

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

1997年1月

動力炉・核燃料開発事業団

## 先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告

報告者課室 リスト参照  
編集 技術協力部技術協力室

### 要 旨

事業団は、大学との研究協力の推進を図るため、平成6年度に大学との研究協力のあり方等を検討した。その審議結果に基づき、平成7年度から、先行基礎工学研究協力制度として実施している。

先行基礎工学研究協力制度は、事業団の施設を主に利用した原子力工学分野に関する基礎的研究を大学との研究協力により推進するために、新たに設けた制度である。この制度は、事業団が設定した研究協力テーマに対して、大学側からの研究協力課題、研究者の応募をもとに、研究協力課題を選考し、大学との共同研究の設定、客員研究員の受入れ、研究生の受入れ等により研究協力を実施してきた。

本報告書は、平成7年度に実施した高速増殖炉関係の先行基礎工学に関する8研究協力テーマ9件の実施結果の概要をまとめたものである。

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究協力の課題一覧

【高速炉関係】

研究協力テーマ 研究協力課題	事業司 受入箇所	事業司 研究者名	協力形態	大学側 研究者名	ページ
1. 液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究 ナトリウムのはり開始温度と限界熱流束	大洗 基盤部 熱流体室	山口 彰	共同研究	塩津 正博 助教授 京都大学原子エネルギー研究所 原子炉構造部門 他	1
2. 高密度比気液二相流に関する基礎研究 中性子がガスをよよによる高密度比気液二相流の可視化と計測	大洗 安工部 高速炉安全室	飛田吉春 小西賢介	共同研究	西原 英晃 教授 京都大学原子炉実験所 他	4
3. 損傷組織の定量化技術の研究 同上	大洗 安工部 機器・構造室	青砥紀身 木村英隆 阪本善彦	客員研究員	丸山 公一 教授 東北大学工学部 材料物性学科	9
4-(1) 中性子モニターに関する研究 同上 (中性子モニター制御法の研究)	大洗 基盤部 炉心室	若林 男	共同研究	鬼柳 善明 教授 北海道大学工学部 原子工学科	11
4-(2) 中性子モニターに関する研究 同上 (収束中性子の研究)	大洗 基盤部 炉心室	若林 男	共同研究	古田島 久哉 教授 東北大学工学部 原子核工学科	14
5. 「常場」実験用燃料を用いたMA核種燃焼特性に関する研究 「常場」照射MA燃料の測定結果を用いたMAの燃焼解析精度評価	大洗 実効部 技術課	青山卓史	客員研究員 研究生	竹田 敏一 教授 大阪大学工学部 原子力工学科 他	16
6. 中性子計測データの計算機直接入力に関する研究 同上	大洗 実効部 DCA	大谷暢夫	共同研究	的場 優 教授 九州大学工学部 他	18
7. 構造物の熱過度強度に関する研究 厚肉円筒の熱応力下のき裂の停留に関する研究	大洗 基盤部 構造力学室	和田雄作	客員研究員 研究生	酒井 信介 助教授 東京大学工学部 機械工学科 他	21
8. 高燃焼度燃料のフリグ評価 FBR高燃焼度燃料のFPガス挙動とOM比評価	大洗 燃焼部 AGS	山本一也 阿部隆幸 梶谷幹男	研究生	佐藤 勇 大学院修士 九州大学工学部 応用原子核工学	26

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	液体金属二相流の熱流動特性に関する基礎研究		
研究協力課題名	ナトリウムの沸騰開始過熱度と限界熱流束		
研究者氏名、所属	京都大学原子エネルギー研究所 塩津正博助教授、畑 幸一助手、竹内右人助手、濱 勝彦技官 大洗・基盤部熱流体室 家田芳明、大島宏之		
研究協力実施箇所	大洗工学センター基盤技術開発部 熱流体技術開発室	研究期間	平成8年1月29日～ 平成8年3月29日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b></p> <p>高速炉の冷却材であるナトリウムは、通常、十分な保守性を確保した条件にて、液单相流の状態で使用される。しかし、安全裕度をより精度よく評価するため、伝熱特性が大きく変化する沸騰開始条件及び膜沸騰への遷移条件について、温度、圧力、熱流束、発熱部条件等のより詳細な把握を行う。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b></p> <p>ナトリウムの沸騰開始条件及び膜沸騰への遷移条件について、特に、沸騰開始過熱度（飽和温度と実際に沸騰が開始する温度の差）に関しては、使用条件によって実験結果にばらつきが大きいとの報告があり、その物理的メカニズムを解明するための基礎的研究が重要となっている。</p> <p>本研究では、ナトリウム中の試験発熱体の沸騰開始温度と限界熱流束を体系的に求め、試験体の履歴発熱率上昇速度、液サブクール度等の沸騰開始過熱度及び限界熱流束への影響を明らかにし、その物理的メカニズムを解明する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p> <p>京都大学エネルギー科学研究科 高温ナトリウム熱伝達実験装置</p>			
<p><b>【進捗状況（概要）】</b></p> <p>平成7年度： 予備実験の実施（発熱リボン電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法の確立）</p>			

## 【今後の予定】

- 平成8年度： 沸騰開始以前の履歴が沸騰開始過熱度及び限界熱流束に及ぼす影響の解明  
(発熱リボン電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法による実験と評価)
- 平成9年度： 発熱率上昇速度が沸騰開始過熱度及び限界熱流束に及ぼす影響の解明
- 平成10年度： 強制循環条件が沸騰開始過熱度に与える影響の解明

## 【研究成果】

### 1. 緒言

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

本年度は、予備実験として、試験発熱体の発熱線の温度から発熱体表面温度を算出する新しい表面温度測定方式について実験的研究を行い、十分な精度で表面温度の測定が可能であることを確認した。

### 2. 従来の研究

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

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

### 3. 実験装置

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

### 3. 発熱リボンの電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法の確立

従来、沸騰熱伝達の温度測定は、発熱部の表面に溝を掘って多数のシース熱伝対を埋め込み、表面仕上げをした発熱体を用いて実施してきた。このような加工が可能な試験体材料は非常に限られており、耐熱性が比較的低いことから、埋め込み式の試験体では限界熱流束の測定のような実験では、測定範囲が限られるとともに、試験体の寿命が短い短所があった。

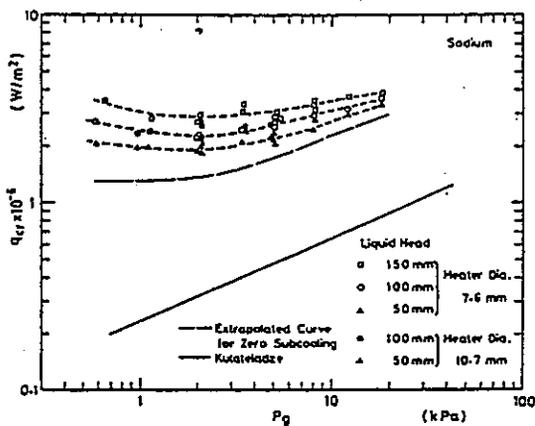
そこで、上記のような埋め込み加工は困難であるが、耐高温特性に優れたタンタル金属を用いて、発熱リボンの電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法を導入し、予備実験によって温度測定精度の確認を行った。

図3に試験体の構造図を示す。発熱部は外径7.6mm、発熱長50mmの円柱状であり、タンタル製の発熱

リボンを用いている。発熱リボンの電気抵抗と温度の関係式から、発熱体表面のシース温度を求める近似式を求め、比較した結果を図4に示す。黒いプロットで示した発熱リボンの電気抵抗に基づく発熱体表面温度測定法は、熱電対による測定結果とよい一致を示した。また、水平円柱自然対流熱伝達に関する表示式を図中に示している。本表示式は広範囲なプラントル数及びレイリー数条件において、精度のよい予測を行うことができる。

### 5. まとめ

タンタル製の発熱リボンの電気抵抗変化から温度を求め、シース表面までの熱抵抗を考慮して表面温度を求める新しい試験発熱体表面温度測定法について、表面温度を正しく測定できることを確認した。この結果に基づき、発熱リボンとシースともにタンタル製とした試験発熱体を平成八年度に製作し、沸騰開始過熱度及び限界熱流束の測定試験を行う計画である。



