

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：
軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発

(国立大学法人東京大学)

研究開発の実施者

機関名：国立大学法人東京大学	代表者氏名：岡 芳明
機関名：国立大学法人九州大学	代表者氏名：森 英夫
機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構	代表者氏名：秋場直人
機関名：東京電力株式会社	代表者氏名：後藤正治

研究期間及び予算額：平成 17 年度～平成 21 年度（5 年計画） 1,577,388 千円

研究開発予算

平成 17 年度	67,401 千円
平成 18 年度	528,957 千円
平成 19 年度	520,306 千円
平成 20 年度	243,438 千円
平成 21 年度	217,286 千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>超臨界水を冷却に用いることで貫流型による原子炉システムの簡素化・コンパクト化と発電効率向上を実現しうる革新的原子力システムとして軽水冷却スーパー高速炉（以下スーパー高速炉という。）の概念を開発し、その概念としての成立性を示すとともに、伝熱流動と材料に関する主要課題について実験し、開発の基盤となる基礎的なデータベースの構築を目標とする。この目標を達成するために、以下 3 つの研究開発項目を実施した。</p> <p>(1) プラント概念の構築</p> <p>軽水冷却の高速炉では燃料棒間隙の狭い稠密燃料集合体を用いる必要があるが、貫流型炉では炉心流量が軽水炉よりはるかに少なくポンプも強力なので、圧力損失やポンプ動力の増加が設計上の制約にはならず高速炉心との適合性がよい。高速炉は減速材が不要で軽水炉より高出力密度にできる。これにより軽水炉よりコンパクトで優れた高速炉を実現できる可能性がある。本研究開発ではその可能性を探求するために設計・解析により、貫流型の特徴を生かしたコンパクトで合理的な炉概念を創出する。具体的には燃料・炉心・高温構造設計と制御・安全性について解析・検討する。これらと関連して核変換性能、バックエンドリスク、燃料棒群の熱流動特性、蒸気凝縮特性解析について検討する。</p> <p>(2) 炉心伝熱流動等に関する研究開発</p> <p>スーパー高速炉の設計に適用しうる伝熱・流動相関式などのデータベースを実験的に構築する。系統的で多様な実験が容易な模擬流体（フレオン）を用いた試験をおこない、超臨界圧流体の基礎伝熱特性、燃料棒群特性、亜臨界圧限界熱流束特性および放出・凝縮特性の各種の基盤伝熱流動データを取得する。模擬流体を用いた試験結果から実際の超臨界圧水の特性を推定する妥当性を確認するため、超臨界圧水を用いた基礎伝熱特性試験、燃料棒群特性試験をおこなう。</p> <p>(3) 高耐久性燃料被覆管材料等の開発</p> <p>スーパー高速炉炉心環境に対応したオーステナイト系炉心材料を開発し、その特性を明らかにする。大きな温度差にさらされる部位の熱応力軽減のための高耐熱性断熱材料を開発し、性能を評価する。超臨界水中におけるステンレス系材料の溶出特性を評価するために、炉心材料溶出挙動評価手法を開発し、溶出特性の基礎データを取得する。</p>

<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 	<p>【研究開発項目（1） プラント概念の構築】 [得られた成果]</p> <p>① 燃料・炉心検討</p> <p>1) 燃料・炉心・高温構造設計</p> <p>燃料・炉心設計、制御・安全、高温構造設計と密接に連携しつつ設計を進め、スーパー高速炉の概念と性能を明らかにした。具体的には、リファレンスとなる炉心（基本炉心と呼ぶ）の燃料棒の一次案を設計するとともに、3次元核熱設計手法により基本炉心（約700MWe）を設計し、設計目標である軽水炉[約100kWe/cc, PWR]を上回る高出力密度(約160kWe/cc)、高い冷却水出口温度(500℃以上)を達成した。熱効率は約44%である。これによりプラントシステムは熱中性子炉と同じであるが減速材が不要で高出力密度であるスーパー高速炉の利点を示した。これをもとに設計目標と設計基準を満たした改良炉心を設計した(平成18、19年度)。さらに制御・安全検討と一体的に改良をすすめ、燃料棒の細径化をはかるとともに、炉心構成や流量配分、プルトニウム富化度分布を改良することで、平成19年度に達成した高出力密度(約290kWe/cc)と高い冷却水出口温度[500℃以上]を保ちつつ、事故時と異常過渡時の燃料被覆管温度基準[それぞれ1260℃と850℃]を満たす改良炉心を設計した(平成20年度)。プラント動特性解析コードを用いて制御系を設計した。この制御系を用いて、貫流型で高出力密度、かつ冷却水密度反応度フィードバックが小さいスーパー高速炉の特性を考慮した安全系を設計した。平成20年度に設計した改良炉心の被覆管表面温度、線出力密度、燃焼度のピーク値がそれぞれ最大となる燃料棒について通常運転時および異常な過渡変化事象・事象時の燃料解析を実施し、安全基準を満たすことを明らかにした。これにより、設計目標、設計基準、安全基準を満たす炉心概念を創出し、特性を明らかにした(平成21年度)。スーパー高速炉は燃料棒間隔が約1mmと小さいので様々な狭隘サブチャンネルの被覆管周方向温度分布を3次元汎用流体解析コードを用いて感度解析し、そのデータベースを構築した。被覆管熱伝導を考慮する必要があること、燃料ギャップ幅/加熱周長をそろえると温度分布を平坦化できることがわかった。スーパー高速炉は冷却水の温度が高く、また炉心入り口温度差が大きいため高温構造の観点からの構造健全性の検討が必要である。炉心設計の改良に対応した压力容器、原子炉構造、原子炉内部構造の寸法・構造を具体化した高温構造設計試案を完成させた。蒸気出口ノズルおよび上部多孔板の定常時、過渡時の熱応力を安全解析結果を参考に解析し、構造健全性が確保できることを確認した。</p> <p>2) 核変換性能解析法整備</p> <p>核変換性能評価に必要な燃焼計算コードを整備し、スーパー高速炉解析用の炉定数ライブラリを作成した。バックエンドリスク評価で重要となる代表的な長寿命核種について燃焼燃料組成の誤差を評価し、スーパー高速炉の使用済み燃料組成に対する誤差とその要因を明らかにした。主要核種U-235、U-238、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Pu-242の核データ起因誤差は、マイナーアクチノイド(MA)装荷に関係なく1%以下であることがわかった。核変換性能の誤差評価法は炉物理分野の最先端の成果である。</p> <p>3) バックエンドリスク評価</p> <p>バックエンドリスクを炉物理と廃棄物処理処分観点より一体的に研究し、水素化物層を含むため多様なスペクトル場を持つスーパー高速炉の核変換性能を評価した。超ウラン元素(TRU)、マイナーアクチノイド(MA)のみならず長寿命核分裂生成物(LLFP)のバックエンドリスクを考慮した。人間影響評価指標(被ばく線量率)と環境影響リスク指標(環境中に放出される放射性物質の毒性)を指標として採用し、バックエンドリスクの重要核種を選んだ。その地下環境中での振舞い予測のための実験データを取得し評価に用いた。スーパー高速炉1基でPWR約11.6基分のMAおよびPWR約3.1基分のTRUを変換できることを明らかにした。⁹⁹Tcおよび¹²⁹Iに対するスーパー高速炉の核変換性能のサポートファクターは液体金属高速炉に対しそれぞれ4.6倍と1.1倍である。¹³⁵Csは中性子捕獲断面積が小さく核変換できないが、マルチリサイクルで閉じ込める方策がある。</p> <p>4) 3次元2流体モデルによる熱流動計算コード整備</p> <p>超臨界から亜臨界圧まで扱える3次元2流体モデルによる熱流動計算コードACE-3Dを整備し、起動・停止、事故時等を含む熱流動解析を可能にした。サブテーマ2の伝熱流動実験データで本コードの計算精度を検証した結果、乱流モデルには検討の必要があるものの、被覆管内の熱伝導を考慮することにより、ACE-3Dコードを用いて燃料棒群体系内熱伝達を予測できることを確認した。燃料集合体を簡略模擬した体系に適用し、ACE-3Dが、次段階の研究開発における燃料集合体熱設計ツールとして使用できることを確認した。</p>
---	---

