

氏名	たなかふとし 田中太
学位(専攻分野)	博士(エネルギー科学)
学位記番号	論エネ博第49号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Study on boiling heat transfer in narrow gap channels (狭間隙流路における沸騰熱伝達に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 三島嘉一郎 教授 代谷誠治 教授 功刀資彰

論文内容の要旨

本論文は、種々の核エネルギーシステムの様々な場面で遭遇する狭間隙流路における沸騰熱伝達現象に関し、広範囲の大きさの伝熱面及び流動条件における狭間隙流路内の沸騰熱伝達現象のメカニズムを究明し、様々な条件下における沸騰熱伝達を予測する手法を開発・検証した結果をまとめたもので、8章からなっている。

第1章は序論であり、本論文の背景として軽水炉のシビアアクシデント時の压力容器下部プレナムにおける溶融炉心のギャップ冷却、板状燃料を使用する試験研究用原子炉の炉心冷却、核破碎中性子源の固体ターゲットの冷却、高出力密度電子回路の冷却などにおいて、狭間隙流路の沸騰熱伝達現象が重要な課題となっていることを述べ、これらについての既往の研究成果をレビューした上で、本論文の目的が、種々の狭間隙流路における沸騰熱伝達現象の特性を把握し、それぞれの条件下における熱伝達及び沸騰限界熱流束を予測する手法を提案すること、および種々の条件下の沸騰熱伝達特性をとりまとめ、狭間隙流路における沸騰熱伝達の統一的解釈に資することである、と述べている。

第2章では、傾斜した狭間隙流路において流れが停滞した劣悪な流動条件における沸騰熱伝達現象の例として、軽水型動力炉の炉心溶融事故時に压力容器下部ヘッドに溶融落下した炉心溶融物と下部ヘッドとの間に形成されるギャップにおける冷却水の沸騰熱伝達の問題を取り上げ、狭間隙流路内の沸騰限界熱流束に及ぼす流路の傾斜角の影響について、加熱流路内の対向流制限の考えに基づく理論的な考察を加え、限界熱流束と傾斜角との間の関係式を導いて、その結果を様々な傾斜角を持つ狭間隙矩形流路を用いた実験により確認している。

第3章では、劣悪な流動条件の狭間隙流路において、初期状態として高温過熱された状態にある伝熱面の過渡冷却問題の例として、第2章と同様の軽水型動力炉压力容器下部ヘッド内のギャップ冷却の問題を取り上げ、膜沸騰状態から遷移沸騰状態を経て核沸騰状態に至るまでの冷却過程の各状態における沸騰熱伝達の特性を、内管加熱二重管の試験部を用いた実験により調べ、その結果を通常の加熱流路のそれと対比させながら議論することにより、ギャップが4 mm より大きい場合にはプール沸騰の熱伝達に近づき、ギャップが4 mm よりも小さくなれば対向流制限によって沸騰熱伝達と限界熱流束がともに低下することを明らかにするとともに、本実験で得られたデータをもとに沸騰曲線の各状態を記述する既存の熱伝達相関式の検証を行っている。

第4章では、前章までとは逆に、短流路で冷却効率の高い状態における沸騰熱伝達の例として、高密度で発熱する核破碎中性子源の固体ターゲットの熱水力設計の問題を取り上げている。具体的には、一様に加熱された短い狭間隙矩形流路内の高流量・高サブクール状態における単相流及び沸騰二相流の熱伝達特性に関する実験を実施し、そのような流動状態における沸騰熱伝達の特性を明らかにしている。すなわち、短流路における強制対流液単相流の熱伝達に対しては助走域長さの効果が大きいこと、高流量においては流路の姿勢の影響は小さいこと、核沸騰領域の沸騰曲線は、高流量・高サブクール状態においては、既存の熱伝達相関式に比べて高過熱度側に移動することなどを見出している。後者の理由としては高流速・高サブクール条件における核沸騰の抑制効果を挙げるとともに、実験データをよく再現する新しい熱伝達相関式を提案している。また、限界熱流束及び核沸騰開始条件についても、本研究による実験データと既存の相関式とを比較検討することによ

って既存の相関式の検証を行っている。

第5章では、第4章に続いて短い狭間隙矩形流路内の高流量・高サブクール状態における沸騰熱伝達の問題を取り上げ、非一様加熱となった場合の影響について議論している。具体的には、核破碎中性子源のビームプロファイルを想定した非一様発熱の伝熱面を用いて実験的にデータを取得し、第4章で得られた結果及び既存の結果と比較しながら、非一様加熱した場合の高流量・高サブクール状態の单相流及び沸騰二相流における熱伝達について検討している。ここでは、单相流の熱伝達に対しては流れ方向の発熱分布の影響が大きいこと、核沸騰熱伝達については第5章で提案した一様加熱の場合の核沸騰熱伝達相関式が適用できることを見出し、限界熱流束については、一様加熱の場合の相関式に形状因子による補正を加えるという従来通りの方法によって予測できることを確認している。