ナトリウムの臨界熱流束に対する液頭の影響、液温が  $P_g$  の飽和温度の場合

図1 従来研究

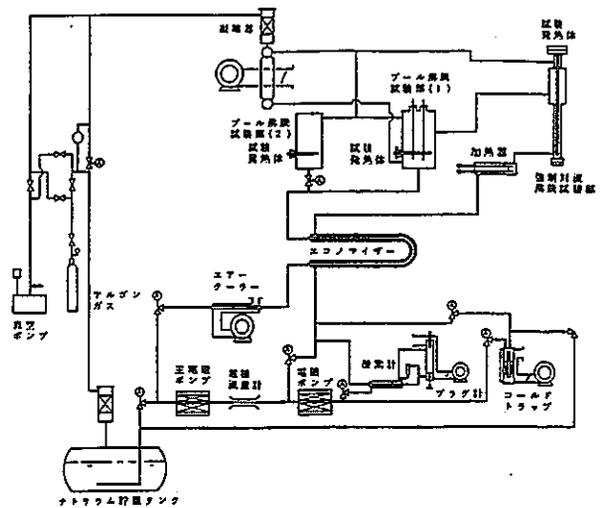


図2 試験装置

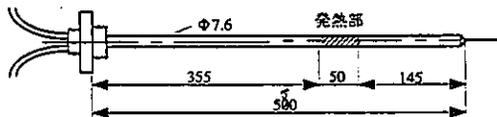


図3 試験体

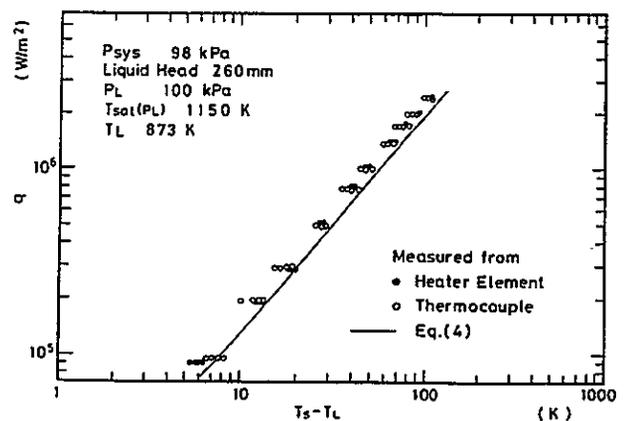


図4 試験結果

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

研究協力テーマ!	高密度比気液二相流に関する基礎研究		
研究協力課題名	中性子ラジオグラフィーによる高密度比気液二相流の可視化と計測		
研究者氏名、所属	京都大学原子炉実験所 三島嘉一郎助教授、 大洗・炉安室 近藤 悟、飛田吉春、小西賢介		
研究協力実施箇所	大洗工学センター安全工学部 高速炉安全工学室	研究期間	平成8年2月8日～ 平成8年3月19日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受け入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>            本研究は、高速炉の炉心損傷事故時に炉心に形成される燃料とスチールの混合プールの沸騰挙動の解明に関する基礎研究であり、炉心プールを模擬した高密度流体（溶融金属）の二相流を可視化測定することで、その流動特性を解明することを目的とする。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b>            溶融低融点金属に気泡注入を行う模擬試験装置に対して中性子ラジオグラフィー手法を用いた可視化計測を行って、高密度比気液二相流の気泡形状、動態及びボイド率などの基礎データを取得するとともに、同データを用いて動燃のSIMMER-IIIコードのモデル検証・改良等を行うものである。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>            日本原子力研究所 東海研究所 JRR-3</p>			
<p><b>【進捗状況（概要）】</b>            中性子ラジオグラフィーによる高密度比二相流の可視化の測定性を確認することを目的に、気泡模擬形状の空間を有する固体試験体を置いた状態でのラジオグラフィー性能確認試験を実施した。用いた試験体は添付図1に示す鉛の試験体に透過距離方向10mmの気泡を模擬した空洞を設けたもの（ボイド率で20%相当）である。これまでに、本試験体の中性子ラジオグラフィー写真の撮影を実施し、良好な可視性を確認できた。</p>			

**【今後の予定】**

平成8年度：本年度の性能試験の結果に基づき、定常条件での気泡注入実験と中性子ラジオグラフィによる観測を実施する。

平成9年度：非定常条件（気泡流入量の急減・急増）における中性子ラジオグラフィによる観測を実施する。

**【研究成果】**

**【実験】**

鉛-ビスマス系等の熔融金属とガスの二相流のボイド率計測の可能性を調べるため、内径10mmの円柱状の穴をあけた厚さ50mmの鉛ブロックを標準試験部として用い、中性子ラジオグラフィ実験を行った。この円柱状の穴によりボイド率0~20%を模擬することが可能である。また、実際の実験体系では、ロックウール等の断熱材を装置周辺に巻く可能性があるため、50mmのロックウール2枚で鉛ブロックを挟み込んだ体系での実験も行った。なお、中性子源としては、日本原子力研究所のJRR-3Mを用い、撮像系として、同炉の中性子ラジオグラフィ設備に付設のSIT管（Hamamatsu,C1000-12）を用いた<sup>(1)</sup>。計測システムの概略<sup>(2)</sup>を図1に、画像処理システムの概略<sup>(3)</sup>を図2に示した。撮像条件は、以下のとおり。

RUN 15	18~19分 (ビデオ)	画像：鉛ブロック
RUN 16	19~20分 (ビデオ)	画像：ロックウール (50mm) + 鉛 + ロックウール (50mm)
RUN 17	20~21分 (ビデオ)	画像：暗電流
RUN 18	21~22分 (ビデオ)	画像：シェーディング

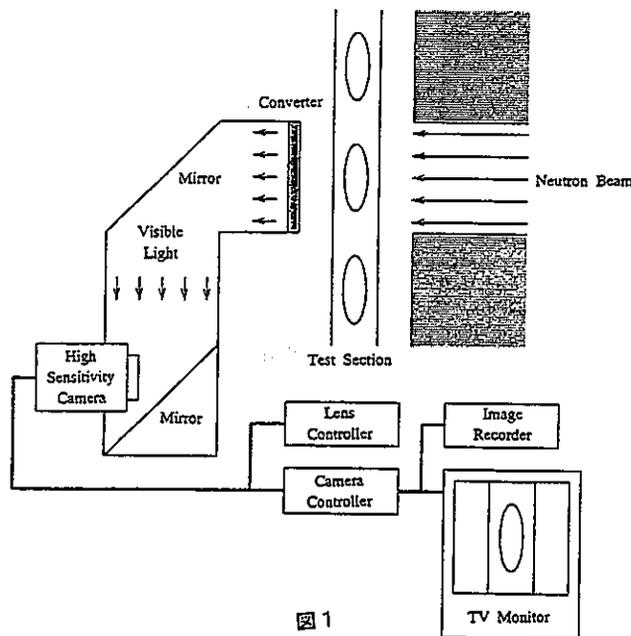


図1

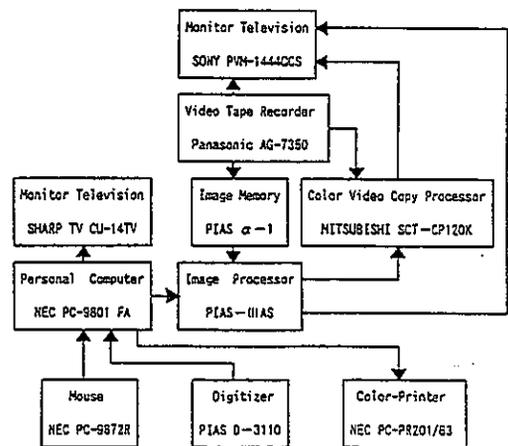


図2

## 【研究成果】

### 【結果】

解析手順① 可視化のみを対象とする場合には、以下の画像処理を施し、画像改善を行った。

1. シェーディング補正
2. ダイナミックレンジの拡大

得られた鉛ブロック画像を図3に示した。また、鉛+ロックウール画像に関しては、図3と殆ど同じ画像が得られた。これは、ロックウールの密度が極めて小さいこととその巨視的断面積が小さいことから、ロックウールが中性子に対して殆ど透明であることによると考えられる。

解析手順② ボイド率計測を行う場合には、画像定量化法として $\Sigma$ スケーリング法を用いた<sup>(4)</sup>。図4にシェーディング画像および鉛画像の輝度分布を示した。なお、解析位置は、図5に示したように、 $(x_p, y_p) = (0, 255) - (511, 255)$ の範囲である。

厳密な $\Sigma$ スケーリング法を行うには、標準試験部等の情報が不足しているため、ここでは、以下の近似的な手法で解析を行った。なお、鉛の中性子の巨視的断面積 $\Sigma_{pb}$ は、 $0.0799\text{mm}^{-1}$ である。

仮定……シェーディング画像、鉛画像間で暗電流データは変化していないものとする。

- ① シェーディング補正
- ② 鉛ブロック中のボイド部左右( $150 \leq x_p \leq 250, 400 \leq x_p \leq 480$ )の平均輝度  $G_{\text{mean}}$  計測
- ③ 鉛ブロック中のボイド部( $285 \leq x_p \leq 395$ )の輝度最高値  $G_{\text{max}}$  計測
- ④  $G_{\text{mean}} = C \cdot \exp(-0.0799 \cdot 50) + G_0$  と  $G_{\text{max}} = C \cdot \exp(-0.0799 \cdot 40) + G_0$  の連立方程式から  $C, G_0$  を決定。なお、本解析では、 $G_{\text{mean}} = 47.44, G_{\text{max}} = 63, C = 690.9, G_0 = 34.72$  であった。
- ⑤ 次式を用いた鉛厚さ  $\delta_{pb}$  計測

$$\delta_{pb} = \frac{1}{\Sigma_{pb}} \ln \left( \frac{C}{G - G_0} \right)$$

- ⑥ 次式を用いたボイド率  $\alpha$  計測

$$\alpha = 1 - \frac{\delta_{pb}}{50}$$

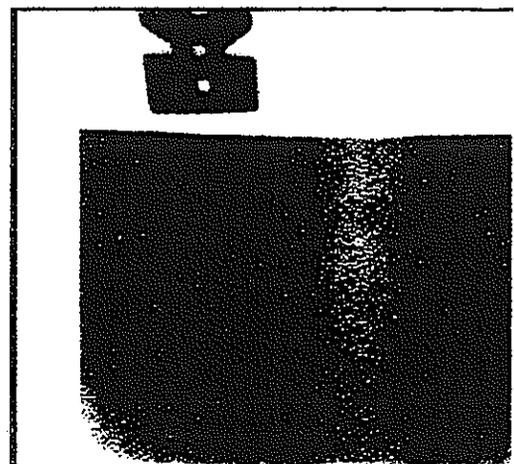


図3

【研究成果】

図6に鉛厚さの空間分布を図7にボイド率分布を示した。また、図中の実線は次式で表される設計値からの計算線を示している。

$$\delta_{pb} = 50 \quad (x < -5, 5 < x), \quad \delta_{pb} = 50 - 2\sqrt{5^2 - x^2} \quad (-5 \leq x \leq 5)$$

$$\alpha = 0 \quad (x < -5, 5 < x), \quad \alpha = \frac{2\sqrt{5^2 - x^2}}{50} \quad (-5 \leq x \leq 5)$$

図より計測値と計算値は良好に一致しており、中性子ラジオグラフィ法は溶融鉛系沸騰二相流のボイド率計測に適用可能であることがわかる。

【参考文献】

- (1) T.Hibiki, K.Mishima, K.Yoneda, S.Fujine, K.Kanda, H.Nishihara, A.Tsuruno and M.Matsubayashi, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 30, 516-523 (1993).
- (2) K.Mishima and T.Hibiki, *Nucl. Eng. Sci.*, (Reg. No., 60-95, in press).
- (3) T.Hibiki, K.Mishima and M.Matsubayashi, *Nucl. Technol.*, 110, 422-435 (1995).
- (4) T.Hibiki and K.Mishima, *Trans. JSME*, 62-595 (in press).

