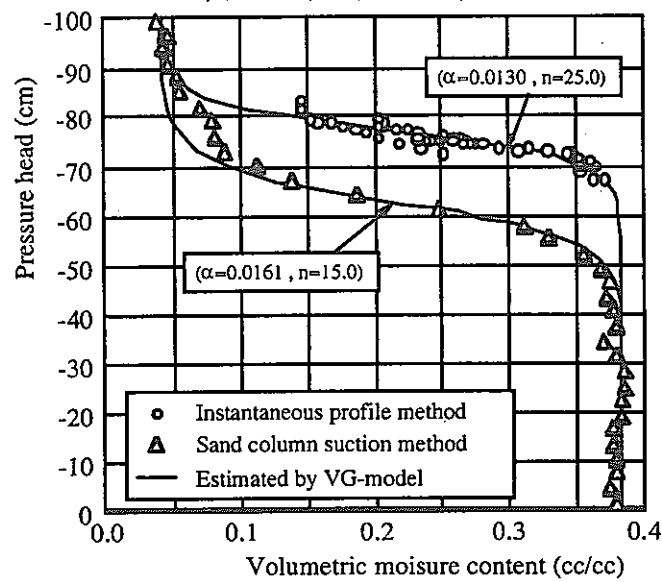


図-13 瞬時水分計測法と土柱法の水分特性曲線の比較

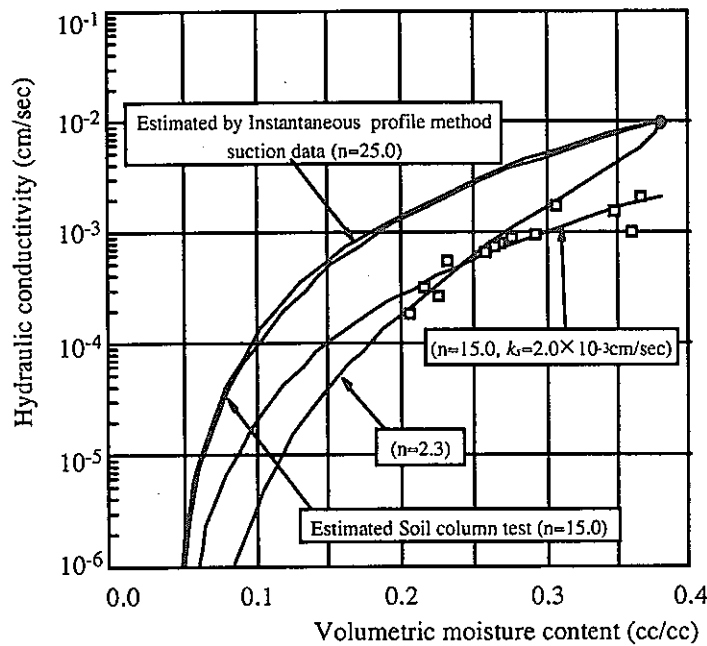


図-14 VGモデルによるフィッティング結果

表-1 試験ケース

No.	実施日	仮 ケース No.	試験 ケース No.	試験 結果	外側ビーズ 粒径 [mm]	内側ビーズ 粒径 [mm]	装置側面条件	FDR	間隙 水圧計	試験水	排水量 測定
1	11-07-30	EX1	EX1-1	○	0.1		予備試験	○	○	無色水	×
2	11-09-09	EX2	EX2-1	×	3.0	3.0	水位固定	△	△	無色水	×
3	11-03-08	EX3-1	EX2-2	×	0.1	3.0	水位固定	△	△	無色水	×
4	11-03-12	EX3-2	EX2-3	○	0.1	2.0	水位固定	△	△	無色水	×
5	11-07-	EX4-1	EX2-4	○	0.1	2.0	水位固定	×	○	無色水	×
6	11-08-02	EX4-2	EX2-5	○	0.1	1.0	水位固定	×	○	無色水	○
7	11-08-05	EX4-3	EX3-1	○	0.1	1.0	不透水	○	△	無色水	○
8	11-08-10	EX4-4	EX3-2	○	0.1	0.8	不透水	○	△	無色水	○
9	11-09-02	EX4-5	EX3-3	○	0.1	1.0	不透水	×	○	無色水	○
10	11-09-14	EX4-6	EX3-4	○	0.1	0.8	不透水	×	○	無色水	○
11	11-10-22	EX4-7	EX3-5	○	0.1	0.8	不透水	×	○	色紅水	○

○：測定，△：一部測定，×：非測定

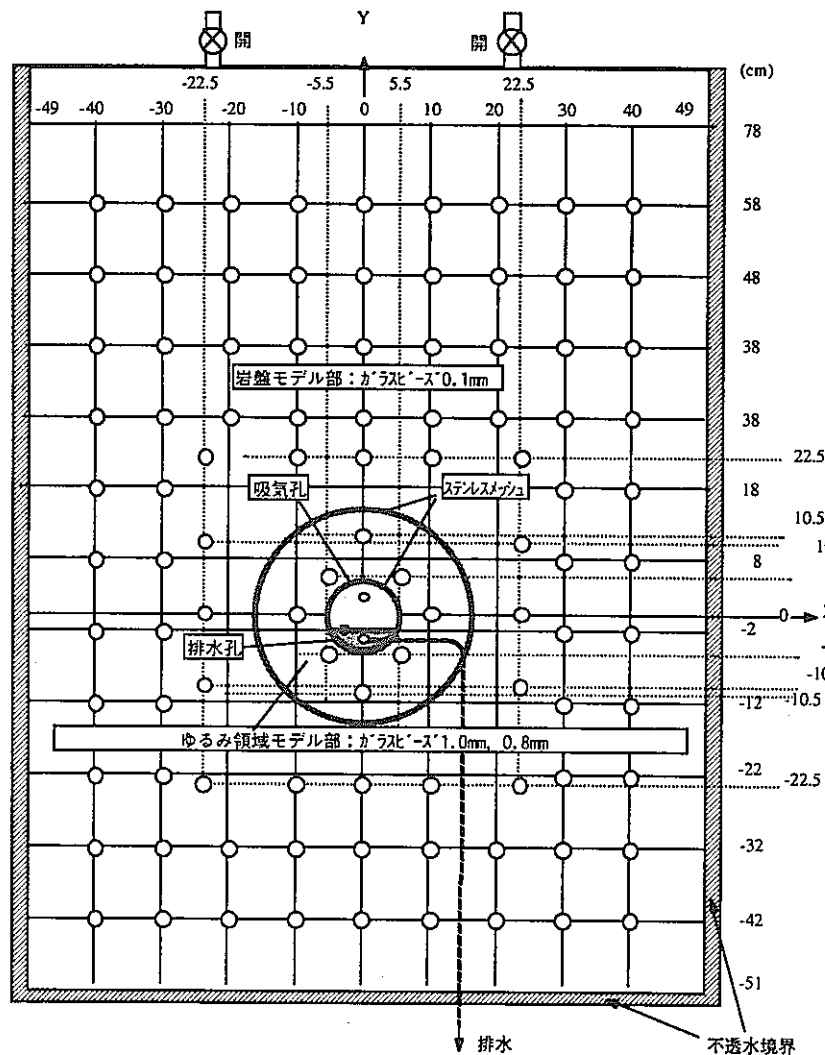


図-15 試験条件（水槽 A : EX3）

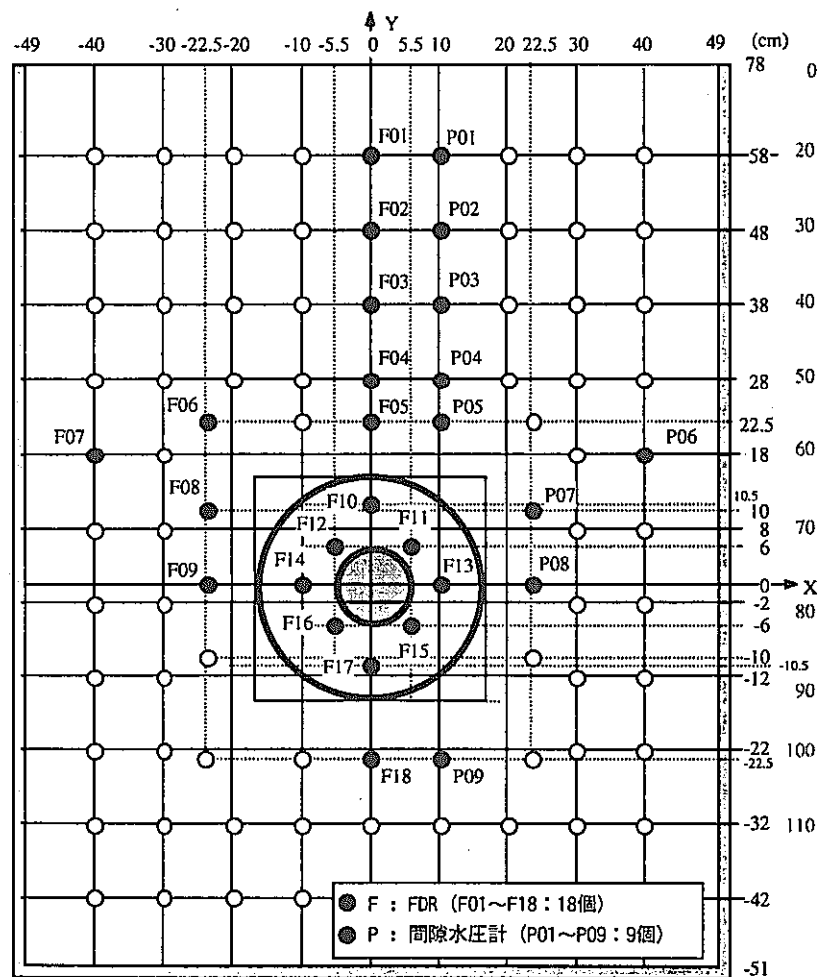


図-16 センサー設置位置（水槽A：EX3-1）

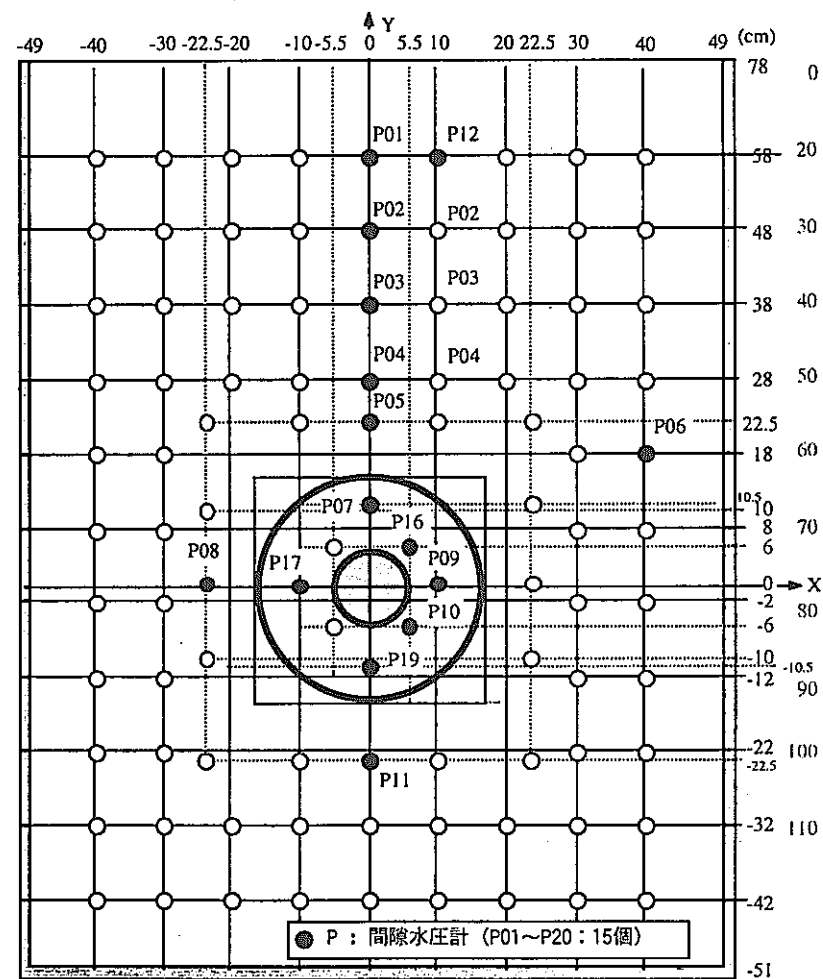


図-17 センサー設置位置（水槽A：EX3-3）

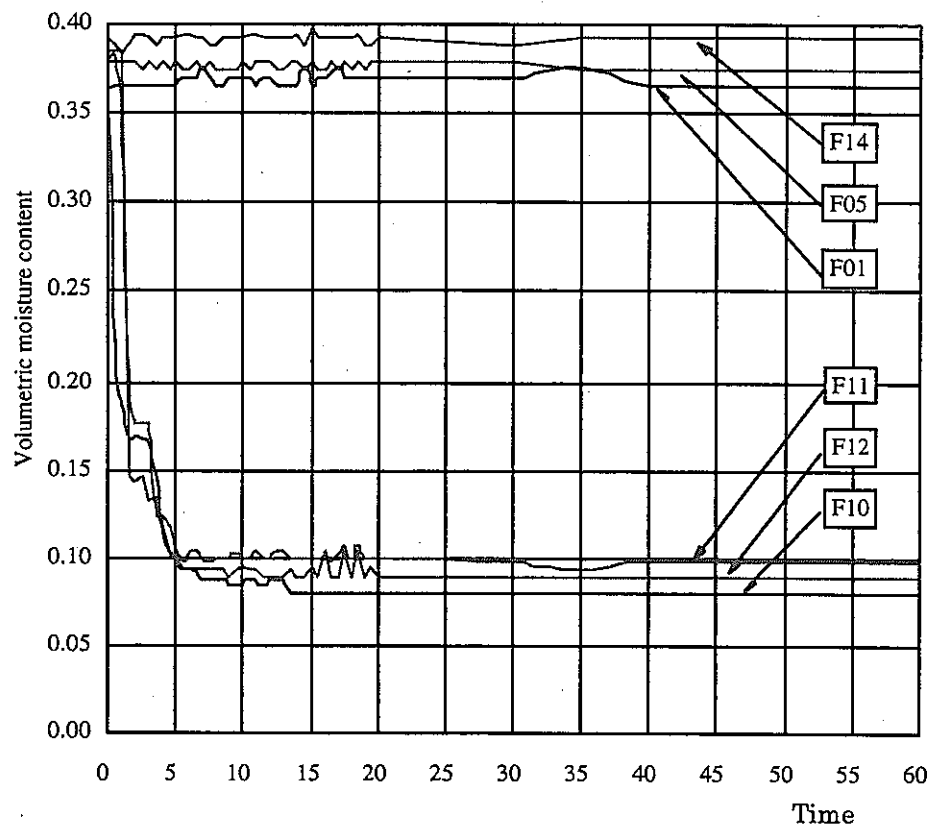


図-18 FDR によって計測された体積含水率の経時変化 (EX3-1)

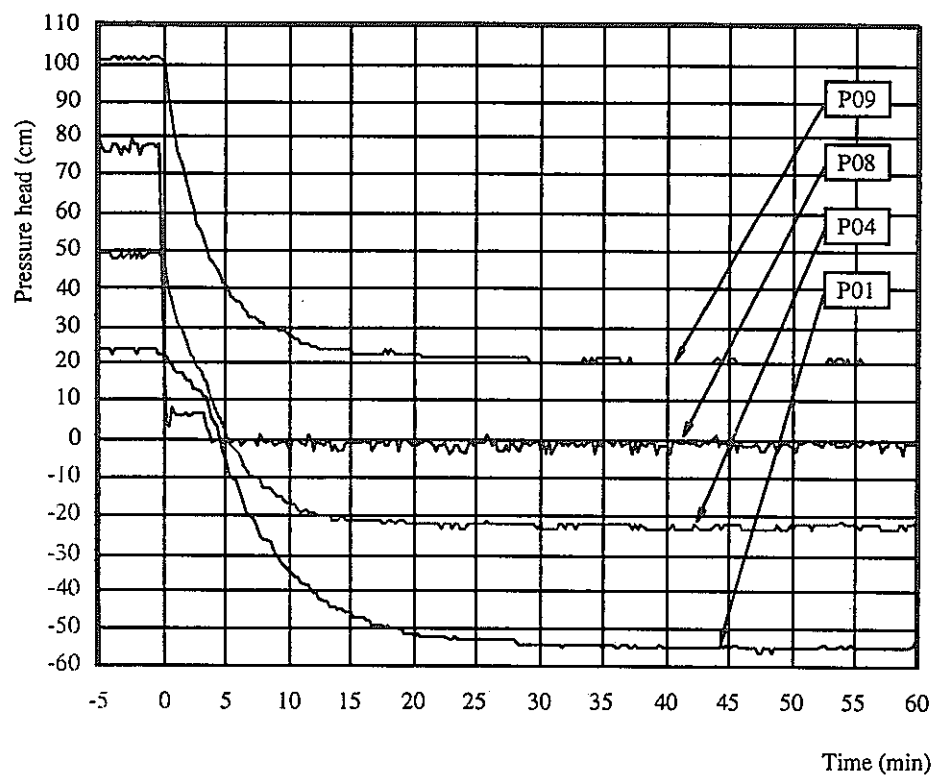


図-19 間隙水圧の経時変化 (EX3-1)

