

氏名	たか せ かず ゆき 高瀬 和之
授与学位	博士(工学)
学位授与の年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)量子エネルギー工学専攻
学位論文題目	高温ガス炉用突起付き燃料棒の伝熱流動特性に関する実験的・ 数値解析的研究
指導教官	東北大学教授 戸田 三朗
論文審査委員	主査 東北大学教授 戸田 三朗 東北大学教授 平川 直弘 東北大学教授 北村 正晴 東北大学助教授 橋爪 秀利

論文内容要旨

本研究は、高温ガス炉の技術基盤の確立と高温に関する先端的基礎研究を行うために日本原子力研究所が現在建設中である高温工学試験研究炉(以下HTTRと称する。)の炉心熱流動設計に資することを目的として、HTTR炉心条件を模擬した高温高圧のヘリウムガス雰囲気中でHTTRで使用される突起付き燃料棒の熱伝達率や摩擦係数を調べ、HTTR炉心の伝熱流動特性を明らかにしたものである。また、従来から乱流解析に実績のある2方程式 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使って突起付き燃料チャンネルの伝熱流動特性を数値的に検証したものである。本論文は、全編5章より構成される。

第1章 序論

高温ガス炉は、1000℃近い高温のガスを各種産業に供給することによって非電力分野における核熱エネルギー利用を目的とした黒鉛減速型ヘリウムガス冷却炉であり、①高温の熱を取り出せる、②熱効率が高い、③周辺環境への熱的影響が少ない、④黒鉛は高い熱伝導率と大きな熱容量を持つため安全性が高い、などの特徴を持っている。

HTTRでは、炉心出口温度を高温にするために燃料チャンネルを流れる冷却材流量は極めて少ない。通常、原子炉では冷却材流れは乱流状態にして良好な除熱特性を示すように設計されるが、原子炉出力が一定の条件で炉心出口温度を高温にするためには冷却材流量を低下させなければならない。そのため、HTTR運転時の炉心レイノルズ数は3000～10000の範囲となっている。したがって、炉心熱流動設計を高精度で行うためには、乱流域から層流域までの燃料チャンネル内の熱伝達率を正確に把握することが必要である。なぜなら、燃料チャンネルにおけるレイノルズ数の低下は熱伝達率の低下を招き、その結果、燃料温度が設計温度以上に上昇することが考えられるからである。

また、冷却材であるヘリウムガスは燃料棒(外径34mm)と冷却材流路(内径41mm)から構成される等価直径7mmの燃料チャンネルを下降しながら加熱される。燃料棒の外表面にはスパーサリブと呼ばれる3次元突起が複数個取り付けられており、ヘリウムガスの流れはスパーサリブによる流路断面積変化の影響を受けることは明らかである。

このような体系で加熱ガス流の伝熱流動特性を定量的に調べた研究は見あたらない。また、3次元的なスペーサリブ形状を模擬した解析条件の基で突起付き燃料チャンネルの熱伝達率と摩擦係数を正確に予測した研究も見あたらない。

本章では、本研究の動機、目的及び意義について述べた。また、環状流路を流れる加熱ガス流の伝熱流動に関する従来の研究と本研究とを比較し、本研究の位置付けを行った。

第2章 実験

本章では、電気加熱式の模擬燃料棒を使って、HTTRの運転条件を模擬した最高温度1000℃、圧力4MPaのヘリウムガス条件下で伝熱流動実験を行い、得られた実験データを基に突起付き燃料チャンネルの熱伝達率と摩擦係数の各相関式を導出した。

まず、突起付き燃料チャンネルの基本的な伝熱流動特性を調べるために、燃料棒表面に微細な矩形突起を有する矩形突起付き燃料棒の熱伝達特性を明らかにした。図1に、矩形突起の高さを一定(0.5mm)として突起ピッチ p と高さ h の比 p/h を10、20、40に変えた場合のヌッセルト数 Nu の分布を示す。HTTRの運転範囲である3000~10000のレイノルズ数範囲では、矩形突起付き燃料チャンネルのヌッセルト数は p/h の低下とともに減少しており、 $p/h=40$ の条件で最も低い熱伝達特性を示すが、それでもHTTRの炉心熱流動設計式である平滑環状流路の値よりも50%以上もヌッセルト数が増加することを明らかにした。