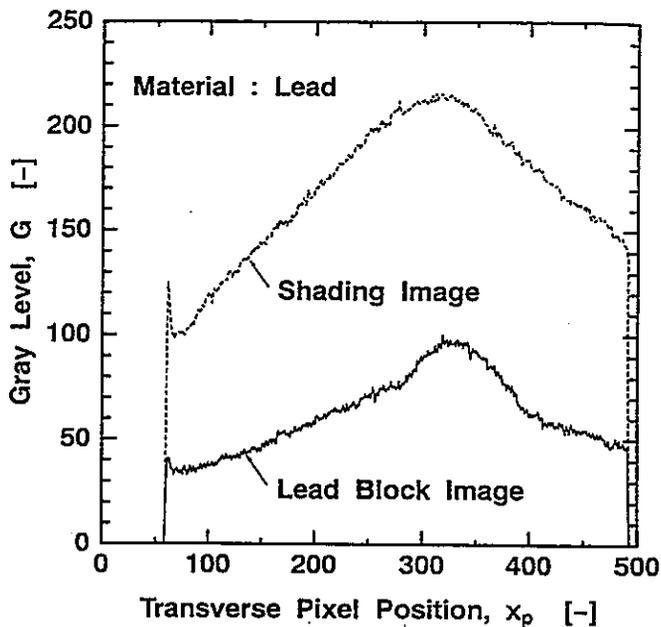


図4

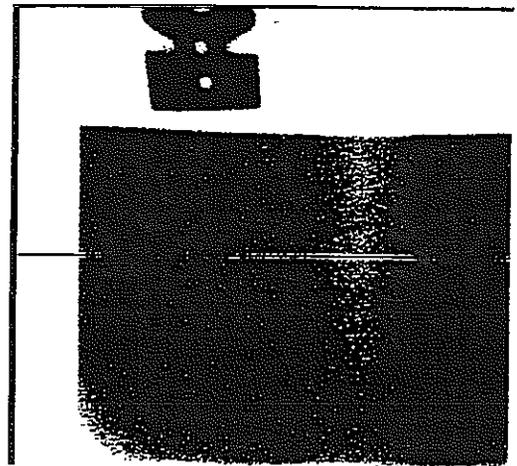


図5

【研究成果】

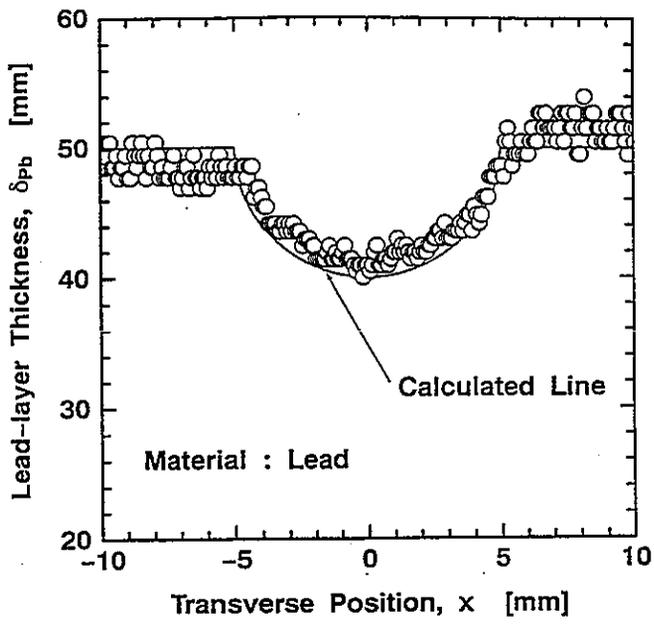


図6

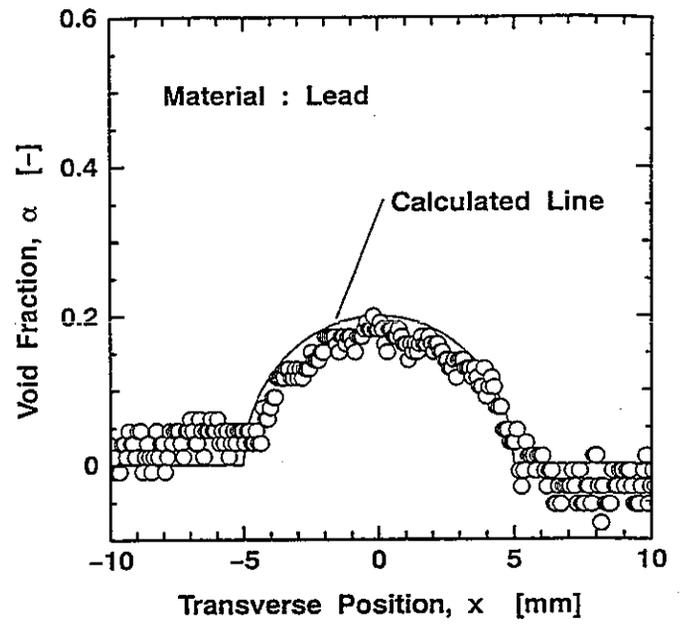


図7

【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7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	損傷組織の定量化技術の研究		
研究協力課題名	損傷組織の定量化技術の研究		
研究者氏名、 所属	東北大学 工学部 材料物性学科 丸山公一教授 大洗・安工部 機器構造室 青砥紀身		
研究協力 実施箇所	大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室	研究 期間	平成 年 月 日～ 平成8年3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】</p> <p>事業団が進めているプラントの寿命・余寿命診断技術の開発や新構造材料の開発のために、強度評価の補強資料として定性的理解のみに用いられてきた材料組織の微視的観察結果や分析データを定量的に把握し、金属組織変化が材料特性に及ぼす効果あるいは相関性を評価する。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>材料および構造物試験後、また材料試験中断試験片の組織観察や分析結果の定量化に関する基礎技術開発を行う。事業団が進めているプラントの寿命・余寿命診断技術の開発や新構造材料の開発のために、従来の定性的理解にとどまっている材料組織や分析結果を定量的に把握し、金属組織変化と材料強度特性との相関性を評価する必要がある。本研究では、材料試験後および中断試験片の組織観察を行い、定量化に有効な金属組織因子を選出し、さらに材料強度特性劣化を記述する手法を開発する。平成7年度は、高速炉構造材料の一つであるクロモリ鋼のクリープ強度と金属組織変化との関係を定量化する研究計画を策定した。</p>			
<p>【使用主要施設】</p>			
<p>【進捗状況（概要）】</p> <p>クロモリ鋼のクリープ強度と金属組織変化との関係を定量化する研究計画について、共通の目標を確認し、研究内容の分担を調整した。また、今後の研究協力の具体的な内容やスケジュールについて、相互の研究の進捗に合わせた計画を策定した。</p>			

【今後の予定】

平成8年度に進める具体的な研究実施に向けて、クロモリ鋼の組織観察すべきクリープ試験の試験条件の提示を受け、それらの破断面観察による破損様式分類および必要な場合には追加クリープ試験の計画を策定する。これに基づき平成8年度、9年度には材料組織の微視的観察結果や分析結果を定量的に把握し、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を確立していく。

【研究成果】

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子ビームプローブに関する研究		
研究協力課題名	中性子ビームプローブに関する研究 -中性子ビーム制御法の研究-		
研究者氏名、所属	北海道大学 工学部 原子工学科 大洗・基盤部 炉心室	鬼柳善明教授、平賀富士夫助手 小川雪郎 須田義之 若林利男	
研究協力実施箇所	大洗工学センター基盤技術開発部 炉心技術開発室	研 究 期 間	平成8年2月 8日～ 平成8年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<b>【研究目的】</b> 中性子、特に熱及び冷中性子は、基礎科学、医療、工業などの広い分野で使われている。中性子を利用する場合、実際に照射を行う位置まで強度を減ずることなく導いてくることが強く望まれている。本研究は中性子ビームをプローブとして使用する場合に重要となるビーム制御（ビームの方向の変更、収束など）の方法について研究することを目的とする。			
<b>【研究内容（概要）】</b> 中性子ビーム制御の方法としては、大きく分けて次の三つのものが考えられる。一つは中性子ガイド管による全反射を利用してビームの向きを変えるもの、二つ目は磁場を利用して中性子を収束させるもの、三つ目はキャピラリー管（細管）内での中性子の全反射を利用して中性子を導いてくるものである。中性子ガイド管については基本的なことはすでに知られている。本研究では先端分岐型の中性子ガイド管を用いて一本の中性子ビーム孔から実質的に二本のビームが取り出せることができるかどうかについて検討を行った。このとき、中性子波長スペクトルが異なったものが得られるようにし、それぞれの用途にあった中性子実験に使えるようにすることを企図する。磁場による中性子ビームの制御に関しては、中性子源から広がりを持って入射した中性子を磁場を通して一点に収束させることを行う。キャピラリー管についても同様にビームを一点に収束することをまず行う。さらに、平行ビームの輸送などについても検討する。			
<b>【使用主要施設】</b> 北海道大学工学部 45MeV 電子線型加速器 性能 最大加速エネルギー 45MeV 繰り返し周波数 1 から 200Hz			
<b>【進捗状況（概要）】</b> 先端分岐型中性子ガイド管の特性を評価するため、モンテカルロ法をもちいてガイド管から放出される中性子の波長分布を計算した。ガイド管出口では波長スペクトルの異なる中性子ビームが得られていることがわかったが、実際に照射を行うような出口から離れたところでは統計が不十分なためはつきりとした違いが見えなかった。磁場による中性子収束に関して予備実験を行った。中性子が収束している傾向が見られたが、収束している中性子の波長の決定が正確にできないため、強度増の倍率が明確になっていない。			

【今後の予定】

先端分岐型中性子ガイド管について、北大電子加速器及びそれに付置されている冷中性子源をもちいて、実験的にその特性を明らかにする。磁場による中性子収束に関しても、同じ設備を用いて、実験的に中性子収束が起こっているかどうかを検証する。

