HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	液体ナトリウムの円筒まわりの熱伝達
Author(s)	石黒, 亮二; 熊田, 俊明; 杉山, 憲一郎
Citation	北海道大學工學部研究報告, 86, 133-147
Issue Date	1978-02-03
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/41443
Type	bulletin (article)
File Information	86_133-148.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第86号（昭和53年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 86 (1978)

液体ナトリウムの円筒まわりの熱伝達

石黒亮二* 熊田俊明* 杉山憲一郎*

（昭和52年8月31日受理）

Heat Transfer around a Circular Cylinder in Liquid Sodium Crossflow

Ryoji ISHIGURO Toshiaki KUMADA Kenichiro SUGIYAMA

(Recevied August 31, 1977)

Abstract

The local and average heat transfer coefficients are experimentally determined for sodium flow normal to a circular cylinder. A sodium loop with special specifications is designed for the purpose. The measurement covers the range of Reynolds number 360～16,900 with three test cylinders of different diameter. The data are compared with the analytical values obtained by Grosh and Cess under the assumption of inviscid flow. Their analysis predicts satisfactorily heat transfer coefficients at the front part of a cylinder where a boundary layer is developing. However, the experimental data are much smaller than the analytical values over the region beyond separation point.

It is concluded that the assumption of inviscid flow leads to large errors in the prediction of both local and average heat transfer coefficients even in such a fluid of low Prandtl number as sodium. A numerical analysis is also tried under the assumption of viscous flow at a Peclet number of 7.8 and is in agreement with the experimental data in reasonable accuracy.

1. まえがき

核燃料資源の有効利用の立場から，高速増殖炉（FBR）の開発は，今日の原子力研究の最も重要な課題の一つである。FBRは一般に炉心の熱発生率が大きいので，伝熱特性のすぐれ，しかも核的な性質にもすぐれたアルカリ金属を冷却材として使用することが有利となる。このような目的から，比較的最近になり，アルカリ金属，特にナトリウムを熱媒体として使用する技術開発が各国で急速に行われて，ほぼ実用の域に達している。

わが国においても，最近ナトリウム冷却型高速増殖試験炉“常陽”が臨界に達し，いよいよナトリウムが原子炉の熱媒体として実際に使用される段階になった。しかし炉心の熱設計や，蒸気発生器（SG）の設計に大切な伝熱特性が充分理解されるようになったというのではなく，その意味では多くの事柄が未検討のまま残されている。

液体金属熱媒体は，在来広く用いられてきた水や空気と異なり，熱伝導率あるいは温度伝導率が大きく，それに対して動粘性係数が水などとあまり変わらないので，プラントル数が非常に

* 原子工学科 原子力安全工学講座

小さいという特徴を持っている。この性質のために，伝熱を伴いながら壁面上を流れる場合に，速度境界層に比べて温度境界層が大変厚くなり，その結果いろいろな面で在来の熱媒体と違った特性を示す。

一般に単相流動の伝熱の研究は，流路内の流れと物体外面上の流れに大別して検討される。流路内の伝熱は実用性の高い研究対象であり，ナトリウムに対しても理論的・実験的にかなりの研究がなされてきた[1)~5)]。しかし，流路内の流れでは，周囲から発達してきた速度・温度境界層が中心部で合体し，それ以降の変化のおさえられたいわば特殊な条件となっており，場の発達の状況と密接に関連する伝熱の基本的な問題を検討するためには必ずしも十分ではない。一方，物体外面の伝熱は境界層の発達について上記のような制約がないので，熱伝達に関する本質的な要素をより多く含んではいるが，大きな流路を必要とするなど実験技術上幾多の困難があり，また実用との直接の結びつきも前者ほどではないこともあって，あまり手掛けられていない。

本報では，物体外面の伝熱の一例として，ナトリウム単相流が単一円筒をよぎる場合の熱伝達を検討する。このような系に対し，かつて Grosh ら[6)]は液体金属のプラントル数の小さいことを根拠に，非粘性流れ場の仮定に基づく熱伝達の解析法を提案した。また，Andreevskii[7)]はナトリウムを用いて円筒表面のヌセルト数を実測して発表している。しかし，これら両者による結果は明らかな不一致を示している。前者がすべての流れ場に対して適用可能であるとは考え難いことであり，また後者は実験精度に対して多少疑問点を含むなど，残された検討事項は少なくない。筆者らはかねてこの点に注目し，この系の測定を試みることとし，その目的に適するように比較的ポンプ容量の大きいナトリウムループを計画作製すると共に，壁面温度分布の高精度な測定法を考案して，信頼性の高い測定値をえた[8),9)]。今回はさらに広いペクレ数の範囲での測定結果を加えて総括的なまとめを行う。また，この結果をいろいろな仮定に基づいた数値計算結果と比較検討して低プラントル流体の伝熱特性を明らかにする。

2. ナトリウムループ

2.1 ナトリウムループの設計方針

一般に液体金属は熱伝達率が極端に大きいために伝熱実験において伝熱面と流体主流の温度差が小さくなり，精度よく熱伝達率を測定することが難しいとされている。とくにナトリウムのようなアルカリ金属の場合には，その物理的および化学的性質に由来する取り扱い上の難しさもあって，装置の設計には精度の向上ばかりでなく安全性の確保に十分な配慮が必要とされる。熱伝達実験の精度を向上させるにはループと試験部の構造によって決まるナトリウムの流れや温度条件を正確に設定するばかりでなく，加熱試験円筒の構造に依存する表面温度や熱流束分布の正確な決定が不可欠である。この節では主に前者の精度向上を安全確保といかに両立させつつ実現するかについて述べる。

(1) 流速の測定法

液体金属の流速（流量率）の測定法としては種々の方法が考察されているが，電磁流量計による測定が一般的である。また，流量率が小さい場合には永久磁石を用いた小型の電磁流量計が用いられる。電磁流量計を精度よく利用するには実際の使用状態で較正することが望ましく，精度が要求される実験では液位変化を利用して較正するための大型タンクをループに備えるのが普通である。あらかじめ較正した流量計をループに設置することによる誤差の原因としては，較正時と，配線，使用環境などが異なることや経年変化が考えられる。本ループでは後に詳しく述べるように，ループの加熱器を利用した較正法を考案し，必要に応じて何時でも較正できる方法を

採用した。

(2)　流れの安定性と流動抵抗の低減化

円筒周りの強制対流伝熱実験で，できるだけ大きいレイノルズ数について実験を行うには大きな流量が必要となる。一定の性能のポンプを用いて主ラインの流量を大きくするには流動抵抗を小さくすればよい。このため主ラインにはバルブを取り付けていない。これによって高流量域でもキャビテーションの発生を避けることができ，かつ安定した流れの条件でループを運転することができる。