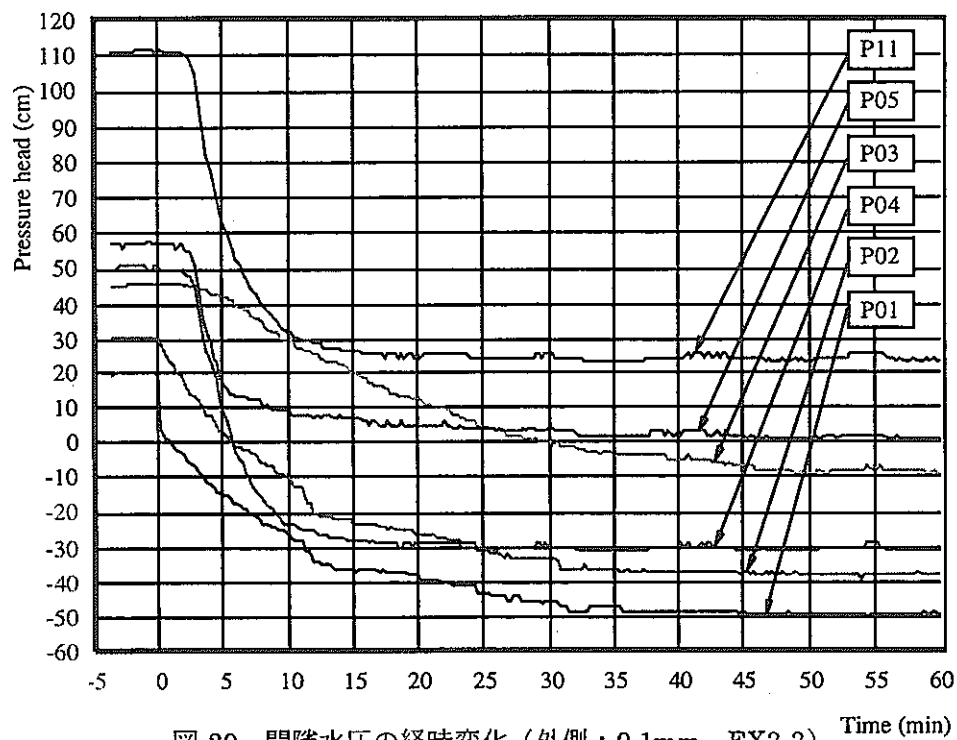


図-20 間隙水圧の経時変化（外側：0.1mm, EX3-3）

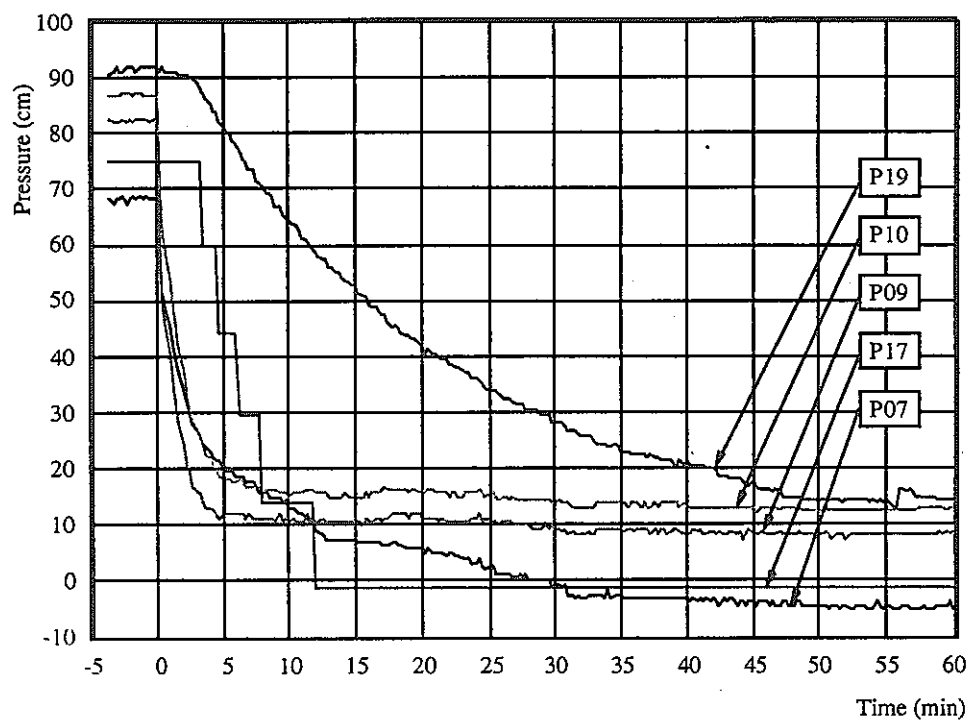


図-21 間隙水圧の経時変化（内側：1.0mm, EX3-3）

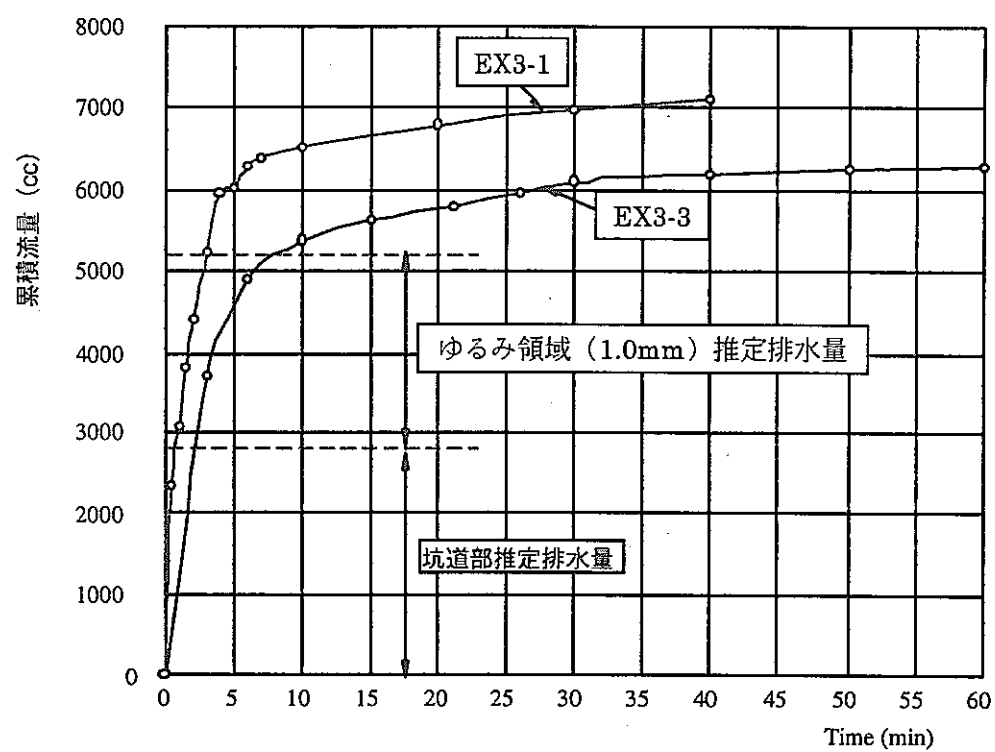


図-22 排水量の経時変化

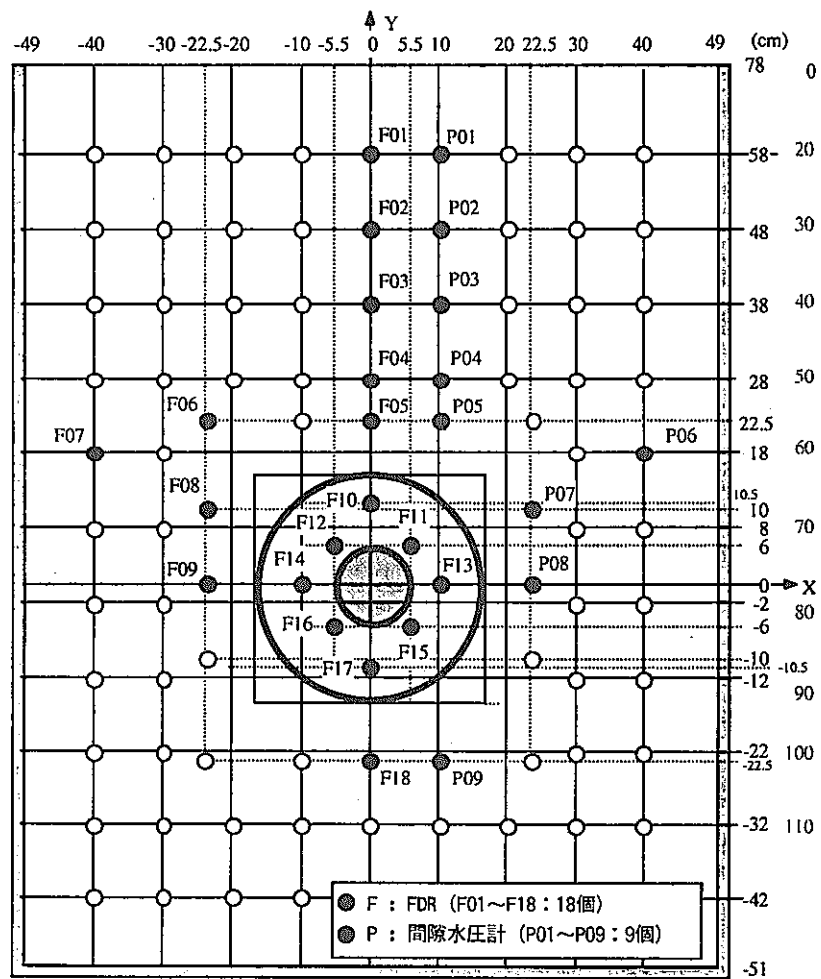


図-23 センサー設置位置 (水槽 A : EX3-2)

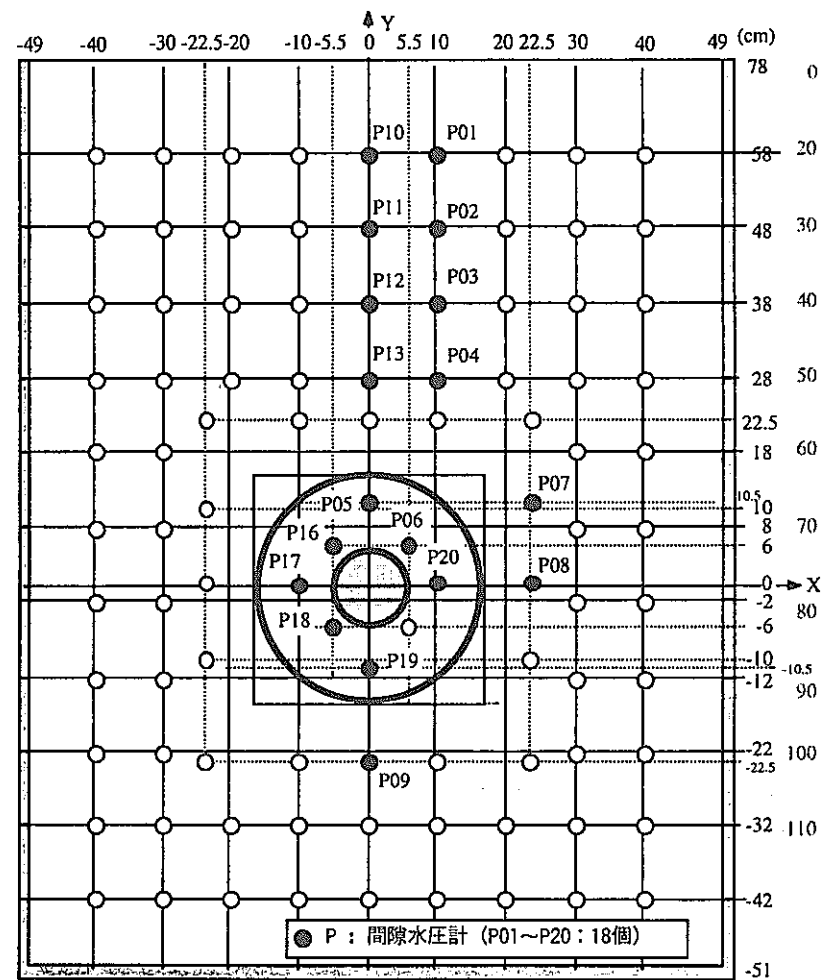


図-24 センサー設置位置 (水槽 A : EX3-4)

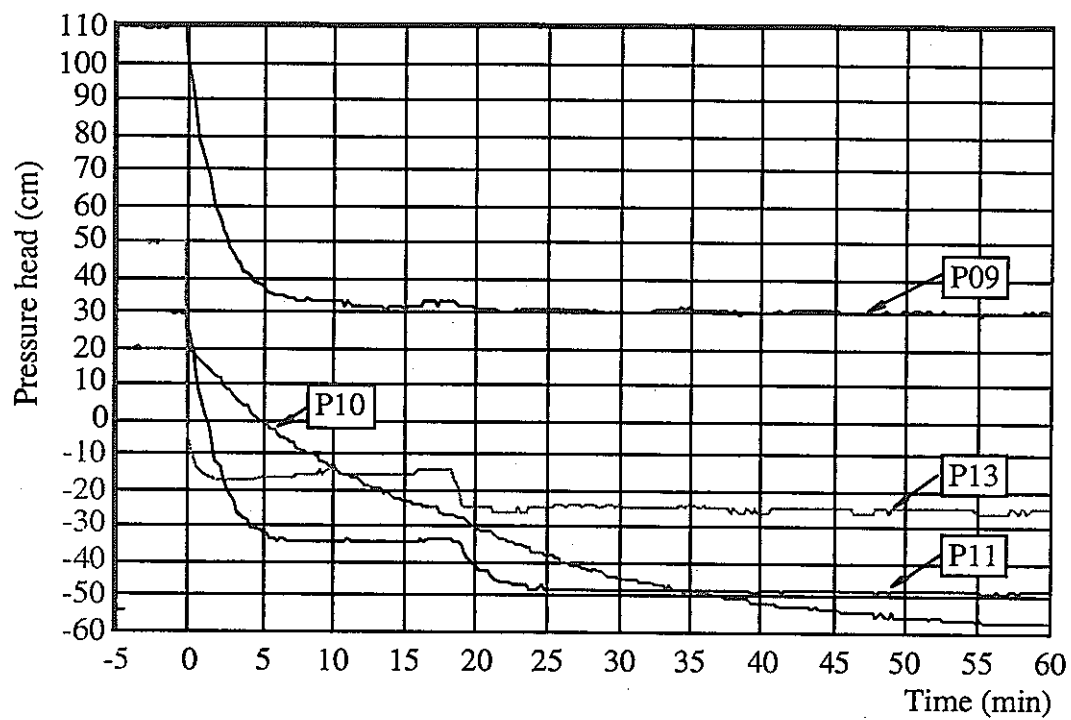


図-25 間隙水圧の経時変化（外側：0.1mm, EX3-4）

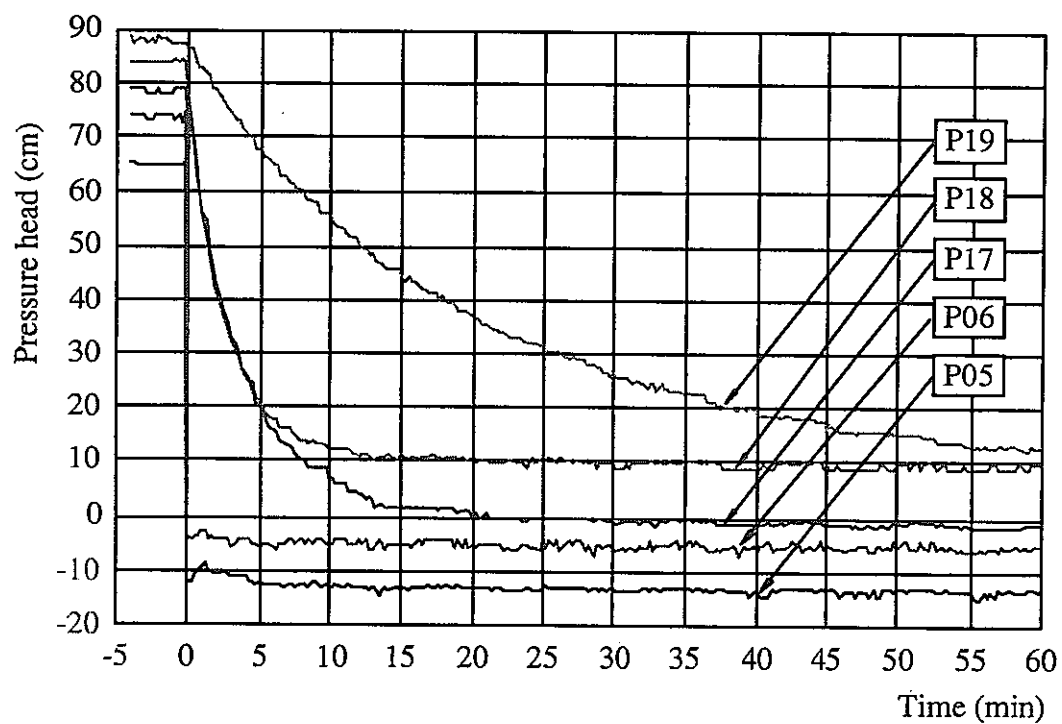


図-26 間隙水圧の経時変化（内側：0.8mm, EX3-4）

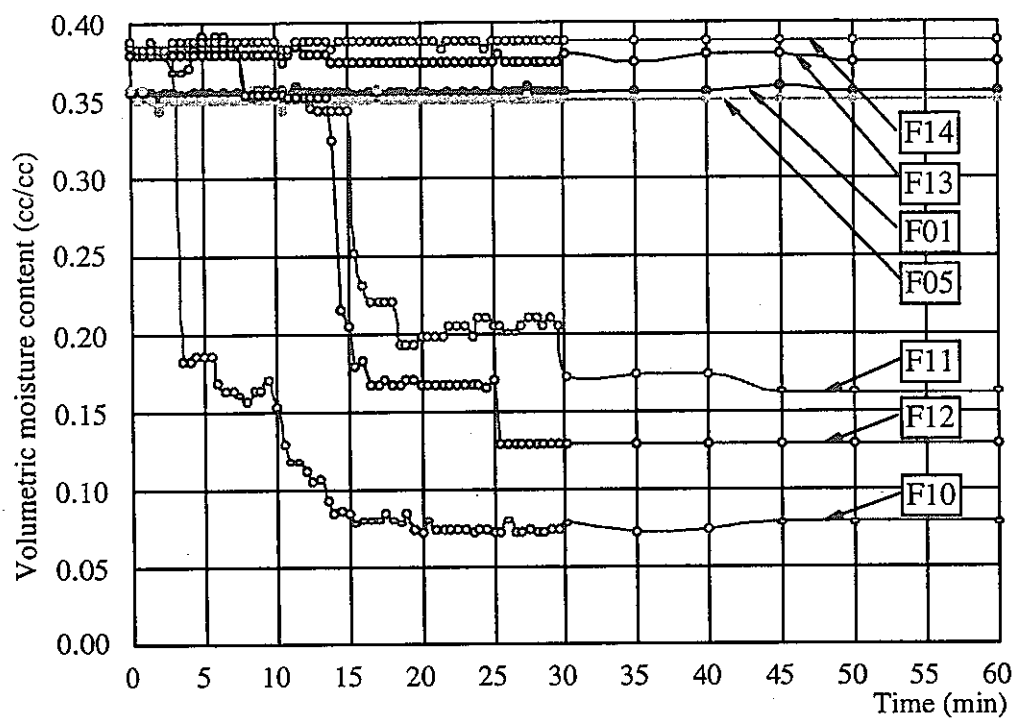


図-27 FDR によって計測された体積含水率の経時変化 (EX3-2)