【研究成果】

1. 先端分岐型中性子ガイド管

中性子源からより多くの中性子ビームラインを確保し、さらにいかに効率的に分光器を配置するかは、中性子実験施設の実効的性能を大きく左右する重要な検討課題である。本研究は、中性子スーパーミラーを挿入した先端分岐型中性子ガイド管を用いることにより、一本のビームラインから2本のビームを取り出すことを目的として研究を行った。

中性子ビームラインの分岐を中性子源に近い所で行うことにより、より多くの中性子をビームラインに導く。先端分岐型ガイド管の概念図は図1に示すようになっている。スーパーミラーの配置場所も合わせて示してある。先端分岐型ガイド管の中の二本のビーム孔のなす角度が小さいため、ガイド管そのものの大きさは通常のガイド管とほとんど変わらない。しかし、数十メートルの中性子飛行距離を取れば、裕に2台の分光器を配置できる。また、ガイドの先端で分岐させることにより、有効な中性子源の面積を大きく取れるので、2本のそれぞれのガイドから通常のガイドの場合とほぼ同じ強度のビームが得られるということが予想される。また、スーパーミラーを透過して出ていく中性子ビームでは低エネルギー中性子が成分が少なく、逆側は低エネルギー中性子成分が多いビームとなることが考えられる。そのことを、モンテカルロシミュレーションにより確かめた。その計算体系を図2に示す。ここでは、簡単のために一本のガイド管にスーパーミラーを取り付けた形になっている。ガイド管出口における中性子波長分布を図3に示す。スーパーミラーを取り付けた方が低エネルギー中性子成分が少なくなっているのが分かる。従って、この位置では所定の効果をあげていることが分かった。実際にビーム照射を行うのは、ガイド管出口からかなり離れたところである。そこで、ガイド管出口から3m離れたところでの中性子波長分布を求めた。その結果を図4に示す。この結果では、長波長側で統計が十分でないため、同様の傾向は見られるが、はっきりとした結論がだせない状況である。

スーパーミラーがビームラインを遮ることによる効果や理想的なスーパーミラーと実際のスーパーミラーの差などは、精度良くシミュレーションに取り込むのは難しい。従って、実験による検証を行う必要がある。図1に示した先端分岐型ガイド管を作成したので、今後これを用いて北大45 MeV 電子線型加速器を中性子源として用いて実験を行う予定である。

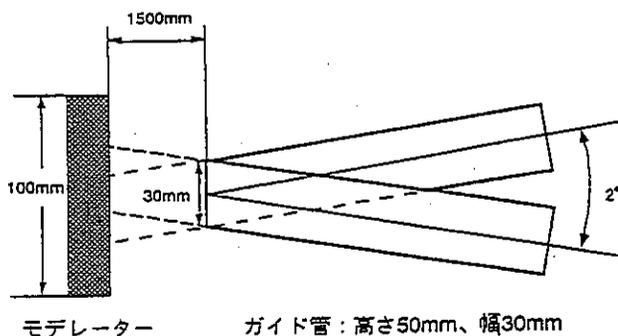


図1 先端分岐型ガイド管 (概念図)

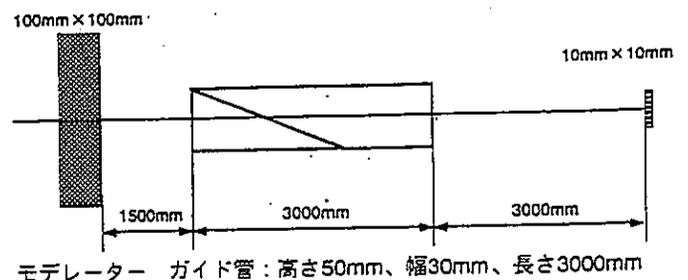


図2 計算体系

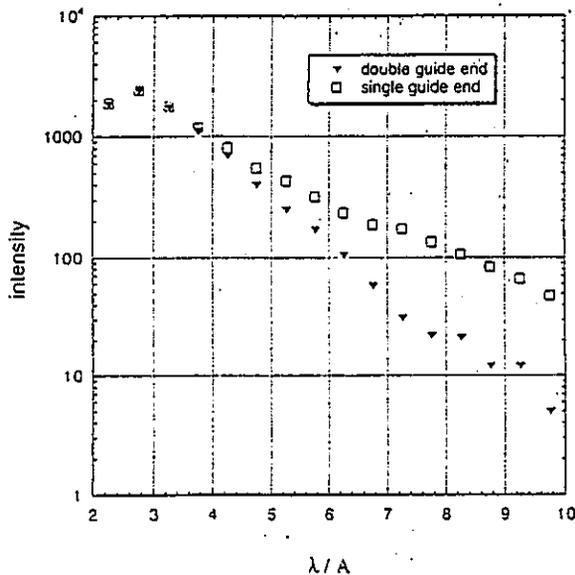


図3 中性子波長分布 (ガイド管出口)

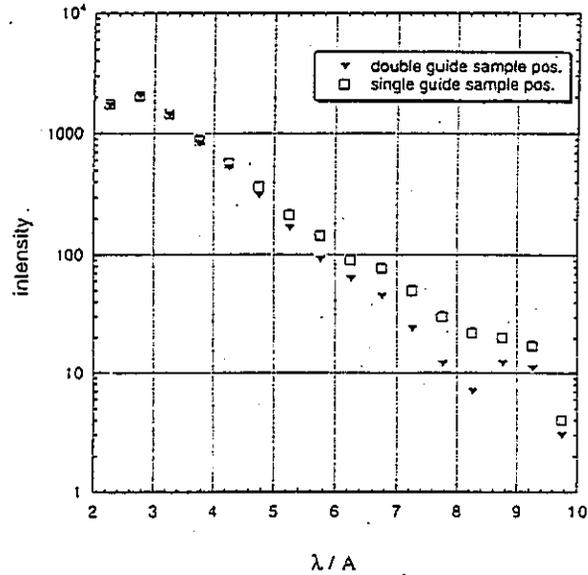


図4 中性子波長分布 (ガイド管出口から3 m)

## 2. 磁場による中性子収束

磁場を用いることによって中性子ビームの収束、ビームの角度広がりを抑えるなどのことができる。中性子ビーム孔から出てくる中性子は一般に角度広がりをもっている。従って、中性子照射試料が小さい場合には、この広がりのために試料に当たる中性子数が少なくなる。それで、角度広がりを小さくし、一点に近くビームを収束することができれば中性子の有効利用が図れる。特定の波長の中性子に注目すれば、角度分散をもったビームを、磁場空間をその波長にあった距離だけ通過させることによって一点に焦点を結ばせることが可能である。

図5に磁場を用いた中性子収束実験体系の概略図を示す。中性子ガイド管の出口に中性子収束用の磁石を設置している。この磁場の前後に中性子ビームを非常に細くするためのコリメータを置き、中性子の収束をはかる。これが実際に動作する事を確認するための予備実験を高エネルギー物理学研究所ブースター利用施設で行った。加速器の繰り返し周波数と測定位置の関係で、中性子飛行時間法によるエネルギー分析では、中性子エネルギーが一意に決まらないという問題があったが、特定の波長で強度が増加しているのが観測された。しかし、この方法による中性子収束が起こっていることを確認するため、波長を決定すること、増加倍率を正確に求めることなどが必要である。今後、そのために、実験条件を整えた実験を北大加速器を用いて行う予定である。

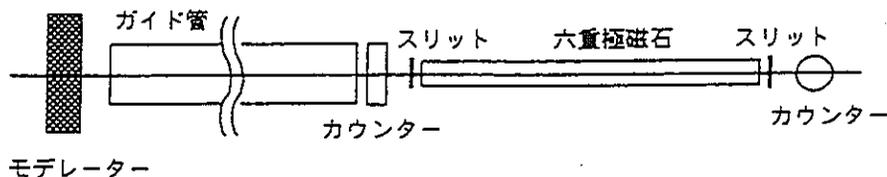


図5 中性子収束実験体系 (概略)

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

なし

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子ビームプローブに関する研究		
研究協力課題名	中性子ビームプローブに関する研究 -収束中性子の研究-		
研究者氏名、所属	東北大学 工学部 原子核工学科 大洗・基盤部 炉心室	古田島久哉教授、坂本 功技官 田中 基 若林利男	
研究協力実施箇所	東北大学サイクロトロンセンター 東北大学工学部加速器工学研究室	研究期間	平成8年2月1日～ 平成8年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p>【研究目的】 高速中性子の運動方向を制御することができれば、炉内中性子の挙動測定等のプローブとして利用できるのみならず、高速中性子のマイクロビームを実現して、中性子の利用技術に関する画期的な新分野を開拓することができる。本研究は、高速中性子ビームを制御する方法についての可能性を論理的に検討するとともに、実際にそのレンズ系を試作して、実用化のための検証実験を行い、この高速中性子ビームの制御技術を確立しようとするものである。</p>			
<p>【研究内容（概要）】</p> <p>照射視野が0.1mm程度の中性子ビームプローブを開発しようとするには、以下の二つの新しい技術開発が不可欠のものである。</p> <p>①従来の中性子源に見られるように、生成される中性子があらゆる方向に放出されるのではなく、限られた前方の狭いコーン内のみ放出される「収束中性子源」を開発し、</p> <p>②更に、生成中性子を極微小の照射視野内に集束する「中性子のレンズ系」を開発する。</p>			
<p>【使用主要施設】 ① 東北大学AVFサイクロトロン</p> <p>② データ収集解析用電子計算機システム</p> <p>③ 集束中性子生成系</p> <p>④ 高速中性子検出器系</p>			
<p>【進捗状況（概要）】</p> <p>文献調査、予備解析の結果、一つの可能性として、高速中性子の微小角散乱の過程を、このレンズ系の実現に応用できるのではないかという結論が得られた。</p>			

【今後の予定】

小規模なレンズ系を設計・試作し、東北大学サイクロロンセンターで検証実験を行う予定である。

【研究成果】

1. 高速中性子微小角散乱の断面積の調査

高速中性子の散乱断面積の測定は一般に難しい実験の一つに掲げられているが、中でも特に微小角の散乱断面積の測定は、その手法に特別の工夫を要する困難なものである。下図は、1973年に測定が試みられた高速中性子の微小角散乱の断面積である。