一方、1000~3000のレイノルズ数領域では、矩形突起付き燃料チャンネルのヌッセルト数は平滑環状流路の場合に見られるような遷移域の傾向を示すことがわかった。この理由は、レイノルズ数の低下とともに燃料棒表面の粘性底層の厚みが突起高さよりも増大して、粗面である燃料棒表面が水力学的に平滑な値に近づくためである。本研究は、10000以下の低レイノルズ数領域における微小突起を有する狭い環状流路内の熱伝達特性を初めて明らかにした。

次に、スペーサリブ付き燃料チャンネルの伝熱流動特性を調べた。図2にヌッセルト数 Nu とレイノルズ数 Re の関係を示す。スペーサリブ付き燃料チャンネルのヌッセルト数は、乱流域から層流域にかけてレイノルズ数の0.8乗に比例する乱流熱伝達の傾向を維持しながら層流域まで減少しており、スペーサリブによる流れ乱れの影響は低レイノルズ数域までチャンネル内に継続していることを明らかにした。また、乱流ヌッセルト数は平滑環状流路の値よりも約20%増加しており、スペーサリブが伝熱促進体として有効に作用していることを明らかにした。

本章で提示した矩形突起付き燃料チャンネルやスペーサリブ付き燃料チャンネルのヌッセルト数及び摩擦係数相関式は、HTTRの炉心熱流動設計式またはそれを裏付ける資料として使用され、高温ガス炉の開発に大きく寄与した。

第3章 数値解析

本章では、2方程式 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使って、矩形突起付き燃料チャンネルの場合には2次元軸対称座標系、スペーサリブ付き燃料チャンネルの場合には3次元一般座標系を適用して熱流動数値解析を行い、突起付き燃料チャンネルの伝熱流動特性を数値的に検証するとともに、乱流モデルの妥当性について検討を加えた。

矩形突起付き燃料チャンネルにおいて、解析領域の平均ヌッセルト数計算値と実験結果から導出したヌッセルト数相関式との差は、 p/h が10から40の条件で10%以下であり、数値解析による矩形突起付き燃料棒の設計研究の可能性について高い見通しが得られた。

図3は、 $p/h=10$ の矩形突起条件で数値予測したヌッセルト数計算値と実験値との比較を示す。ここで、

□は標準型 $k-\epsilon$ モデル及び○は低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルで計算した解析領域の平均ヌッセルト数、さらに●は実験結果である。低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルによる計算結果は乱流域から層流域までのヌッセルト数の分布傾向を良く模擬できるものの、HTTRの運転範囲である3000以上のレイノルズ数領域では標準型と低レイノルズ数型の両計算結果には差は見られない。この結果、HTTRの炉心伝熱性能は標準型 $k-\epsilon$ モデルを使って十分予測できると判断した。

次に、スパーサリブ付き燃料チャンネルの伝熱流動特性を、十分に発達した乱流条件下で標準型 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使って計算した。数値予測した燃料チャンネルのヌッセルト数と摩擦係数の値は、実験結果に良く一致しており、本数値解析手法は十分な計算精度を有していることを確認した。また、本数値解析の結果から、現状のスパーサリブの配置ではスパーサリブ後流に形成される速度欠損の影響が軸方向にわたって継続されるため、図4に示すように流路の加熱面温度はリブ列位置で高く、スパーサリブから円周方向に離れるにつれて低下する山状の温度分布を示すことを明らかにした。本研究の結果、スパーサリブ付き燃料チャンネルの伝熱促進のメカニズムは、流路断面縮小による加速流の影響が支配的であり、従来から考えられてきた突起による伝熱促進の影響は極めて小さく、むしろ突起の存在は伝熱を低下させる方向に作用することを定量的に明らかにした。

