

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：

**TRU燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発**

（ニュークリア・デベロップメント株式会社）

機関名：ニュークリア・デベロップメント(株) 代表者氏名：伊藤邦博

機関名：慶應大学 代表者氏名：菱田公一

機関名：大阪大学 代表者氏名：山口 彰

研究期間及び予算額：平成18年度～平成21年度（4年計画） 370,001千円

平成18年度 141,503 千円

平成19年度 105,018 千円

平成20年度 68,246 千円

平成21年度 55,233 千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>本業務は、マイナーアクチド（以下「MA」という）を含有する高速増殖炉用低除染超ウラン元素（以下「TRU」という）燃料集合体組立工程における除熱手法を確立するため、フルモックアップ集合体及び少数ピンモデルの温度・流速計測を実施し、冷却挙動評価手法の整備（評価精度目標±5℃）、健全性に影響を及ぼさない被覆管温度に除熱する機能を有する冷却システム概念の構築（定常時被覆管最高温度200℃、送風冷却停止30秒後300℃以内とする除熱設備）および送風冷却停止時の被覆管温度上昇挙動の評価を行うものである。</p> <p>研究実施期間を4カ年とし、フルモックアップ試験、少数ピンモデル試験について、前半において定常除熱、後半に過渡除熱試験を行う。試験結果を反映しながら、冷却挙動評価手法整備、冷却システム概念構築を4カ年に亘って実施するものとし、送風冷却停止時の温度評価を4カ年の後半に行う。</p>
2. 研究成果  ・成果 ・副次的な成果 ・論文、特許等	<p>【研究開発項目1】TRU燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価ツールの整備</p> <p>(1)燃料バンドルフルモックアップ除熱試験</p> <p>実機燃料集合体フルモックアップの横置裸バンドル体系除熱試験装置を用いて定常および冷却停止過渡試験を行い燃料バンドル内の温度分布データを取得した。燃料バンドルとそれを支持するバツル板（支持板）間ギャップはバンドル組立上5mmが必要となるが、組立てに支障を与えることなくギャップを閉じる構造設計の目処を立てた上で、ギャップが5mmの場合とギャップを閉じて冷却効率を高めた場合の2通りの定常除熱試験を実施し、データを取得した。被覆管最高温度はバンドル上層部の中央部付近に発生し、被覆管温度上昇は出力にほぼ比例、流速にほぼ反比例している。試験の全ての範囲において、被覆管最高温度は目標とする制限温度200℃を十分に下回った。また、ギャップを閉じた状態で横置裸バンドルの冷却停止過渡試験を行った。被覆管温度の上昇率は極めて緩慢であり、試験の範囲で、目標とする30秒後において300℃以下という制限値を十分に下回る結果を得た。さらに、ラップ管装着軸流除熱試験を行うための準備として、横置裸バンドルにラップ管を被せて軸方向に除熱する試験装置に改造した。</p>

(2) 燃料ヒート流束評価

ヒートロッドの製作公差の周方向熱流束分布に与える影響について評価し、被覆管内表面熱流束で最大 6%程度の周方向分布を生じるものの、被覆管外表面では製作公差の影響はほとんど無いことを確認した。

(3) 燃料バンドルフルモックアップ 出口領域温度計測試験

燃料バンドルフルモックアップ 出口部の温度の空間分布を発熱量と流速をパラメータとして計測し、バンドル出口部近傍では、ワイヤが空気の出口流路を閉塞する位置にあると温度が低い傾向を示すが、バンドルから上方に離れるに従ってワイヤ効果が減少し、自由空間での対流によりバンドル切欠側への空気の流れによってバンドル切欠側出口部の温度が高くなることが判明した。

(4) 燃料バンドルフルモックアップ 出口領域 PIV 計測試験

燃料バンドルフルモックアップ 出口領域の PIV 計測を行い、バンドル出口部の流速が殆どゼロに近いのに対してギャップ部の流速が大きいことを確認した(例: バンドル入口流速 1m/s 時、ギャップ流速が約 4m/s)。また、バンドルに切欠がある側の方が非切欠側よりも流速値が大きく、バンドル切欠側では周囲の流体の巻き込み量が少ないと推定した。