5) 原子炉特性に関する考察

原子炉ユーザーの立場からスーパー高速炉の燃料、炉心、安全性、プラント特性の望ましい特性を考察し、設計改良に役立てた。

② 制御・安全性検討

スーパー高速炉の制御系および安全系を設計し、それぞれの特性を明らかにするとともに、得られた知見を燃料・炉心設計にフィードバックした。具体的には、プラント動特性解析コードを用いて主蒸気温度の偏差を主冷却流量（主給水流量）にフィードバックする従来の制御方式に、出力/流量比偏差、出力偏差、出力変化率のフィードバック項をそれぞれ加えた3種類の改良制御系を設計した。出力/流量比を一定に保つ効果により、改良制御系は出力変更時の主蒸気温度変動を低減できることを確認した。この制御系を用いて貫流型で高出力密度、かつ冷却水密度反応度フィードバックが小さいスーパー高速炉の特性を考慮した安全系を設計した。想定される異常な過渡変化事象・事故事象を解析し、いずれの事象も最高被覆管温度や最高使用圧力などの安全性判断基準を満たしていることを確認した。冷却材喪失事故発生時に燃料被覆管温度が安全基準を満たすために必要な流量配分と最高線出力密度の条件を明らかにし、炉心設計にフィードバックした。炉心緊急減圧時等に評価が必要となる蒸気の液体中での凝縮特性の数値解析法がない問題に対処するため、革新的数値解析法である粒子法により凝縮特性を解析する方法を検討した。さらに発展的に研究し実験値との比較を行い良い一致を得た。従来の数値解析法では困難であった凝縮特性解析について途を開いた。スーパー高速炉のプラントコンパクト化について検討し、貫流・直接サイクル型（SG・加圧器・再循環系削除、2ループ、高い比エンタルピー蒸気）、高出力密度による原子炉圧力容器の小型化等により格納容器必要体積やフットプリントが同程度の出力の軽水炉に比べて半減できる可能性があることが分かった。なお熱効率も約44%と軽水炉を大幅に上回っている。

以上の結果よりプラントのコンパクト化と発電効率の向上したスーパー高速炉の概念を開発するという本研究開発の所期の目標を達成した。基本炉心ですでに軽水炉を上回る出力密度を得ており所期の目標を達成したが、さらに軽水炉の3倍近い高出力密度の改良炉心を創出し、その制御・安全性検討を炉心改良と一体的に進めて優れたスーパー高速炉の概念を創出した。これは想定を上回る成果である。粒子法による凝縮特性解析についても実験値との比較を行いよい一致を得るといふ発展的成果が得られている。

【研究開発項目（2） 炉心伝熱流動等に関する研究開発】

[得られた成果]

① 模擬流体を用いた炉心伝熱流動等に関する研究開発

系統的で多様な実験が容易な模擬流体（フロン）を用いた試験をおこない、超臨界圧流体の基礎伝熱特性、燃料棒群特性、亜臨界圧限界熱流束特性および放出・凝縮特性の各種の基盤伝熱流動データを取得した。あわせて、スーパー高速炉の熱流動設計に有用な熱伝達と圧力損失の相関式を作成し、データベースを構築した。