(3)　ナトリウムの主流温度変化

予熱ヒータや加熱器を用いて液体を加熱する場合に，出力を一定としてもナトリウム温度には“ゆらぎ”を生じる。また，ループ各部の温度が十分定常になっても外気温度の変化に影響され，ループの温度はドリフトする。ナトリウム温度の“ゆらぎ”は各部を加熱している以上避けられないが，試験部およびその入口近くは断熱構造とすることによりこれを小さくすることができる。また，外気温度の変化によるループ全体の温度のドリフトについては，試験円筒のナトリウム温度変化に対する応答の時定数がドリフトの周期に比較して十分小さければ測定精度上差し支えない。試験部に流入するナトリウム温度を一定にしようとしてPIDにより制御すれば，かえって試験円筒の温度変化に対する時定数と同程度の周期の温度変動を誘発し誤差の原因となる。

(4)　ナトリウムの純度管理法

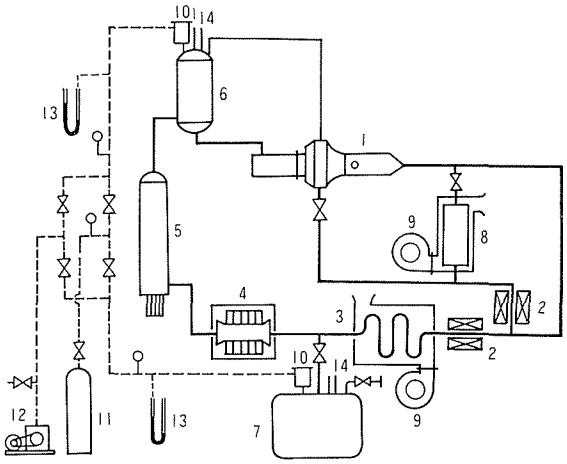
使用したナトリウムは原子炉級のものである。ループ中のナトリウムの純度を保つ方法としては通常コールドトラップやホットトラップが用いられている。ホットトラップについては特定の不純物を除去することが目的となるので，材料の腐蝕試験のような場合を除いてはコールドトラップのみを用いるのが普通である。また，ナトリウム中の酸化物や水素化合物の測定にはプラギングメータがよく用いられるが，流路がそれだけ複雑になることとコールドトラップの性能が十分信頼できるので本ループには設置しなかった。ループ中の不純物量を減らすにはループの気密性と不純物の混入を避けるための日頃の管理が大切で，この目的のためにもループの構成はできるだけ簡素化することが有効である。

(5)　操作運転の簡便さ

ループの定常運転時ばかりでなく，運転開始および終了時にも一人で操作できるように設計し，簡単な操作マニアルによって安全に運転できるようにした。とくにループ内へのナトリウムの充填し過ぎによる事故を防止するため，膨脹タンクとそのガス系は圧力操作時以外は密封する操作マニアルとした。

2.2　ループの構成

図-1にループの構成線図を示す。定常運転時のナトリウムの流路は，電磁ポンプ



図—1　ナトリウムループの構成

4, 流量較正用加熱器 5, 膨脹タンク 6, 試験部 1, 電磁流量計 2 および冷却器 3 を経てポンプに戻る主ラインとコールドトラップ 8 を流れるナトリウム精製ライン, 試験部底部からの試験部ドレンラインおよびドレンタンクへ通じるドレンラインとからなる。

(1) ナトリウム配管系

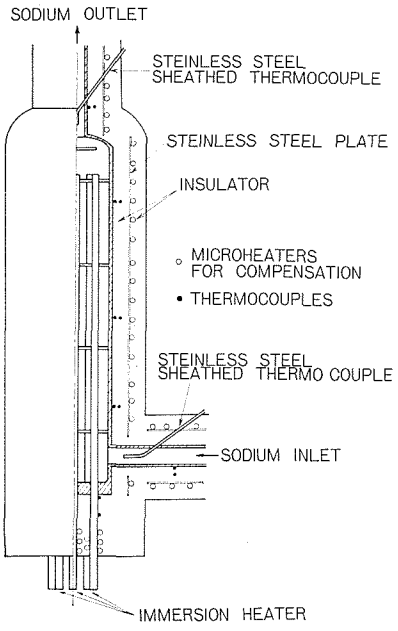
主ラインには SUS27 の 3/2 インチ管, その他の配管には 1 インチ管を用いた。主ラインには流動抵抗を小さくするため弁を用いず, 図-1 に示すように試験部ドレンライン, 精製ラインおよびドレンラインに 1 インチ用弁をそれぞれ 1 個使用している。弁の型式は手動式止弁でベローズシール型, 本体は SUS27 の鋳造である。

(2) 電磁ポンプ

電磁ポンプは広く使用されている三相 AC ファラデ型を採用し, 流量, 揚程はそれぞれ 130 ℓ/min (400°C), 1.0 kg/cm^2 である。

(3) 流量較正用加熱器

この加熱器の出力とそれによるナトリウム温度の上昇を測定することにより流量計の較正を行うものである。また, 較正を行う時以外は加熱器をループ内ナトリウムの加熱に利用している。9 本のイマージョンヒータはそれぞれ最大出力 1 kW で, 加熱器円筒 (外径 6 インチ, 長さ 890 mm) の下部よりナトリウム中に直接挿入する型式である (流量計較正 2.3 (1) 項参照)。また加熱器外壁ならびにイマージョンヒータ端部を断熱条件とするためガードヒータを設けてある。図-2 に流量較正用加熱器の構造を示す。



図—2 加 熱 器

(4) 膨脹タンク

膨脹タンクは縦型円筒形で容量約 15 ℓ である。タンク上面に先端位置が 150 mm 異なる抵抗式液面計を取り付け, 運転時にはこの 2 本の液面計の間に液位がある。液位がこの位置から変動した場合にはランプが点滅する。また, 上面にはガス系配管に接続するベーパトラップが取り付けられている。

(5) ドレンタンク

ドレンタンクも同じく縦型円筒形で容量 112 ℓ, 充填ナトリウム量 80 kg である。ドレンタンクのナトリウム液位を測定するための液面計 2 本が取り付けられ, 同じく液位異常時にはランプが点滅する。上部にナトリウムドレンラインおよびアルゴンガス系配管が取り付けられている。

(6) 冷 却 器

冷却器は 3/2 インチ管にフィンを取り付け水平方向に蛇行させた構造で空気により強制冷却される。総冷却面積は 0.52 m^2 であり, ダンパーにより冷却空気量を調節する。

(7) コールドトラップ

コールドトラップは長さ 600 mm の 4 インチ管にステンレススチール製メッシュを充填した構造である。管外側に縦フィンを取り付け, 空気により強制冷却し, エコノマイザーはない。ナトリウム精製時の流量は 3 ℓ/min 程度で, 運転終了時にはコールドトラップを加熱し, 不純物を