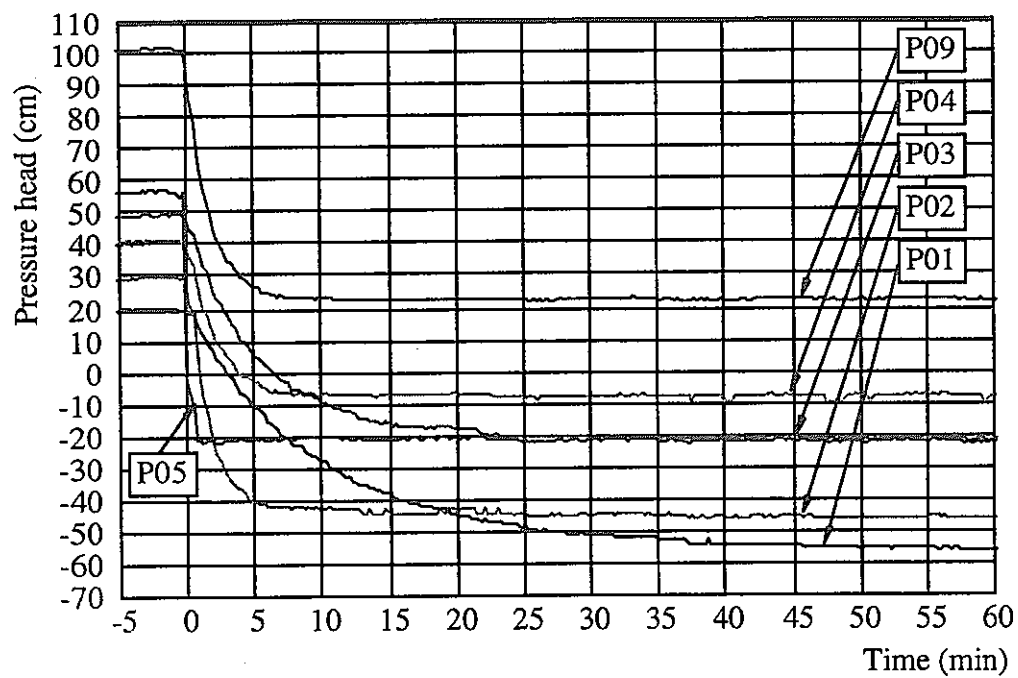


図-28 間隙水圧の経時変化 (EX3-2)

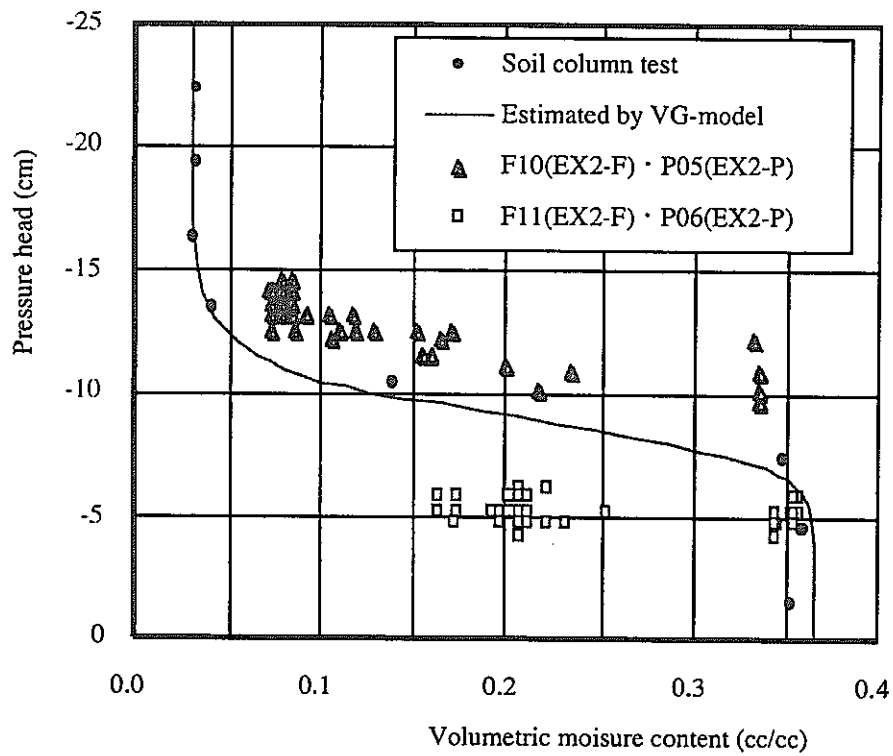


図-29 水分特性曲線との比較

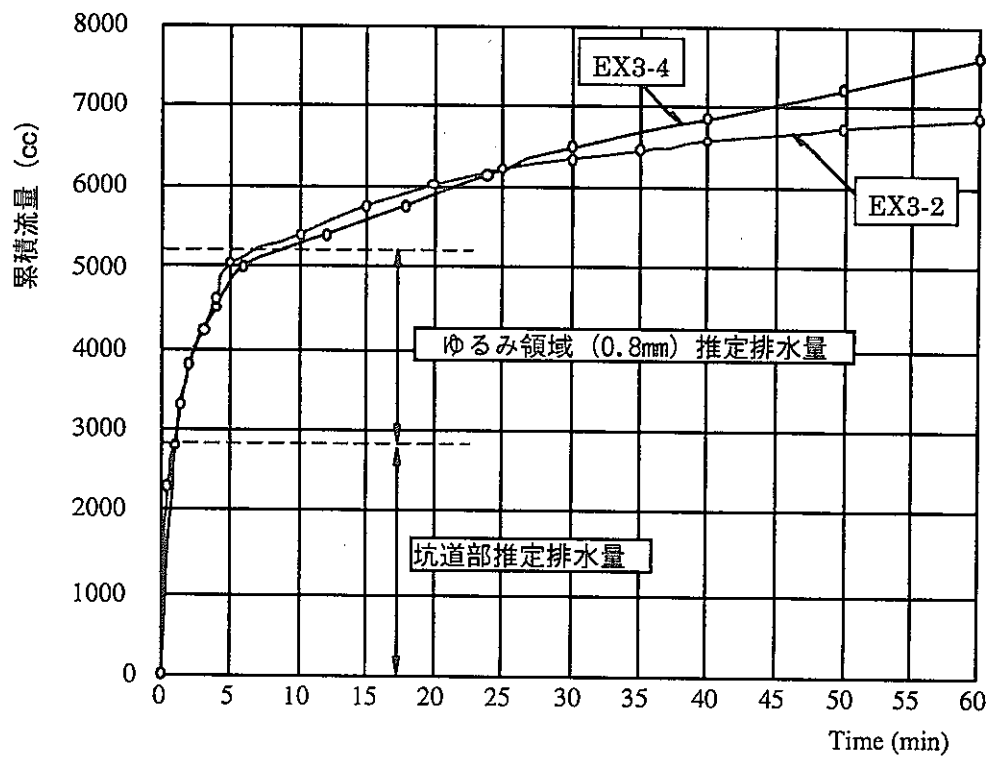


図-30 排水量の経時変化

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	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		
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 田中 知 教授* 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境学専攻 長崎 晋也 助教授* 東京大学 大学院工学系研究科 システム量子工学専攻 鎮守 浩史** [*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 Gr 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 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11年4月 1日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☒ 客員研究員 ☒ 研究生の受入れ ☐ 共同研究		
【研究目的】 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、放射性核種自体がコロイド粒子を形成したり、あるいは地下水中に存在する天然のコロイドに核種が収着することによって、地層中での放射性核種の移行挙動に影響を及ぼすことが懸念されている。 本研究では、コロイドを含む溶液を地質媒体を模擬した亀裂性岩石に送液することにより、コロイドの移行挙動を確認する。また、コロイドと岩石の相互作用に着目した遅延効果に着目することにより、コロイドフィルトレーションなどを考慮した移行メカニズムを解明する。さらに次のステップとして、コロイドと溶質との相互作用を考慮することによって、溶質の移行挙動にコロイドが及ぼす影響を検討し、核種移行モデルの開発に反映することを目的とする。			
【研究内容（概要）】 亀裂性岩石中での核種移行にコロイドが及ぼす影響については、種々の概念モデルによる評価や ¹⁾ 、コロイド形成による実際の地層中での核種移行の助長の事例 ²⁾ が報告されている。しかし、コロイド-岩石あるいはコロイド-核種間の相互作用についての検討は、これまで十分に行われていないので、特にコロイドに関する移行メカニズムの現象解明や、そのモデルへの反映は、必ずしもなされているとはいえない状況にある。 地下水中にコロイド形態の核種が存在しても、コロイド-亀裂表面間に十分な相互作用が存在するのならば、コロイドについても亀裂中での移行が遅延されることが期待される。そこで本研究は、まず亀裂性岩石中でのコロイドの移行挙動を解明することを目的として、平成10年度よりカラム試験を開始した。 コロイドの移行を抑制するメカニズムとして、移流しているコロイドが亀裂表面に接触して、そのまま固相に付着する現象が考えられる。地質媒体を模擬した亀裂性岩石にコロイド溶液を送液することによって、このコロイドフィルトレーションのイオン強度や流速依存性を確認した。また試験後、亀裂面をSEMやEDXで観察することによってコロイドの付着状態を確認し、移流系でのコロイドと岩石（鉱物や表面形状の影響）の相互作用について考察を加えた。			
【使用主要施設】 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			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

亀裂を有する岩石中でのコロイドの移行挙動を調べるために、図1に示す装置および試験条件において、カラム試験を実施した。長さ30cm、直径10cm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研摩した後、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。水の流れを模擬するトレーサ溶液としては、岩石に対する収着性が低いと考えられるI⁻（NaI溶液として使用）を用い、またコロイド溶液には粒径309nmのポリスチレンラテックスを用いた。これらの溶液をカラムに送液し、流出液をオートサンプラーで分取して濃度を紫外吸収スペクトル法で測定した。一連の試験は同一の岩石カラムを用いたが、各試験の終了時には蒸留水で十分洗浄し、洗浄液にラテックスコロイドが検出されなくなるのを確認した。

平成10年度は、溶液のイオン強度がラテックスコロイドの破過挙動に与える影響を検討した。図2に試験結果を示す。コロイドの流出挙動としては、急激な破過の後には、徐々に流出濃度が流入濃度に近づく（ $C/C_0=1$ ）傾向が確認された。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が増加するのが認められた。

【研究成果】

1. コロイド移行試験

本年度は、流速がラテックスコロイドの破過挙動に与える影響を検討した。これまでの試験と同様に、長さ30cmの模擬亀裂岩石カラムに、濃度25ppmのラテックスコロイド（粒径309nm）を送液した。溶液はいずれの試験でも、 NaNO_3 によってイオン強度を 10^{-4} に調整し、流速は約7cm/hr、35cm/hrおよび70cm/hrに変化させた。これは各々、ポンプ流量約7mL/hr、35mL/hrおよび70mL/hrに対応する。コロイドの移行試験については、各条件について2回実施した。

試験結果を図3に示す。流速約70cm/hrの試験では、2回の送液において破過挙動に相違が見られたが、全体としてはラテックスコロイドを送液する流速が大きい程、同一流出量におけるコロイド濃度が増加し、コロイド移行における遅延現象が減少していることが確認された。これは流速が大きい状態では、亀裂表面とコロイドとの相互作用が十分でない、すなわち、コロイドが亀裂面へ十分付着しないうちに、カラムを破過してしまうためと推測される。この流速依存性はトレーサとしてのNaIについても確認された。ただし同一の流速においてはいずれの場合でも（流速約7cm/hrおよび70cm/hr）、トレーサの破過に比較してコロイドのそれの方が遅延された。

2. 亀裂表面観察

コロイドの送液を開始した初期の段階での、岩石へのコロイドの付着状態を確認することを目的として、カラムから岩石を取り出し、亀裂表面のコロイドをSEM（Scanning Electron Microscopy）/EDX（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）で観察した。

上述の試験と同様に、ラテックスコロイド（粒径：309nm、濃度：25ppm）を、 NaNO_3 によってイオン強度 10^{-3} の溶液に調整し、約7cm/hrの流速で長さ30cmの岩石カラムに送液した。ただしこの試験では、コロイドの岩石への付着の初期の段階を調べるために、液量を540mL流した段階で送液を中止した。その後、蒸留水を送液して、亀裂内部に残留している試験溶液を洗浄し、カラムを分解して岩石コアを取り出した。カラムの流入口近傍および流出口近傍から、おのおのの岩石を切断して、破片をSEM観察用の試料に供した。

カラム流入口近傍でのコロイドの付着状態を図4に、また流出口近傍でのそれを図5にそれぞれ示す。EDXで岩石の元素組成を分析することにより、SEMでの画面上を占めている鉱物を推定した。図4、5を比較すると、カラム流出口近傍より流入口近傍のほうが、コロイドの付着量が多い傾向が確認された。また、ここで推定を行った花崗岩を構成する鉱物（長石、石英および雲母）に関しては、いずれもラテックスコロイドが付着しているのが確認されたので、鉱物種によるコロイド付着性の顕著な相違は無いと判断された。特に図4においては、むしろ亀裂表面の起伏（荒さや孔）の程度に依存して、コロイドは局部的に付着しているように見受けられる。このように、ラテックスコロイドについては、岩石への付着の初期の段階において、亀裂表面に均一に付着するのではなく、表面の形状的不均一性の影響を受けてパッチ状に付着することが観察された。

コロイド粒子が付着する媒体の表面不均一性を考慮したコロイドの破過挙動に関するモデル検討では³⁾、媒体に対してコロイドの付着性が強いサイトと弱いサイトの2種類を想定している。付着性の強いサイトは局所的（パッチ状）に存在するものとし、このサイトの存在割合やコロイドの付着頻度、および付着したコロイドが後続のコロイドの付着を妨げる影響（ブロッキング）を考慮して、コロイドの破過過程を検討している。今回の観察結果より、コロイドの送液の初期段階では、ラテックスは亀裂表面に均一に付着しないことが確認されたので、上述のようなコロイドの付着性の強弱を考慮することが、ラテックスコロイド／花崗岩系での移行挙動の現象解明において必要とされと考えられる。

- 1) Baek, I. and Pitt, Jr. W.W. (1996) : Colloid-facilitated Radionuclide Transport in Fractured Porous Rock, Waste Manage., Vol.16, No.4, pp.313-325.
- 2) Kersting, A.B., Efurud, D.W., Finnegan, D.L., Rokop, D.J., Smith, D.K. and Thompson, J.L. (1999) : Migration of Plutonium in Groundwater at the Nevada Test Site, Nature, 397, 7, January, pp.56-59.
- 3) Ryan, J.N. and Elimelech, M. (1996) : Colloid Mobilization and Transport in groundwater, Colloids Surfaces A, Vol.107, pp.1-56.