(5) 燃料バンドル除熱評価ツールの整備

a) 冷却システム構築のためのパラメータ解析に適し、横置きラッピングワイヤ型バンドルに特化したサブチャンネル解析コード

燃料バンドル冷却評価ツールの整備として、サブチャンネルコードに研究開発項目 3 で作成の DRM モデル及び伝熱相関式を取り入れた他、新たに出入口境界条件と自然対流モデルを組み込んで横置裸バンドル体系での過渡解析を可能とした。サブチャンネルコードを用いて(3)のフルモックアップ試験データ再現解析を行い、サブチャンネルコードのバンドル内温度分布予測目標精度(±5°C以内)を達成した。また、過渡試験との一致度も良好であることを確認した。

b) 比較的粗い計算格子でバンドル体系を解析できる乱流モデルを含む汎用多次元熱流動解析コード

フルモックアップ過渡試験解析を汎用多次元熱流動解析コード「FLUENT」を用いて行い、フルバンドル体系の解析が可能であり、温度場の精度が 5°C以内であることを確認した。

【研究開発項目 2】 TRU 燃料集合体組立時の冷却システム概念の構築

(1) 冷却システム検討のためのパラメータ解析

横置裸バンドルに関する冷却停止過渡試験及び当該事象に関するサブチャンネルコード解析により、冷却停止 30 秒後のバンドル内被覆管最高温度上昇は 1°C以内であると評価した。また、入口部流動変動の有無をパラメータとした解析を行い、入口流量変動が被覆管最高温度に殆ど影響を与えない(変動 1°C以内)ことを確認した。さらに、システムに想定される具体的過渡事象に関するサブチャンネル解析によっても温度上昇は僅かであり、開発目標である定常時 200°C、冷却停止 30 秒後 300°C以下を十分に満足すると評価した。

(2) 冷却システム検討

フルモックアップ除熱試験結果およびバンドル過渡解析を行った結果を踏まえて、TRU 燃料集合体組立時の冷却システム概念の検討を行った。燃料バンドルとバッフル板間のギャップ(5mm)を通過する過大な空気流量を抑制するための構造としてバッフル板移動方式を選定した。また、ラップ管装荷

方法を検討し、装荷時にバンドル構成が伴うおよびハッフル板を漸次収納する構造を考案した。

安全設計の考え方の整理に基づき、設計要求事項を抽出し、冷却システム構成として、径方向と軸方向送風機を独立させ、それぞれが並列送風機 2 機（逆止弁付）から構成するシステムを選定した。また、バンドル入口部空気の整流方式について流動解析を通して検討し、パンチング・ハカム組合方式を選定した。以上に基づき冷却システムの主要設備仕様を定め、構造図を作成した。さらに、燃料バンドルの温度監視手段として赤外線放射温度計の有効性を確認し、赤外線放射温度計と熱電対の組合せによる温度監視システムを提案した。本冷却システムにおける過渡事象発生時のサブチャンネル解析を行い、いずれの過渡事象でも温度上昇は $1^{\circ}\text{C}$ 以内に収まり、極めてロバスト性のある安定なシステムであることを確認した。

#### 【研究開発項目 3】PIV データ活用によるマイクロ評価ツールの検討

汎用多次元熱流動解析コード（以下、マイクロ評価ツールという）に適合するマイクロモデルを定めることを目的に、2次元少数ピンモデル試験装置を用いて定常及び冷却停止試験を行い、PIV および熱電対により詳細な流速・温度分布データを取得し、マイクロ評価ツールで使用する乱流モデル、壁関数モデルを選定した。2次元少数ピンモデル試験装置は燃料ピン 5 本部分を 5 倍に拡大したものであり、ワイヤ取付け角度を軸方向に固定しているがピンの回転でワイヤ角度の変更が可能とした。PIV 手法の適用により、3本のピンで囲まれたサブチャンネル内の微細な流速場データの取得に成功した。上記試験解析を行うためにあらたにメッシュジェネレータを開発し、マイクロ評価ツールである「FLUENT」を用いて感度解析を実施し、乱流モデルとして RNG  $k-\epsilon$  モデル、RSM モデルが計測データとの一致度が良好であり、実用性の観点で燃料バンドルの解析には RNG  $k-\epsilon$  モデルが適すると判断した。また壁関数として EWT（改良壁処理）が適することを確認した。