高速中性子の微小角散乱断面積の文献調査の結果から、レンズの構成材として鉛を用いるものがよいと考えられる。

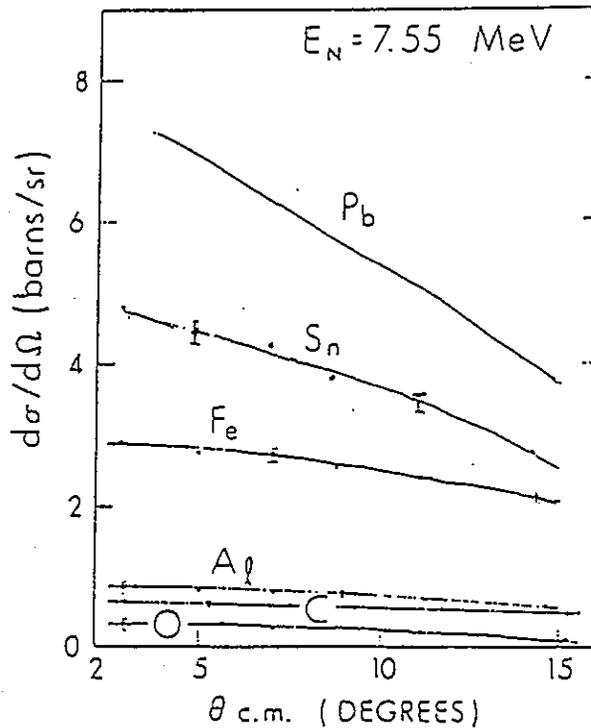


図 高速中性子の微小角散乱の断面積の実験結果

2. 高速中性子レンズ系の検討

レンズの寸法については、

(1)直径： 使用する収束中性子源の収束性を考慮して定める。

(2)暑さ： レンズの収束性を考慮して定める、

などが重要であると考えられる。予備解析に基づいて高速中性子レンズ系の1号機を試作し、東北大学サイクロロン・センターの収束中性子源に接続して、高速中性子マイクロビームの可能性を検討する。

【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

PRODUCTION OF FOCUSED NEUTRON BEAM USING HEAVY ION REACTION :

K. Hasegawa, K. Kotajima, M. Kitamura, T. Yamaya, O. Satoh, T. Shinozuka and M. Fujioka.

Proc. 11th Int. Conf. on Cyclotron and their Applications, Tokyo.

Ed. M. Sekiguchi, Y. Yano and K. Hatanaka, 642-645

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	「常陽」実機照射試料を用いたMA核種の燃焼特性に関する研究		
研究協力課題名	「常陽」照射MA試料の測定結果を用いたMAの燃焼解析法精度評価		
研究者氏名、所属	大阪大学 工学部 原子力工学科専攻 大洗・実験炉部 技術課	竹田敏一教授、山本敏久助手、 北田孝典助手、横山賢治研究生 青山卓史	
研究協力実施箇所	大洗工学センター 実験炉部 技術課	研究期間	平成7年12月1日～ 平成8年3月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>                  動燃で進めているアクチニドリサイクル研究の一環として、高速炉心におけるマイナーアクチニド（MA）核種の燃焼特性を精度良く評価するため、高速実験炉「常陽」で照射したMA試料により、MA燃焼解析法の精度評価を行い、高速炉を用いたMAの消滅処理研究に資する。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b>                  高速実験炉「常陽」で照射したMA試料を用いて、MAの燃焼解析法（核データ、燃焼チェーン、詳細中性子束分布計算法等）の精度評価を行う。                  平成7年度の検討では、「常陽」の炉心第1列に装荷された炉心材料照射試験用反射体CMIR-4の<math>^{237}\text{Np}</math>ドシメータを解析対象に選定し、試料が装荷された照射集合体内部の中性子束分布をモンテカルロ法により計算し、「常陽」の炉心管理や炉心解析に用いている拡散コードによる中性子束と比較し、これらの差が燃焼計算に与える影響を評価した。また、モンテカルロ法により得られた中性子束を用いて、<math>^{237}\text{Np}</math>変換率を計算し、測定値と比較した。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>                  高速実験炉「常陽」</p>			
<p><b>【進捗状況（概要）】</b>                  モンテカルロ計算コードMVPにより集合体内部の非均質構造を考慮して計算した詳細な中性子束分布を、「常陽」炉心管理コードMAGI、拡散コードCITATIONを用いた均質モデルによる計算値と比較した結果、CMIR-4が装荷された炉心第1列では、拡散計算はMVPに比べて、炉心中心方向で約4%の過小評価、炉心周辺方向で約1%の過大評価であることがわかった。                  計算された中性子束を用いて<math>^{237}\text{Np}</math>燃焼特性（核分裂および中性子捕獲による変換率）を計算した結果、MVPによる中性子束を用いた計算値は測定値を約30%過大評価した。</p>			

## 【今後の予定】

- (1) 炉心材料照射試験用集合体CMIR-4の $^{237}\text{Np}$ 変換率の評価において、MVPの中性子束による燃焼計算値は測定値を約30%過大評価することに関して、測定法と解析法の両面からの検討を行う。
- (2) 反射体隣接領域や制御棒近傍等の中性子束の空間分布やスペクトルの変化が比較的大きい位置について燃焼解析を行い、中性子束分布計算に対する集合体構造の非均質効果を評価する。また、長期照射したMA試料を対象に燃焼解析を行い、燃焼による高次MAの蓄積効果について評価する。

## 【研究成果】

### 1. 中性子束分布の計算と評価

MVPを用いた中性子束分布の計算結果を図1に示す。主な評価結果は以下のとおりである。

#### (1) 集合体内部の中性子束分布

$^{237}\text{Np}$ ドシメータが装荷されていた集合体中心部の軸心管では、全中性子束に統計誤差以上の差は認められなかった。しかし、炉心中心方向のコンパートメントでは、MAGIによる拡散計算はMVPに比べて最大4.4%過小評価しており、この位置での解析を行う場合には、詳細な中性子束分布を評価する必要があることがわかった。

#### (2) 中性子束分布に対する制御棒効果

今回の解析では、制御棒全引き状態の体系でMVPにより中性子束分布を計算したため、実運転履歴に基づいて制御棒位置を模擬しているMAGIの計算に比べて、制御棒挿入による中性子束の歪みが計算されていない。しかし、CMIR-4の装荷位置が炉心第1列であり、制御棒位置（炉心第3列および第5列）から離れているため、CMIR-4の $^{237}\text{Np}$ ドシメータの燃焼解析については、制御棒のモデル化の違いは有意な差を与えなかった。

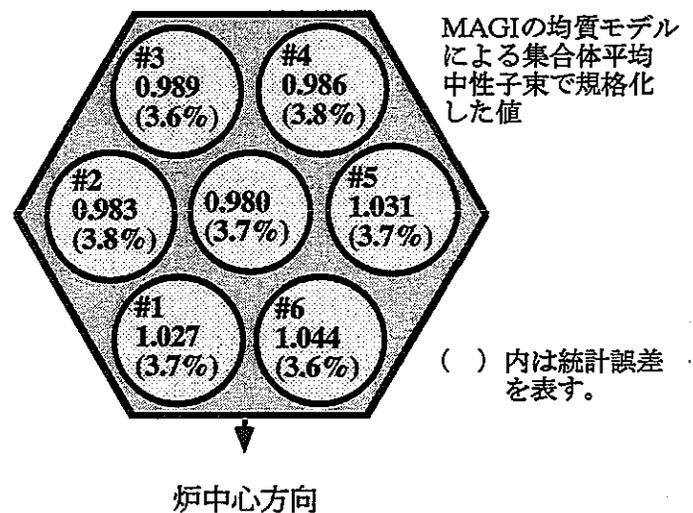


図1 CMIR-4 集合体内部の詳細中性子束分布

### 2. $^{237}\text{Np}$ 変換率の計算結果

MAGIで規格化したMVPの中性子束を用いた $^{237}\text{Np}$ 変換率の計算値は、中性子捕獲、核分裂反応ともに測定値を約30%過大評価した。また、ドシメータセットの実測反応率でアジャストした中性子束による計算でも測定値より約12~20%大きかった。この原因として、MAGI等の拡散計算による中性子束の計算誤差、ドシメータの測定反応率の種類が少ないことによるアジャストメントの信頼性の問題や $^{237}\text{Np}$ 変換率の測定誤差についても検討する必要があることがわかった。

以上の結果、 $^{237}\text{Np}$ 燃焼特性の解析精度を向上させる上での問題点を抽出することができた。

## 【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7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	中性子計測データの計算機直接入力に関する研究		
研究協力課題名	(同上)		
研究者氏名、所属	九州大学 工学部 応用原子核工学科 的場 優教授、榮 武二助教授 大洗・実験炉 臨界工学試験室 納富昭弘助手、北村康則 大谷暢夫		
研究協力実施箇所	大洗工学センター実験炉部臨界工学試験室 九州大学工学部応用原子核工学科	研究期間	平成8年2月13日～ 平成8年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input checked="" type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b>            高速炉燃料再処理施設等の核燃料施設に対する未臨界度モニターの高度化をはかる事を目的として、新しい概念による中性子計測処理システムを開発する。</p>			
<p><b>【研究内容(概要)】</b>            原子炉雑音の時系列データを計算機に直接入力する装置を開発し、未臨界度モニターとして実用的で且つ新しい機能を有する計測・処理系を実現する。複数の中性子検出器による原子炉雑音の時系列データを、計算機に直接入力する事によって収集し、得られたデータをオンライン処理して、自己・相互相関の情報を実時間上で評価できるシステムとする。            重水臨界実験装置の重水減速体系、及び、未臨界度測定試験体系を測定対象として炉雑音測定実験を実施し、異なる種類の測定システムとの比較評価によって適用性を検証する。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b>            重水減速圧力管型臨界実験装置、最大出力1kW</p>			
<p><b>【進捗状況(概要)】</b>            九州大学で開発されてきた単一入力の直接測定システムを用いて、大洗工学センターの重水臨界実験装置において炉雑音測定実験を実施した。これまで臨界工学試験室で開発されてきた測定システムによる測定データと比較評価し、ファインマン-アルファ法によるデータ処理については、直接測定システムが正しくデータを集積している事、及び、双方のデータに整合がとれている事を確認し、本システムによる炉雑音測定と未臨界度モニターに対する見通しを得た。</p>			
<p><b>【今後の予定】</b> 検出不感時間の短縮の為の計測システムの開発を行い、重水臨界実験装置の未臨界度測定試験体系において軽水減速試験体の測定試験によって適用性を検証する。ファインマン-アルファ法によるデータ処理システムを開発し、未臨界度モニターとしての性能を実験的に評価する。測定によって得られる時系列データに含まれる情報を有効に利用できる解析手法を開発する。</p>			

