

材料試験炉用炉心要素の流動伝熱実験

Flow and Heat Transfer Experiments of Fuel and Control Elements for Japan Materials Testing Reactor Core

守 田 孝 博* 内ヶ崎 儀 一 郎*
Takahiro Morita Giichirō Uchigasaki

桜 間 直 樹** 山 内 淳 男**
Naoki Sakurama Atsuo Yamanouchi

要 旨

材料試験炉炉心部は高中性子束・高出力密度のため炉心熱水力設計は限界設計を要求される。熱除去を容易にするため薄い燃料板を高流速の水で冷却するので、特に炉心要素内の流速分布、圧力損失、燃料板の振動、バーンアウト、冷却水への熱伝達などが問題となる。詳細設計に先だてこれらの特性を模擬要素および模擬試片を用いて実験的に求めた結果と、その炉心設計への適用について述べる。

1. 緒 言

材料試験炉(JMTR)は、動力用原子炉の燃料物質および構造材料などの中性子照射下の諸特性を究明することを目的に日本原子力研究所に建設中の原子炉であり、昭和43年3月臨界、昭和43年9月までに全出力連続運転が行なわれて、日本原子力研究所に引き渡されることが予定されている。この原子炉には炉心部およびその周辺に数多くのループ、リグ、キャプセル、水力ラビットなどの照射設備がそう入されて燃料、材料などの中性子照射に供せられる。このような原子炉の目的から、JMTR炉心部はつぎのような設計上の特色を持つ。

(1) 非常に高い中性子束をもつこと。すなわちJMTRの中性子照射は動力用原子炉の構成物がその寿命中に受けると同量の中性子を短時間に照射しようとするものであるから、その要求中性子束は当然相当高いものになる。このために炉心部の出力密度が他の原子炉に比べ異常に高く、BWRの10~20倍になるので、炉心部の熱除去がむずかしくなる。

(2) 炉心部の内蔵反応度が大きく、かつ制御棒用のスペースが照射設備の関係から限定されているので制御棒1本当たりの反応度が大きいこと、しかもこれに伴う出力分布のひずみが小さいことが要求される。

上記(1)の要求をみたすために、JMTRでは図1に示すように、0.5mm厚のウラン-アルミ合金を0.38mm厚のアルミニウムで被覆した非常に薄い燃料板19枚を、冷却チャンネルと隣り合うように並べて1組とした燃料要素を用いている。これは伝熱面積をふやして燃料部の温度上昇を少なくする考慮からである。またチャンネルにおける冷却水の流速を10m/s程度に高くして燃料板表面における温度上昇を低くおさえている。さらに燃料板の諸条件を緩和するために炉心部および燃料要素内の出力分布、流速分布はできるだけ均一なことが必要である。

上記(2)の要求をみたすために、JMTRでは燃料フォロワおよびベリリウム反射体フォロワをもつ特殊な制御要素を用いることになる。これらはスクラムの衝撃に耐えるとともに、燃料フォロワは上記(1)の要求をみたさなければならない。