このマイクロ評価モデルをバンドル体系に適用し、実機バンドル ( $P/D: 1.1$ ,  $P$ : ピンピッチ,  $D$ : ピン径) に適合する分布流動抵抗モデル (DRM) と伝熱関係式を作成した。

#### 【研究開発項目 4】ラップ管装着燃料バンドル軸流除熱試験

横置裸バンドルにラップ管を被せて軸方向に除熱する試験装置を用いて、定常および冷却停止過渡試験を実施した。ラップ管装着という過酷な条件においても、被覆管の温度上昇は極めて緩慢であることが判明し、除熱が可能である見通しを得た。

ラップ管を被せた軸流除熱体系に関するコード開発は本研究計画外であることから (P0 等の指示で試験を実施)、被覆管最高温度上昇は試験結果からの推定となるが、冷却停止後の温度上昇は横置裸バンドル体系と同様に緩慢であり、30 秒後において $1^{\circ}\text{C}$ 以内に留まると評価された。また、発熱量と流量をパラメータとした試験結果の整理により、ラップ管を被せた体系においても、バンドル部の流速が $3\text{m/s}$ であれば、定常時、冷却停止後 30 秒において、温度上昇が $200^{\circ}\text{C}$ 程度に収まると評価した。過渡時の温度上昇が緩慢である理由を解析的に分析し、被覆管の熱容量が温度上昇抑制に寄与していることを明らかにした。

#### 【研究開発項目 5】まとめと評価

4カ年の研究全体の成果のまとめを行い、課題として与えられた全項目について達成したと評価した。

**【事業全体】** をとおして

ワイヤラッピング燃料バンドルの横方向冷却解析に対応するサブチャンネルコードの開発の成功は国内外に例を見ないものであり、過渡解析までを含めた精度の高さは特筆すべきと考える。これを可能としたのはマイクロPIV試験、ミクロ解析、フルモックアップ試験さらには汎用コードによるバンドル体系解析であり、いずれも挑戦的課題であったが、当初の予想を超える成果を得、それらの有機的結合がサブチャンネルコード開発に結合したと考える。また、これまでのプラント設計経験を反映して、財産保護を可能とする径方向、軸方向独立2系統、並列送付機のシステム設計に結びつけ、実用化設計の一手手前に至った。

**【得られた成果の外部発表】**

- ・ 日本原子力学会 2007 年秋の年会（北九州市） 2 件口頭発表
  - (1) TRU 燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発研究
  - (1) 全体計画と試験装置の設計検討
  - (2) TRU 燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発研究
  - (2) 燃料バンドル冷却評価ツールの開発
- ・ ICAPP2008 2008 年 6 月 8 日～12 日（米国アナハイム市） 3 件口頭発表（シーズ発表）  
Development of the Cooling Technology on TRU Fuel Pin Bundle during Fuel Fabrication Process
  - (1) Whole Study Plan and Fabrication of Test Apparatuses
  - (2) High-Speed PIV Measurements in Gap among Fuel Pins
  - (3) Development of Analytical Tool
- ・ 日本原子力学会 2008 年秋の年会 9 月 4 日～6 日（高知県香美市） 2 件口頭発表
  - (3) TRU 燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発研究
  - (3) 模擬燃料バンドル定常状態除熱試験
  - (4) TRU 燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発研究
  - (4) サブチャンネルコードによるフルモックアップ試験解析
- ・ NTHAS56 2008 年 11 月 24 日～27 日（沖縄県名護市） 2 件口頭発表
  - (1) DEVELOPMENT OF SUB-CHANNEL ANALYSIS TOOL FOR TRU FUEL FABRICATION
  - (2) NUMERICAL QUANTIFICATION OF CROSS-FLOW HEAT FLUX FOR TRU FUEL PIN BUNDLE
- ・ ICAPP2009 2009 年 5 月 10 日～14 日（東京都新宿） 2 件口頭発表  
Development of the Cooling Technology on TRU Fuel Pin Bundle during Fuel Fabrication Process
  - (4) Steady state cooling test of full mock up fuel pin bundle
  - (5) Development of heat transfer correlation for sub-channel analysis tool
- ・ The INTERNATIONAL SUMMER SCHOOL of NUCLEAR POWER PLANTS and YOUNG GENERATION WORKSHOP 平成21年7月28～8月5日 茨城県東海村 ホスター発表  
「Development of the Cooling Technology on TRU fuel Pin Bundle during Fuel Fabrication Process」

