

氏名	中 島 健 なか しま つよし
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 184 号
学位授与の日付	昭 和 44 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学位論文題目	<b>Fundamental Studies of Heat Removal from Fuel Elements</b> (燃料要素の熱除去に関する基礎的研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 岐 美 格 教 授 大 石 純 教 授 兵 藤 知 典

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は原子炉の燃料要素の熱除去について、基礎的な研究を行なった結果をまとめたもので、八章からなっている。

第一章は緒論であって、この研究の目的と、以下の各章で解析すべき課題を明らかにし、特に冷却材の基本的な流路として、同心円環流路をとりあげる理由を述べている。

第二章は、二個の同心の円管によって構成された円環流路を、流れの十分に発達した種々の流体が、内部発熱をともないながら、内管の外表面および外管の内表面に別個に与えられた種々の熱的境界条件のもとで流動している場合の、流体の温度分布や内外両表面における熱伝達係数を、一般的かつ統一的に理論解析したものである。熱的境界条件としては、内外両表面において熱流束または温度が与えられるものとして、四種をとりあげ、その各々について理論解析を行ない、理論式を導いている。

まず、流体は一樣に内部発熱しており、内外両表面における熱的境界条件は両者で異なるが、それぞれ一定の場合を解析した。温度分布は、それが十分に発達した領域では、熱的境界条件には無関係な三個の基本的関数を組み合わせることによって表わすことができる。この三個の関数は、流体の速度分布と熱の渦拡散係数を与えると決定できる。温度助走域における温度分布は、固有値問題の解として得られ、発達域での三個の関数と、それらに対応する固有関数を各項とする三個の無限級数との組み合わせによって表わすことができる。これらの温度分布から、内外両表面におけるヌセルト数が導かれる。ヌセルト数は、内外両半径の比や内部発熱率と壁面における熱的境界条件との関係によっても影響を受ける。

ついで、内部発熱率、壁面における熱流束あるいは温度が、流路の軸方向に任意に変化する場合の解析を行ない、既に求めた一樣な場合の解を重ね合わせることによって、理論式を導いている。

上述の理論解において重要な、各固有値に対応する固有関数を各項とする無限級数の収束性の悪さを補なうために、WKB法により、固有値、固有関数、級数の係数の漸近解を求め、数値計算に便ならしめている。

なお、円環流路の特別の場合として、平行平板間流路や円管流路についても論じている。

第三章は著者の実験に使用した実験装置と実験方法について述べたものである。従来、円環流路における熱伝達の実験として、内外両表面における熱的境界条件を明確にした上で行なったものは、水銀や空気を用いてなされているが、プラントル数のもっと大きいものについてはほとんどなされていないことから、流体として水とディフェニールをとりあげて実験している。実験結果は、第六章で、第二章の理論解に基づく数値計算結果と比較検討される。

第四章は、第二章の理論解による具体的な数値計算を行なうために、円環流路内の十分に発達した流れの速度分布や渦拡散係数について研究したものである。層流については、ニュートン流体を特別の場合として含むビンガム流体をとりあげ、その速度分布や摩擦係数を理論的に求め、円環流路の内外両半径の比と栓部の内外両半径の比をもつて整理できることを示している。乱流については、ニュートン流体をとりあげ、円管流路に対する渦拡散係数を表わす Reichardt の式ならびに混合距離を表わす Nikuradse の式を応用して、それぞれ解析した。後者の式を応用して求めた渦拡散係数と混合距離が、円環流路内の最大速度の位置の近傍で従来の実験値と一致しなかった以外は、実験結果をよく満足している。また円環流路の内壁から最大速度の位置までの区間の速度分布は、内外両半径の比が小さくなると、外壁側の速度分布から大きくずれる。さらに、速度分布の近似式を導き、摩擦係数を求めたところ、円管に対する摩擦係数よりも数パーセント大きく、Brighton の実験値とよく一致した。以上の解析で得られた速度分布は、第五章および第六章で用いられる。

第五章は、十分に発達した層流で、ビンガム流体が一様な内部発熱をとめないながら、円環流路を流動する場合の熱伝達を解析したもので、内外両表面における熱流束は両者で異なるが、それぞれ一定の場合を扱っている。第二章の理論解に基づき数値計算された内外両表面におけるヌセルト数は、両表面における熱流束と内部発熱率との関係によっていろいろな値になる。このことは温度助走域についても成り立ち、流路軸のある位置で最小値をとったり、負の値になったり、あるいは無限大になったりする。これは任意の断面における流体の混合平均温度と壁温との相互関係から生じる。