一連の数値解析的検討により、今後の燃料棒設計で燃料チャンネルの高さやスパーサリブの形状が変更される場合でも、本研究で提示した数値解析手法は十分な精度で適用できる見通しを高くした。

第4章 高温ガス炉用燃料体への適用

本章では、第2章で導出したスパーサリブ付き燃料チャンネルのヌッセルト数相関式及び第3章で数値予測したスパーサリブ付き燃料チャンネルのヌッセルト数計算値のピン・イン・ブロック型高温ガス炉用燃料体への適用性について述べた。HTTRの炉心熱流動設計では、本研究で得られたスパーサリブ付き燃料チャンネルの熱伝達率の実験結果を保守的に評価した値が設計式として採用された。

第5章 総括結論

本章では、本研究で得られた結果を要約して総括するとともに、今後の研究課題について言及した。

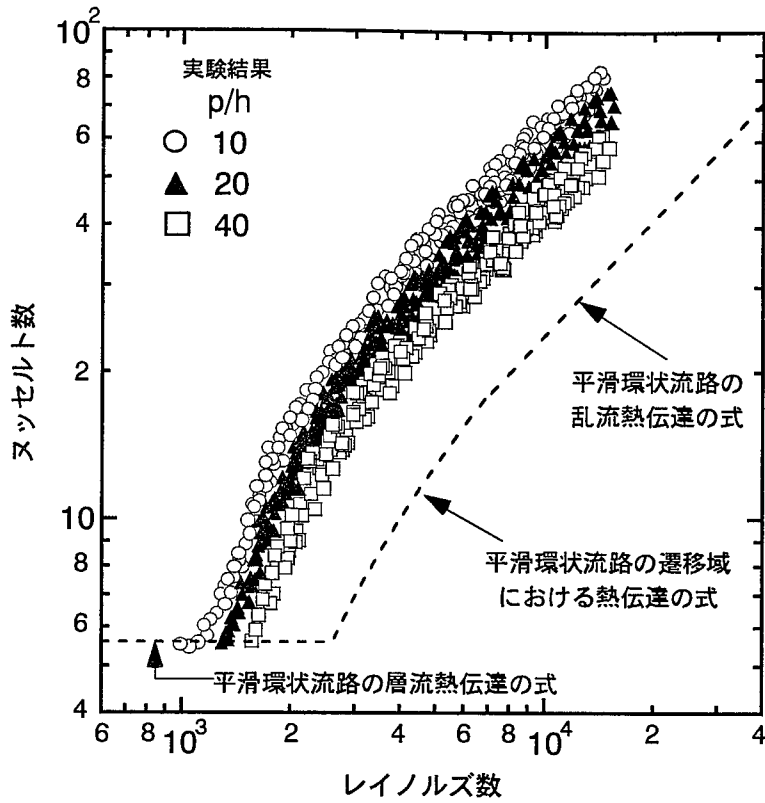


図1 矩形突起付き燃料チャンネルにおけるヌッセルト数とレイノルズ数の関係

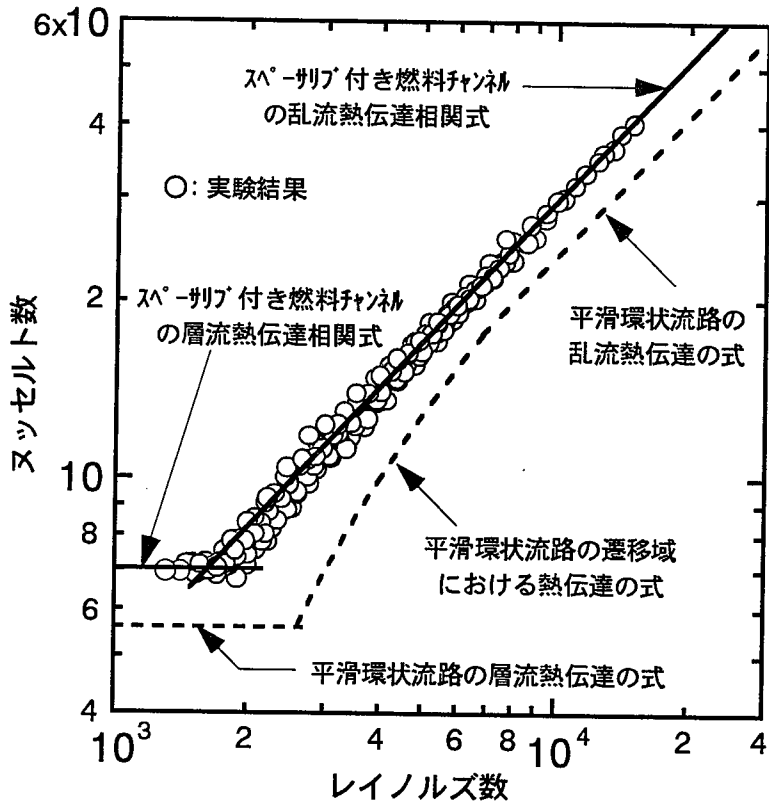


図2 スパースリブ付き燃料チャンネルにおけるヌッセルト数とレイノルズ数の関係

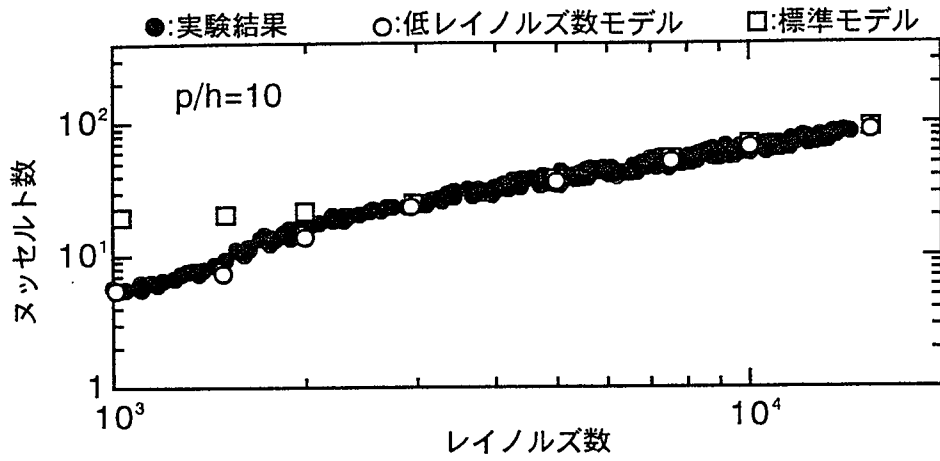


図3 p/h=10の矩形突起条件で2つのk-ε乱流モデルを使って
数値予測したヌッセルト数計算値と実験結果の比較

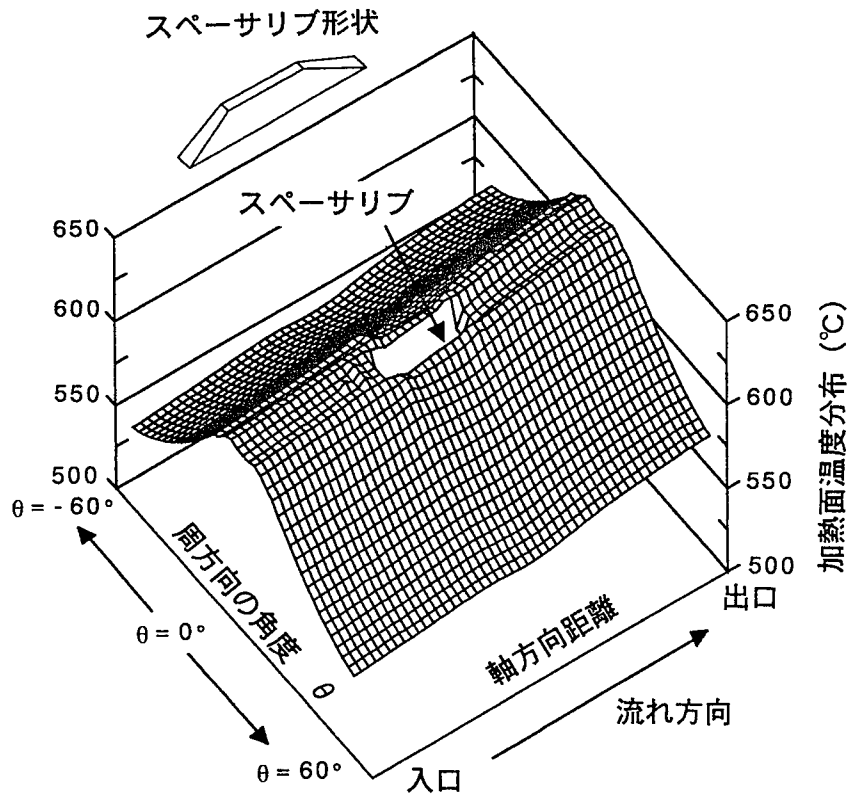