1) 基礎伝熱特性試験

基礎伝熱特性試験のほかに、燃料棒群特性試験と亜臨界圧限界熱流束試験で共通して用いる模擬流体伝熱流動試験装置を設計・製作した。この装置に実機の狭い燃料棒間隔流路に相当する小内径の円管試験体を組み込み、上昇流と下降流における定常および流量・圧力減少過渡の試験をおこなった。これにより、実機と同じ定格条件では、上昇流と下降流ともに正常熱伝達の特性を示し、熱伝達は Watts-Chou の相関式でよく再現でき、比較的高い熱負荷であっても、熱伝達の急激な劣化は生じにくいことを明らかにした。しかしながら、上昇流で低流量の場合、管壁温度の上昇をもたらす熱伝達劣化の発生に注意する必要があることを明らかにした。ここで得られたデータは、燃料棒群特性試験の計画策定に反映された。

2) 燃料棒群特性試験

模擬流体伝熱流動試験装置を用いてスペーサの形状と間隔を変えた4種類の7本バンドル試験体（I～IV）の試験を行い、熱伝達率と圧力損失のデータベースを構築した。バンドル流れでは、熱伝達劣化は生じにくいことを明らかにした。各バンドル試験体について熱伝達の相関式を作成した。試験体IVの羽根付き型スペーサを用いると、高エンタルピーの過熱蒸気域でも、良好な伝熱が維持されることを明らかにした。スペーサの圧力損失係数の相関式を作成して、加熱流におけるバンドル流れの摩擦圧力損失の予測方法を確立した。

流量減少過渡時の熱伝達特性は管内流と異なることを明らかにした。窒素ガスを用いた模擬流動試験を行い、羽根付きグリッドスペーサの流れ乱れ促進効果が大きいことを明らかにした。

3) 亜臨界圧限界熱流束試験

円管、バンドル試験体Ⅰ及びⅡを用い、限界熱流束が生じやすい臨界圧近傍で限界熱流束試験を実施した。臨界圧近傍の亜臨界圧域では、膜沸騰による限界熱流束状態が発生しやすいことを明らかにして、この領域の限界熱流束のデータベースを構築した。限界状態における最高壁温、最小熱伝達率及び発生エンタルピーの圧力変化特性を明らかにした。限界状態の発生エンタルピーは臨界圧力より幾分低い圧力で最も小さく、限界状態の発生圧力範囲は、昇圧より減圧の方が広いことを明らかにした。臨界圧近傍における限界発熱流束の相関式を作成した。圧力減少過渡時、臨界圧近傍で限界熱流束状態が発生しやすく、限界状態は減少速度が大きいほど、より低い圧力域まで維持されることを明らかにした。

4) 放出・凝縮特性試験

模擬流体を使用して、超臨界圧の高温蒸気をプール液中に放出し、その際の凝縮挙動のデータベースを構築した。超臨界流体の凝縮に伴う圧力振動の振幅は、サブクール度の増加とともに増大し、あるサブクール度で最大となった後減少する傾向を示すことを明らかにした。凝縮様相の観測に基づき、圧力振動は放出蒸気塊体積の周期的変化によるものであることを示した。超臨界圧過熱蒸気の気中放出試験を行い、臨界流などのデータベースを構築するとともに、放出過程における流量変化は、圧縮性流体力学の考え方を適用して見積もることができることを明らかにした。

② 超臨界水を用いた炉心伝熱流動等に関する研究開発

1) 基礎伝熱特性試験

単管形状で非加熱の基礎伝熱試験部（Ⅰ）を製作して、超臨界圧水による流動試験データとして試験部の流量や圧力などのデータを取得した。燃料棒を模擬したヒータを持つ単ピン形状の基礎伝熱試験部（Ⅱ）を製作し、超臨界圧水による伝熱流動試験をおこない、定常時における熱伝達係数評価のための基礎データを取得した。これらの基礎データは熱流動計算コードACE-3Dの計算精度の検証に活用された。

2) 燃料棒群特性試験

スペーサを有する実機の燃料棒集合体を模擬した7本バンドル形状の燃料棒群特性試験部を設計製作し、燃料棒群特性試験をおこなって熱伝達および圧力損失に関するデータを構築した。圧力損失係数は、模擬流体の実験結果整理にも使用された石谷の式による予測値と良い一致を示した。熱伝達係数も、模擬流体での試験結果の整理式による予測値と±20%の範囲で良い一致を示した。これらの結果により模擬流体を用いた炉心伝熱流動に関する試験結果から実際の超臨界圧水の伝熱流動を推定することの妥当性を確認した。

以上の結果より、本研究開発項目の所期の目標を達成した。さらに当初の目的の熱流動データベースの構築に加えて多くの学問的知見を明らかにした。例えば亜臨界圧限界熱流速試験で限界状態の発生に昇圧と減圧で違い[ヒステリシス]があること、放出凝縮特性試験で放出過程における流量変化が圧縮性流体力学の考え方で見積もれることなどである。これらは想定以上の成果である。

【研究開発項目（3） 高耐久性燃料被覆管材料等の開発】

[得られた成果]

① 炉心材料開発

1) 炉心材料開発

高温クリープ特性に優れたオーステナイト鋼被覆管材料PNC1520（以下、標準組成PNC1520と呼ぶ。）をベースに、チタン添加型およびジルコニウム添加型の試作材を製作し、高温クリープ特性試験、高温高圧水中（290℃、8MPa）および超臨界圧水中（600℃、25MPa）での腐食挙動試験、中性子照射材腐食挙動試験などを実施した。ジルコニウム添加型材の高温クリープ特性は標準組成PNC1520と同等であることがわかった。高温高圧水中および超臨界圧水中の腐食挙動試験の結果、ジルコニウム添加型が腐食、強度とも優れた特性を示す。