本報ではこのようにきびしい条件をもつ炉心要素(燃料要素および制御要素)について詳細設計に先だて必要と考えられる下記の

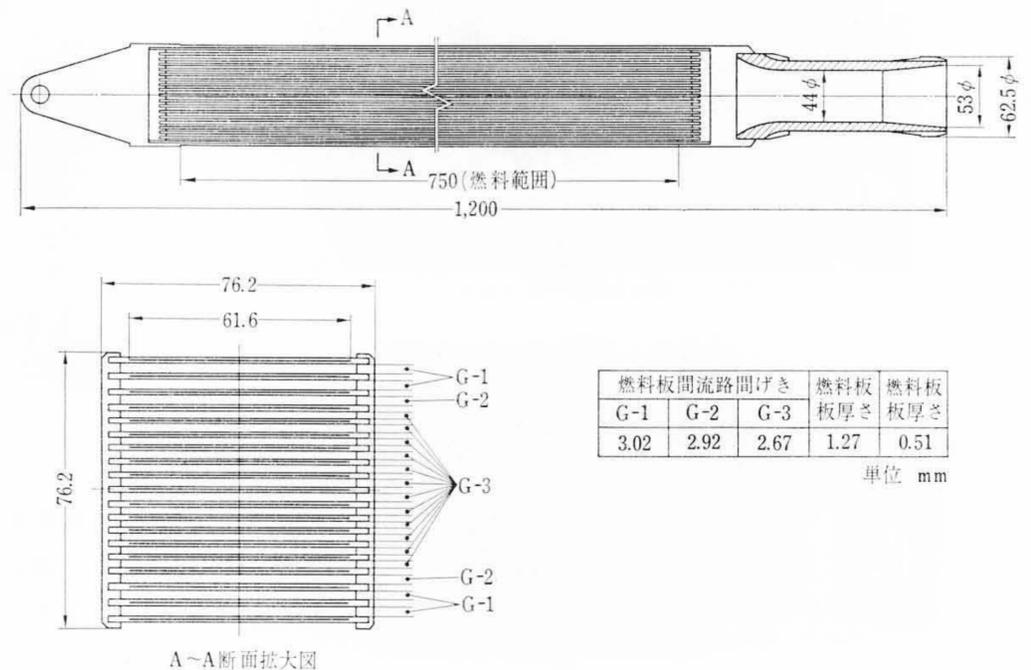


図1 燃 料 要 素

特性実験を行なった結果、およびこれらのJMTR炉心設計への適用について述べる。

- (1) 燃料要素および制御要素の流動試験
(要素内流量分布、燃料板の振動、圧力損失)
- (2) 燃料板チャンネルの伝熱試験
(バーンアウトおよび熱伝達係数)

2. 流 動 試 験

2.1 流 動 試 験 装 置

流動試験装置は実寸大の模擬燃料要素および模擬燃料フォロワつき制御要素の流動試験、すなわち流速分布、圧力損失、振動特性などを測定するもので、試験部に最大15m/s程度の流速を与えることができる。その系統図を図2に示す。

試験部の外筒としてはその中に納められた試験要素の燃料部が外部から肉眼で観察できる図3のようなアクリル樹脂製のものを使用する。試験要素は材料試験炉の燃料要素および制御要素を実物大の寸法・形状に模擬したアルミ製のものである。

燃料板間の冷却水流速は熱伝達係数やバーンアウトに影響を及ぼすので、なるべく出力に応じた流速になるようにして、すべての燃料板を十分に冷却することが望ましい。図4は中性子束分布の最も不均一な燃料要素(炉心隅で2辺をベリリウム反射体に接しているもの)の出力分布であるが、要素の隅で最高の出力分布を示している。