ナトリウムに溶解してドレンタンクに移す。

(8) **予熱・保温・温度測定系**

ループの予熱は主にシースヒータによっている。保温材は成形カポサイトで外側を鋼板で包装している。また，各部の温度は素線外径 0.4ϕ のグラスシース熱電対 (C-A) により測定し，ヒータ電圧調整用スライダー1箇当り1対の熱電対を取り付けている。

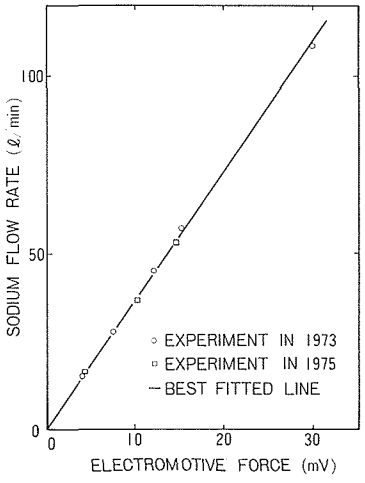
2.3 機器の較正と確認

(1) **流量計較正** (図-2 参照)

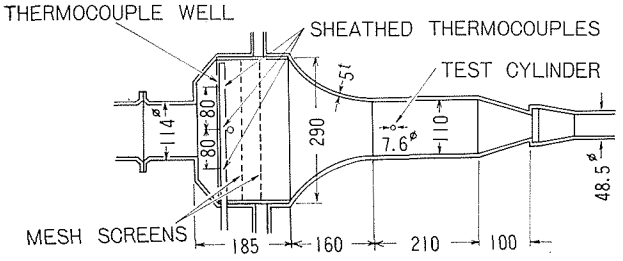
較正法の原理は加熱用電力と，加熱器入口と出口のナトリウム温度の差を測定し，次式により流量率を決定するものである。

$$V = \frac{P}{\rho C_P (t_{out} - t_{in})} \qquad (1)$$

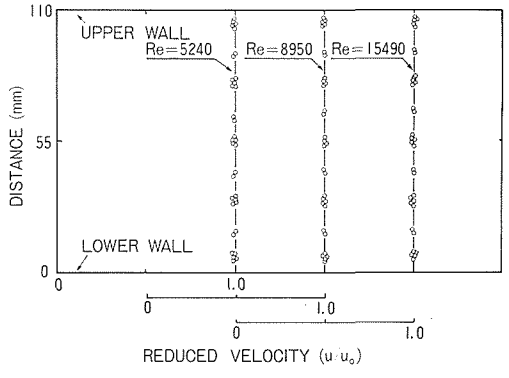
この原理による流量較正法では加熱器表面を完全な断熱構造とすることが，較正の精度を高める必須条件である。このため保温性のよい断熱材を使用することはもちろん，断熱材を貫流する熱量を小さくするため断熱材の厚さ 50 mm の位置にステンレス加熱板を置き，これを加熱器表面温度と等しくすることによって，より断熱条件を完全なものとした。イマージョンヒータの挿入部については，ヒータシースの底板から 60 mm の位置にマイクロヒータを巻き付け，底板と 50 mm 離れたシース表面の温度を等しくすることにより熱伝導による熱損失を極力抑えた。入口と出口のナトリウム温度を測定するため外径 3.2ϕ の接地型シース熱電対 (C-A) を直接管内に 70 mm 挿入した。熱電対の先端より約 40 mm は管の中心軸に沿っている。2本の熱電対は取り付け前に相対誤差が十分小さいことを確認している。ナトリウムは流路途中に設けたバッファプレートにより十分混合され，出口で均一温度となって流出する。較正の精度を高めるため，イマージョンヒータの出力が無い場合の出入口のナトリウム温度を基準として加熱時の出入口温度を決定した。図-3 に較正実験の結果を示す。



図—3　電磁流量計の較正結果



図—4　試　験　部



図—5　速度分布の確認

(2) 試験部流路における一様流の確認

試験部の断面詳細図を図-4に示す。ループに使用するナトリウム量の制限から試験部の形状を単に一様流を得る目的のみから決定できず，図のようにナトリウム流入部で流路は急拡大している。これによる流速の不均一分布を小さくするため，入口近くに設けた整流網（40メッシュ2枚）を調節した。なお，流れの一様性は予想される実験のレイノルズ数範囲について水試験により確認した。図-5は，試験円筒挿入位置における測定結果の一例である。

(3) 試験部入口ナトリウム温度の測定

試験部入口のナトリウム温度を測定するため，整流網の上流側に熱電対用のステンレスパイプ（外径10 mm）を十字型に取り付けている。このパイプの中央および上下左右に80 mm離れた位置にパイプ内側より外径1 mmのシース熱電対（C-A）を表面まで貫通させニクロブレーズによりろう付けした。熱伝達試験結果の整理に用いるナトリウム温度としては，試験円筒の出力が無い状態で円筒シースに埋め込んだ熱電対の温度を基準として前述の6箇所の平均温度を較正して用いた。

(4) ナトリウムの純度管理

ループ各部のガス圧力は常時大気圧以上として，ループ外からの反応性不純物の混入を避けた。また，アルゴンガスも高純度のものを使用することによりナトリウム中の不純物の増加を抑えた。ドレンタンクよりのナトリウムの充填はナトリウム温度120°C程度として，充填ナトリウム中の不純物量をできるだけ少なくした。さらにこのナトリウムをコールドトラップにより精製した。

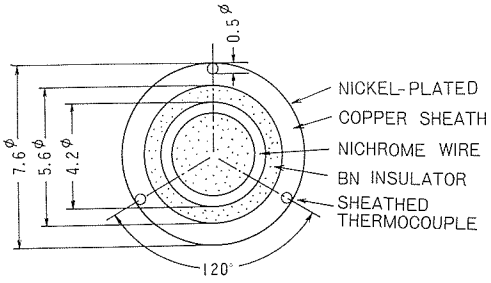
3. 試験円筒

3.1 試験円筒の構造

ナトリウムの熱伝達特性が十分な精度で明らかにされない原因の一つには，伝熱面温度の測定の難しさがある。ナトリウムでは多くの場合熱伝達率が非常に大きくなるため，ナトリウムと加熱体表面との温度差を測定精度上要求される値に保つには非常に大きな熱流束が必要となる。このため，加熱体シースに固定した熱電対の僅かな取り付け位置の不確かさや熱電対を取り付けることによって生じる温度場の歪に起因する測定誤差が，熱伝達率決定の際の大きな誤差の原因となる。

このような事情から，熱伝達率を精度良く測定するには試験円筒の製作精度に特段の注意をはらい，また，構造を工夫する必要がある。本実験では，この観点からシース材として銅を用いることによって，シース材中の温度勾配をできるだけ小さくし，取り付け位置の不確かさによる温度測定の誤差を小さくした。また，熱伝導率の値が銅と同程度な特別な銀ろうを作り，これを熱電対の取り付けに使用することでシース材中の温度場の歪を小さくし，測定精度の向上を計った。