第6章では、極端に小さな伝熱面を有する狭間隙流路における沸騰熱伝達の例として、陽子ビームを極端に絞った極限状態におけるターゲット冷却の問題、あるいは極めて高密度で発熱する電子回路の冷却の問題を取り上げ、短小伝熱面を有する狭間隙矩形流路における沸騰熱伝達実験を行って、限界熱流束に及ぼす流路間隙、質量流束及びサブクール度の影響を調べるとともに、限界熱流束を予測する既存の相関式の検証を行っている。その結果、高流量においては限界熱流束に及ぼす流路間隙の影響は小さいが、低流量においてはその影響が大きく、流路間隙が10 mmの場合はプール沸騰の限界熱流束に近づくこと、逆に流路間隙1.5 mm以下では限界熱流束が低下することを見出している。また、高流量・高サブクール状態の短小流路では、流路間隙の大小に関わらず、限界熱流束を超える高熱流束状態において、気泡微細化沸騰と呼ばれる特異な現象が発生することを見出し、その特性について議論している。

第7章では、狭間隙流路における沸騰熱伝達の統一的解釈に資する目的で、前章までの研究結果及び既往の研究結果を取りまとめて、狭間隙矩形流路における沸騰限界熱流束に対する加熱長さの影響について、実験観察に基づいてそのメカニズムについて議論するとともに、加熱長さの影響を考慮した新しい相関式を提案し、実験データによく一致する良好な結果を得ている。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果を取りまとめ、今後の課題を示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、種々の核エネルギーシステムの様々な場面で遭遇する狭間隙流路における沸騰熱伝達現象に着目し、そのメカニズムを広範囲の伝熱面サイズ及び流動条件に亘って究明し、様々な条件下における狭間隙流路の沸騰熱伝達予測法について研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 軽水型動力炉の炉心溶融事故時において問題となる圧力容器下部ヘッドにおける溶融炉心のギャップ冷却などに関連して、傾斜した狭間隙流路において流れが停滞した劣悪な冷却条件下における限界熱流束相関式を、対向流制限のメカニズムに基づく理論的考察から導き、実験データをよく再現する良好な結果を得た。また、高温伝熱面の過渡的な冷却過程において、膜沸騰状態から核沸騰状態に移行する沸騰熱伝達のメカニズム及びそのメカニズムに及ぼす流路間隙の影響を実験的に究明するとともに、各条件下での熱伝達率及び沸騰限界熱流束を予測する相関式を提案した。
2. 高密度で発熱する核破碎中性子源固体ターゲットの熱水力設計に関連して、冷却効率の良い高流量・高サブクール条件下の短い狭間隙流路内の单相流及び沸騰二相流の熱伝達特性に対する影響因子を実験的に調べ、沸騰限界熱流束のメカニズムを明らかにするとともに、高発熱密度で短い狭間隙流路の熱水力設計に適用可能な熱伝達率及び沸騰限界熱流束の予測式を提案した。
3. 陽子ビームを極端に絞った核破碎中性子源固体ターゲット冷却あるいは高発熱密度の電子回路冷却の問題に関連して、極端に小さい伝熱面を有する狭間隙流路内の沸騰熱伝達現象の特性を実験的に明らかにするとともに、得られた実験データに基づいて既存の沸騰限界熱流束相関式の検証を行った。また、高流量・高サブクール状態の短小流路では、気泡微細化沸騰と呼ばれる特異な現象が発生することにより、沸騰限界熱流束を超える極めて高い熱流束が実現できることを見出した。
4. 本研究及び既往の研究結果を取りまとめ、狭間隙矩形流路における沸騰限界熱流束について、広範囲に亘る加熱長さの影響を実験観察に基づいて考察することにより、この影響を取り入れた新しい限界熱流束相関式を提案して検証した。

以上、要するに本論文は、種々の核エネルギーシステムの様々な場面で遭遇する狭間隙流路内の沸騰熱伝達現象のメカニズムを、通常の流路の結果と比較しながら明らかにするとともに、それらの現象の解析あるいは核エネルギーシステムの熱水力設計に適用可能な計算手法を研究したもので、得られた成果は今後の核エネルギーシステムの安全性と信頼性のさらなる向上に寄与するものであり、学術上、實際上、資するところが大きい。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年2月6日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。