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所日立研究所

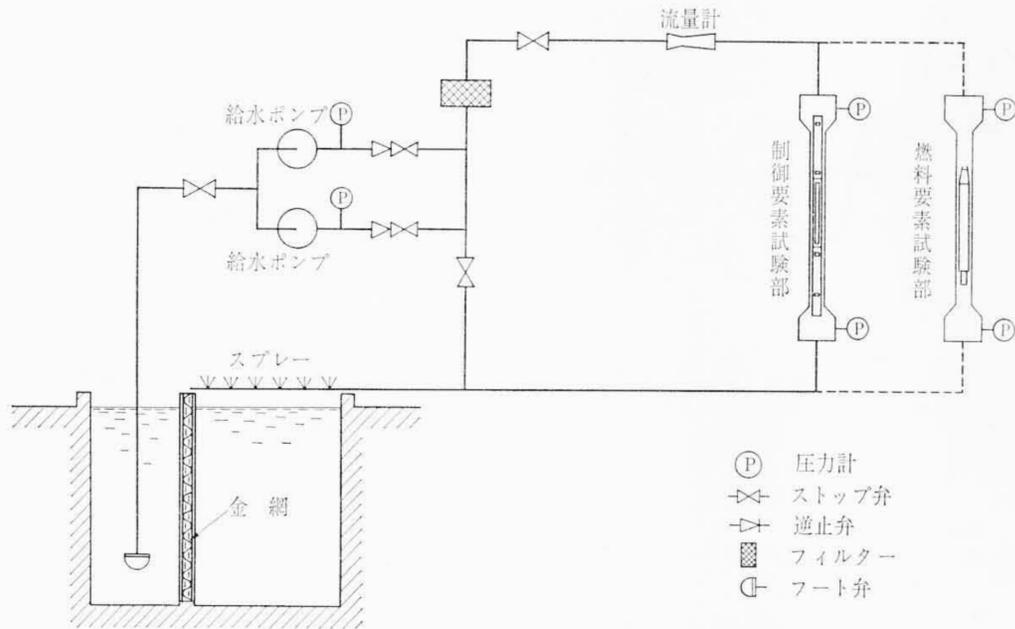


図2 流動試験回路系統図

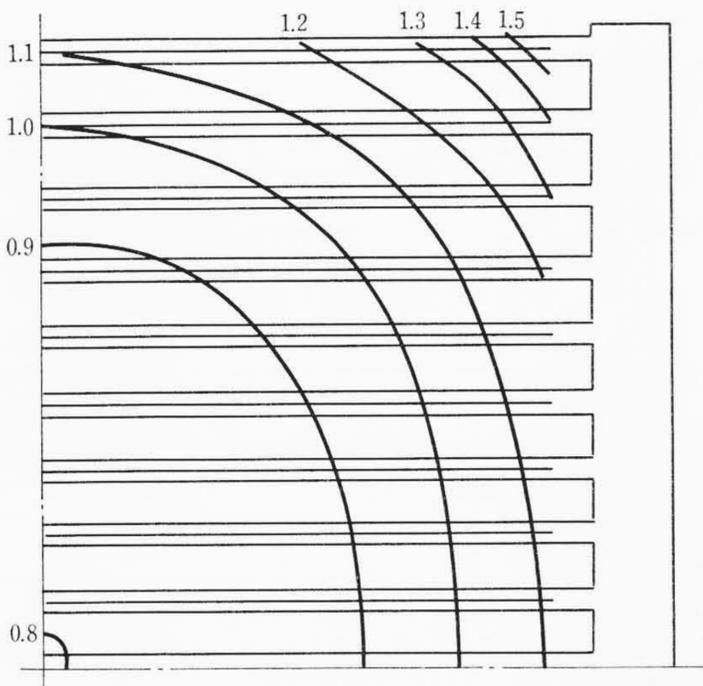


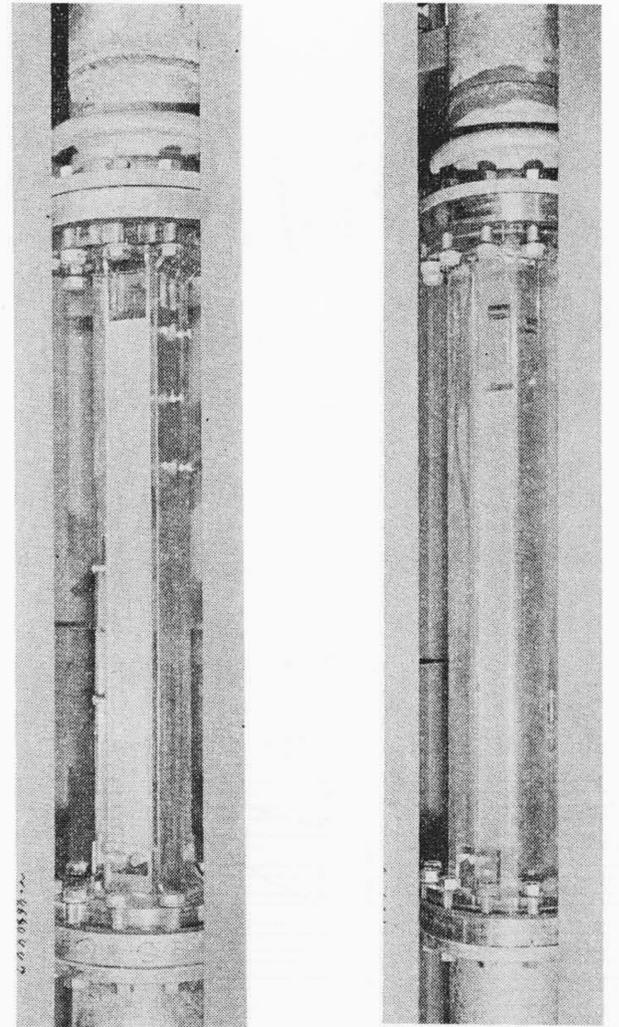
図4 燃料要素内出力分布

一方、流速分布は燃料要素の下プラグ部で中央部付近に流れが集中する構造になっているので、燃料板部でも周辺部の流速が落ちる傾向にある。そのため燃料板間隔を不等間隔とし、外側を広く中央をやや狭くして流速分布を改善している。このような不等間隔燃料要素と等間隔燃料要素、制御要素の燃料フォロワの3種について流速分布を実測した。