本実験では広い範囲のレイノルズ数域で測定を行うため，直径7.6 mm，15 mmおよび20 mmの3本の試験円筒を製作した。図-6に7.6 mmの円筒断面を示す。発熱体は螺施状のニクロム線で，絶縁材としてチッ化ホウ素（BN）を用いている。シースは銅製で，その表面に外



図—6 試験円筒断面

表—1 試験円筒仕様 Unit [mm]

		H-1	H-2	H-3
Cylinder diameter		7.6	15.0	20.0
Sheath material		Copper		
Thickness of sheath		1.0	2.0	1.0
Plated with		Nickel	Chrome	Nickel
Insulator		BN	MgO	BN
Heating element		Nickrome spiral wire		
Thermocouple	Sheath dia.	0.5	0.65	0.5
	Number	3	4	4

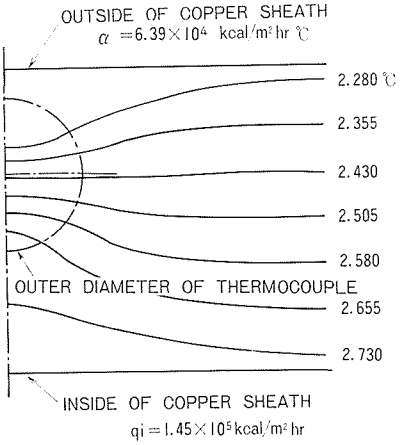
径 0.5 mm のシース熱電対 (C-A) 3 本が埋め込まれている。ほかの 2 つの試験円筒も同様な構造をしておりその仕様は 表-1 に示す通りである。銅シース表面に熱電対を埋め込むには二通りの方法を採用した。すなわち，H-1 と H-3 の試験円筒では最初に銅シース表面に溝を切り熱電対を取り付けた後，スウェッジ法により埋め込んだ。この際熱電対先端には最初に設けた溝が残るので，前述の特製銀ろうによりこの部分を埋めた。また，銅シース表面においても溝と熱電対の間に僅かな隙間が生じることから熱電対先端付近は銀ろうで覆った。一方，H-2 の試験円筒では熱電対より幾分大きな矩形断面の溝を切り，熱電対を直接この溝の底部に銀ろうにより埋め込んだ。この銀ろうの成分は銀 72%，銅 28% で，銀—銅 2 成分系の共晶点成分をなしていて，その融点は 780°C である。この温度は銅の融点に比較して十分低く，銅シースを溶かすことなく熱電対を埋め込むことが可能である。なお，その熱伝導率の値はステップ加熱法[10] により測定した結果，200°C および 300°C でそれぞれ 258 kcal/mh°C および 252 kcal/mh°C であった。

円筒表面は銅および銀のナトリウムに対する溶解度が大きいことから[11]，ニッケルあるいはクロムメッキにより保護した。また，X 線写真により螺旋状ニクロム線のピッチの均一性と偏心の無いことを確認した。試験部の試験円筒取り付け部分のシールにはシリコンゴムとグラファイトガスケットを用いた。これにより円筒の回転が可能であり，測定時に熱電対相互の特性を確認できる。

3.2 測定精度の検討

(1) 温 度 測 定

前述の方法で銅シースに熱電対を取り付けた場合の熱電対周辺に生じる温度場の歪を検討するため，実際の構造を模擬したモデルについて熱伝導の数値計算を行ってみた。この場合境界条件として，銅シース内壁で熱流束一定，銅シース外側では流れ場を非粘性流と仮定した場合の解析に従って熱伝達率を与えた。その計算結果の一例を図-7 に示した。図から明らかなように，銅に比べてその熱伝導率が極めて低い熱電対が存在するため，熱電対近傍の内壁側では熱電対が熱流に対して抵抗となり，銅シースの同一深さに対して幾分高い温度となっている。一方，外壁



図—7 銅シース内の温度場の歪

側では熱電対のため熱流の流入が少なく，幾分低い温度となっていることが観察される。しかしながら，熱電対の感温点が存在する熱電対中心の領域ではこの歪の度合は非常に小さく，熱電対が影響を与えていない領域の表面から同一深さの温度とほぼ同じ値となっている。従って，本実験で用いた方法により熱電対が理想的に取り付けられた場合には，その指示値にはほとんど誤差が生じないことになる。しかし，実際には熱電対の感温点が必ずしも熱電対シース断面の中心にあるとは限らず，熱電対の取り付け位置にも 0.05 mm 程度の不確かさが伴うものと考えねばならず，熱電対の指示値にはこれらの誤差に伴って ±0.1°C 程度のバラツキがあるものと推定される。