## 【研究成果】

九州大学工学部で開発されてきた中性子検出信号の時系列データ直接測定システムを用いて、大洗工学センターの重水臨界実験装置(DCA)において炉雑音を測定し、本システムの適用性を確認した。

### (1) 炉雑音測定体系と測定システム

測定にはDCAの未臨界度測定炉心を使用した。図-1にDCAの炉心配置を示す。炉心中央に円筒形の試験体領域があり、周辺の円環状の領域をドライバー領域と称する。ドライバー領域の重水水位を変化させることによって実効増倍率を0.998から0.6程度までとし、それぞれの未臨界度(実効増倍率)における炉雑音を測定した。中央の試験体領域にはATR規格のウラン燃料ピンで構成された試験体が装荷されているが、今回の測定では試験体に減速材は供給せず、測定体系は円環状の重水減速体系である。ドライバー領域には1.2%Uの燃料クラスターが44体装荷されており、検出器を挿入しない場合の臨界水位は約169.6cmである。

中性子検出器からデータ収集装置に至る中性子検出システムを図-2に示す。検出器からの信号は電荷有感型の前置増幅器を通した後、炉室において主増幅器で波形を整形・増幅し、同軸ケーブルで計測室に伝送した。計測室では、タイミングシングルチャンネルアナライザーのディスクリレベルを調整し、対応する波高成分のタイミング情報を持つTTLレベルのロジック信号に変換した。こうして得られたタイミング信号は複数に分岐され、今回テストする測定システムに入力されると同時に、モニター用の計数率計や動燃で開発されてきた他の炉雑音測定システムにも供給された。

測定に使用した直接測定システムの概念を図-3に示す。本システムでは、中性子検出系から計算機に入力された信号がCPUに割り込み処理を要求し、割り込み処理では、独立に1MHzの基準クロックを計数しているスケーラーの値を読み出して、計算機のメモリーに格納する。メモリーに格納されるスケーラーの値は相対的な時刻であり、メモリー上に信号の時系列データが測定値として得られる。

### (2) 炉雑音の測定

今回の実験では、直接測定システムに取り込むデータの計数率を、本システムを用いた近大炉での実験で標準的に使用されてきた1~2kcpsになるように調整した。計数率が高すぎる場合には、タイミングシングルチャンネルアナライザーのディスクリレベルを上げて直接測定システムに入力される計数率を下げた。He-3比例計数管に入射した一個の熱中性子が、出力波高分布上のどの位置に計数されるかは熱中性子のエネルギーとは無関係であり、ディスクリレベルを上げることによって低波高成分を計数しないことは、検出器全体の中性子に対する感度を下げることと等価である。直接測定システムによって得られるデータは、中性子が検出された時刻の記録であり、現状では直接このデータを統計処理して炉物理パラメーターを算定する手法が開発されていない。今回は、時間データをマルチチャンネルスケーラーによる測定データと同等の形式(所定の時間内の計数個数)に変換し、ファインマン- $\alpha$ 法による統計処理で即発中性子減衰定数を算定した。

上記の直接測定システムと並行して、動燃で開発されてきた2種類の炉雑音計測システムによる測定を行い、即発中性子減衰定数 $\alpha$ を算出して比較・検討することとした。第1の計測システムはネットワーク対応型MCSとワークステーションによってデータを収集し、ファインマン- $\alpha$ 法で解析するシステムであり、第2は高速フーリエ変換(FFT)を行って得られたパワースペクトルから $\alpha$ を算出する周波数解析器を用いたシステムである。

### (3) 測定結果と評価

直接測定システムによる測定データを、ファインマン- $\alpha$ 法のデータ解析手順によって処理した結果の例を図-4に示す。他の条件の測定についても20分程度で安定した結果が得られることが確認された。測定された雑音データから統計処理によって得られた即発中性子減衰定数 $\alpha$ を表-1に示す。高速フーリエ変換による周波数解析法では、実効増倍率が0.8程度まで低くなると測定が困難になったが、0.9よ

りも大きい領域で得られた $\alpha$ の値は時系列データ直接測定システムの評価値と極めてよい一致を示している。今回の測定によって、直接測定システムを用いて安定した測定データが得られることが確認された。

#### (4) 今後の計画

現状の直接測定システムでは、マルチチャンネルスケaler(MCS)と比較して不感時間が若干長くなる。今回の実験では、中性子検出の計数率(直接測定システムに入力される信号の計数率)を、実績のある所定の値( $\sim 20,000$  cps)以下に調整しており、直接測定システム固有の不感時間の影響は見られなかった。しかしながら、高い計数率を低く押さえることは中性子の検出感度を下げることと等価であり、中性子検出系が本来持っている能力を切り捨てたことになっている。今回測定した体系で計数率が高いのは、体系の実効増倍率が高く臨界に近い場合であるため、雑音信号中の有効成分の割合が高く、検出感度を下げても有意なデータが得られたが、実効増倍率が低く外部線源強度が高い体系への適用が必要であることを考慮すると、不感時間の短縮化、又は、直接測定システムにおける不感時間の影響の評価が必要である。

計算機に転送されたデータの統計計算処理においても、現状のファインマン- $\alpha$ 法による処理はデータの持つ情報の一部しか利用していない。時間データそのものを利用した新しい統計計算処理手法の開発が必要有効である。本システムでは、計数の検知された時だけ計算機が作動しており、測定システムとして合理的な概念となっている。記憶容量の観点からも演算装置の作動の観点からも、将来性のある興味深い測定システムである。

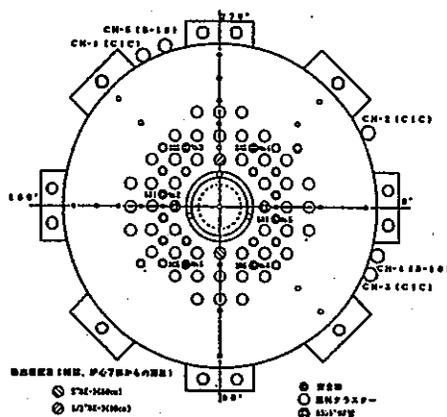


図-1 DCA炉心配置

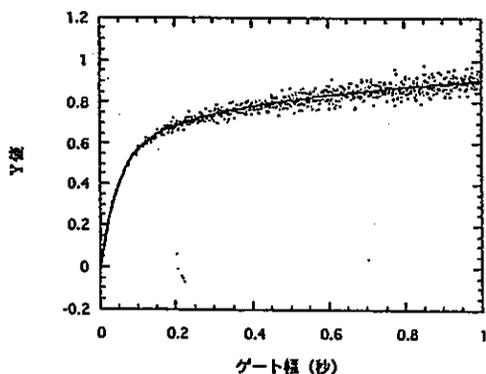


図-4 ファインマン- $\alpha$ 法による解析結果

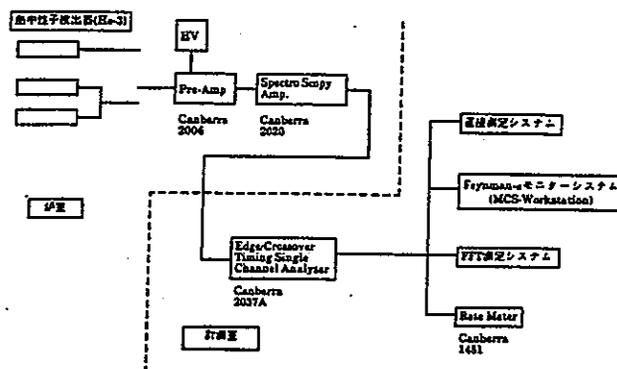


図-2 中性子検出システム

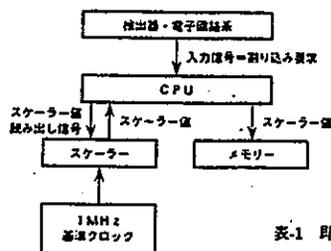


図-3 直接測定システムの概念

表-1 即発中性子減衰定数(測定値の比較)

重水水位 (cm)	検出器 配置	$k_{eff}$ (推定値)	$\alpha$ (推定値)	$\alpha$ (直接入力)	$\alpha$ (MCS)	$\alpha$ (BFNA)
168.42	A	0.998	17.9	13.5		17.6
164.00	B	0.992	28.7	24.6	26.0	28.3
160.50	B	0.987	39.6	38.7	38.5	38.3
136.48	B	0.939	138.5	131.2	117.0	135.7
115.21	B	0.878	282.5	252.9	233.8	
99.30	B	0.814	456.0	434.5		755.9
86.80	B	0.748	664.3	637.0	507.7	682.35
76.51	B	0.681	917.7	986.0		
69.00	B	0.616	1219.9	1141.8		