2.2 流速分布の測定

幅3mm ならずの狭い複雑な流路構造内で平均10m/s以上の水の流速分布を測定することは技術的にきわめて困難な問題であり、今まで測定例も少ないので、その測定技術を確立するには多くの工夫を要した。測定方法について種々の検討を行なった結果、本実験では円筒ピトー管を燃料部下端から7mmのところを設定し、その流速分布から要素内の流速分布を推定する方法を採用した。小形流動実験装置における流線測定の結果、燃料板直下では流線がほとんど乱されていないことをあらかじめ確認してあるので、この推定による誤差は少ないものと考えられる。測定は円筒ピトー管により全圧を測定し、静圧は出口外筒の壁につけた圧力タップからとって測定した。円筒ピトー管の走査方向は燃料板に直角な方向とし、中心線からの距離が異なる位置2箇所を走査した。図5にその取り付け写真を示す。

測定結果の一例を図6に、またそれらを整理して作成した要素内流速分布を図7に示す。なお図中の数値は各燃料板間ギャップ厚さ



(a) 燃料要素 (b) 制御要素

図3 流動試験試験部

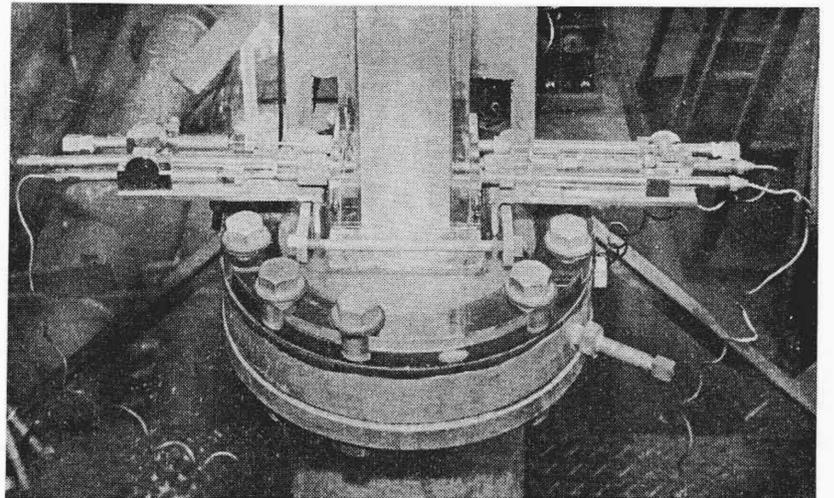


図5 円筒ピトー管取り付け図

方向のピーク値を採ったものである。(a)の場合は、等流速分布はほぼ同心円状で周辺部の流速が著しく低下しており、下部のノズルにおける縮流の影響が現われたものとみることができる。(b)の場合には外側で流速が大きく側板寄り周辺部の流速もあまり低下しておらず不等間隔の効果がよく現われている。(c)では側板付近でやや流速は小さいがほぼ様な分布とみることができる。このように燃料要素としては燃料板不等間隔のほうが等間隔よりも望ましく、制御要素では等間隔でよいことを確かめ、この結果を設計に採り入れた。また測定精度は相対値としては予想以上に精密な値が得られ、再現性もよく、燃料板間隔の製作誤差を推定することも可能なほどであった。

2.3 圧力損失の測定

圧力損失は外筒の上下に設けた圧力測定タップにより測定された。

各要素についての圧力損失実測結果を図8に示す。ここで燃料板間平均流速とはオリフィスによって求めた流量を燃料部の流路断面積で除した値、すなわち要素内平均流速を意味する。これらの実験結果から実際の炉心内における圧力損失の値を推定するときは、出