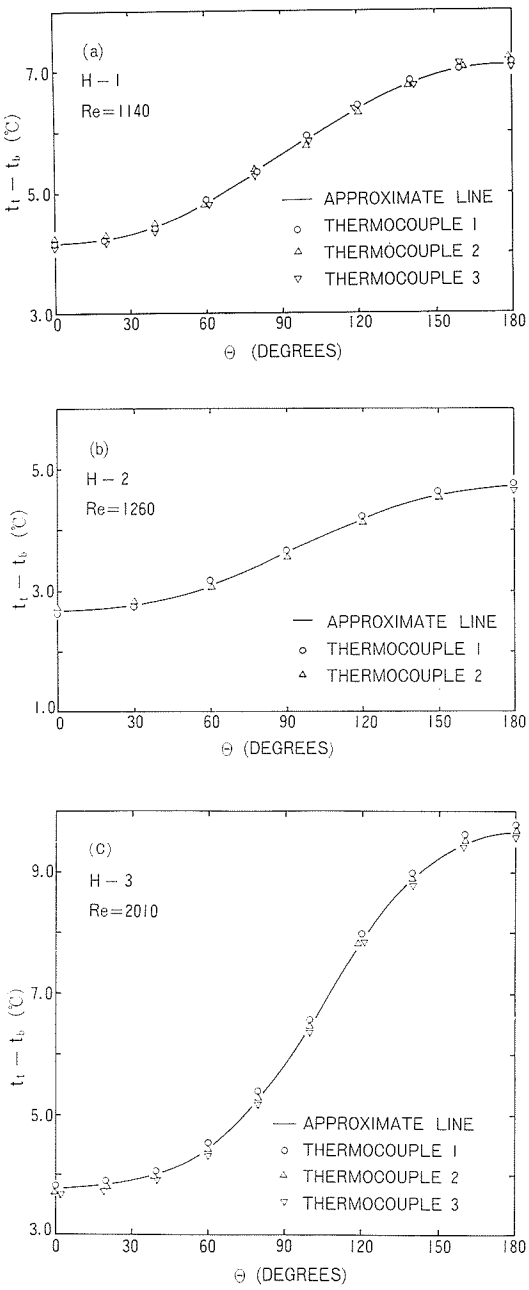
(2) 試験部ダクトの閉そく効果

電磁ポンプの容量の制限から，高いレイノルズ数域での測定を行うためには，試験円筒直径を大きくする必要がある。本実験では，このため H-3 試験円筒は直径 20 mm とした。この場合，試験部ダクトの高さが 110 mm であるため，直径と高さの比は 0.18 となる。従って，円筒直径に比較してダクトの高さは十分高いとはいえず，閉そく効果が実験結果に幾分影響を与える可能性がある。ここでは簡単のため非粘性流れのモデルを用いてその効果を確かめる計算を行った。すなわち，ダクト内に円筒が置かれた場合の非粘性流れ場について熱伝達の近似解析を行い，その影響の程度を検討した。その結果ダクト壁がない場合に比べて熱伝達率は 1.5% 程度大きくなることがわかった。また，プラントル数が異なるため正確な対比はできないが，Perkins ら[12] が水を用いて行った実験では，同じ円筒直径とダクト高さの比に対して円筒前面で熱伝達率が 2% 程度上昇しており，非粘性流の解析と同じ程度の相違を示している。従って，これらの検討結果より本実験においてもダクト壁の拘束効果は小さく，ほぼ無限一様中での測定とみなして良い。

4. 実験結果と考察

4.1 温度分布の測定結果

試験円筒 H-1, H-2 および H-3 に取り付けた熱電対による温度分布の測定例を図-8 (a), (b), (c) に示す。H-1 および H-3 では測定は回転角 20° 毎に行い，H-2 では 30° 毎に行



図—8 試験円筒の温度分布

った。ただし，表-1 に示す熱電対本数のうち取り付け中あるいは測定中に故障を生じ，実際には H-2 では 2 本，H-3 では 3 本で測定が行われた。この熱電対の故障の原因は，熱電対を銀ろうで埋める際の熱電対の焼損と埋め込み不良によるものと考えられる。一方，H-1 ではこの点に注意し試験円筒の製作を行った結果，故障は生じなかった。図-8 (a), (b), (c) から明らかなように，異なる熱電対による測定値の差は小さい。特に，H-1 および H-2 では試験円筒の章で示した計算による銅シース内の温度誤差の範囲にほぼ納まっており，推定された精度で測定が行われていることがわかる。

4.2 熱伝達率の算出

円筒まわりの伝熱特性は全周に対する平均熱伝達率の値に加え，局所熱伝達率の分布について検討することではじめて明らかにされる。空気などの通常流体では等温壁あるいは等熱流束壁などの条件を設定することが比較的容易であるため，局所熱伝達率を簡単に求めることができる。しかし，本実験の試験円筒ではこれらの条件が成立していないため，局所の値を求めること自体が重要な課題となる。以下では局所熱伝達率を求めるための考察について述べる。

試験円筒の絶縁材に用いた窒化ホウ素や酸化マグネシウムの熱伝導率はそれらが焼結体や粉体であるため，測定温度域で最大 2～3 kcal/mh°C 程度である。この値は銅の熱伝導率に比べて，1/100 以下である。従って，絶縁材中では円周方向への熱移動は非常に小さく，これに接触している銅シース内壁では熱流束一定の条件が満たされる。このことを確認するため，試験円筒の銅シースとニクロム線外側の絶縁材からなる領域について熱伝導の数値計算を行った。その際境界条件としては，ニクロム線に接している絶縁材内壁では熱流束一定とし，銅シースの熱電対取り付け位置では測定された温度分布を与え，代表的な測定例について計算を行った。その結果，銅シース内壁では熱流束の不均一性は平均値に対して 1.5% 以内であった。従って，局所熱伝達率を求める目的で銅シース内壁に熱流束一定の条件を仮定することは妥当なものと判断した。

一方，銅シースに取り付けられた熱電対により得られた温度分布は有限フーリエ級数により近似した。図-8 (a), (b), (c) に示した実線はフーリエ級数近似による値である。図から明らかなように十分な精度で測定値を近似可能である。これらの境界条件を設定することにより，銅シース内の温度分布を解析的に求め，円筒の表面温度と表面熱流束を以下のように求めた。

銅シース内の熱伝導方程式および境界条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}=0 \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned}&\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_i}=-\frac{q_i}{\lambda_c}\\&T(r_t,\theta)=T_0+\sum_{n=1}^{N}T_n\cos n\theta\\&\left.\frac{\partial T}{\partial \theta}\right)_{\theta=0,\pi}=0\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式 (3) の条件のもとに式 (2) を解けば

$$T(r,\theta)=T_0-\frac{q_i r_i}{\lambda_c}\ln\frac{r}{r_t}+\sum_{n=1}^{N}T_n\left(\frac{r_t}{r}\right)^n\left(\frac{r^{2n}+r_i^{2n}}{r_t^{2n}+r_i^{2n}}\right)\cos n\theta \tag{4}$$

この方程式を円筒表面まで適用することにより，円筒表面温度と表面熱流束を次式により求めた。

$$T(r_0,\theta)=T_0-\frac{q_i r_i}{\lambda_c}\ln\frac{r_0}{r_t}+\sum_{n=1}^{N}T_n\left(\frac{r_t}{r_0}\right)^n\left(\frac{r_0^{2n}+r_i^{2n}}{r_t^{2n}+r_i^{2n}}\right)\cos n\theta \tag{5}$$

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial r}\Big)_{r=r_0} = \frac{q_i r_i}{r_0} + \lambda_c \sum_{n=1}^{N} n T_n \frac{r_t^n}{r_0^{n+1}} \left(\frac{r_0^{2n} - r_i^{2n}}{r_t^{2n} + r_i^{2n}} \right) \cos n\theta \qquad (6)$$