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

- 1) 北村他、時系列データ直接処理による未臨界度モニタの開発(1)、日本原子力学会「1996年秋の大会」A20

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	構造物の熱過渡強度に関する研究		
研究協力課題名	厚肉円筒の熱応力下のき裂停留に関する研究		
研究者氏名、所属	東京大学 工学部 機械工学科 大洗・基盤部 構材室	酒井信介教授、飯井俊行研究生 和田雄作、山下卓哉	
研究協力実施箇所	大洗工学センター 基盤技術開発部 構造・材料技術開発室	研究期間	平成7年12月1日～ 平成7年1月31日
研究協力形態	<input checked="" type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p><b>【研究目的】</b> 厚肉円筒については、熱応力による環状疲労き裂の進展が板厚の1/3 ～1/2 で停留することが経験的に知られている。本研究は、実用上き裂が停留するメカニズムを明らかにすることを目的に実施した。</p>			
<p><b>【研究内容（概要）】</b> 片側にき裂を有する板に対する熱応力の特性を調べるため、一様な温度分布と線形温度分布の2ケースについて検討を行った。その結果、円筒端部の回転が拘束されることが、主としてき裂停留に寄与していることがわかった。また、圧縮応力域が存在しない場合には、き裂の進展速度は飽和するものの減少はしないことがわかった。これにより、圧縮応力域の影響は小さいもののき裂の停留に対して無視できないことが明らかとなった。</p>			
<p><b>【使用主要施設】</b></p>			
<p><b>【進捗状況（概要）】</b> 平成7年度で研究を終了した。</p>			

## 【今後の予定】

## 【研究成果】

### 1. 緒言

厚肉円筒については、熱衝撃を中心として熱応力下の疲労き裂進展に関する基本的な性質のが進められてきた。この成果のうちで簡易評価という観点から選ぶとすれば、代表的なものは次の2点である<sup>(1)</sup>。

- 1) 熱応力（たとえ弾性域を超えても）による疲労き裂進展速度を、いわゆる Paris 則で安全側の評価ができること。

$$\frac{da}{dn} = C (\Delta K)^m \quad (1)$$

- 2) この場合の応力拡大係数範囲  $\Delta K$  値が厚肉円筒の非定常最大弾性熱応力により表現できること。

$$\Delta K = \frac{E \alpha (T_{avg} - T_s)}{1 - \nu} \times \sqrt{\pi a} \times k \left( \frac{a}{W} \right) \quad (2)$$

ここに、 $E$ ：ヤング率、 $\alpha$ ：熱膨張係数、 $\nu$ ：ポアソン比、 $T_s, T_{avg}$ ：各々内表面温度と平均温度、 $a$ ：き裂長さ、 $W$ ：肉厚、 $k$ ：無次元関数である。同時に実験結果から、「疲労き裂が肉厚の 1/3～1/2 程度で実用上停留とみなせる」という経験則が知られている。しかし、この停留疲労き裂長さについては肉厚の 3/4 まで至った例も報告されており<sup>(2)</sup>、「何故疲労き裂が停留するのか」「疲労き裂の停留長さと熱応力の荷重条件との関係」については未だに明らかになっていない。そこで、本研究においては、この2点を明らかにすることを試みた。

本稿では、熱応力の特性に着目し、き裂の「実用上」の停留を論じる場合には材料の  $\Delta K_{th}$  と比較することなく現象を説明することができるか、またその場合に熱応力のどの特性がき裂の停留に寄与するのかという点を明らかにする。このために、理論的な見通しが付け易い片側き裂板に対し検討を行った。

### 2. 検討条件

熱応力は弾性範囲内にあり、き裂先端は小規模降伏条件を満足するものとする。疲労き裂進展速度については、Paris 則が成立するものとする。最大熱応力分布と熱応力0の間の荷重・除荷を繰返すものとして、以下の議論では最大熱応力分布に対する  $K$  値で  $\Delta K$  値を読み代える。もしき裂が実用上停留するならば、き裂進展速度、即ち  $\Delta K$  値はき裂進展とともに極大値を示し、その後減少していくような傾向を示すはずである(式(1))。

熱応力は、本来自由な熱膨張が拘束されることにより生じる応力である。板の場合には、図1のように平均温度相当の自由伸びに対し縁の回転が拘束されるような境界条件となる。厚肉円筒の軸方向熱応力との対応（式(2)の応力項）に配慮し、x方向は自由に膨張できるとして計算した。このとき板の熱応力は次式で与えられる。

$$\sigma = E \alpha (T_{\max} - T) \quad (3)$$

検討した最大熱応力分布は(i)一様分布(ii)線形分布(図1)の2種類である。いずれも最大応力は、 $\sigma_0 = E \alpha T = 103 \text{Mpa}$  ( $E = 206,000 \text{Mpa}$ ,  $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}$ ,  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ )である。

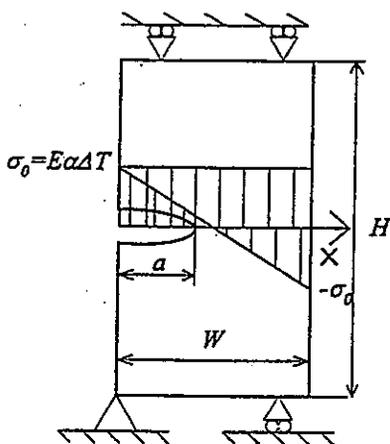


Fig. Single Edge Cracked Strip under Thermal Stress

計算は二次元有限要素法により行い、K値は外挿法により求めた。板厚 $W = 10 \text{ mm}$ 、高さ $H = 10, 20, 30, 40, 50, 100, 500, 1000 \text{ mm}$ について無次元長さ $a/W = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ の計算を行った。

### 3. 計算結果

通常の荷重境界問題であれば、K値は $W/H = 1/3$ 以下では $W/H = 0$ の結果と差が無いと言われている。今回の熱応力の場合(変位境界問題)は状況が異なるため、高さHの影響についても合わせて考えることにした。

#### 3.1 線形熱応力分布

図2に線形熱応力に対する片側き裂のK値の3次元分布を、図3に図2のK値の等高線分布を示す。これより

- (1) 片側き裂板の線形熱応力下のK値は、き裂の進展に伴い極大をとり、その後減少する傾向を示す。
- (2) ただし、 $W/H < 1/10$ 程度ではK値は単調増加の傾向を示す。 $W/H = 1/100$ 程度となると拘束のない片側き裂板に表皮応力  $103 \text{Mpa}$  を加える純曲げの結果とほぼ一致する。即ち、板の両端の回転拘束がき裂先

端に及ぼす影響が弱くなると、K値は単調増加の傾向を示す。

- (3) K値が極大値をとる時のき裂長さ  $a/W$  は、板幅  $W/H$  が増加するほど小さくなる。
- (4) K値が極大値をとるき裂長さ  $a/W$  は、 $1/2$  以下となる。

ことがわかる。

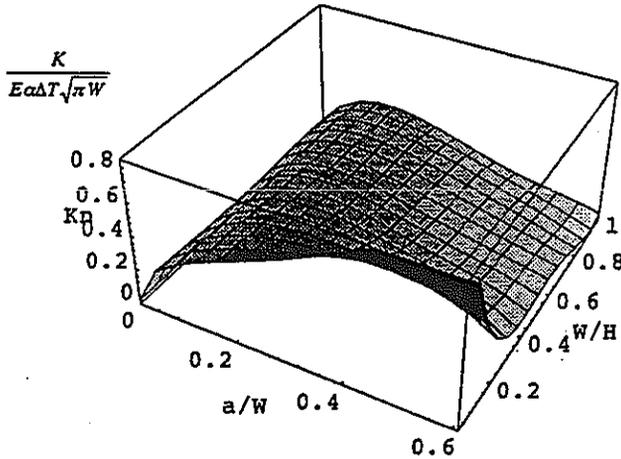


Fig. 2 Normalized Stress Intensity Factor of Single Edge Cracked Strip under Linear Thermal Stress

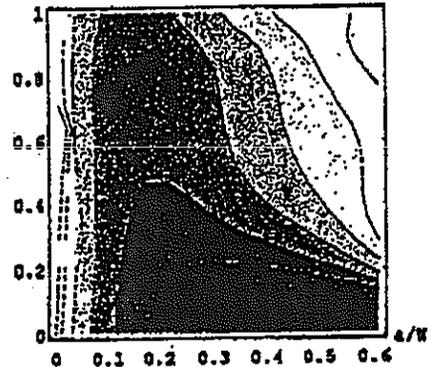


Fig. 3 Contour of Normalized Stress Intensity Factor of Single Edge Cracked Strip under Linear Thermal Stress

### 3. 2 一様熱応力分布

図4に一様熱応力に対する片側き裂板のK値の分布を3次的に示す。熱応力ゆえ板の両端の回転を拘束しているが、K値はき裂の進展とともに極大値は示さなかった。線形熱応力との差は、圧縮応力域の有無の差であると思われる。

$W/H$  が小さいとK値はき裂の進展とともに単調増加する傾向を示し、 $W/H=1/100$  程度で回転拘束がない片側き裂板を 103Mpa の一様応力で引張った結果とほぼ一致した。

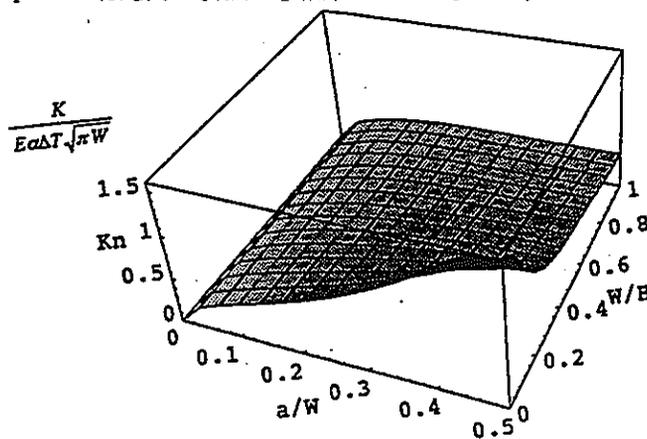


Fig. 4 Normalized Stress Intensity Factor of Single Edge Cracked Strip under Uniform Thermal Stress

#### 4. 結言

- (1) 線形熱応力に対しK値がき裂長さとともに局大値を示し、その後減少するという傾向が得られた。これによりき裂が実用上停留する現象が、 $\Delta K_{th}$ と比較することなく、主として熱応力下のK値分布特性から説明できる見通しがついた。
- (2) 熱応力の特性のうち、「き裂の停留、即ちK値がき裂進展とともに極大値をとり、その後減少する傾向」に大きく寄与するのは板の両端の回転拘束である。
- (3) (2)ではあるが、圧縮応力域がなければき裂の進展とともにK値が減少に転じる傾向は得られない。