第六章は、十分に発達した乱流で、ニュートン流体が一様な内部発熱をとめないながら、円環流路を流動する場合の熱伝達を解析したもので、内外両表面における熱流束は両者で異なるが、それぞれ一定の場合を扱っている。第二章の理論解に基づき、数値計算は、流路の内外両半径の比が  $0 \sim 1$ 、レイノルズ数が  $10^4 \sim 3 \times 10^5$ 、プラントル数が  $0.005 \sim 10^3$  のはんいについて行なわれた。十分に発達した領域のヌセルト数は層流の場合と同じく、両壁面における熱流束と内部発熱率との関係によっていろいろな値になるが、その影響は層流の場合にくらべて弱い。特にプラントル数が10より大きいと、内部発熱率や両面加熱の影響はほとんどなく、内部発熱がなく片面断熱の場合のヌセルト数にほぼ等しい。内部発熱をとめない場合の解析結果を、いろいろの流体、すなわち液体金属、ガス、水、ディフェニールに対する従来ならびに著者の実験結果と比較してよく一致することを認めている。なお設計に便利のように、数値計算の結果を満足するヌセルト数の近似式を導いている。温度助走域のヌセルト数の流路軸方向の変化の様子は層流の場合と同様である。また、プラントル数が0.7ないし10のはんいでは、温度助走域の長さはプラントル数が大きいほど、あるいは流路の内外両半径の比が小さいほど短い。さらに、内部発熱がなく、流

路の内外両表面における熱流束が流路軸方向に正弦状に変化する場合の熱伝達についても、第二章の理論解の一例として数値計算を行ない、ヌセルト数の軸方向の変化の様子を明らかにしている。

第七章は、円環流路における熱伝達の理論解の一応用として、ちどり配列の管群に平行して乱流で流動する場合の熱伝達を解析したもので、プラントル数が、 $0.005 \sim 10$ 、レイノルド数が  $10^4 \sim 2 \times 10^5$ 、ピッチと直径の比 ( $P/D$ ) が  $1.1 \sim 3.6$  のはんいで数値解析している。まず、求められた摩擦係数は  $P/D > 1.1$  で従来の水や空気による実験値とよく一致する。十分に発達した領域のヌセルト数を従来の実験値と比較すると、空気や水に対しては  $P/D$  が  $1.1$  以上でよく一致するが、液体金属では  $1.4$  以上でないと一致がよくない。また一般に、 $P/D$  の変化によるヌセルト数の変化はプラントル数が小さいほど大きく、 $P/D$  が大きいほどヌセルト数は大きい。

第八章は、以上の結果を総括して結論としている。

### 論文審査の結果の要旨

原子炉工学において重要な研究課題の一つは、棒状、板状、あるいは環状の燃料要素面から、種々の冷却材への熱伝達の問題である。著者はこのような熱伝達の問題を一般的かつ統一的に解析することを目的として、冷却材の基本的な流路として同心円環流路をとりあげ、理論的ならびに実験的に基礎的研究を行なった。平行平板間流路や円管流路の特別の場合として理解し、またクラスタ状に配列された燃料棒表面からの熱伝達も、円環流路に対する理論解を応用して解析している。

本研究な主な成果は次の通りである。

1) 流れの十分に発達した種々の流体が、同心円環流路を、内部発熱をともないながら、流路の内外両表面に別個に与えられた四種の熱的境界条件のもとで流動している場合の、流体の温度分布や内外両表面におけるヌセルト数を、一般的かつ統一的に理論解析し、理論式を導いた。これらの中には、温度助走域の熱伝達、ならびに内部発熱率や内外両表面における熱流束あるいは温度が一様な場合ばかりでなく、流路軸方向に任意に変化する場合の理論解も含まれている、さらに、固有値、固有関数およびその級数係数の漸近解をWK B法によって求め、数値計算に便ならしめている。

2) 円環流路を流れるビンガム流体の層流速度分布および摩擦係数を理論的に求めた。

3) 円環流路を流るニュートン流体の乱流速度分布、渦拡散係数、摩擦係数について解析し、従来の実験値とよく一致する結果を得た。

4) ビンガム流体が一様な内部発熱をともないながら、円環流路を層流で流れる場合の内外両表面のヌセルト数は、内外両半径の比、栓部の内外両半径の比、流路軸方向の位置ならびに両表面における熱流束（それぞれ一定とする）と内部発熱率との関係によって影響されることを、数値をもって示した。

5) ニュートン流体が一様な内部発熱をともないながら、円環流路を乱流で流れる場合の内外両表面のヌセルト数を、プラントル数  $0.005 \sim 10^3$ 、レイノルズ数  $10^4 \sim 3 \times 10^5$ 、流路の内外両半径の比  $0 \sim 1$  のはんいで数値計算により求めた。特に内部発熱がない場合に、著者の得た水およびディフェニールに対する実験値ならびに従来の液体金属やガスに対する実験値と比較検討してよく一致することを見出した。なお、温度助走域のヌセルト数や、流路壁の熱流束が軸方向に正弦状に変化する場合のヌセルト数の位置的变化

の様子も明らかにした。

6) ちどり配列の燃料棒群に平行して乱流で流動する場合の熱伝達を、プラントル数 0.005~10, レイノルズ数  $10^4 \sim 2 \times 10^5$ , ピッチと直径の比 (P/D) 1.1~3.6 のはらいで数値解析し, 従来の実験値と比較検討して, プラントル数数0.7以上の流体に対しては  $P/D > 1.1$  でよく一致するが, 液体金属に対しては  $P/D$  が1.4以上でない一致がよくないことを見出した。

以上要するに本論文は, 燃料要素の熱除去について基礎的研究を行ない, 多くの基本的な知見を与えたもので, 学術上, 工業上寄与するところが少なくない。

よって本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。