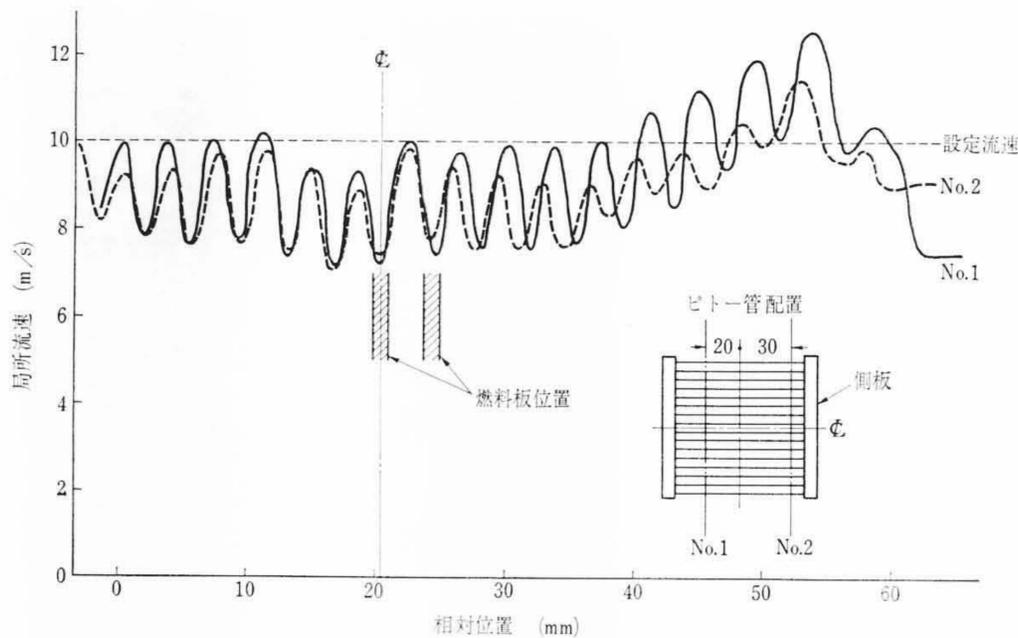


図6 不等間隔燃料要素内冷却水流速分布

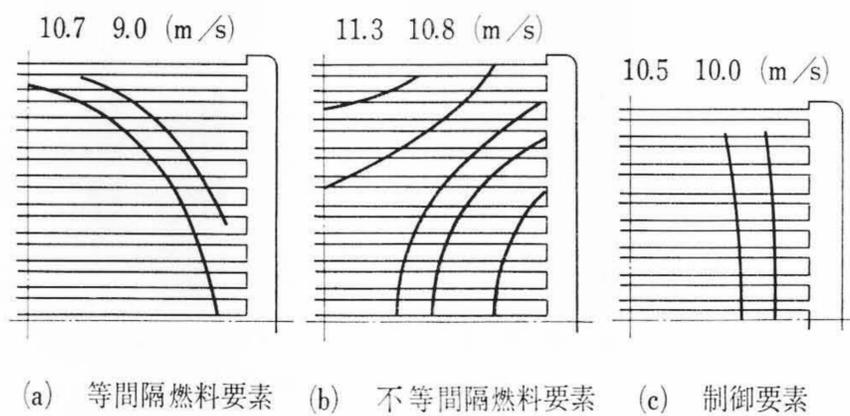


図7 燃料要素と制御要素の要素内冷却水流速分布(ピーク値)

入口の拡大・縮小率の相違, 要素間の混流, バイパス流などの影響を考慮しなければならない。

2.4 振動試験

非常に薄い燃料板に高流速の冷却材を流すことに対する設計限界を確かめるために燃料板の振動実験を行なった。

まずヤング率の小さいアクリル板を用いて予備実験を行なった。図9はアクリル板にひずみゲージをはり, 流速をかえた場合のひずみ計の出力を示したものである。流速4.5 m/sで限界流速に達し, それ以上では振動は発散し, さらに5.4 m/sで遷移流速に達し, 発散をやめて一定振動数の振動に移る。これらの振動は二次元の線形振動方程式によってよく説明できる。振動が発散する限界流速 v_{CF} は次の式で表わされる。

$$v_{CF} = \left(\frac{15gEd^3h}{\rho_F w^4 (1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

- ここで, g : 重力の加速度
- E : 板のヤング率
- d : 板の厚さ
- w : 板の幅
- ν : 板のポアソン比
- h : 流路間げき
- ρ_F : 流体密度

である。

模擬燃料要素, 模擬制御要素の燃料板にひずみゲージをはり, 流速最大 15 m/s までの振動を測定したが, 記録されたのは不規則な雑音振動のみで, モードによる周期的な振動や異常な湾曲はなかった。なお上述の2次元的に取り扱った理論によれば燃料要素で約 19 m/s, 制御要素で約 29 m/s までは振動が起こらないことになる。装置の関係でその限界値まで実際に振動状態を確かめることはできなかったが少なくとも 15 m/s までは安全であることが実験で確認