#### 参考文献

- (1) Skelton, R. P. and Nix, K. J., Crack Growth Behavior in Austenitic and Ferritic Steel during Thermal Quenching from 550 °C, High Temp, Technol., Vol. 5, 1987, p. 8.
- (2) Skelton, R. P. and Miles, L., Crack Propagation in Thick Cylinders of 1/2CrMoV Steel during Thermal Shock, High Temp, Technol., Vol. 2, No. 1, 1984, p. 28

#### 【レポート、学会誌・国際会議への発表論文等】

1. 飯井他、厚肉円筒の熱応力下の疲労き裂停留（第1報）、第45回応用力学連合講演会予稿集（1995）PP. 357-358

先行基礎工学分野に関する平成7年度研究概要報告書

研究協力テーマ	高燃焼度燃料のスエリング評価		
研究協力課題名	FBR高燃焼度燃料のFP挙動とO/M比評価		
研究者氏名、所属	九州大学 工学部 応用原子核工学科 佐藤 勇 研究生 大洗・燃材部 AGS 山本一也、梶谷幹男		
研究協力実施箇所	大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料試験室 (AGS)	研究期間	平成7年11月20日～ 平成8年3月31日
研究協力形態	<input type="checkbox"/> 客員研究員 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生の受入れ <input type="checkbox"/> 共同研究		
<p>[研究目的]</p> <p>実用化を目指したFBR燃料の高燃焼度化を達成するためには、燃料中に高い濃度で蓄積される固体状の核分裂生成物 (FP) が燃料物性を変化させるだけでなく、燃料ペレットのスエリングや被覆管内面腐食 (FCCI) を発生させることから、その照射時の挙動と燃料物性に与える影響を把握することが必要である。</p> <p>本研究は、高燃焼度のFBR燃料について固体FPの照射による再分布挙動と酸素ポテンシャルの関係を、照射済燃料を用いた実験的データから明らかにするとともに、その熱力学的解析等を通して固体FPと燃料内のO/M比 (酸素の金属元素に対する比) の照射挙動評価モデルの理論的基礎を構築するものである。</p>			
<p>[研究内容 (概要)]</p> <p>燃料内に生成される固体FPの中でも、Moはその位置における酸素ポテンシャルに応じて、酸化物としてMOX燃料中に存在する割合と白色金属析出相に合金として存在する割合が変化することが知られている。これを利用して、燃料中に存在するMoと白色金属析出相に存在するMoの活量比から酸素ポテンシャルを算出し、O/M比を求める手法がREDOX法である。本研究は、フランスの高速炉Rapsodie炉と「常陽」で8～14at%まで照射された照射済燃料を用いて、燃料径方向Mo分布を遮蔽型X線マイクロアナライザー(SXMA)で測定評価し、REDOX法にてO/M比を求めた。また、その結果を酸素の再分布 (O/M比) に関する最も一般的な熱力学的モデルであるAitkenモデルと比較することによって、高燃焼度燃料におけるMoと酸素の移動機構について考察した。</p>			
<p>[使用主要施設]</p> <p>大洗工学センター 燃料材料開発部 照射燃料試験施設 (AGF) 及び照射燃料集合体試験施設 (FMF) 金相セル</p>			
<p>[進捗状況 (概要)]</p> <p>平成7年度計画していた試験及び解析評価はすべて完了し、報告書にまとめた。</p>			

## [今後の予定]

平成8年度からは、3年間の大学との共同研究とし、上記スエリングや被覆管内面腐食に直接関係するCsやZr等に研究の範囲を拡げて実施する。平成8年度及び9年度では、照射済燃料を用いた金相試験ならびに機器分析によるFP元素再分布のデータ取得、PNC316被覆管材についての炉外腐食試験による酸素ポテンシャル評価のための基礎データ取得に重点を置いて実施し、平成10年度は、これらのデータを用いた熱力学解析及び金相写真の画像解析を主体とし、固体FPと酸素ポテンシャルの照射挙動について理論的なアプローチを試みる。

## [研究成果]

### 測定と解析方法

本研究で用いた照射燃料は、初期O/M比約1.94、Pu含有量は約30wt%の混合酸化物燃料である。照射条件は燃焼度8~13at%、線出力156~264W/cm、被覆管表面温度410~578℃であった

燃料ピンは軸方向3箇所切断され、それぞれの横断面について径方向にMo濃度分布を測定した。測定は動燃のFMF金相セルに設置されているSXMAを用いて、燃料マトリックスと白色金属析出物の2相についてそれぞれ実施した。一次元熱伝導計算より得られた燃料内温度分布と測定された両相のMoのモル分率分布から燃料内酸素ポテンシャル分布を得た。この酸素ポテンシャルから、WoodleyによってSIMFUELを用いた実験によって得られた酸素ポテンシャルのFPによる変化量のデータに基づき、Catlowの理論を適用してO/M比を求めた。

### 結果と考察

白色金属相と燃料マトリックス中のMoの径方向分布を、分析に供した試料の採取位置とともに図1に示す。燃焼度、温度が共に高い燃料ピン中間部のMo存在量が少ないことが分かる。また、Moは、燃料表面近くでは燃料マトリックスに、燃料中心付近では白色金属析出相に多く存在していることが分かる。

図2に燃料内のO/M比径方向分布を示す。燃料ピン上端部と下端部では比較的平坦な分布であり、製造時の初期値と比べると全体として高い値を示している。これは燃料の燃焼によって生成される余剰酸素によるものと考えられる。一方、燃焼度、温度がいずれもより高い燃料ピン中間部では著しいペレット外周方向への再分布が見られ、酸素が上・下端部よりも低温側へ大きく移動していることが分かった。

O/M比分布を解析的に評価するベースとして一般的に良く知られているAitkenの酸素の移動機構モデルは、燃料内の熱拡散と炭酸化合物あるいは水酸化物の相互拡散に基づくモデルであるが、図3に示すように、本研究で得られた高燃焼度燃料のO/M比分布と比べると分布の傾向に違いが見られ、特に、温度の高い燃料中心付近で違いが大きくなることが分かった。このような違いの生じる原因について調査した結果、O/M比評価の基になっているMoの径方向分布が、低燃焼度燃料では従来の熱拡散モデルで説明できるが、高燃焼度燃料では従来のモデルでは説明できない低下を示しているためであることが分かった。

10at%を越える燃焼度を有する燃料では、燃料ペレットと被覆管のギャップ部に著しいCs<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>の形成が知られており、以前に動燃で実施された試験でこのMoがFPであることが確認されている。このことから、現在、高燃焼度燃料では従来のモデルでは説明できないMoの移動機構が存在し、このMoの移動によってAitkenモデルと異なる酸素の移動が生じるために、上述のようなO/M比分布の違いが現れるものと推測している。

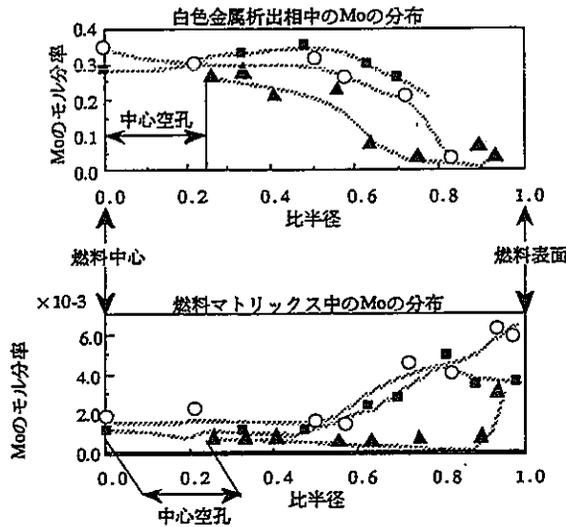
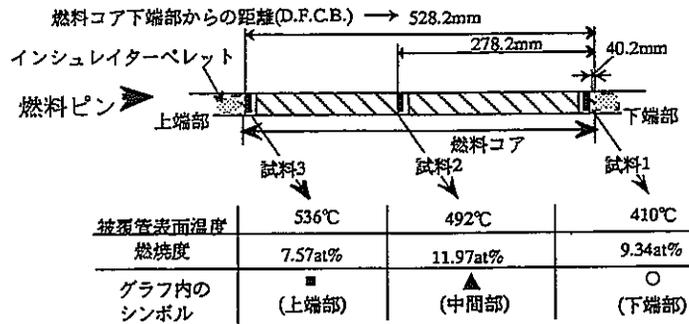


図1 分析試料の位置と燃料内のMo分布の測定結果

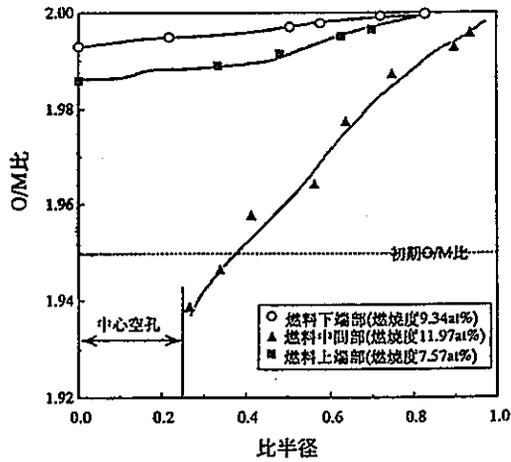


図2 燃料内のO/M比径方向分布

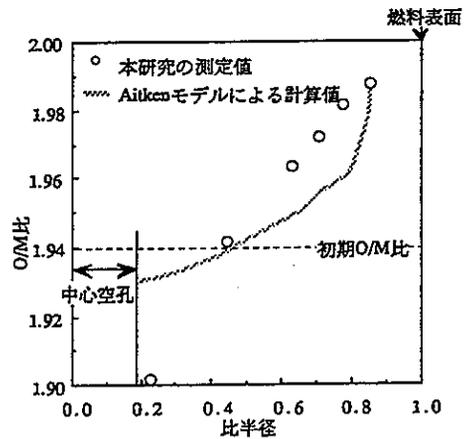


図3 O/M比分布の計算値と測定値の比較 (燃焼度13.33at%)

[レポート、学会誌・国際会議への発表論文等]

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