図4 数値予測したスペーサリブ付き燃料チャンネルの加熱面温度分布

審査結果の要旨

日本原子力研究所において建設が進んでいる高温ガス炉（HTTR）の炉心では、ヘリウムガス冷却材をレイノルズ数約3000～10000の乱流範囲で、突起状スパーサーリップ付き燃料棒で構成される環状流路内を流して冷却するが、最高約950℃に達する高温ガスの層流化現象を含めて、その基礎研究は十分ではない。本論文は、HTTR炉心燃料チャンネルを模擬した流路による層流域から乱流域に至る伝熱流動実験を実施し、設計式の提示と、乱流モデルを用いた数値解析による伝熱流動の予測可能性を示した研究成果を纏めたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、先ずHTTR炉心燃料チャンネルを実寸大で模擬した実験装置による伝熱流動実験の詳細を記述している。実験はHTTRの運転条件と同じ条件下で行い、熱伝達率と摩擦係数の相関式を提示し、レイノルズ数10000以下の領域で熱伝達率が急激に低下することを初めて明らかにしている。乱流域及び層流域における熱伝達率と摩擦係数が、従来の平滑環状流路設計式より算出された値より20%程度高いことを初めて明らかにするとともに、HTTRの運転条件下では熱伝達の劣化をもたらす層流化が起こらないことを実験的に確認している。

