



ところで、第3章、第4章の結果において、管内ヌセルト数の管内レイノルズ数に対する依存性は大きく、従来の中温域・低熱流束での発達した円管内の流れの結果とは異なる。また、フィン管の管内平均ヌセルト数が裸管のものより小さくなる。この理由として、冷却空気の大きな温度変化による物性値の変化、助走区間、管内リブによる2次流れが考えられるが、特に、高熱流束条件下での物性値の大きな変化に伴う層流化現象は、この大きな理由と推測されると述べている。

第5章では、この現象を明らかにすることが、管内側の熱伝達の促進の検討につながる重要な課題であると考え、円管およびリブで区切られた扇形流路を模擬した扇型管を高熱流束加熱し、管内局所・平均熱伝達率および層流化限界について検討を行っている。まず、高熱流束条件下における円管内熱伝達率の結果から層流化現象を確認した。円管では、管内レイノルズ数に対しある熱流束以上で層流化が生じる。しかし、扇形管では、層・乱流の共存が考えられ、層流化現象も円管と異なることが予測されるため、高熱流束条件下における扇形管内熱伝達率を検討した。その結果、扇形管では、熱流束の増加にともない、円管と異なり徐々に層流化が進む。これは、層流化が、層・乱流の存在割合に影響を及ぼすためと考えられる。この際、管内平均ヌセルト数は、管内レイノルズ数に対し、1乗以上の大きな依存性をもつ。したがって、高温流動層内でのセラミック伝熱管内でも同様の現象が生じていたことが推測できるとしている。

第6章では、本研究で検討した、流動層型高温用セラミック熱交換器を、石炭燃焼ガスタービンコージェネレーションシステムの一例に適用した際の、必要伝熱管表面積、システム効率、エクセルギー効率について検討した。本検討例では、1段流動層システムに適用すると、長さ1mの伝熱管140本以下で、約44%のシステム効率、約56%のシステムのエクセルギー効率を得られる。また、2段流動層システムに適用すると、長さ1mの伝熱管400本以上必要となるが、約55%のシステム効率、約61%のシステムのエクセルギー効率を得られる。なお、熱交換器としてのエクセルギー効率は、1段流動層では、約29%であるが、2段流動層にすると、熱交換器で回収できるエクセルギーは約51%と大きくなり、ガスタービンの出力割合も大きくなると述べている。

第7章では、本研究の結論を述べている。管内熱伝達の促進等の課題はあるが、流動層型高温用セラミック熱交換器を利用した、石炭燃焼ガスタービンコージェネレーションシステムの実現可能性が確認できたと結論している。

## 発表論文リスト

1. 超高温用高性能セラミック熱交換器に関する研究  
(第1報、流動層内の水平裸管群の熱伝達特性)  
姫路裕二、熊田雅弥、花村克悟  
日本機械学会論文集、B編、63巻、615号、PP.210-215、1997
2. 超高温用高性能セラミック熱交換器に関する研究  
(第2報、流動層内のフィン管群の熱伝達特性)  
姫路裕二、熊田雅弥  
日本機械学会論文集、B編、64巻、619号、1998 (印刷中)

## 論文審査結果の要旨

本研究は、石炭の燃焼ガスを利用したガスタービンコージェネレーションシステムに適用することのできる、高温用流動層型セラミック熱交換器を開発することを目的として検討を行ったもので、エネルギー事情を反映した現代的課題である。

第1章では、まず、研究の背景および目的を示し、高温用流動層型セラミック熱交換器の開発の必要性を記述し、論文の位置付けをしている。また、従来の研究としてセラミック熱交換器と流動層の適用による熱交換器の高性能化について総括している。両者を組合わせた本熱交換器は独創的なものである。

第2章では、本実験に使用した装置のシステムの詳細、および実験方法について示している。また、管内外の平均熱伝達率の算出方法および温度効率・エクセルギー効率の算出方法について示している。1200℃の高温における安定した流動層を実現している。

第3章では、まず、内部に放射状リブを有するセラミック裸管を伝熱管とした流動層型熱交換器を試作し、管内外の熱伝達特性を検討して、熱交換器としての性能評価を行っている。その結果、流動層を適用することにより、高温条件下で単相に比べて約8倍の大幅な管外熱伝達率の促進が実現している。また、層内温度が高くなるほど管外ヌセルト数が大きくなることから、高温流動層における輻射の効果を評価している。

第4章では、さらに大きな管外熱伝達率の促進を実現し、小型・高性能化を図るため、セラミックスの焼成技術の進展を期待して、フィン付セラミック伝熱管を試作している。特に、フィン付セラミック管は世界に例のない貴重なデータである。裸管の場合と同様、高温条件下で層内均一温度場を実現し、熱伝達特性を検討し、フィンの効果により、裸管の約3倍、すなわち、単相に比べて20倍以上の大幅な管外熱伝達率の促進効果を得ている。しかし、熱交換器性能としては、熱貫流率が管内側に支配されていたため、大きな改善効果が得られなかった。さらなる管内側の伝熱促進を行うことにより、熱交換器性能は改善されるが、現段階では、管内リブ形状・枚数を変化させることは、セラミック管の焼結・加工技術から、製作上容易ではなく、現状での限界であると述べている。

一方、第3章、第4章において、管内ヌセルト数の管内レイノルズ数に対する依存性は大きく、従来の発達した円管内の流れの結果とは異なること、および、フィン管の管内平均ヌセルト数が裸管のものより小さくなることより、助走区間、管内リブによる2次流れの影響が考えられるが、特に、高熱流束条件下での物性値の大きな変化に伴う層流化現象が、この大きな理由と総括し、次章の検討を行っている。

第5章では、上述より、管内側の熱伝達の促進の検討につながる重要な課題であると考え、円管およびリブで区切られた扇形流路を模擬した扇型管を高熱流束加熱し、管内局所・平均熱伝達率および層流化限界について検討を行っている。まず、高熱流束条件下における円管内熱伝達率の結果から層流化現象を確認している。しかし、扇形管では、層・乱流の共存が考えられ、熱流束の増加にともない、円管と異なり徐々に層流化が進む。これは層流化が、層・乱流の存在割合に影響を及ぼすためとしている。この様な層・乱流共存場での層流化の知見は、層流化現象の機構を解明する上で貴重な結果である。

第6章では、流動層型高温用セラミック熱交換器を、石炭燃焼ガスタービンコージェネレーションシステムに適用した際のコンバインサイクルにおける、必要伝熱管表面積、システム効率、エクセルギー効率について検討している。1段流動層システムに適用すると、約44%のシステム効率、約56%のエクセルギー効率を得られ、2段流動層システムに適用すると、約55%のシステム効率、約61%のエクセルギー効率を得られ、現状の最高性能コ

ンバインサイクルの効率に匹敵するかそれ以上の値を得ている。詳細なトレードオフの検討項目を残している点を考慮すればかなり優れたシステムと言える。

第7章では、本研究の結論を述べている。管内熱伝達の促進等の課題はあるが、流動層型高温用セラミック熱交換器を利用した、石炭燃焼ガスタービンコージェネレーションシステムの実現の可能性が確認できたと結論している。

以上の結果より、本論文の流動層型セラミック熱交換器の結果は、高性能で、石炭燃焼ガスタービンコージェネレーションシステムへの適用と実現の可能性を確認したもので、工業的に貢献するものであり、その詳細な伝熱特性の解明は、学問的に重要な知見を与えるものであり、学位論文に値するものと判断される。