2) 複合環境照射試験

超臨界環境、高温水環境ならびに高温気相環境における超臨界腐食試験装置と重照射研究設備のバン・デ・グラフ加速器に付加する高温にて実験可能な照射試験装置を整備し、3種類の試作材（標準組成PNC1520、チタン添加型材、ジルコニウム添加型材）を対象に腐食試験と照射試験を実施した。さらに、高温高湿セル中でのイオンビーム照射により腐食と照射を重畳した合環境照射試験をおこない、表面形態変化および内部構造変化を評価した。その結果、ジルコニウム添加型材は全面腐食、粒界感受性、照射硬化の面から3種の試作材のなかで最も優れた特性を示した。

これらによりスーパー高速炉炉心環境に対応したオーステナイト系炉心材料を開発しその特性を明らかにするという所期の目的を達成した。

② 高耐熱性断熱材料の開発

1) 高耐熱性断熱材料の開発

高耐熱性断熱材料の候補材料として、高温安定性と中性子吸収特性などにより、ジルコニア (ZrO_2) にイットリア (Y_2O_3) を固溶させたイットリア安定化ジルコニア (YSZ: Yttria-Stabilized Zirconia) 選定した。3mol%- Y_2O_3 -97% ZrO_2 と 8mol%- Y_2O_3 -92% ZrO_2 のそれぞれの粉末に造孔材粉末をいれて気孔率を変化させた焼結体を作製し、微細組織観察、熱伝導率測定、熱サイクルに対する機械強度を測定し、断熱材料特性データとしてまとめた。造孔材添加量や焼結温度の最適化によって、焼結密度がジルコニアの 25% 程度、熱伝導率がジルコニアの 20 分の 1 程度の高性能な断熱材料が得られた。

2) 高耐熱性断熱材料の照射挙動評価

高速実験炉「常陽」で中性子を照射した YSZ の熱定数を測定し、非照射材との比較により中性子照射の影響を評価した。その結果、照射の影響で促進されるイットリア相分離による熱拡散率上昇と、照射に伴う照射欠陥の形成による熱拡散率低下により、熱定数に温度依存性が生じることが明らかになった。

これらにより高耐熱性断熱材料を開発し性能を評価するという所期の目標を達成した。なお熱伝導率がジルコニアの 20 分の 1 程度というきわめて高い断熱性能をもつ断熱材料が開発できたのは当初の目標以上の成果である。

③ 溶出特性評価手法の開発

臨界圧水中におけるステンレス系放射化材料の溶出挙動評価試験装置を開発し、スーパー高速炉環境での炉心材料の溶出特性を評価した。超臨界水条件での温度特性試験では、400℃以上で材料の酸化腐食、溶解度低下、水の物性変化などが重畳することにより擬臨界温度以下の条件に比べ、溶出が著しく低下することがわかった。同じ酸化皮膜状態下でも、温度の変化に伴う水の物性変化によって溶出挙動が大きく変化することが分かった。特に超臨界状態において顕著であり、十分な酸化膜の形成の有無に関わらず溶出が抑制される。同じ水の環境下でも、初期の酸化皮膜が厚いと溶出が抑制されるとの知見が得られた。温度や溶存酸素濃度などの水環境条件を複合的に変化させた条件も含めてき溶出特性の基礎データベースを構築した。以上により超臨界水中におけるステンレス系材料の溶出特性を評価するために、炉心材料溶出挙動評価手法を開発し、溶出特性の基礎データを取得するという所期の目標を達成した。さらに同じ酸化皮膜状態下でも、温度の変化に伴う水の物性変化によって溶出挙動が大きく変化すること。超臨界状態において十分な酸化膜の形成の有無に関わらず溶出が抑制されること。同じ水の環境下でも、初期の酸化皮膜が厚いと溶出が抑制されるなど学問的にも新知見が得られた。

以上の結果より、本研究開発項目の所期の目標を達成した。熱伝導率がジルコニアの 20 分の 1 程度の高断熱材料の開発されたことは、想定以上の成果である。

【事業全体】を通して

研究開発の進捗ならびに研究開発の成果：平成 17～21 年度の事業項目を実施し、当初の目標を計画通りすべて達成した。さらに想定以上あるいは発展的な成果を得た。プラント概念開発・伝熱流動・材料と多くの分野からなる研究開発チームを一体的に運営し組織的な研究開発を行い世界をリードする成果を挙げた。当初の目標を達成したのみならず当初の予想を上回る成果、発展的成果、学問的な成果も多く挙げた。具体的には以下である。

研究開発項目 1「プラント概念の構築」では、燃料、炉心、高温構造、安全性などの一体化した設計解析によって、貫流型・超臨界圧水冷却の高温のスーパー高速炉の概念を創出し、特性を定量的に明らかにした。軽水炉の約 3 倍の高出力密度で安全性なども満足するコンパクトなスーパー高速炉のプラントシステムを創出できたことは想定を上回る成果である。革新的数値解析法である粒子法により凝縮特性を解析する方法を開発し、さらに発展的に研究し実験値との比較を行い良い一致を得て、従来の数値解析法では困難であった凝縮特性解析について途を開いたことは発展的成果である。

研究開発項目 2「炉心伝熱流動等に関する研究開発」では、模擬流体を用いて超臨界流体の基礎伝熱試験、燃料棒群特性試験、亜臨界圧限界熱流速試験、放出凝縮特性試験を行い、超臨界圧水を用いて基礎伝熱試験、燃料棒単特性試験を行い、研究開発の基盤となる伝熱流動データベースを構築した。当初の目的の伝熱流動データベースの構築に加えて多くの学問的知見を明らかにしたことは

発展的成果である。具体的には亜臨界圧限界熱流束試験で限界状態の発生に昇圧と減圧で違い[ヒステリシス]があること、放出凝縮特性試験で放出過程における流量変化が圧縮性流体力学の考え方で見積もれることなどである。