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

1. 不均一媒体へのコロイドの付着の観察

今年度の研究結果より、コロイドの亀裂表面への付着およびそれに伴う移行の遅延は、岩石表面の形状的不均一性に影響されるように見受けられた。亀裂表面の起伏（荒さや孔）は、表面近傍における水の流れ方（水理的不均一性）や結晶端面などでの表面電荷（静電的不均一性）に影響を及ぼすことが推測される。これらの要因を詳細に解明するためには、今後岩石を用いたカラム試験と併行して、ガラス板などの材質的に均一な付着媒体を用いることにより、表面形状の影響を抽出したコロイド移行試験を実施することが必要だと考えられる。

2. コロイドが溶質移行に及ぼす影響の検討

亀裂岩石中における溶質単独での移行挙動と、コロイドが共存する時のそれとを比較することにより、溶質の移行に及ぼすコロイドの影響を実験から検討する。また、カラム試験と併行して、岩石／溶質／コロイドの3相間での相互作用（コロイドの付着および溶質の収着）をバッチ試験により確認する。

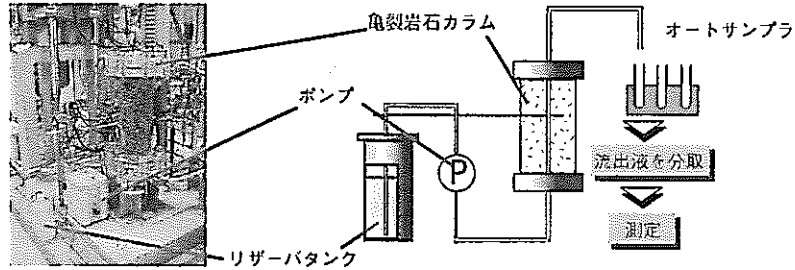
【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

昨年度までの成果について、Journal of Nuclear Science and Technology に投稿中。

● 目的および試験装置・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。

試験装置：

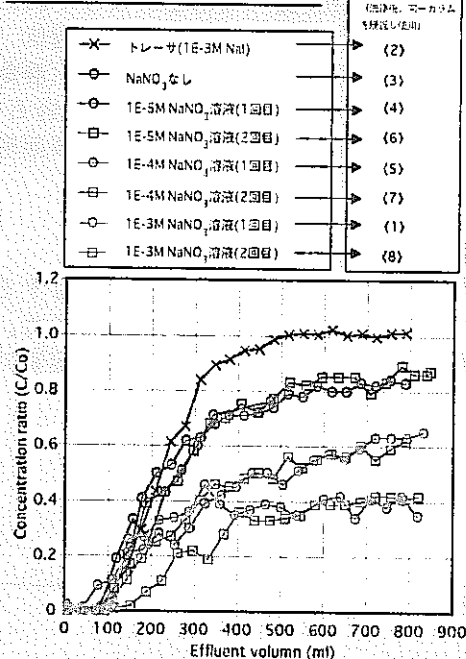


試験条件：

- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 模擬亀裂岩石 亀裂面研磨平滑処理 カラム長さ 30cm, 15cm 亀裂寸法 約W100mm X H1mm ・ 流速 約7~70cm/hr
(ポンプ流量約7~70mL/hrに対応) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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. 試験装置および試験条件

● 試験結果 (イオン強度依存性)



コロイドの亀裂岩石カラムからの流出挙動のイオン強度依存性
 コロイド：ポリスチレン(PSt)ラテックス (粒径：309nm)
 リザーバ濃度：25ppm 流速：約7cm/hr
 カラム長さ：30cm 亀裂幅：約1mm

図2. ラテックスコロイドの破過曲線のイオン強度依存性

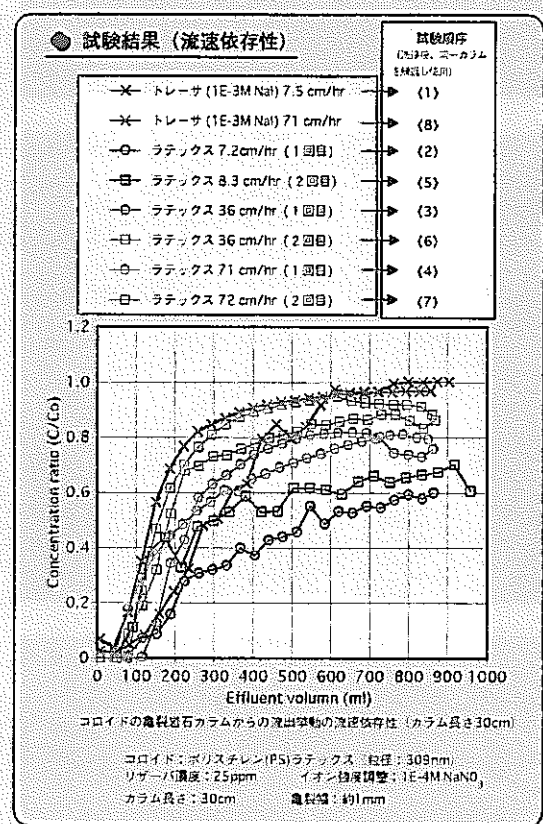
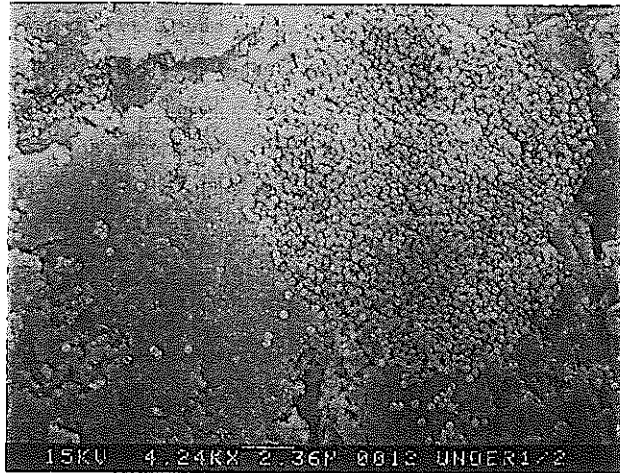
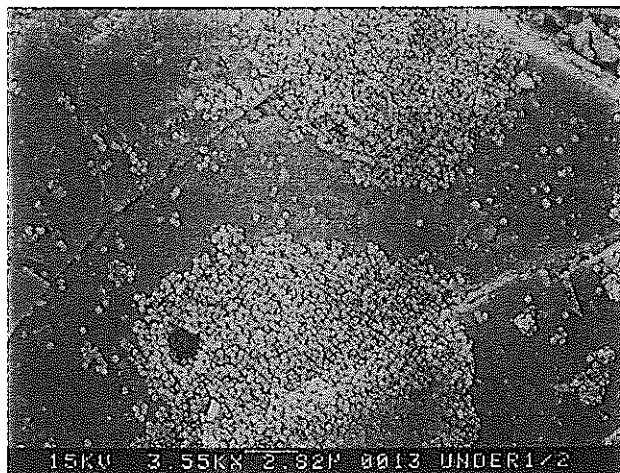


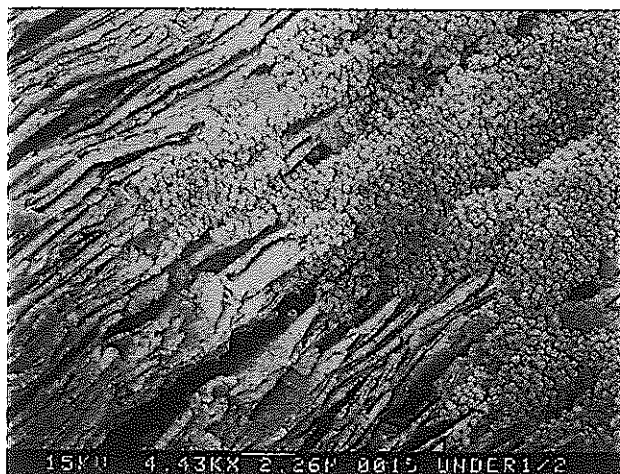
図3. ラテックスコロイドの破過曲線の流速依存性



長石



石英



雲母

図4. 亀裂表面へのラテックスコロイドの付着（カラム流入口近傍）



長石



石英



雲母

図5. 亀裂表面へのラテックスコロイドの付着（カラム流出口近傍）

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	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			
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 光斉, 博士課程 于 青春		
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 システム解析 Gr 研究員 澤田 淳, 研究員 井尻裕二, 研究主幹 内田雅大		
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 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 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11年 9月 6日 ~ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 高レベル放射性廃棄物地層処分に関わる第2次と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モデル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した。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ヶ所の鉱山や路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及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。			
【研究内容（概要）】 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。			
【使用主要施設】 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 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 Gr 計算機			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 10 年度は日本全国のトンネルや大規模地下空洞（地下発電所や地下石油備蓄基地〔例えば、菊間基地：花崗閃緑岩〕）で観察された亀裂データを収集・整理し、事業団が保有する亀裂解析コード（FracMan）により亀裂解析を実施することによって、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の方向性や大きさ等についてその特性を明らかにした。平成 11 年度は平成 10 年度に引続き亀裂特性評価を行うとともに、得られた知見より第 2 次取りまとめで構築した亀裂ネットワークモデルの妥当性を示した。

【研究成果】

今年度の研究成果の概要を以下に記す。

（1）亀裂特性評価

昨年度までに収集・整理した亀裂データのうち、菊間地下石油備蓄基地、久慈地下石油備蓄基地、奥多々良木地下発電所、赤石地下発電所、神岡鉱山スーパーカミオカンデ、音羽ダムの 6 サイトについて亀裂の方向やトレース長分布の解析を行った。図 1 に菊間地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップおよび、その亀裂マップをデジタル化したものを示す。この亀裂マップから、亀裂のトレース長分布を求めた（図 2）。また、これらの亀裂の方向分布を図 3 に示す。

以上のような亀裂データ解析の結果、地下深部の花崗岩において亀裂の方向特性は直交する鉛直 2 組の亀裂群が存在すること、亀裂の大きさはべき乗分布にしたがうことがわかった。

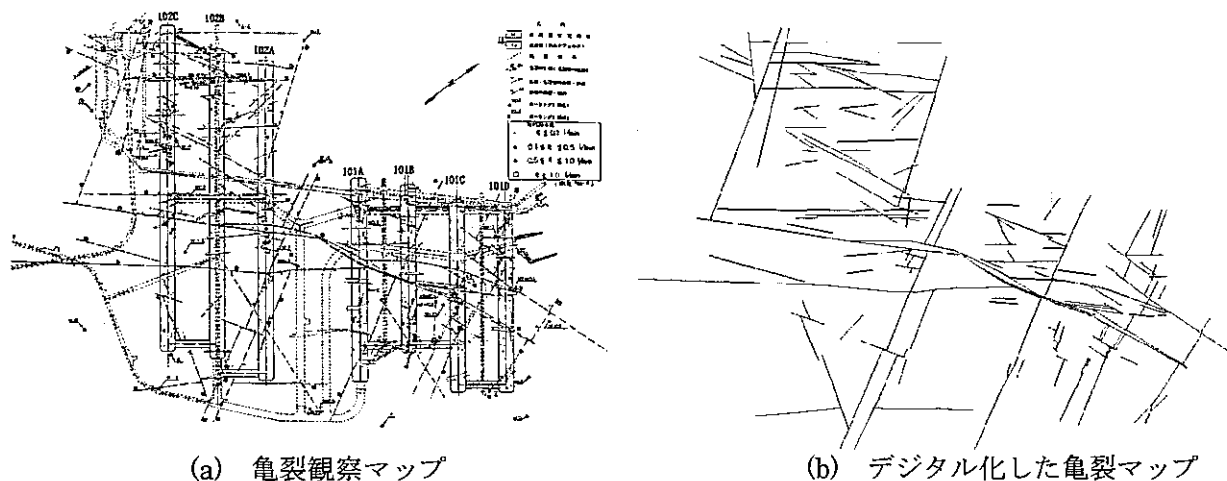


図 1 菊間地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ

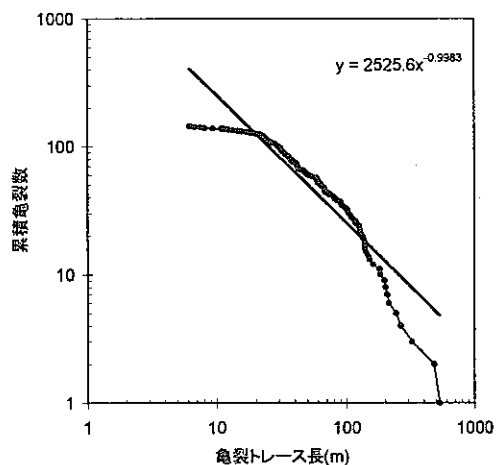


図 2 亀裂トレース長分布（べき乗分布）

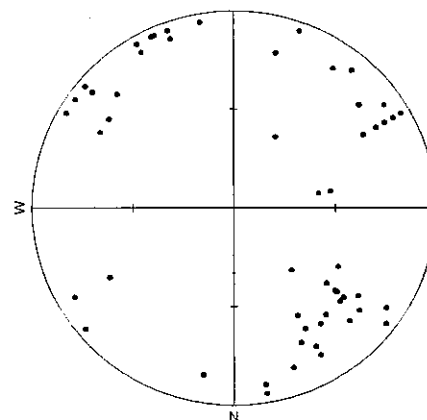


図 3 亀裂の方向分布
（シュミットネット、下半球投影）

(2) 第2次取りまとめで構築した亀裂ネットワークモデルの妥当性

亀裂の方向特性については、花崗岩以外のサイトでは亀裂の方向性に顕著な傾向を認めることはできなかったものの、花崗岩地域においてはお互いに直交する亀裂が卓越する傾向が認められ、第2次とりまとめで採用した仮定（「地下深部の花崗岩では直交する2組の鉛直亀裂群が卓越する」）の妥当性が確認された。

亀裂のトレース長分布においては、岩種や地域に拘わらず両対数グラフではほぼ同じ直線上にプロットされ（図4）ことがわかり、第2次とりまとめで採用した仮定（「亀裂の大きさはべき乗分布に従う」）の妥当性が確認された。

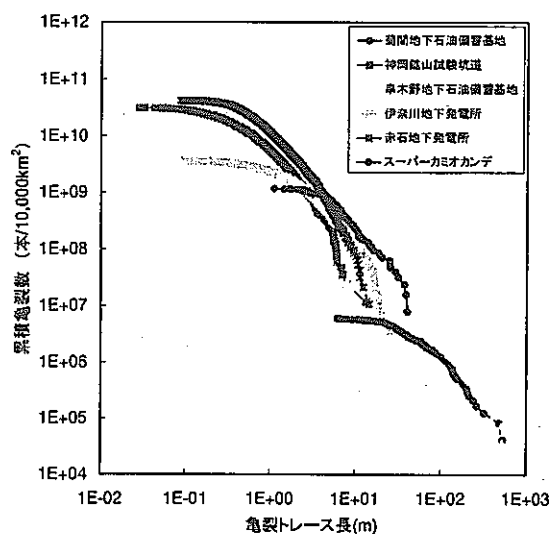


図4 亀裂トレース長のべき乗分布

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成12年度は、前年度までに得られた亀裂特性に基づいて亀裂ネットワークモデルを構築し、亀裂パラメータが亀裂性岩盤中の水理物質移行に及ぼす影響を感度解析的に把握する。また、この結果に基づいて、構築した亀裂ネットワークモデルの信頼性を評価する方法について検討する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

井尻裕二、澤田淳、山田直之、大西有三、大津宏康、土山富広：亀裂のトレース長分布とそのモデル化に関する考察、第35回地盤工学研究発表会論文集（印刷中）

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	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 長沼毅 助教授 村上由記（博士課程1年）** 〔*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Gr 岩月輝希		
研究協力 実施場所	広島大学 生物生産学部 東濃鉱山および周辺試錐孔		
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11年8月1日 ～ 平成12年3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☒ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 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。 本件では、地下微生物の生物量、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への影響評価を行うため、基礎的な知見を得ることを目的とする。			
【研究内容（概要）】 東濃鉱山およ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、酸素濃度に関わる特異微生物の調査研究を行う。			
【使用主要施設】 広島大学 生物生産学部 東濃鉱山および周辺試錐孔、ペレトロン年代測定棟			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

堆積岩及び花崗岩に掘削された調査試錘孔において、地下水中の微生物の現存量および多様性に関する直接的な調査（顕微鏡法および培養法）をおこなった。可能な限り陸上からの菌混入のない条件で様々な深度の地下水を採取した。得られた地下水中に存在する微生物の現存量を見積もるために全菌数を計数したほか、培養法により一般従属栄養嫌気性菌・脱窒菌・硫酸還元菌・鉄酸化細菌の生菌数を見積もった。さらに、これら培養微生物の一部について遺伝子（16S rRNA）解析をおこなった。

【研究成果】

調査の結果、以下の事が明らかになった。

①微生物の全菌数は堆積岩・花崗岩地下水ともに約 10^6 cells/ml である。これは、生物生産の高い海洋表層の細菌数に匹敵し、地下水中にもかなり高密度で微生物が存在していた。

②実際の生菌数を見積もるために、液体培養を用いた MPN 法により、それぞれの働きをおこなう微生物の培養をおこなった結果、従属栄養性細菌はどの深度からも検出されているが、硫酸還元菌、および鉄酸化細菌の密度は深度によってかなり差が見られ、強還元環境（-300mV）にある堆積岩の深度 153m の地点でもっとも微生物が多様に存在していた。

③染色法による生菌微生物の計数および呼吸活性の測定の結果、これらの環境中の微生物は少なくとも 30~50% の割合で「生きている」ことが確認された。

④電子顕微鏡観察の結果、土岐炭層上部の深度 132 m の地下水からは二分裂中の細胞像や鉄酸化菌と思われる細胞像などが観察され、これらの微生物の活動により、地下の酸化還元環境がコントロールされている可能性が示唆された。

【今後の予定】

本年度で当初予定されていた共同研究期間が終了するため、契約を一旦終了する。平成 12 年度より、新規共同研究を開始する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文など】

「深部地質環境における微生物生態系」：月刊海洋（1999），号外 No. 19, 108-115

「深部地質環境における微生物群集—東濃地域を例として—」：原子力バックエンド研究（1999），Vol.5, No.2, 59-66

「Abundance of subsurface microbial communities in the Tono area, central Japan.」：International symposium on subsurface microbiology (ISSM'99) Proceeding pp. 61-62