従って，局所ヌセルト数は次式のように表わされる。

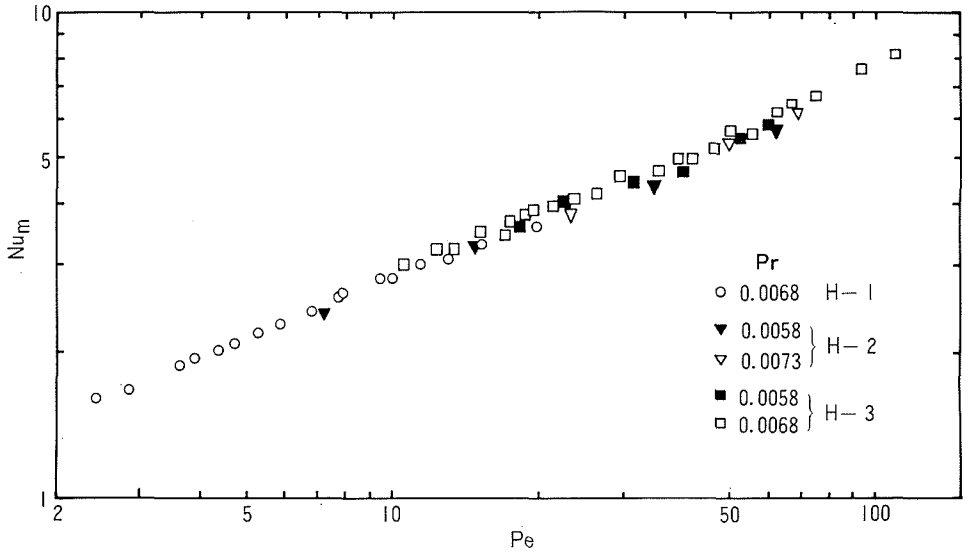
$$Nu_\theta = \frac{2q_i r_i + 2\lambda_c \sum_{n=1}^{N} n T_n \left(\frac{r_t}{r_0} \right)^n \left(\frac{r_0^{2n} - r_i^{2n}}{r_t^{2n} + r_i^{2n}} \right) \cos n\theta}{\left\{ T_0 - \frac{q_i r_i}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_0}{r_t} \right) + \sum_{n=1}^{N} T_n \left(\frac{r_t}{r_0} \right)^n \left(\frac{r_0^{2n} + r_i^{2n}}{r_0^{2n} + r_t^{2n}} \right) \cos n\theta \right\} \lambda_s} \qquad (7)$$

また，平均ヌセルト数は式(8)となる。

$$Nu_m = \frac{2q_i r_i}{\left\{ T_0 - \frac{q_i}{\lambda_c} \ln \left(\frac{r_0}{r_t} \right) \right\} \lambda_s} \qquad (8)$$

4.3 平均熱伝達率の結果

図-9に本実験で得られた平均ヌセルト数を示す。3本の試験円筒による結果は良く一致しているが，実験値相互の厳密な比較に従えば，H-3の試験円筒による結果はH-1やH-2に比較して幾分高い値を示している。この相違は主に試験円筒の構造の違いに由来している。すなわち，いずれの試験円筒についても，銅シース内壁で熱流束一定の条件は成立しているが，銅シース内半径と外半径の比はH-1およびH-2で0.73に対して，H-3では0.9となっている。従って，同一ペクレ数でも銅シース表面の温度分布は異なるため，平均ヌセルト数にも差が表われてくる。



図—9 平均ヌセルト数

4.4 局所熱伝達率の結果

(1) Grosh らの解析との比較

低プラントル数流体の円筒まわりの熱伝達の解析として，非粘性流れ場の仮定のもとに導かれたGroshとCessの報告が知られている。この解析結果と比較することにより，非粘性流れの仮定による熱伝達の解析の可能性を検討する。

H-1およびH-2の測定では，図-10(a)および(b)のように円筒表面温度分布を $T_0' - T_1' \cos\theta$ で近似できる。この表面温度分布の条件に対して，Groshらは次式で与えられる局所および平均

ヌセルト数を導いている。

$$Nu_{\theta P} = 1.128 Pe^{1/2}(1+\cos\theta)^{1/2}\left(\frac{1+\sigma-2\sigma\cos\theta}{1-\sigma\cos\theta}\right) \tag{9}$$

$$Nu_{mP} = 1.015 Pe^{1/2}\left(1+\frac{\sigma}{3}\right) \tag{10}$$

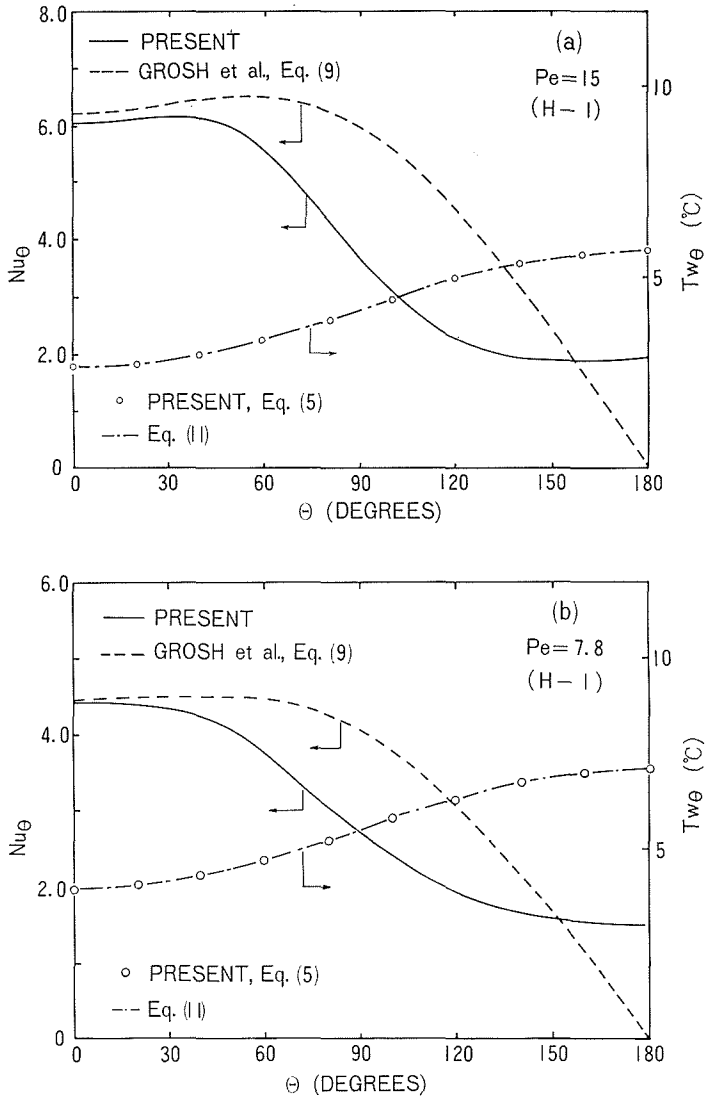
ここで円筒表面温度分布は

$$Tw_\theta = T'_0 - T'_1\cos\theta \tag{11}$$

そして

$$\sigma = T'_1/T'_0 \tag{12}$$

従って，測定された表面温度分布に対して，それぞれ σ を求めることにより，実験値に対応する Grosh らの局所および平均ヌセルト数を式 (9) および (10) から求めることができる。図-10 (a)