研究開発項目3「高耐久性燃料被覆管材料等の開発」では、PNC1520の改良材の開発・評価、照射と腐食を重畳した試験を行い、被覆管候補材料の特性を明らかにした。ジルコニウム添加型PNC1520が優れた特性を示した。優れた断熱性能を持つイットリア安定化ジルコニアを開発し、その強度や超臨界圧水への腐食挙動など、その性能を総合的にまとめた。炉心材料の冷却水への溶出特性について、温度や溶存酸素濃度などの水環境の複合的影響を評価し溶出特性の概要を解明した。なお熱伝導率がジルコニアの20分の1程度というきわめて高い断熱性能をもつ断熱材料が開発できたのは当初の目標以上の成果である。溶出特性について同じ酸化皮膜状態下でも、温度の変化に伴う水の物性変化によって溶出挙動が大きく変化すること。超臨界状態において十分な酸化膜の形成の有無に関わらず溶出が抑制されること。同じ水の環境下でも、初期の酸化皮膜が厚いと溶出が抑制されるなど学問的にも新発見が得られた。

さらに160件を超える外部発表を行った。なお本研究開発には18名の若手[日本5名、中国11名、韓国2名]が特任研究員として参加した。滞在中は日本人大学院生や若手とも交流しその国際センス育成やネットワーク形成に貢献した。帰国後は主要原子力関係大学や研究開発機関の教員や研究員になっており人材育成や国際ネットワーク形成にも寄与している。設計と数値解析を先行し、定量的な結果から原子炉の性能や安全性にとって重要な物理現象を同定して、焦点を絞りさらに研究や実験を進めるという原子炉研究開発の新しい方法を生み出した。これにより定性的な議論や無駄を省いて効率的に研究開発を進めることができた。

本研究開発の成果を含めて英文書「Super Light Water Reactors and Super Fast Reactors」[416ページ、ISBN:978-1-4419-6034-4]をまとめた。Springer社より2010年夏に刊行された(全651頁)。

【論文、特許等】

論文発表(論文誌)

- (1) L. Cao, Y. Oka, Y. Ishiwatari and Z. Shang: "Fuel, core design and subchannel analysis of a super fast reactor", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 45[2],138-148,2008.
- (2) L. Cao, Y.Oka, Y. Ishiwatari, S. Ikejiri: "Three-dimensional core analysis on a super fast reactor with negative local void reactivity", *J.Nucl. Eng. and Des.* 239(2009)408-417.
- (3) Wenxi Tian, Yuki Ishiwatari, Satoshi Ikejiri, Masanori Yamakawa, Yoshiaki Oka: "Numerical computation on thermally controlled steam bubble condensation using MPS method", *J. Annals of Nuclear Energy*, Volume 37, Issue 1, January 2010, p.5-15.
- (4) K. Sasaki, A. Suzuki, T. Terai: "Microstructure control of sintered porous YSZ as a durable thermal shielding material", *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 6[3] 362-372 (2009).
- (5) H. Ju, Y. Ishiwatari, Y. Oka and S. Ikejiri: "Analysis of fuel rod behavior under normal operating conditions in Super Fast Reactor", *J.Nucl. Eng. and Des.*, Volume 240, Issue 6, June 2010, Pages 1450-1457.

論文発表(国際学会)

- (1) Y. Oka, Y. Ishiwatari, J. Liu, *et al.*: "Research program of a super fast reactor", *Proc. ICAPP'06*, Paper 6353, Reno, NV, USA, June 4-8, 2006.
- (2) Y. Oka, Y. Ishiwatari and S. Koshizuka: "Research and development of Super LWR and Super Fast Reactor" *Proc. 3rd Int. Symposium on SCWR - Design and Technology*, Paper No. SCR2007-I003, Shanghai, China, March 12-15, 2007.
- (3) Y.Oka: "Design study of Super LWR and Super Fast Reactor", *中国西部地区研究者・大学院生講演会*, Xian, China, August 20. 2007.
- (4) H. Ju, L. Cao, Y. Ishiwatari, *et al.*: "Fuel rod analyses under normal operating condition", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo, Oct. 8-10),(2008).
- (5) H. Lu, L. Cao, Y. Ishiwatari, *et al.*: "Transmutation analyses of minor actinides and transuranium elements", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo, Oct. 8-10),(2008).
- (6) J. Gou, Y. Ishiwatari, Yoshiaki Oka, *et al.*: "Thermal hydraulic analyses of tight-lattice subchannels", *International symposium commemorating the first anniversary of the*

foundation of GoNERI, (University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).