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	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の解析										
研究者所属、氏名	<table border="1"> <tr> <td>大学側</td> <td colspan="3">京都大学大学院工学研究科 今中忠行教授 跡見晴幸助教授 江崎聡助手</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G r 岩月輝希</td> </tr> </table>			大学側	京都大学大学院工学研究科 今中忠行教授 跡見晴幸助教授 江崎聡助手			機構側	東濃地科学センター 地層科学研究G r 岩月輝希		
大学側	京都大学大学院工学研究科 今中忠行教授 跡見晴幸助教授 江崎聡助手										
機構側	東濃地科学センター 地層科学研究G r 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11年8月4日 ～ 平成12年3月31日								
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究										
【研究目的】 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。 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ことにより、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。											
【研究内容（概要）】 東濃鉾山およ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、得られた微生物について、微生物機能の解析を行う。											
【使用主要施設】 東濃鉾山および周辺試錐孔、ベレトロン年代測定棟 京都大学大学院工学研究科											

【進捗状況（当該年度までの概要）】

東濃鉾山から採取した土壌サンプル、水サンプルについて、嫌気状態のグローブボックス内で、各種微生物の分離を行った。まず、形態的に異なるものをそれぞれ分離し、遺伝子解析による菌の同定と分類を行い、得られた微生物に対する考察を行った。

【研究成果】

東濃鉾山周辺の堆積岩から採取された地下水中の微生物について、菌株の同定を行ったところ、地上では珍しい菌株や未同定の菌株が見いだされた。現在までの知見をまとめて各菌株の特徴を述べる。深度 104m 地点から分離された菌は *Delftia* 属、*Comamonas* 属と近縁であることが判った。ただ、同じ地点から分離されてきた *Pseudomonas* 属の菌は多様な性質を持つ種類からなるため、より詳しい性質を調べるまではどのような菌か判らない。また、深度 132m 地点の地下水から分離された *Methylophaga* 属の菌株はメタン資化性菌でありメタンを栄養源として従属的に増殖する。深度 132m 地点に生息する菌は未同定のものである可能性が強く、非常に珍しいものであると考えられる。これと若干似ている *Acidovorax* 属の菌は *nitrobenzene* など芳香族炭化水素を分解する菌として研究されており、難分解性の化合物を分解して増殖していると考えられる。ただ、これらの菌は好気的な条件下で有機物の分解を示すものであり、地下でどのように酸素、あるいは酸素に変わる電子受容体を獲得しているのかは興味深い点である。さらに、深度 153m 地点から分離された菌も *Delftia* 属、*Comamonas* 属と近縁であり、*Comamonas* 属は (2,4-dichlorophenoxy-)propionate や chlorophenol などの含ハロゲン有機物を分解する菌として知られている。この性質は *Delftia* 属の菌と同様であり、この地下環境には難分解性のハロゲン化有機物を分解できる貴重な菌が生息していることが推測された。深度 177m 地点から分離された *Rhodococcus* 属は naphthalene などの芳香族炭化水素を分解するものが知られており、属は異なるが上述した他の *Delftia* 属、*Comamonas* 属と性質が似ている。これらの結果を総合して考えると、東濃の地下環境にはメタン資化性菌や難分解性炭化水素や含ハロゲン炭化水素を分解、資化できる従属栄養微生物が生息していることが考えられる。これらの菌は環境浄化という観点から非常に有用な微生物であり、これらの菌自身、あるいはこれらの菌が生産する酵素についての研究が望まれる。

【今後の予定】

本年度で当初予定されていた共同研究期間が終了するため、契約を終了する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文など】

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	緩衝材特性評価モデルの高度化に関する基礎研究		
研究協力課題	均質化法による緩衝材のミクロ・マクロ解析		
研究者所属、氏名			
大 学 側	名古屋大学 大学院工学研究科 地圏環境工学専攻 助教授 市川 康明		
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 Gr 柴田 雅博, 上野 健一 放射化学研究 Gr 佐藤 治夫, 鈴木 覚 処分材料研究 Gr 藤島 敦		
研 究 協 力 実 施 場 所	名古屋大学 大学院工学研究科 地圏環境工学専攻 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 地層処分基盤研究施設		
通算研究期間 (予定)	平成 11 年 10 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 11 年 10 月 29 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアのひとつである緩衝材に対し、緩衝材中の水や物質の動きを評価するモデルを検討し、緩衝材性能に対する理論的裏付け与えるとともに、環境条件の変化に伴う緩衝材性能の変化や長期の時間にわたる緩衝材挙動を予測することを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
緩衝材材料であるベントナイト粘土はミクロレベルで見ると各種粘土鉱物、水、空気からなるミクロ構造物質が集合して全体を形成している典型的なミクロ非均質材料である。従来は、マクロスケールの実験データを取得し現象論的解釈を実施してきたが、本研究では、材料のミクロ構造に基づいた分子レベルでの粘土の挙動に着目し、これをマクロの連続体挙動まで拡張するモデルによって緩衝材の力学挙動や緩衝材中での物質の移動現象を明らかにすることを目的にしている。具体的には、スメクタイト・水複合体等に分子シミュレーション法的一种である分子動力学法を適用してその物性を評価し、均質化手法というミクロ非均質材料を解析する数学理論を通してマクロスケールでのベントナイトの挙動を評価する。 本研究では、特に緩衝材中の物質移動現象に着目し、ベントナイトのミクロ組織特性と分子シミュレーション計算から定まった物性を反映した、新たな拡散場均質化モデルを構築し、数値シミュレーションを実施する。 モデルの評価にあたっては、サイクル機構が従来より取得してきた緩衝材の各種特性値を確証データとして利用するとともに、モデルの確証にも利用可能な新たなデータ取得を行っていく。			
【使用主要施設】			
核燃料サイクル開発機構 地層処分基盤研究施設			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、「(1) 均質化モデルの作成」として、飽和多孔質媒体における多成分混合溶液の拡散問題を取り扱う計算モデルを作成し、固相への収着の取り扱いについても検討を行った。「(2) 均質化解析の実施」として、上記モデルを用い、人工バリア材のレイアウトを考慮した 2 次元における拡散問題の計算を行った。「(3) 解析結果の精査」のために、解析結果との対比を行うための透過拡散実験の準備を行った。また、緩衝材の空隙構造を決定するために、スメクタイト配向性の定量化手法考案とデータ取得を実施した。

【研究成果（当該年度）】

平成 12 年 3 月までの研究成果の概要をまとめる。

(1) 均質化モデルの作成

緩衝材中の核種移行挙動を分子動力学法と均質化法の結合解析により計算を行うために、飽和多孔質媒体における多成分混合溶液の拡散問題を取り扱う計算モデルを検討し、作成した。また、モデルにおける固相への収着の取り扱いについても検討を行った。緩衝材の空隙構造モデルとして、簡易な平面二次元状態を仮定したモデルを作成するとともに、粘土鉱物表面に吸着水を与え、そこへの溶質の分配を定義することで収着を取り扱うモデルを作成した（図・1）。

(2) 均質化解析の実施

既存の無限平行平板型形状モデルを用いた緩衝材中の透水係数の均質化解析において、NaCl 溶液の分子動力学計算結果を入力データとして、従来の純水系での透水係数に加え、塩溶液を媒体とした際の透水係数の解析を実施し、実測値との良い一致を得た（図・2）。

また、核種の拡散現象については、処分に用いる人工バリア材のレイアウト（図・1）をモデルにして、2 次元における拡散問題の計算を行った。ここでは、性能評価上の設定値から収着項の設定を行ったが、同モデルを用いることで、収着を伴う核種移行現象が表現できることを明らかにした（図・3）。しかしながら、核種移行挙動を評価するにあたってはモデルに対して収着の取り込みが必要不可欠であり、収着に対する物理化学的メカニズムをさらに詳細に究明し、現象理解に基づいたモデルへの取り込みが重要であることが再認識された。

(3) 解析結果の精査

解析結果を精査するにあたり、試験結果との比較検討を行うことが必要である。解析結果と試験結果との対比においては、ベントナイトに含水する溶液のイオン強度、温度および圧縮体の間隙構造をパラメータとして変化させる。本年度は、イオンの透過拡散試験の準備を行うとともに、ベントナイトの微細構造決定手法の検討を行った。

透過拡散試験の拡散媒体は精製されたスメクタイトを圧縮成形したもので、拡散イオンは Sr^{2+} と I^- を予定している。これまで、スメクタイトの精製作業を完了し、専用の成形治具を用いて圧縮成形し含水を行っている。また、拡散試験に用いるセラミックフィルターの透過拡散試験を行い、セラミックフィルターの実効拡散係数のイオン強度依存性を得た（図・4）。このことは、フィルター間隙水中のイオンの拡散係数がイオン強度と関係があることを意味している。この結果は、今後実施するイオン強度をパラメータとした圧縮スメクタイト中におけるイオンの透過拡散試験の評価（測定データの補正）に利用される。

ベントナイトの微細構造の観察は走査型電子顕微鏡を用いて行なわれた。ベントナイトは粘土鉱物や石英を主成分とする粉末試料である。観察は粒子形状、サイズと鉱物粒子の配列構造について行われた。粘土粒子の形状は板状で、底面の大きさは数 μm ~ 数十 μm 程度であった。1 つの粒子は $0.1\mu\text{m}$ 程度の鱗片状粘土粒子の集合体であることが分かった。また、圧縮ベントナイトの配向性評価の手法として、試料断面の走査型電子顕微鏡観察を行い、その画像処理により断面の凹凸や間隙を抽出し、その伸長方向により評価する手法を考案し、ベントナイト（モンモリロナイト含有率 98~99 重量%）の圧縮成形体に適応した。その結果、供試体の圧縮時の乾燥密度が $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ の時、粘土鉱物はほぼ圧縮方向に垂直な方向に配列していることが分かった（図・5）。この他、X 線回折装置や原子間力顕微鏡により、圧縮ベントナイト中のスメクタイトの配向性について評価・検討を実施している。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、精製されたスメクタイトの圧縮供試体中での透過拡散試験を実施し、同拡散試験に対応した均質化解析を行い、モデルの妥当性の検討を行う。また、ケイ砂や随伴鉱物を含むベントナイト緩衝材の間隙構造モデルの構築とそれに対応した均質化モデルの検討を実施する。さらに、均質化モデルにおける収着の取り扱いについての検討を実施する。

平成 13 年度は、均質化モデルによる緩衝材間隙構造の同定を試みるとともに、緩衝材中の核種移行遅延に対する均質化法の適応可能性について成果をとりまとめる。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

藤井直樹, 市川康明, 清木隆文 (2000): 「ベントナイト中の拡散問題における均質化解析の適用に関する研究」, 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.8-14.

Ichikawa, Y., Kawamura, K., Nakano, M., Kitayama, K., and Fujii, N. (2000): "Molecular behavior and micro/macro analysis of diffusion in bentonite", Proc. European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS2000), Barcelona (to be appeared).

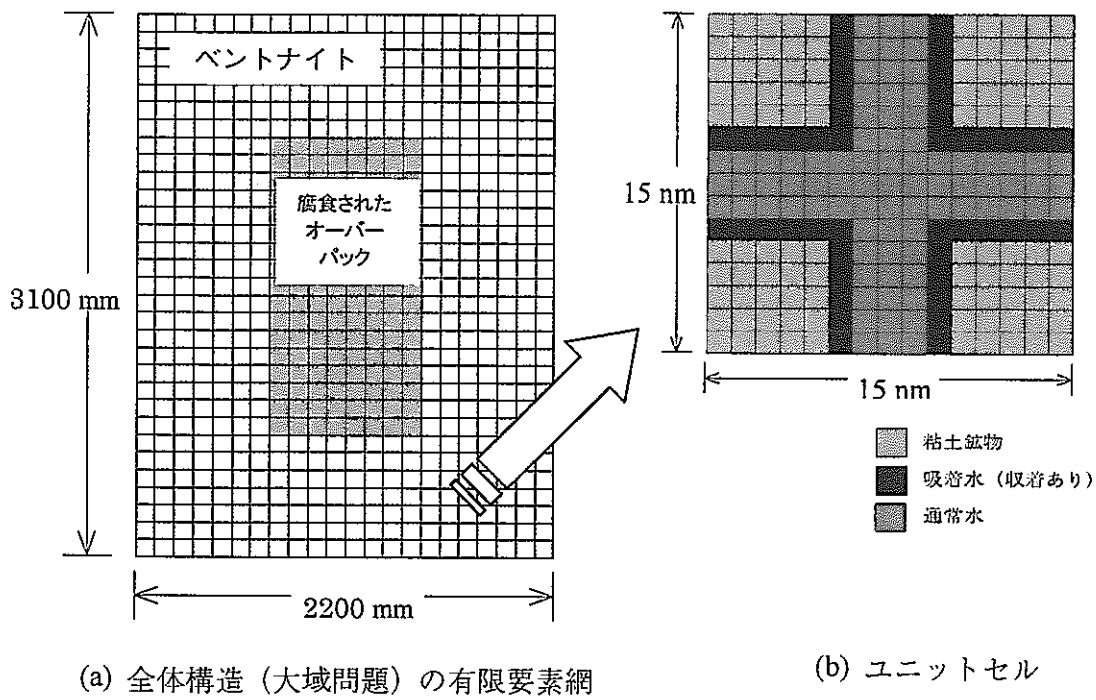
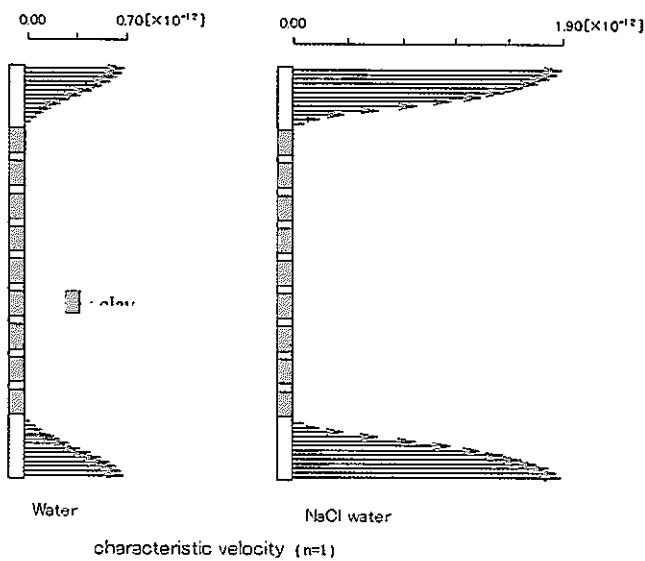
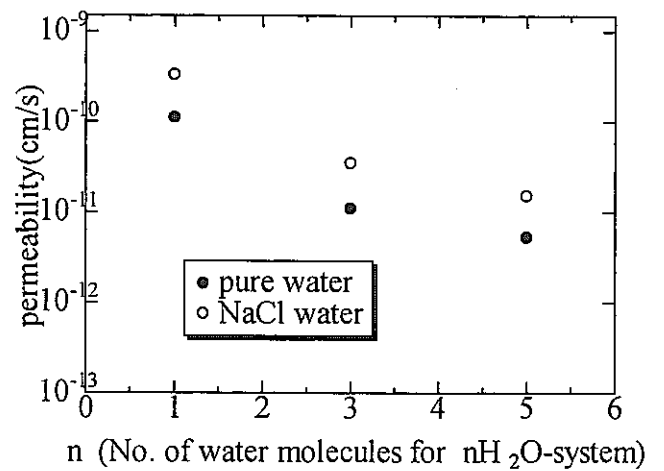