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2009年秋の原子力学会 9月16日～18日 東北大学 口頭発表。 TRU 燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発研究 (6)サブチャンネル解析ツールによるフルモックアップ冷却停止過渡試験解析</li> <li>・第13回原子炉の熱流動に関する国際会議 (NURETH-13) 平成21年9月28日～10月2日 石川県立音楽堂 口頭発表 Development of heat transfer correlation in cross-flow direction of TRU fuel pin bundle with wrapping thin wire</li> <li>・原子力学会欧文誌 (Journal of Nuclear Science and Technology : Vol. 47, No. 9, p.1-10, 2010 in printing) Development of Sub-Channel Analysis Tool for TRU Fuel Fabrication</li> <li>・2010年秋の原子力学会 平成22年9月15日～17日 北海道大学 口頭発表 (シリーズ発表) TRU 燃料集合体組立時の燃料バンドル冷却評価技術の開発研究 (7)汎用多次元伝熱流動コードによるピンバンドル内温度分布評価 (8)ラップ管装着TRU模擬燃料バンドル軸流除熱試験 (9)熱流動試験と解析に基づくTRU燃料組立時の冷却システム概念の構築</li> <li>・NUTHOS8 (The 8th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety, Shanghai, China, Oct. 10-14, 2010) 口頭発表 Sub-Channel Analysis of TRU Fuel Fabrication Coupled with Multi-Dimensional Thermal Hydraulics</li> </ul>
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・研究開発の成果</li> <li>・技術の卓越性</li> <li>・成果の発展性</li> </ul>	<p><b>【研究開発の成果】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・横置き体系の燃料バンドルサブチャンネル解析コードを開発し、ベンチマークとの比較評価によりバンドル内温度分布予測目標精度 (<math>\pm 5^{\circ}\text{C}</math>) を達成している。また、冷却システムの除熱機能に関しては、開発目標を十分達成できる除熱能力があることを定量的に示している。</li> <li>・以上のことから、燃料バンドル冷却評価ツールの整備、冷却システム概念の構築とも開発目標通りの成果を挙げている。</li> </ul> <p><b>【技術の卓越性】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・最終的なアウトプットとしての横置き体系の燃料バンドルのサブチャンネル解析コードの開発は、ある程度の実用性を持って仕上がっていると評価する。</li> <li>・試験はよく検討されており、伝熱流動現象の把握に役立つものと考えられる。</li> </ul> <p><b>【成果の発展性】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・横置き体系の燃料バンドルの発熱量と冷却の関係を定量的に評価することが可能となり、TRU燃料集合体組み立て工程の実用化に向けての必要な情報が得られ、詳細設計につながることができている。</li> <li>・得られたデータは、燃料集合体の保管、輸送、取扱等を検討する上で参考になると考えられる。</li> </ul>

4. その他	<ul style="list-style-type: none"><li>• 今後は、本開発で得られた成果を利用し、F a C T設計での実機適用に向けて、たわみの影響など製作性との兼ね合いを事前評価して燃料バンドル冷却評価ツールの予測精度を確保するとともに、冷却システム概念の設計を実際に用いる設備としてより詳細化して、安全な冷却システムを構築していくことを期待する。</li></ul>
--------	--