- (7) S. Ikejiri, G. Yun, Y. Ishiwatari and Y. Oka: "Abnormal transient analysis of Super Fast Reactor during supercritical-pressure operation", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).
- (8) Y. Guo, C. Han, S Ikejiri, Y. Ishiwatari and Y. Oka: "Accident analysis of Super Fast Reactor during supercritical-pressure operation", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).
- (9) W. Tian, Y. Ishiwatari, S. Ikejiri, *et al.*: "Numerical simulation on single steam bubble condensation using MPS-MAFL", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).
- (10) K. Sasaki, T. Kubo , A. Suzuki , *et al.*: "Fabrication and characterization of durable thermal shielding material", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*,(University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).
- (11) Y. Nakazono, T. Iwai and H. Abe: "Corrosion properties of PNC1520 austenitic stainless steel in supercritical water as a fuel cladding candidate material for Supercritical Water Reactor", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*,(University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).
- (12) Z. Han and Y. Muroya : "An approach to evaluate the elution characteristic of stainless materials in subcritical and supercritical water", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*,(University of Tokyo , Oct. 8-10),(2008).
- (13) Yuki Ishiwatari, Masanori Yamakawa, Yoshiaki Oka and Satoshi Ikejiri: "Research and development of a Super Fast Reactor (1) Overview and high-temperature structural design", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008),Paper ID P16p1290.
- (14) Liangzhi Cao, Haitao Ju, Yuki Ishiwatari, Yoshiaki Oka, and Satoshi Ikejiri: "Research and development of a Super Fast Reactor (2) Core design improvement on local void reactivity", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008),Paper ID P16p1291
- (15) Haitao Ju, Liangzhi Cao, Yuki Ishiwatari, Yoshiaki Oka and Satoshi Ikejiri: "Research and development of a Super Fast Reactor (3) Fuel rod analyses under normal operating condition", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18,(2008),Paper ID P16p1292.
- (16) Liangzhi Cao, Haoliang Lu, Yuki Ishiwatari, Yoshiaki Oka, and Satoshi Ikejiri, "Research and development of a Super Fast Reactor (4) Transmutation analyses of minor actinides and transuranium elements", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Oct. 13-18,(2008),Paper ID P16p1293.
- (17) Junli Gou¹, Yuki Ishiwatari, Yoshiaki Oka, Masanori Yamakawa, and Satoshi Ikejiri: "Research and development of a Super Fast Reactor (5) Thermal hydraulic analyses of tight-lattice subchannels", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Oct. 13-18,(2008),Paper ID P16p1294.
- (18) Satoshi Ikejiri, Yun Guo, Yuki Ishiwatari, Yoshiaki Oka, and Takashi Sawada: "Research and development of a Super Fast Reactor (6) Analyses of abnormal transients", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008),Paper ID P16p1295.
- (19) Hideo Mori, Masaki Ohno, Katsumi Ohishi, and Yoshinori Hamamoto : "Research and development of a Super Fast Reactor (7) Heat transfer to a supercritical pressure fluid flowing in a sub-bundle channel ", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*,Oct. 13-18, (2008),Paper ID P16p1297.
- (20) Koichiro Ezato, Masato Akiba, Mikio Enoeda, Satoshi Suzuki, Yohji Seki, Hisashi Tanigawa, Daigo Tsuru, Hideo Mori and Yoshiaki Oka: "Research and development of a Super Fast Reactor (8): Heat transfer experiments around a simulated fuel rod with supercritical pressure water", *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008),Paper ID P16p1240.
- (21) Takeharu Misawa, Toru Nakatsuka, Hiroyuki Yoshida and Kazuyuki Takase:

- “Numerical analysis of heat transfer experiment of supercritical pressure water and freon in a rod bundle”, *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008), Paper ID P16p1065.
- (22) Kazuya Sasaki, Toshiharu Kubo, Akihiro Suzuki, Naoaki Akasaka and Takayuki Terai: “Fabrication and characterization of durable thermal shielding material”, *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008), Paper ID P16p1427.
- (23) Zhenhui Han and Yusa Muroya: “Research and development of a Super Fast Reactor(11) An approach to evaluate the elution characteristic of stainless materials in subcritical and supercritical water”, *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008), Paper ID P16p1315.
- (24) Shoji GOTO, Yuki Ishiwatari, and Yoshiaki Oka: “Research and development of a Super Fast Reactor (12) Considerations for the reactor characteristics”, *16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBNC)*, Aomori, Japan, Oct. 13-18, (2008), Paper ID P16p1276.
- (25) T. Nakatsuka, T. Misawa, Hi. Yoshida and K. Takase: “Numerical analysis of supercritical water flowing in an annular channel using the two-fluid model code ACE-3D”, *Sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6)*, Okinawa, Japan, November 24- 27, 2008, N6P1047.
- (26) Y. Ishiwatari, Y. Oka, K. Yamada: “Japanese R&D projects on pressure-vessel type SCWR and related design studies at the university of Tokyo”, *4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors(SCWR)*, March 8-11, 2009, Heidelberg, Germany, Paper No. 73.
- (27) W. Tian, Y. Ishiwatari, S. Ikejiri, Y. Oka, M. Yamakawa : “Numerical computation on thermally controlled steam bubble condensation using MPS-MAFL”, *4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors(SCWR)*, March 8-11, 2009, Heidelberg, German, Paper No. 5.
- (28) Y. Nakazono, T. Iwai and H. Abe: “Corrosion properties of PNC1520 austenitic stainless steel in supercritical water as a fuel cladding candidate material for Supercritical Water Reactor ”, *4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors(SCWR)*, March 8-11, 2009, Heidelberg, Germany, Paper No. 59.
- (29) Z. Han and Y. Muroya: “ Development of a new method to study elution properties of stainless materials in subcritical and supercritical water”, *4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (SCWR)*, March 8-11, 2009, Heidelberg, Germany, Paper No. 75.
- (30) T. Nakatsuka, T. Misawa, H. Yoshida and K. Takase: “Numerical simulation of heat transfer experiment of supercritical water by two-fluid model code ACE-3D”, *4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors(SCWR)*, March 8-11, 2009, Heidelberg, Germany, Paper No. 31.
- (31) H. JU, Liangzhi CAO, Y Ishiwatari, H. LU, Y. Oka1, and S. IKEJIRI1: “Core design and fuel rod analyses of a Super Fast Reactor with high power density”, *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9264
- (32) H. Lu, Y. Ishiwatari, C. Han, Y. Oka1, and S. Ikejiri: “Evaluation of transmutation performance of long-lived fission products with a Super Fast Reactor”, *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9263
- (33) J. Gou, Y. Ishiwatari, Y. Oka, M. Yamakawa, and S. Ikejiri: “CFD analyses in tight-lattice subchannels and seven-rods bundle geometries of a Super Fast Reactor”, *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9262.
- (34) Y. Ishiwatari, C. Peng, S. Ikejiri and Y. Oka: “Design and improvement of plant control system for a Super Fast Reactor ”, *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9261.
- (35) H. Mori, M. Ohno and Y. Hamamoto: “Experimental study for research and development of a Super Fast Reactor(1) Critical heat flux in the near-critical region”, *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9368.
- (36) H. Mori, M. Ohno and Y. Hamamoto: “Experimental study for research and development of a Super Fast Reactor(2) Oscillatory condensation of high temperature vapor directly discharged into sub - cooled liquid pool ”, *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9369.