図-1 ベントナイト中の拡散問題の均質化モデル



(a) 純水と塩水に対する特性速度



(b) 均質化法で計算された透水係数

図-2 多層粘土水和モデルによる純水と塩水に対する均質化法透水解析

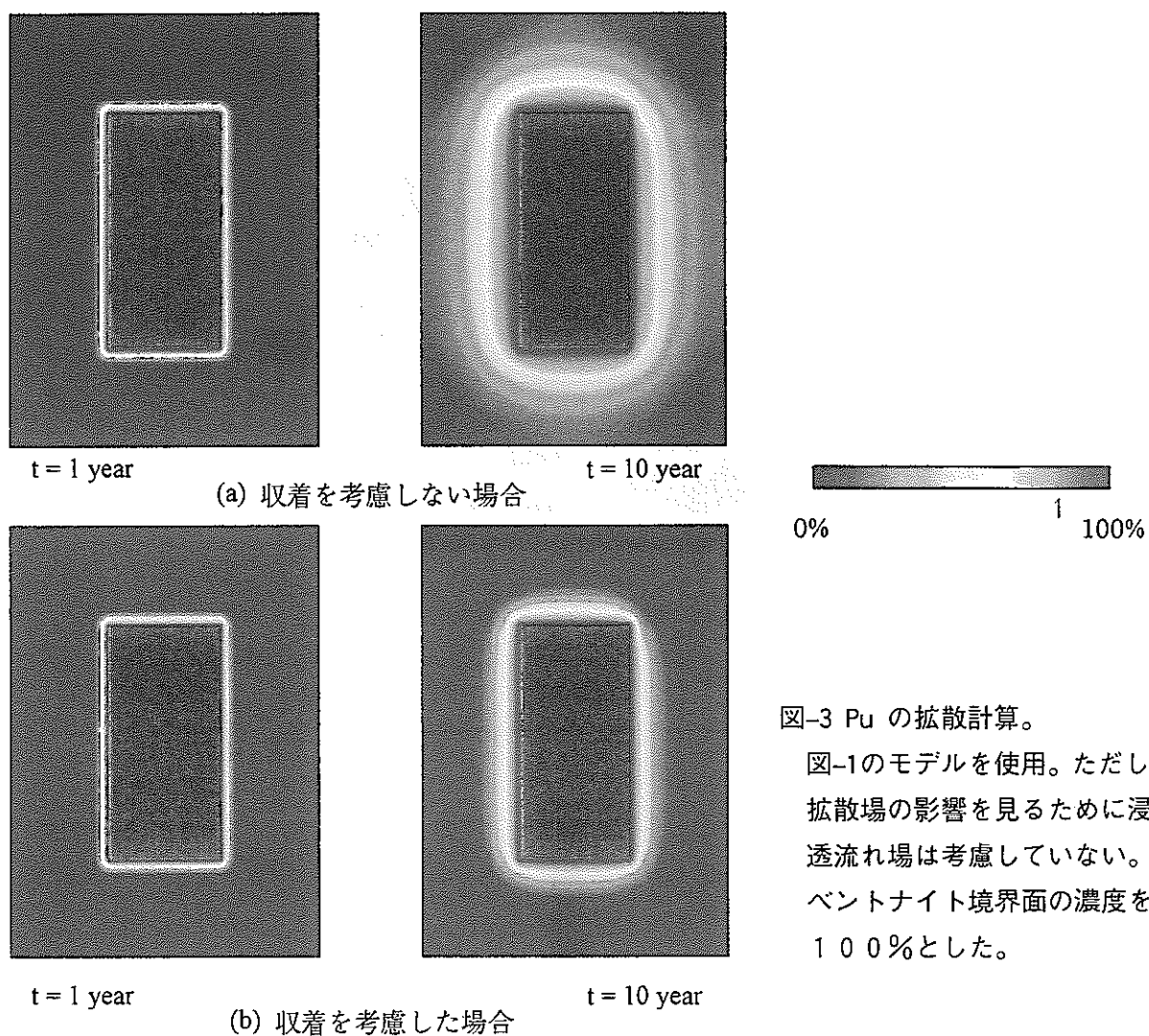


図-3 Pu の拡散計算。

図-1のモデルを使用。ただし、拡散場の影響を見るために浸透流れ場は考慮していない。ベントナイト境界面の濃度を100%とした。

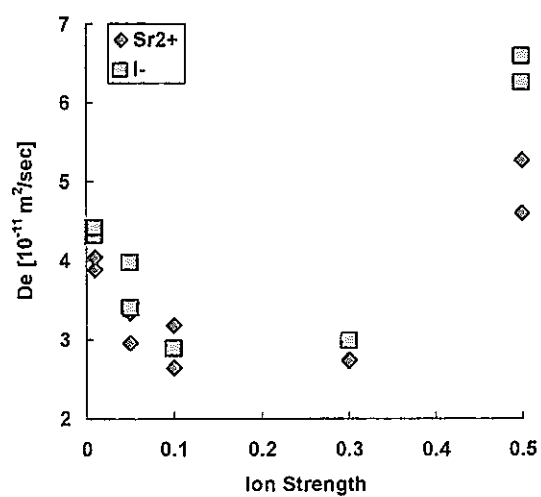
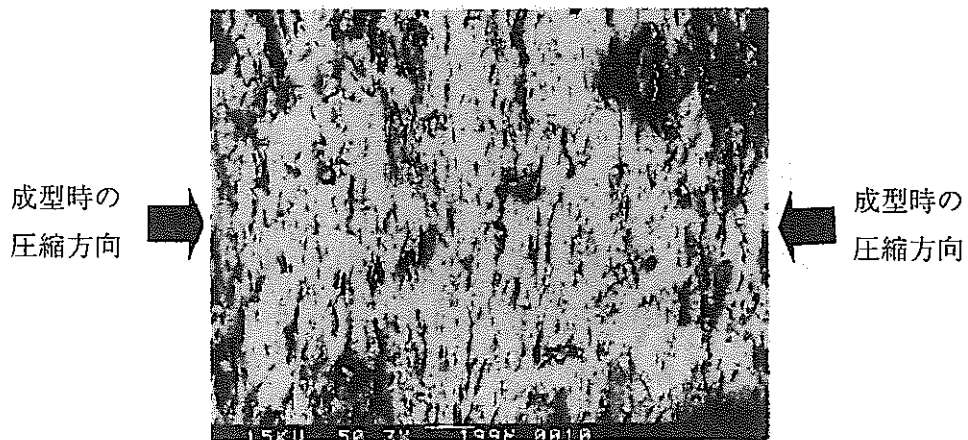
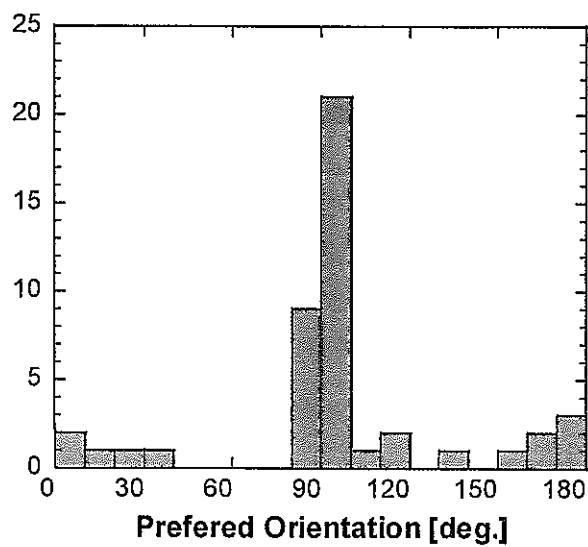


図-4. セラミックフィルターの実効拡散係数のイオン強度依存性



(a)



(b)

図-5 圧縮スメクタイトの SEM 写真(a)、紙面水平方向より圧縮。
画像処理による間隙の配向のヒストグラム (b)。
横軸は圧縮方向と伸長方向がなす角度。

先行基礎工学研究に関する平成11年度研究概要報告書

研究協力テーマ	緩衝材特性評価モデルの高度化に関する基礎研究		
研究協力課題	分子動力学法による緩衝材のミクロ挙動解析		
研究者所属、氏名			
大 学 側	東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻 教授 河村 雄行		
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 Gr 柴田 雅博, 上野 健一 放射化学研究 Gr 佐藤 治夫, 鈴木 寛 処分材料研究 Gr 藤島 敦		
研 究 協 力 実 施 場 所	東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 地層処分基盤研究施設		
通算研究期間 (予定)	平成 12 年 1 月 ~ 平成 14 年 3 月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成 12 年 1 月 24 日 ~ 平成 12 年 3 月 31 日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】			
高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアのひとつである緩衝材に対し、緩衝材中の水や物質の動きを評価するモデルを検討し、緩衝材性能に対する理論的裏付け与えるとともに、環境条件の変化に伴う緩衝材性能の変化や長期の時間にわたる緩衝材挙動を予測することを目的とする。			
【研究内容（概要）】			
緩衝材材料であるベントナイト粘土はミクロレベルで見ると各種粘土鉱物、水、空気からなるミクロ構造物質が集合して全体を形成している典型的なミクロ非均質材料である。従来は、マクロスケールの緩衝材材料に対してデータ取得や現象論的解釈を実施してきたが、本研究では、材料のミクロ構造に基づき、分子レベルでの粘土の挙動に着目し、これをマクロの連続体挙動まで拡張するモデルによって、緩衝材材料の力学挙動や緩衝材中での物質の移動現象を明らかにしようとするものである。 すなわち、スメクタイト-水複合体等に分子シミュレーション法的一种である分子動力学法を適用してその物性を評価し、均質化手法というミクロ非均質材料を解析する数学理論を通してマクロスケールでのベントナイトの挙動を評価する。 本研究では、Na^+, Ca^{2+}, Cl^- 等のイオンが存在する条件下でのベントナイト中の水およびイオンの拡散挙動に着目することとし、スメクタイト-水複合体等について、分子動力学法を適用するために、原子間相互作用関数を決定し、それを用いた分子動力学法シミュレーションを実施する。シミュレーションにより得られたミクロ物性値は、別途実施されるマクロスケールでのベントナイト挙動の評価を行うための均質化モデルのための基本データとして提供する。また、シミュレーション結果は、NMR, X線回折等により得られる粘土鉱物の挙動との整合により確認する。			
【使用主要施設】			
核燃料サイクル開発機構 地層処分基盤研究施設			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、「(1) 原子間相互作用関数の決定」として、原子間相互作用モデルの改良と水の原子間ポテンシャルの再評価を行った。「(2) 分子動力学計算の実施」においては、(1)の結果として得られたポテンシャル関数を用いて、スメクタイトの層間における水の構造、拡散係数等を、純水、NaCl 溶液の 2 つのケースについて、計算を行った。「(3) 確認実験の実施とモデルの評価」のために、スメクタイト間隙の水の存在状態に関する情報を得るために、レーザーラマン分光スペクトル測定装置等を用いた水の構造分析を実施するとともに、分子動力学計算から得られる層間水の振動スペクトルとの比較検討を行った。

【研究成果（当該年度）】

平成 12 年 3 月までの研究成果の概要をまとめる。

(1) 原子間相互作用関数の決定

改良した原子間相互作用モデルを用いて、 H_2O に関する原子間ポテンシャルの再評価を行った。最新のポテンシャルモデル (99-10-16(5) model) を用いた分子動力学計算では、温度 -20°C から 0°C での氷の密度、 -20°C から 100°C の範囲で水の密度、自己拡散係数および融解エンタルピーの値が実測値とよく一致する結果が得られている (図 1)。

(2) 分子動力学計算の実施

スメクタイト分子の表面に接する純水（外部水）の構造および物性を予測することを目的として、分子動力学計算を実施した (図 2)。また、同様に水に NaCl が溶解している場合（海水相当）についても同様の計算を行った (図 3)。その結果、純水、NaCl 溶液いずれの場合も、スメクタイト分子表面近傍の 1 層目の水は構造化しており、分子の角度分布に 2 つのピークが認められ (図 2 と 3 の中段の図)、氷のような結晶構造となっていることが示された。この構造化の傾向は純水の方が NaCl 溶液より強い。これを反映して H_2O 分子の拡散係数は、純水、NaCl 溶液いずれの場合も、スメクタイト分子表面近傍で拡散係数が小さく、離れるに従い拡散係数は増加する。純水の場合、表面から 1nm 程度が拡散層であり、それ以上で拡散係数は、ほぼ一定の値を示すのに対し (図 2 の下段)、NaCl 溶液の場合には、表面から 2nm 程度が拡散層となっており (図 3 の下段)、溶液条件により水分子の層間での拡散係数分布に差異が生じることが示された。

比較のため同様の固体表面近傍の水の構造として、拡散係数分布等を石英表面、酸化マグネシウム表面についても計算を実施し、固体表面の違いにより、水分子の構造や拡散係数の分布に差異が現れることが確認された。

これらの局所物性のデータは、鉱物-水集合体である緩衝材のマクロ力学解析（均質化法による解析）の基礎データとして用いられる。

(3) 確認実験の実施とモデルの評価

スメクタイト-水系の分子動力学計算の結果を含水したベントナイトの分光学的測定の結果と対比した。分光学的測定は、JNC において核磁気共鳴分光装置 (NMR) およびレーザーラマン分光装置を用いて行なわれた。ベントナイト（モンモリロナイト含有率 98～99 重量%）とイオン交換水を含水率 98～75 重量%の条件で混合したものを測定試料とした。プロトンの NMR スペクトルは、含水量が低くなるほど、自由水に比べ高化学シフトを示し、スペクトルの線幅は著しく増大した。含水率 75wt% の試料では、2 種類以上の化学結合環境にあるプロトンの存在が確認された (図 4)。このことは、間隙水の構造や粘性が自由水と異なることを示唆している。一般に、高化学シフトは水素結合力の増大を意味し、線幅の増大は自己拡散係数の低下すなわち粘性の増加を意味するので、上記の結果は間隙水の水素結合は自由水のそれよりも強く、粘性もより高いことを示していると考えられる。一方、ラマン測定により、含水率が低くなるほど 3250cm^{-1} 周辺の散乱強度が強く、水素結合が強い水分子が多いことがわかった (図 5)。このことは、間隙水の粘性が自由水に比べ高いことを示唆すると考えられ、NMR による研究と調和的な結果である。この傾向は、圧縮密度 1.8 g/cm^3 のベントナイト（含水率 30wt% 相当）でも同様に、圧密状態の間隙水の構造は自由水と異なることが分かった。このように分光学的測定から示唆される粘土の間隙水が自由水とは異なる構造、粘性を持つという結果は、分子動力学計算の解析結果とも調和的である。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度

ヨウ化ストロンチウムの透過拡散試験に対応した解析を実施することとし、Sr を溶質として含む系での分子動力学計算を実施する。また、スメクタイト結晶端などの従来と異なる表面に対して、継続して分子動力学計算を実施する。さらに、分光学的方法を用いたスメクタイト間隙水の分子構造等に関するデータ取得を継続するとともに、分子動力学法による振動スペクトルの計算を実施し、測定データとの比較評価を行うことで、スメクタイト間隙中の水存在状態を明らかにする。これらの結果を、緩衝材のマクロ力学解析（均質化法による解析）の基礎データとして用いる。

平成 13 年度

平成 12 年度までの研究を継続するとともに、スメクタイト間隙中での水の存在状態、間隙中での水および溶質の拡散係数について、成果をとりまとめ成果の公開を行う予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

(1) レポート、学会誌・国際会議への発表論文等

Kawamura, K., Ichikawa, Y., Nakano, M., Kitayama, K., and Kawamura, H. (1999)
Swelling properties of smectite up to 90 C · In situ x-ray diffraction experiments and molecular dynamics simulations
Engineering Geology 54, 75-79.

河村 雄行 (2000)

粘土鉱物と水・水溶液との係わり
—分子動力学法計算からのアプローチ—
スメクタイト研究会 会報, 第 10 巻, 第 1 号, 23-37, 2000.

河村 雄行, 市川康明, 中野政詩 (1999)

粘土鉱物—水系の分子動力学シミュレーション
月刊「地球」, Vol. 21, No. 2, 97-101, 1999.

鈴木 覚 (2000年7月号 印刷中)

ラマン分光法による粘土間隙水の構造
月刊「地球」

鈴木 覚, 間中光雄, 森田光男 (審査中)

ベントナイト間隙水のラマン測定,
核燃料サイクル機構 技術資料

(2) 学会等での発表予定

鈴木覚 (2000年9月 発表予定)

ベントナイトの間隙水のラマン分光測定
原子力学会, 秋の大会

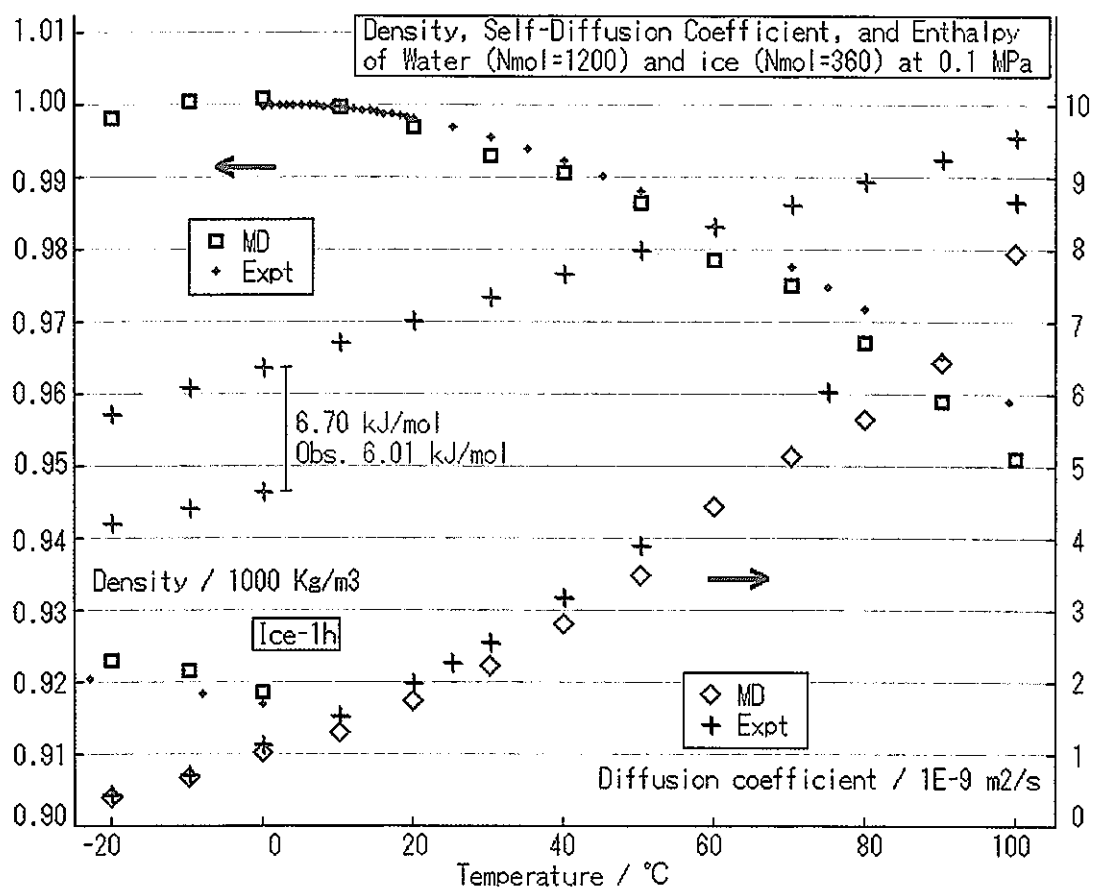


図1 最新の H₂O 系の原子間相互作用モデルによる水と氷の物性の再現

Clay mono-layer + nH₂O. Natom=732(6×3 cell)+15000(5000H₂O)
T= 293K D/g/cm³ Cell/ 30.977 26.666 192.413
P= 0.10MPa 1.0795 90.000 90.000 90.000