第3章では、矩形突起状スパーサーリップ付き燃料チャンネルの熱流動特性を2次元の軸対称流路モデルとk-e乱流モデルを適用した数値解析により調べ、実験結果を良く説明できることを明らかにし、矩形突起による伝熱促進効果を突起周りの乱流エネルギー分布から説明している。また3次元熱流動解析も行い、数値解析予測値が、実験値から求めた熱伝達率及び摩擦係数相関式の値と10%以下の誤差で良く一致することを明らかにしている。また、スパーサーリップ後流に生じる速度欠損の影響が軸方向に継続して生じていることを明らかにし、伝熱促進のメカニズムについて考察を加えている。

第4章では、HTTR炉心燃料体1カラムを実寸大で模擬した実験装置により実験を行い、第2章の熱伝達率相関式及び第3章の熱流動数値解析による予測可能性を確認している。HTTRの炉心熱流路設計式は本研究で得られた実験結果を保守的に評価したものであり、本研究の成果が高温ガス炉の設計に適用されたことは大きな成果である。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、レイノルズ数約3000～10000の乱流範囲で、3次元突起状スパーサーリップ付き燃料棒で構成される環状流路内を流れる高温ヘリウムガス冷却材の熱流動特性を実験と数値解析の両面から明らかにし、HTTR設計評価に適用できる相関式を提示したもので、高温条件下における原子炉熱流動工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位として合格と認める。