- (37) K. Ezato, Y. Seki, M. Dairaku, S. Suzuki, M. Enoeda, M. Akiba, H. Mori and Y. Oka: "Heat transfer in a seven-rod test bundle with supercritical pressure water(1) Experiments", *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9464.
- (38) T. Misawa, T. Nakatsuka, H. Yoshida and K. Takase: "Heat transfer in a seven-rod test bundle with supercritical pressure water (2) Numerical simulation", *ICAPP 2009*, Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, Paper 9487.
- (39) T. Nakatsuka, T. Misawa, *et al.*: "Numerical simulation on thermal-hydraulic characteristics in fuel assemblies of Supercritical Water Cooled Reactors using two-fluid model analysis code ACE-3D", *GLOBAL2009*, Paris, France, Sep.6-11,(2009), Paper 9486.
- (40) H. Ju, Y. Ishiwatari, H. Lu, Y.Oka, and S. Ikejiri: "Fuel rod analyses of a Super Fast Reactor with high power density", *2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology*, XJTU-UT-SJTU Joint Workshop, March 21-23, 2009, Tokai, Japan.
- (41) H. Lu, L. Cao, Y. Oka, Y. Ishiwatari and S. Ikejiri: "Transmutations of TRU and LLFPs in a Super-critical Water-cooled Fast Reactor", *2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology*, XJTU-UT-SJTU Joint Workshop, March 21-23, 2009, Tokai, Japan.
- (42) J. Gou, Y. Ishiwatari, Y. Oka, M. Yamakawa, and S. Ikejiri: "CFD analyses in tight-lattice subchannels and seven-rods bundle geometry of a Super Fast Reactor", *2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology*, XJTU-UT-SJTU Joint Workshop, March 21-23, 2009, Tokai, Japan.
- (43) S. Ikejiri, C.Y.Han, Y. Ishiwatari and Y. Oka, "Loss of coolant accident analysis of a Supercritical-Pressure Water-Cooled Fast Reactor with downward flow channels", *2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology*, XJTU-UT-SJTU Joint Workshop, March 21-23, 2009, Tokai, Japan
- (44) Wenxi Tian, Yuki Ishiwatari, Satoshi Ikejiri, Masanori Yamakawa and Yoshiaki Oka: "Bubble deformation behaviors in condensation using MPS method", *2nd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology*, XJTU-UT-SJTU Joint Workshop, March 21-23, 2009, Tokai, Japan.
- (45) Takeharu Misawa, Toru Nakatsuka, Hiroyuki Yoshida, Kazuyuki Takase: "Heat transfer experiments and numerical analysis of Supercritical Pressure Water in seven-rod test bundle", *The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13)*, Kanazawa City, September 27-October 2, 2009, N13P1437.
- (46) Z. Han and Y. Muroya: "A new method to evaluate the elution and corrosion properties of stainless materials in subcritical and supercritical water", *Symposium on Water Chemistry and Corrosion in Nuclear Power Plants in Asia 2009*, Nagoya, October 28-30, 2009.

口頭発表 (国際会議)

- (1) Y. Oka: "Research program of a Super Fast Reactor", *SCWR Information Exchange Meeting*, Reno, NV USA, June 5, 2006.
- (2) K. Ezato: "High temperature, high pressure test loop in JAEA", *Japan - Korea Blanket/First Wall, Japan - Korea Workshop on Blanket/First Wall*, (Seoul National University, KO, August 28 - 30) (2007).
- (3) S. Goto, Y. Ishiwatari, Y.Oka: "Considerations for the reactor characteristics of Super Fast Reactor", *ANS/ENS International Meeting*, WASHINGTON, DC, America, November 7th-15th (2007).
- (4) T. Misawa, H. Yoshida, H. Tamai and K. Takase: "Development of three-dimensional thermal-hydraulic analysis code for Supercritical Water-Cooled Reactor", *ANS/ENS International Meeting*, WASHINGTON, DC, America, November 7th-15th (2007).
- (5) L. Cao, Y. Oka, Y. Ishiwatari: "Fuel, core design and its subchannel analysis of a Super Fast Reactor", *HPLWR - Information Exchange Meeting*, Cadarache, France, September 4th, (2007).
- (6) Takeharu Misawa¹, Hiroyuki Yoshida¹, Hidesada Tamai¹, Kazuyuki Takase: "Enhancement of the three-dimensional two-fluid model code to supercritical pressure region", *APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI*, (December 3-6),(2007), Kyoto,

JAPAN.