a
b c

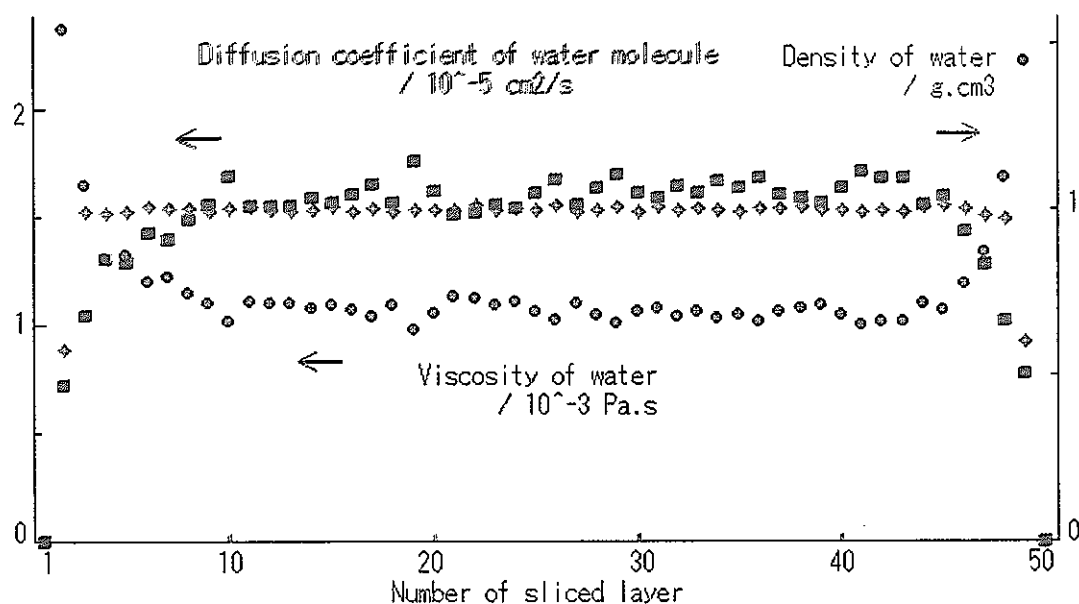
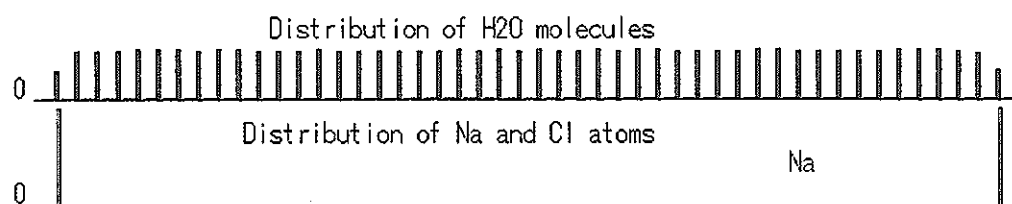
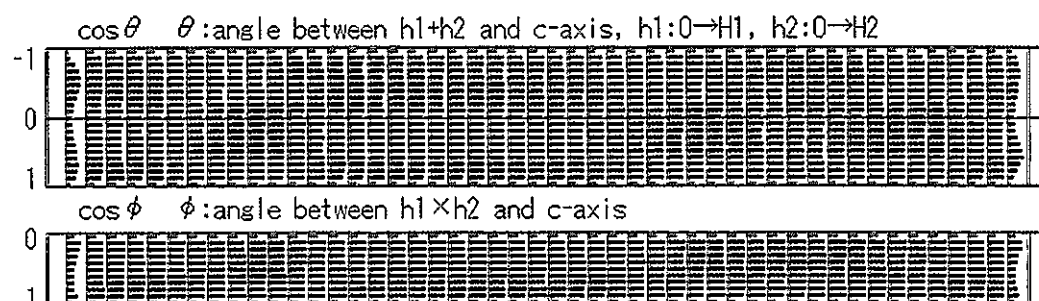
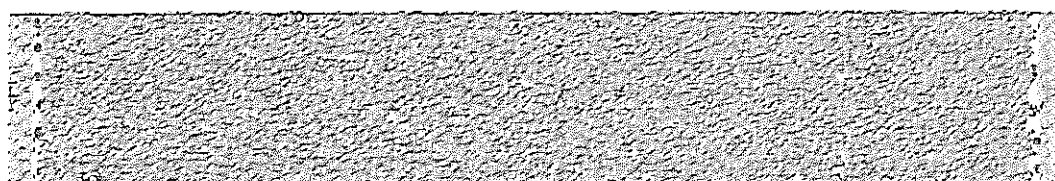


図2 スメクタイト分子-純水系の分子動力学計算結果

Clay layer+mNaCl+nH₂O, Natom=732(6*3 cell)+40+11880(3960H₂O)
T= 293K D/g/cm³ Cell/ 31.013 26.689 158.665
P= 0.10MPa 1.0986 90.000 90.000 90.000

a
b c

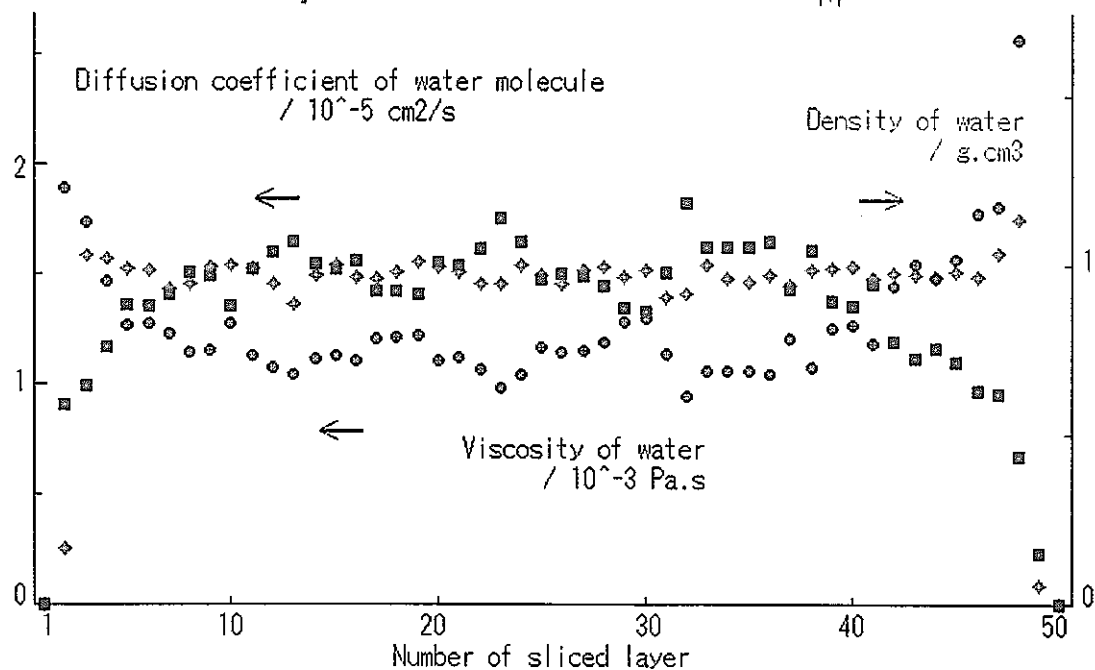
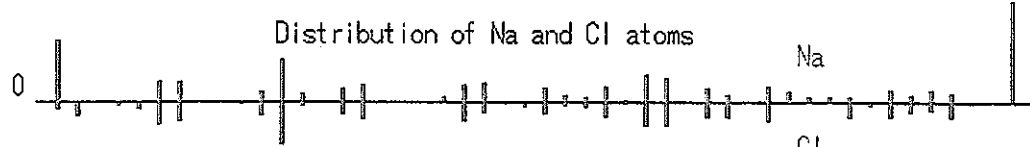
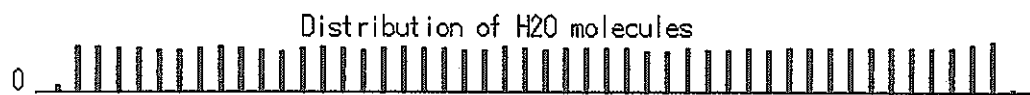
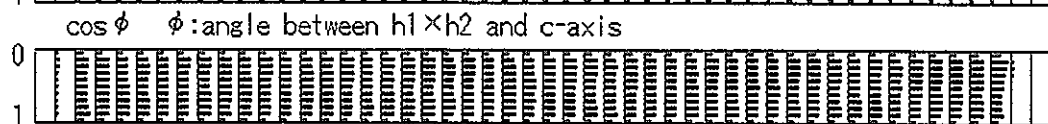
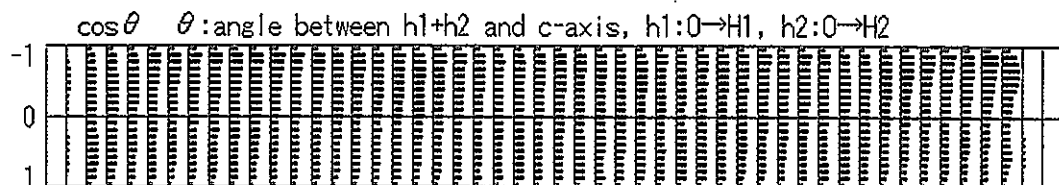
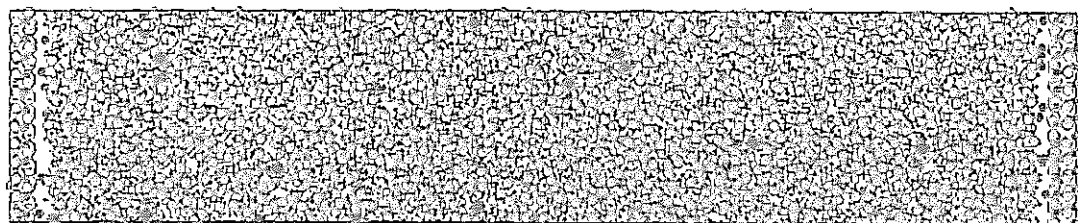


図3 スメクタイト分子-NaCl水溶液（1モル%）系の分子動力学計算結果

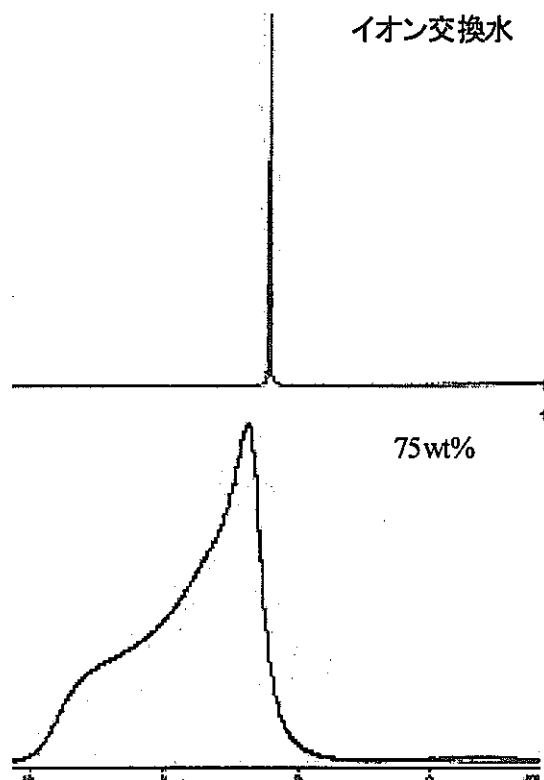


図 4.イオン交換水(上段)とベントナイト間隙水(下段)の NMR スペクトル

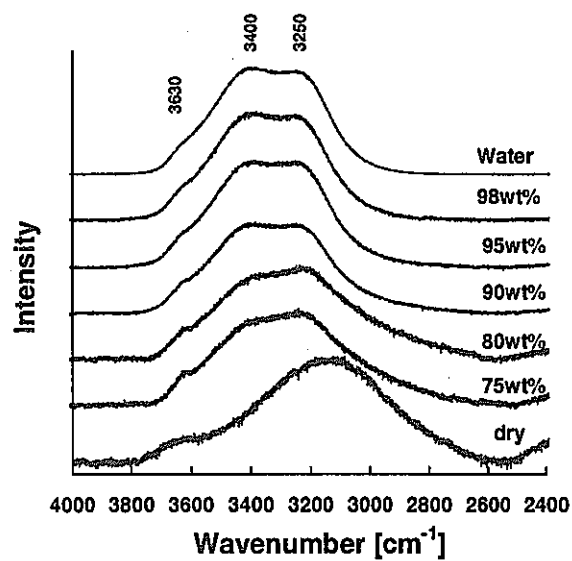


図 5 ベントナイト間隙水のラマンスペクトルに対する変化. ピーク強度は 3250cm^{-1} のピーク強度で規格化されている. 右側の数字は試料の含水率(重量%)を示す. dry は乾燥状態の試料を water はイオン交換水のスペクトルを示す.

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	単一割れ目中の水理・物質移行に関する研究		
研究協力課題	岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの実験的・解析的研究		
研究者所属、氏名			
大 学 側	九州大学 大学院工学研究科附属環境システム科学研究センター 教授 江崎 哲郎, 教授 神野 健二, 助教授 三谷 泰浩 長崎大学 工学部 社会開発工学科 助教授 蔣 宇静		
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 システム解析 Gr 内田 雅大, 赤堀 邦晃, 畑中 耕一郎		
研 究 協 力 実 施 場 所	九州大学 大学院工学研究科付属環境システム科学研究センター 機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 地層処分基盤研究施設		
通算研究期間 (予定)	平成11年11月 ~ 平成14年 3月	当 該 年 度 研 究 期 間	平成11年11月 1日 ~ 平成12年 3月31日
研究協力形態	☐ 客員研究員 ☐ 研究生の受入れ ☒ 共同研究		
【研究目的】 高レベル放射性廃棄物を亀裂性媒体に処分する場合には、核種は岩盤中に存在する亀裂中を移行する。単一亀裂中の地下水流動では、チャネリングと呼ばれる亀裂内の選択的な流路を流れる現象が見られ、その現象は天然バリアの性能評価上マトリクス拡散寄与面積を減少させ、また亀裂内の流速を増加させる可能性がある。チャネリングに関する研究は、過去に様々な手法を用いて研究されてきたが、せん断応力下における透水試験の実施例は少ない。本研究では、天然の岩盤に多く存在するせん断亀裂を対象としたせん断応力下における透水試験の実施、亀裂開口幅の測定手法の確立、及び岩盤の変形を対象とした岩盤力学的モデルと亀裂内流れを対象とした水理学的モデルを連成した解析を実施することにより、せん断亀裂内のチャネリングに関するデータを取得し、天然バリアの性能評価に資する。			
【研究内容（概要）】 単一亀裂内の水理・物質移行において亀裂開口幅は重要なパラメータとなるものの、その測定手法については、過去に多くの研究が実施されてきたが、例えば亀裂面全面のデータが取得不可能であったり、また亀裂内の水理・物質移行現象のモデル化に必要な精度が確立されていない等の課題が残されている。また地下深部における天然亀裂は様々な方向の応力を受けており、応力下における透水性を理解するためには亀裂面に垂直な応力だけではなく、亀裂面に対しせん断方向の応力についても考慮する必要がある。本研究では、それらの問題点を考慮し、次の内容を実施する。 まず、高精度なレーザー変位計を用いた亀裂面の凹凸の自動測定装置、サイクル機構が有する接触式3次元測定器によるせん断亀裂面の凹凸を測定し、亀裂開口幅の推定手法について検討する。 次に、せん断一透水同時試験が可能な装置を開発するとともに、同時試験を実施し、せん断応力下における単一亀裂の水理学的データを取得する。 そして、GIS(Geographic Information System: 地理情報システム)技術を用いて実験によって得られた亀裂の幾何学的特性データ、透水試験データから不連続面の力学的モデルと亀裂内流れを連成した2次元的なモデルの開発を行う。			
【使用主要施設】 ・九州大学 大学院工学研究科附属環境システム科学研究センター ・機構 東海事業所 環境保全・研究開発センター 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK)			

【進捗状況（当該年度までの概要）】

平成 11 年度は、非接触式の凹凸計測装置と接触式の凹凸計測装置を用いて亀裂面の計測を行い、両者の比較検討を行いその問題点を整理した。また、測定結果を基に亀裂開口幅を確定する方法について提案した。さらに、せん断－透水同時実験装置の改良を行い、確認試験を実施し、その有効性を確認するとともに岩盤不連続面のせん断－透水同時特性に関する基礎的データを取得した。最後に、GIS を用いた力学モデルおよび透水モデルの提案を行い、実験結果との照査を行った。

【研究成果】

(1) 亀裂開口幅の測定手法の確立

高精度なレーザー変位計を用い自動的に亀裂面の凹凸を測定可能な非接触型の凹凸計測装置を開発した。この非接触型の凹凸計測装置と接触型の凹凸計測装置を用いて人工的に作成した亀裂面の凹凸を測定した。ここでは、両者の測定方法による計測誤差について詳細に検討し、両測定方法の問題点を明らかにした。その結果、以下のような知見が得られた。

接触型の計測システムでは、1)プローブ先端が計測面に触れる際の圧力によって計測面の変形が生じることによるエラー、2)プローブ先端が球状のために急激に変化する部分（角度のある部分）を計測することができないエラー、3)急傾斜の計測を行う場合に、計測値が実際よりもずれるエラーが想定され、これらのエラーについてはいずれも規則正しい形状であれば補正を行うことで処理することが可能であるかもしれないが、岩の不連続面のように非常に不規則でかつ凹凸の変化が著しい場合には、その補正は難しく不可避な問題となる。また、2番目と3番目のエラーについてはプローブ球の大きさを小さくすることで対応することも可能であるが、その大きさを小さくするには限界があり、このような問題点は、接触式計測システムの致命的な欠点であることがわかった。