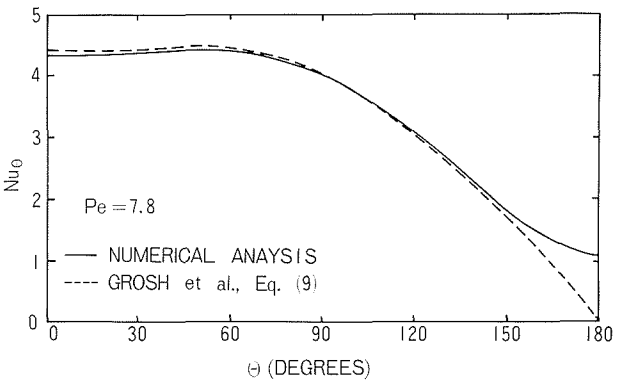
図—10 局所ヌセルト数の比較

および (b) はこのようにして求められた局所ヌセルト数の比較も示した。図-10 (a) に示したペクレ数 15 の場合には，円筒前面で実験値は Grosh らの解に比べて幾分低いが，比較的良い一致を示している。しかし，実験値が 40° 付近から減少するのに対して，解析値は 60° 付近まで幾分増加の傾向を示した後に減少しており，下流では両者の差は大きなものとなっている。図-10 (b) の場合もほぼ同様な傾向を示し，円筒前面を除き両者の差はかなり大きいことがわかる。このような差は非粘性流と粘性流の相違から次のように説明できる。すなわち，円筒前面での理論解析の仮定と実際の流れとの相違は，薄い境界層が存在することであるが，低プラントル数流体であることから，この層の影響は小さく両者が比較的良く一致する結果となった。一方，円筒後方ではは く離域が存在するため，非粘性流と粘性流の流れ場は非常に異なったものとなり，熱伝達率も当然大きな差を生じた。

Hoe ら[13] による水銀を用いた管群の実験では，局所熱伝達率が通常流体（空気，水など）のようにはく離点付近で極小値を取らなかった。Grosh らはこの点に注目して，液体金属の場合にははく離域であっても非粘性流の仮定が大きな誤差なく適用可能であろうとして彼らの解析を導いた。しかし，本実験によって，この領域では差が大きく，さらに，はく離点以前の領域でも無視できない差が生じることが明らかとなった。この差を生じる理由は，はく離点に近づくにつれて速度境界層が非常に厚くなることやはく離域の影響を受けて境界層外縁の速度分布も非粘性流のそれと異なるためと考えられる。これらの比較により，非粘性流れ場を仮定して十分な精度で熱伝達率を推定できる領域は円筒前面のみに限られることがわかる。

(2) 流れ方向の熱伝導効果の検討

Grosh らの解析では，その取り扱いの簡便さから流れ方向の熱伝導効果が無視されていた。この効果はペクレ数は低い領域で影響を及ぼすと考えられ，図-10 (a) および (b) に示された解析と実験値の差異にはこの効果を含む可能性がある。この点についての検討結果を図-11 に示した。この図はペクレ数 7.8 の場合について，実験で得られた表面温度分布を境界条件とし，流れ方向の熱伝導を考慮した数値計算[14] と Grosh らの解を比較したものである。円筒後方で Grosh らの解析の性質から局所ヌセルト数が零になるのに対して，数値計算では有限値を取り，この領域ではかなりの差が生じている。しかし，それ以外の領域では差は非常に小さく，流れ方向の熱伝導は非粘性の流れ場を仮定する限り，低いペクレ数域でもほとんど影響を及ぼさないことが判明した。

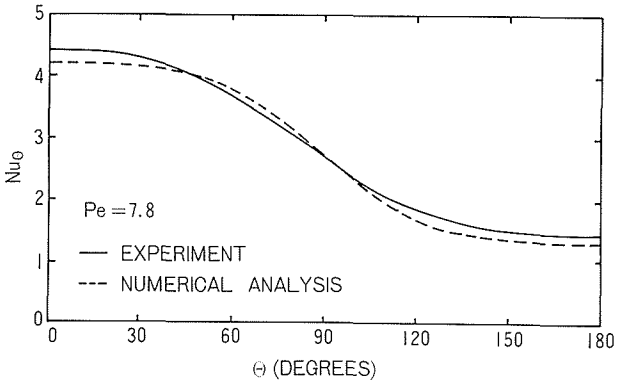


図—11 流れ方向の熱伝導を考慮した数値解と Grosh らの解の比較

(3) 粘性流の数値解との比較

従来報告されている液体金属の実験では，測定者により実験値に大きなバラツキを生じることが多く，その原因が単に装置の構造や測定精度によるばかりでなく，液体金属中の酸化物や混入ガスなどによる場合もあることが報告されている[15]。そのような点を考慮すれば本研究においても十分な信頼性を求めるためには，理論解析などほかの手段との相互比較があれば一層望ましい。

この目的のために粘性流れ場での数値計算を試みた。すなわち，Navie-stokes の方程式を直接差分方程式に変換し，粘性流の流れ場を求め，その結果を用いて円筒まわりのエネルギ方程式を同様に差分方程式により解き，局所ヌセルト数を求めた[14]。その際の境界条件として実測された円筒表面温度を用いた。

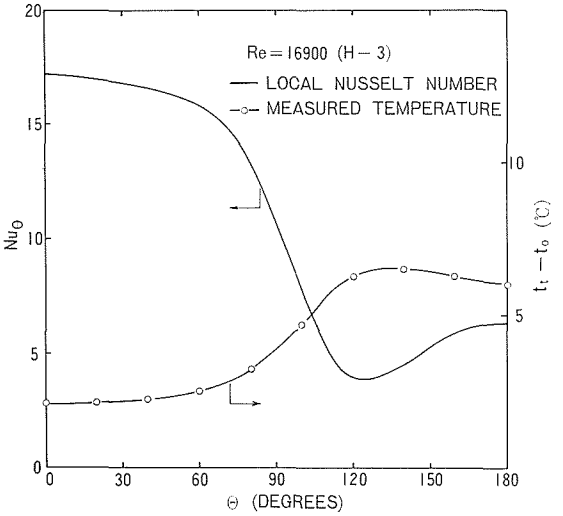


図—12 粘性流での数値解と実験値の比較

図-12 にペクレ数 7.8 での数値解と実験値の比較を示す。実験値は円筒前方と後方で幾分高い値を示しているが，全体に一致は良い。なお，生じた差異については，円筒前面では主に実験誤差によるものと思われる。すなわち，実験では円筒前面の温度差が最も小さく，シース内の温度降下が大きいため誤差が相対的に大きくなる。このことは，同じ流れ場による空気を想定した数値計算結果が円筒前面で空気の実験値[16]と良く一致することからも確認できた。一方，円筒後方の差異については，実際の円筒後方の流れが非常に複雑であるのに対して，数値計算ではその特性を十分把握しきれない面もあり，計算値の方により多くの誤差が存在しているものと思われる。いずれにしろ，この程度の相違は，現時点でナトリウムの伝熱特性を議論する上で問題となるような量ではない。