- (7) Takeharu Misawa, Hiroyuki Yoshida, Hidesada Tamai and Kazuyuki Takase: "Development of three-dimensional thermal-hydraulic analysis code for Supercritical Water-Cooled Reactor", *ANS/ENS International Meeting*, WASHINGTON, DC, America, November 7th-15th (2007).
- (8) Y. Ishiwatari and Y. Oka: "Research program of Super Fast Reactor", *SJTU-UT Joint Workshop on Nuclear Engineering 2008*, Shanghai, China, March 20-22th (2008).
- (9) Y. Ishiwatari, Y. Oka, S. Nagasaki, T. Terai, H. Abe, Y. Muroya, H. Mori, M. Akiba, N. Akasaka, H. Akimoto, T. Mori, S. Goto: "Research and development of a supercritical-pressure light water cooled fast reactor (Super Fast Reactor)", *Workshop on Advanced Reactors With Innovative Fuels (ARWIF)*, Fukui, Japan, February 20-22th, (2008).
- (10) Y. Ishiwatari, Y. Oka, S. Ikejiri: "Thermal-hydraulics and related studies on pressure-vessel type supercritical water-cooled reactors", *THIRS*, April 14-16, Forschungszentrum Karlsruhe Germany, (2008).
- (11) L. Cao, Y. Oka, Y. Ishiwatari: "Concept design of a supercritical water-cooled fast reactor with high power density", *CCSC2008*, Shanghai, China, April 25-26, (2008).
- (12) T. Misawa, H. Yosida, *et al.*: "Numerical simulation of heat transfer test of supercritical water in a tube using the three-dimensional two-fluid model code", *The 16th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE16)*, May 11-15 (2008).
- (13) H. Lu, L. Cao, Y. Ishiwatari, *et al.*: "Transmutation analyses of minor actinides and transuranium elements", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo, Oct. 8-10), (2008).
- (14) W. Tian, Y. Ishiwatari, S. Ikejiri, *et al.*: "Numerical simulation on single steam bubble condensation using MPS-MAFL", *International symposium commemorating the first anniversary of the foundation of GoNERI*, (University of Tokyo, Oct. 8-10), (2008).
- (15) D. Kawasaki, N. Nogi, T. Saito and S. Nagasaki: "SCFR fuel cycles and their impact on the performance of high-level waste disposal", *GLOBAL2009*, Paris, France, Sep. 6-11, (2009).
- (16) H. Lu: "Evaluation of transmutation performances of TRU and LLFPs with a Super Fast Reactor", May 13, 2009, University of Tokyo, Tokaimura, Ibaraki (*GoNERI seminar*)
- (17) J. Gou, Y. Ishiwatari, Y. Oka, M. Yamakawa, and S. Ikejiri: "Thermal hydraulic analyses in tight-lattice subchannels and fuel-rods bundle geometries of a Super Fast Reactor", April 17, 2009, University of Tokyo, Tokaimura, Ibaraki (*GoNERI seminar*).
- (18) Y. Oka, Y. Ishiwatari and S. Morooka, "Research and development of a Super Fast Reactor in Japan", *International Symposium on Generation-IV Reactors*, Taipei, Taiwan, April 22-23, 2009
- (19) Y. Oka, Y. Ishiwatari and S. Ikejiri: "Education and research of reactor design in GCOE; Design and analysis of Super LWR and Super FR", *Todai Forum Role of Nuclear Energy for Sustainable Development*, Imperial College London, U.K., April 28-29, 2009.
- (20) S. Ikejiri, C. Y. Han, Y. Ishiwatari and Y. Oka: "Loss of coolant accident analysis of Super Fast Reactor with downward flow channels", *Todai Forum Role of Nuclear Energy for Sustainable Development*, Imperial College London, U.K., April 28-29, 2009.
- (21) T. Nakatsuka, T. Misawa, H. Yoshida and K. Takase: "Thermal-hydraulic calculation for simplified fuel assembly of Super Fast Reactor using two-fluid model analysis code ACE-3D", *International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR09)*, Kyoto, Dec. 7-12, (2009).
- (22) Yoshiaki Oka: "Research and development of Supercritical-pressure Water Cooled Reactors", International conference on opportunities and challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century (IAEA), Vienna Austria, October 27-30, (2009), (Keynote).
- (23) Y. Nakazono A, T. Iwai A, H. Abe: "General corrosion properties of modified PNC1520 austenitic stainless steel in supercritical water as a fuel cladding candidate material for Supercritical Water Reactor", *Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50*, July 26-31, (2009), Tokyo.
- (24) Yoshiaki Oka: "Research and development of Super LWR and Super FR", *3rd Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology*, SJTU China, January 4-5, (2010).

口頭発表(国内会議)

	<p>(1) 川崎大介、斉藤拓巳、長崎晋也：“表面錯体形成を考慮した狭隘経路における核種輸送モデルの開発”、日本原子力学会「2006 年秋の大会」、予稿集 83、(北海道大学、9 月 27 日-29 日) (2006) 他、92 件</p> <p>その他(技術交流 等)</p> <p>(1) L. Cao: “Fuel, core design and subchannel analysis of a Super Fast Reactor”, Shanghai Jiaotong University, August 14th, (2007).</p> <p>(2) Y.Oka: “Program of Super fast reactor R&D in Japan”, Taejon, Korea, November 5-6, (2007).</p> <p>(3) Y.Oka: “Research and development of Super LWR and Super FR”, Nuclear Power Institute of China, January 8,(2010) ,(Invitation Lecture).</p> <p>(4) Y.Oka: “2007 Highlights”, GIF SCWR Annual Report,(2008).</p>
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 研究開発の進捗 ・ 研究開発の成果 ・ ブレイクスルー 	<p>【研究開発の進捗】 軽水冷却高速炉の現実的な成立性評価を目的とした体系だった計画であり、内容としてほぼ妥当なものとなっている。一部の試験で外的要因によるやむを得ない遅れが生じたものの、全ての項目が計画通りに遂行されている。</p> <p>【研究開発の成果】 第4世代原子炉国際フォーラムの技術評価にて選定された概念のひとつであり、ほぼ全ての分野にわたるバランスのとれた研究成果は高く評価できる。 水冷却高速炉に関するプラント概念を構築し、伝熱流動、被覆管材料の分野における基本的な問題に取り組み、多くの成果が得られ、今後の研究開発の展開に明確な方向性を示したことは高く評価できる。</p> <p>【ブレイクスルー】 高効率でコンパクトな炉心・プラント概念を構築し、その成立性を担保する伝熱流動特性研究や材料開発において所定の成果を上げ、資源有効利用性や環境負荷低減等について極めて興味深い成果が報告されたことは、革新的原子力システムに期待される諸特性を有する「軽水冷却スーパー高速炉」の実用化達成というブレイクスルー実現に向けた着実な進展と評価できる。</p>
<p>4. その他</p>	<p>スーパー高速炉の位置づけ、開発の必要性、各国の技術、R & Dの現状を踏まえ、国際協力をどのように進めるのかを提言していただくことを期待する。</p>