非接触式計測システムでは、1)レーザー変位計の測定限界を超えることによるエラー、2)反射率に関するエラーが想定され、前者のエラーについては、不連続面表面がレーザー変位計の測定範囲である 16mm を超えた場合に生じる。これに関するエラーについては補正のしようがなく、不連続面の凹凸のアンギュレーションが測定範囲内でないと計測することはできない。後者のエラーについては、感度を自動調整する設定として不連続面の構成物質の反射率の相違に対応するものである。これらのエラーの計測データに対しては測定間隔を密にし、エラーが発生した点の周囲の 8 つの値を用いて、これらの平均高さに補間することで対応することはできる。しかし完全なる補間ではないため誤差は生じると考えられる。

2 つの計測システムの比較を行うために同じ岩石不連続面の計測を行った。計測は不連続面の一部分を等しい大きさの格子状にデータを取得する。接触式計測システムについては、プローブ先端のルビー球の大きさを直径 $\phi 1\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm}$ 、 $\phi 0.1\text{mm}$ の 3 種類とし、非接触式計測システムについては、レーザー変位計を用いる。データ取得の際の格子（メッシュ）の大きさは、接触式計測システムの場合、ルビー球の大きさに支配され、 $\phi 1\text{mm}$ の場合には 0.2mm メッシュ、 $\phi 0.5\text{mm}$ の場合には 0.4mm メッシュ、 $\phi 0.1\text{mm}$ の場合には 0.2mm メッシュで行い、非接触式計測システムの場合には、 0.2mm メッシュでデータの取得を行った。これらの比較結果として、計測結果の残差の度数分布をそれぞれ求めた結果、各図とも両者の差はほぼ正規分布に近い分布形状を示し、いずれの結果における全体の傾向はほぼ一致する。また、標準偏差に着目してみると $\phi 1\text{mm}$ との比較のケースで 0.22mm 、 $\phi 0.5\text{mm}$ との比較のケースで 0.22mm 、 $\phi 0.1\text{mm}$ との比較のケースで 0.24mm といずれの結果も標準偏差に大きな差はみられず、どちらかといえばルビー球が小さくなるに従って標準偏差は大きくなる傾向がみられる。これは、ルビー球の球形を小さくすることでプローブの力学的な強度などの信頼性が低下していることが 1 つの原因として考えられるが、その原因を特定することは難しい。いずれにせよ、以上の結果からは下側岩体の高さの真値がわからないため正確な誤差については明確に言及できないが、両者の計測結果に対して有意な差は認められなかった。しかしながら、いずれの計測方法にも一長一短があり、これらの問題点を把握した上で計測を行う必要があることがわかった。

(2) 不連続面の力学・透水カップリング技術の開発と基礎的データの取得

ここでは、過去のせん断応力下での単一亀裂内流れに関する研究において問題となった、1)一方向流れの透水実験、2)試験岩体サイズ、3)せん断応力負荷時に発生する上側ブロックの回転の制御の 3 点を改良した理想的な原位置の条件を再現できるせん断－透水同時試験装置の開発した（図 1、図 2）。

そして、開発したせん断一透水同時試験装置を用いてせん断一透水同時試験を実施した結果、以下に示す知見が得られた（図3，図4）。

2本のロッドで垂直荷重の载荷率を変化させることで上箱の回転を制御することができた。また遮水機構においてはせん断時においても不連続面周辺の遮水を十分に行えるものであり、一方向流の透水実験を可能にし、開発を行った試験装置の性能の有効性を確認することができた。

得られた実験結果から、上箱の回転を拘束することにより、せん断応力に対しては大きな影響を与えないものの、透水実験に関しては、垂直応力が大きい程、上箱の回転を拘束しているために接触領域部分に応力が集中し、局所的に間隙幅が閉塞し、透水経路が遮断され、せん断一透水同時特性に与える影響が大きいことがわかった。

(3) GIS 技術を用いた不連続面の力学・透水モデルの開発

取得した亀裂面の凹凸データと実験によって得られたせん断一透水同時特性について GIS(Geographical Information System: 地理情報システム)を用いたシミュレーションモデルの提案を行った。

まず、せん断応力の変化について幾何学的な条件と岩石の特性結果から初期間隙幅を特定するためのモデル、せん断過程を表現するためのモデルを構築し、せん断に伴うせん断応力の変化をシミュレートした（図5）。その結果、せん断過程における不連続面上下接触の状況を定量的に評価することができ、せん断とともに不連続面内の局所的に接触する部分に応力が集中している状況を明らかにした。また、実験結果とせん断応力のシミュレーションの結果は、良く似た傾向を示しているが、両者の結果は完全に一致しておらず、まだ、改良の余地があると考えられる。これは、今回の解析モデルでは、せん断により破碎され発生したガウジなどによる影響や計測のメッシュサイズによる影響と考えられる。しかしながら、せん断の状況をほぼ適切にシミュレーションできたと考えられる。

さらに、せん断に伴う不連続面の凹凸の変化を基に不連続面内を流れる流れをシミュレートした（図6）。その結果、不連続面内の水頭値や流量の分布等を定量的に評価でき、不連続面内の流れの特性、いわゆるチャンネリング現象を定量的に明らかにすることができた。

このように今回提案したモデルは、まだ多くの改良点を含んでいるものの、将来的に有効な手法として適用できる見込みを得ることができた。

【今後の予定（翌年度以降の概要）】

平成 12 年度は、せん断一透水同時実験を追加し、基礎的なデータの蓄積を図ること、さらには試験装置の垂直荷重の容量を増加させ、高い垂直応力下でのせん断一透水同時実験が可能な装置に改良し、実験手法を確立する。亀裂開口幅の測定手法については、GIS とリンクさせた測定手法の確立を目指す。さらに、試作を行ったせん断一透水同時特性のシミュレーションモデルに改良を加え、適用性のあるモデルの構築を目指すとともに平行平板モデルの適用性、チャンネリング現象などの具体的な現象の解明を目的とした検討を行う予定である。

平成 13 年度は、人工不連続面だけではなく自然の不連続面を用いた実験を行い実験データの蓄積を行うとともにせん断一透水同時特性のシミュレーションモデルの構築を行う予定である。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

新しいせん断一透水同時実験装置の開発と GIS による不連続面内流れのシミュレーションによる研究，第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.15-21, 2000.1

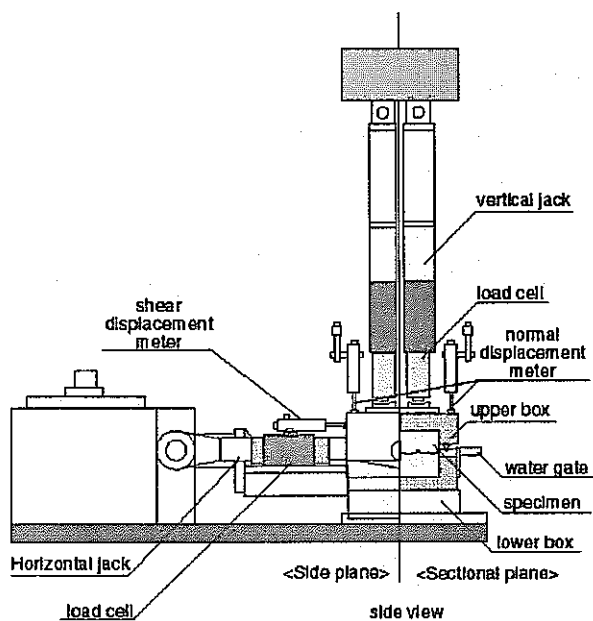


図1 せん断-透水同時実験装置

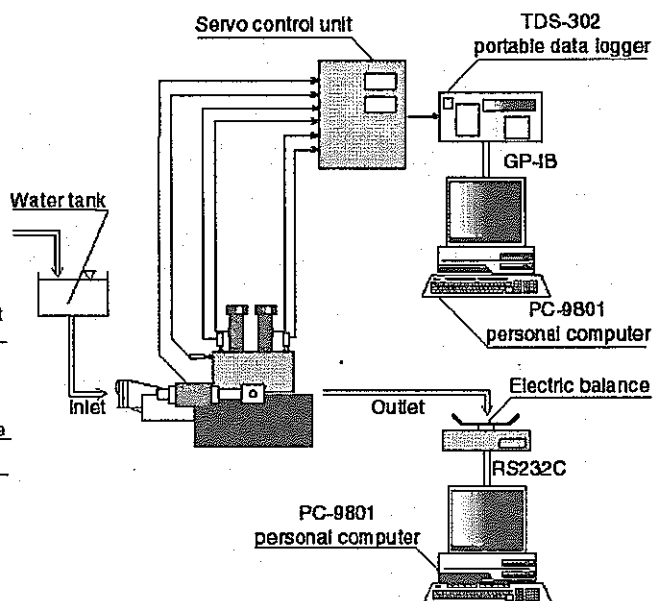


図2 せん断-透水同時実験システム図

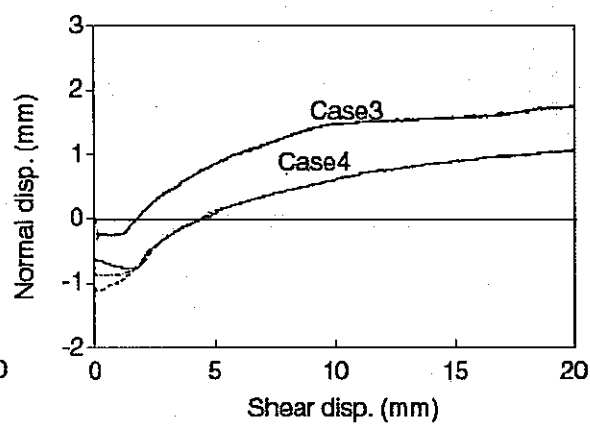
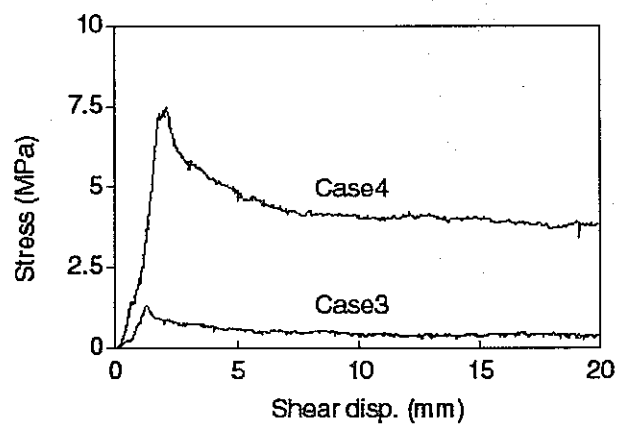
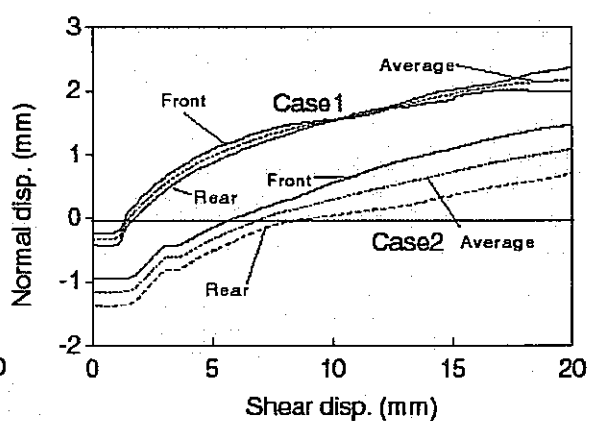
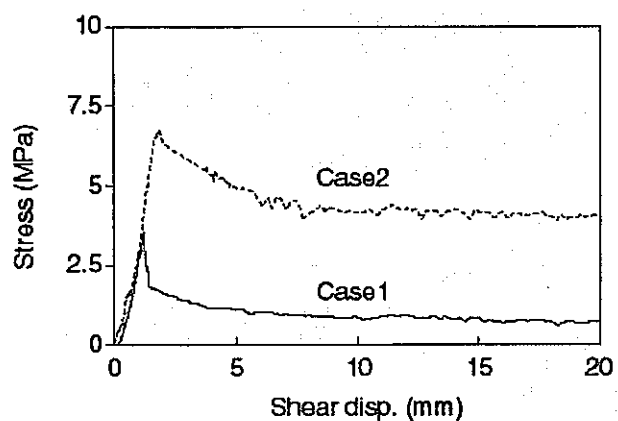


図3 せん断-透水同時実験結果 (せん断応力, 垂直変位)

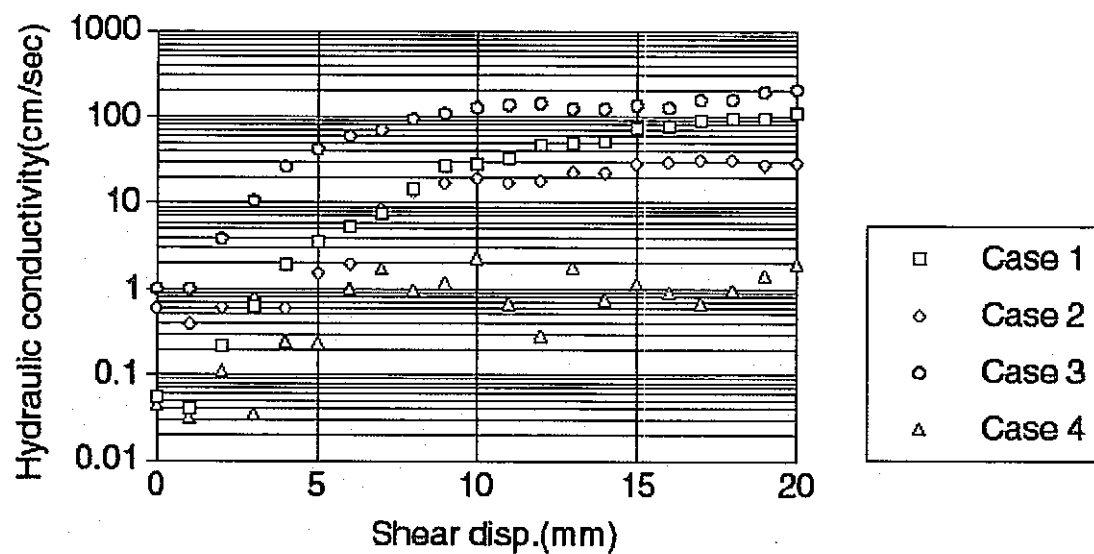


図4 せん断一透水同時実験結果 (透水係数)

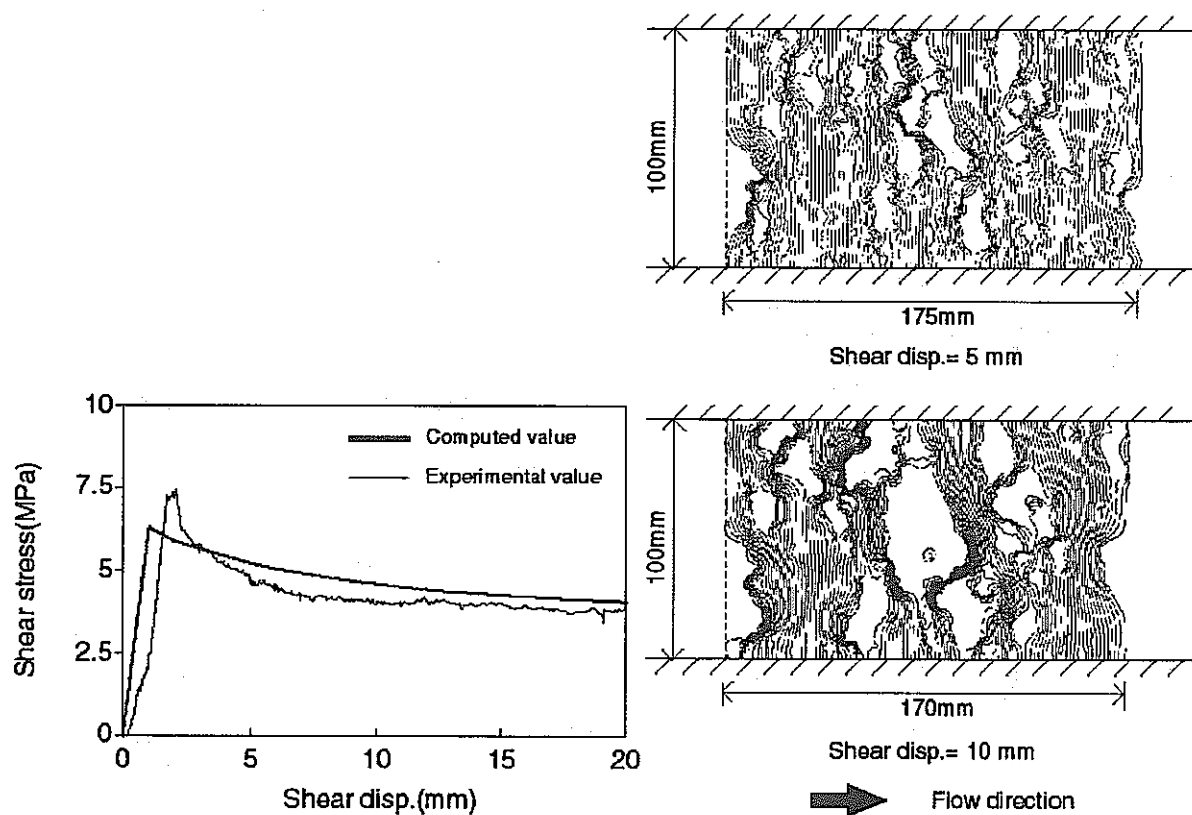


図5 せん断応力のシミュレーション結果

図6 透水実験のシミュレーション
(不連続面内の水圧コンター)