(4) 高いペクレ数での局所熱伝達率

図-10 (a) および (b) では比較的低いペクレ数域での局所ヌセルト数を示したが，図-13 に H-3 の試験円筒で得られた本実験で一番高いペクレ数での局所ヌセルト数および測定温度を示す。図から明らかなように，この例では局所ヌセルト数はは く離域で極小値を示し，円筒後方で増大する傾向が見られる。このことは測定された温度分布からも推定可能であり，前方よどみ点から 130° 付近で最大値を取った後減少していて，局所ヌセルト数が極小値を取ることを示している。Bloor[17] の空気による円筒後方の流れ場の観察結果によれば，レイノルズ数 10^4 以上の場では円筒後方に形成されている逆流域の長さは徐々に短くなり，円筒背面付近の流れはすでに乱流的様相を示している。従って，これらの効果によりナトリウムの場合にも，円筒後方で熱伝達率が増大したと考えられる。すなわち，空気などの通常流体と同様レイノルズ数が高くなるにつれて，ナトリウムにおいてもはく離域の流れの影響により，円筒後方で熱伝達率の増大を示すことが明らかとなった。このことは先に述べた Grosh らの解析で円筒後方でも非粘性流れの仮定を適用できるとする推論が成立しないことを明瞭に示すものである。



図—13 高ペクレ数 (Pe=109) での局所ヌセルト数

5. むすび

本報告では，ナトリウム流の熱伝達に関し，最も基本的な単相の境界層流れの場を取り扱うこととし，その一つとして円筒を直交する流れの場についての測定と数値解析を行った。実験では測定精度の向上に格段の注意をはらい，従来は信頼性の十分でなかったこの系の正確な測定結果を得た。その結果，非粘性流れ場の仮定に基づく近似理論の適用性は広いものではなく，円筒前面のわずかな領域に限られることが明らかになった。とくに円筒をよぎる流れの場では境界層のはく離を伴うため，はく離点では速度境界層が厚くなり，またその影響で主流場自体に変化が表われて，熱伝達率はさらに大幅に減少する。また，後流の乱流遷移が円筒背面に及ぶレイノルズ数に対しては，非金属流体と同様なヌセルト数の増加のあることも明らかとなった。

従来，この分野では実用的な実験が主体となっていて，基礎工学的な検討に欠ける面があり，それがまた折角得られた測定値の汎用性を損っていたきらいがある。しかし，各国において幾台ものFBRが稼動し始めた現時点では正確な熱設計や安全解析のために，この問題の根本的な理解がいよいよ大切になってきている。

FBR炉心では，定常運転時においては沸騰は起らぬよう計画されている。しかし，燃料被覆管表面は高熱流束を担っているので，負荷変動時などに局所的にボイドの発生することが十分予想される。軽水炉におけるボイドの発生は反応度の低下をもたらし，炉に自己制御性を与えることはよく知られている。しかし，FBRではナトリウムボイドの発生が核的には出力逸走の方向となる危険がある。従ってナトリウム沸騰現象の解明はFBRの安全性の確保のための重要な研究課題となっている。一方，熱エネルギー有効利用の立場から複合ランキンサイクルの計画が再び注目されている。そのための高温側熱媒体としてのアルカリ金属の利用も有望なものの一つである。この目的のためには中間熱交換器におけるアルカリ金属の凝縮の問題が大切な研究対象となろう。これらの例が示すように液体金属熱伝達の研究は相変化を含めて広範にわたっており，今後解明されるべき多くの問題が残されている。

この研究には実験で池崎英二，桑山有紀，長谷部友二および大谷順一，数値解析では笠原文雄および吉田範行の諸君が卒業研究として参加した。一応の成果を収め得たのは，これら学生諸君の努力に負うところが大きい。記して謝意を表する次第である。また，本研究に用いた設備には文部省科学研究費（昭和47年一般研究A 課題番号74020）の補助を得た。

記号

a ： 温度伝導率

C_P ： 定圧比熱

Nu_m ： 平均マセルト数，$\dfrac{2q_0r_0}{\left(\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_0^{\pi} Tw_\theta d\theta\right)\lambda_S}$

Nu_θ ： 局所マセルト数，$\dfrac{2q_\theta r_0}{Tw_\theta\lambda_S}$

P ： 加熱器熱入力

Pe ： ペクレ数，$Re\cdot Pr$

Pr ： プラントル数，$\dfrac{\nu}{a}$

q_i ： 銅シース内面での平均熱流束

q_0 ： 銅シース外面での平均熱流束

q_θ ： 銅シース外面での局所熱流束

Re ： レイノルズ数，$\dfrac{2u_0r_0}{\nu}$

r ： 半径

r_i ： 銅シース内半径

r_0 ： 銅シース外半径

r_t ： 熱電対取り付け半径

T ： 温度差，$t-t_b$

T_0, T_n : 式(3)で定義される温度差
T_0', T_1' : 式(11)で定義される温度差
$T w_\theta$: 円筒表面での温度差
t : 温　　度
t_b : 近寄り流れ温度
t_{in} : 加熱器入口温度
t_{out} : 加熱器出口温度
t_t : 熱電対測定温度
u_0 : 近寄り速度
V : 流　量　率
α : 熱伝達率
θ : 前方よどみ点からの角度
λ_c : 銅の熱伝導率
λ_s : ナトリウムの熱伝導率
ν : 動粘性係数
ρ : 密　　度

文　　献

1) Martinelli, R. C.: Trans. ASME, **69** (1947), 947.
2) Lyon, R. N.: Chem. Eng. Progr. **47** (1951), 75.
3) Субботин, В. И. идр.: Атомная Энергия **13** (1962), 380.
4) Dwyer, O. E.: At. Energy Rev., **4** (1966), 3.
5) 黒柳利之, 石黒亮二, 落合政昭, 古川和男: 日本機械学会論文集, **38** (昭47), 2897.
6) Grosh, R. J. and Cess, R. D.: Trans. ASME, **80** (1958), 667.
7) Andreevskii, A. A.: Sov. J. At. Energy, **7** (1961), 745.
8) 石黒亮二, 熊田俊明, 杉山憲一郎, 池崎英二: 日本原子力学会誌, **17** (1975), 250.
9) 石黒亮二, 杉山憲一郎, 熊田俊明: 日本原子力学会誌, **19** (1977), 49.
10) Kobayasi, K. and Kumada, T.: Technol. Rep. Tohoku Univ., **33** (1968), 169.
11) 石森富太郎編: 原子炉工学講座 5 (熱工学・構造設計), (昭47), 104, 培風館.
12) Perkins, H. C. and Leppert, G.: Int. J. Heat Mass Transfer, **7** (1964), 143.
13) Hoe, R. J., Dropkin, D. and Dwyer, O. E.: Trans. ASME, **79** (1957), 899.
14) 杉山憲一郎, 石黒亮二: 日本機械学会講演論文集, **772-2** (昭52-8), 31.
15) 佐野川好母: 伝熱工学の進展 I (昭48), 109, 養賢堂.
16) Krall, K. M. and Eckert, E. R. G.: Trans. ASME, Ser. C, **95** (1973), 273.
17) Bloor, M. S.: J. Fluid Mech., **19** (1964), 290.