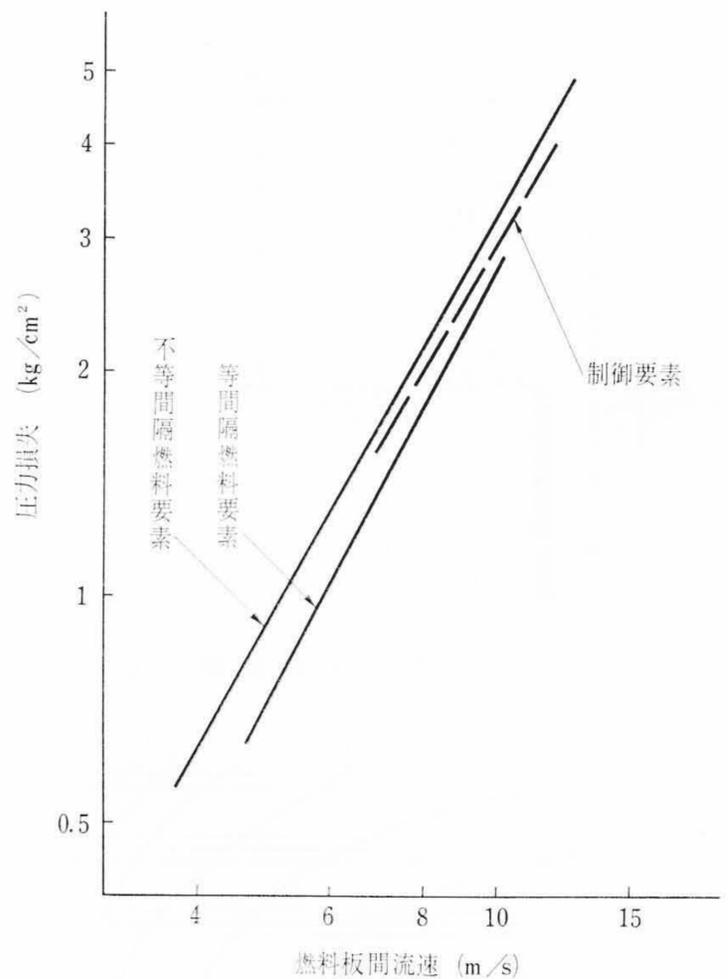


図8 燃料要素と制御要素の圧力損失

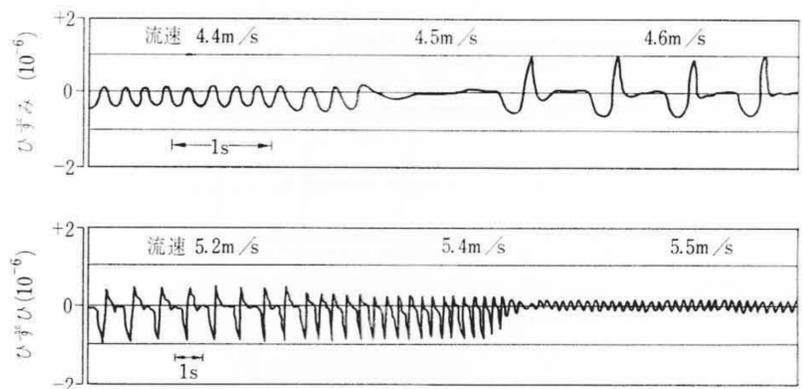


図9 限界流速近傍における燃料板の振動

された。

3. 伝熱試験

3.1 伝熱試験装置

伝熱試験装置はバーンアウトおよび熱伝達係数の実験を行なうため実際の燃料板間流路に近い条件の試験流路を持ち, 試験部に最大 15 m/s の冷却水流速と電流最大 6,000 A を与える必要がある。

図10は伝熱試験回路の系統図を示したものである。

試験部の流路間げきは実際と等しく 2.7 mm, 幅は最大 66 mm, 長さは最大 300 mm で抵抗熱によって加熱される。

バーンアウト検出は温度の急変による抵抗値の急激な変化をブリッジで検出するものであるが, これにより求めたバーンアウト熱流束を, 物理的破壊を伴うバーンアウト熱流束と比較するため, 実際に試片を焼き切る実験も行なった。

3.2 バーンアウト熱流束の測定

本実験に用いた試験部を図11に示す。流路は長方形で, 流路間げきは実際と等しく 2.74 mm, 流路幅は約 20 mm である。縦方向発熱分布を均一発熱量分布としたが, 入口からバーンアウト点までの距離を実際と近くするため, 試験片の発熱長を実際の燃料要素の発熱長 750 mm の半分に近い 300 mm とした。また側板部のガンマ発熱を模擬するため短辺の肉厚が 1 mm の試片 A と 0.4 mm の試片 B とを作った (JMTR の場合は試片 B に相当する)。

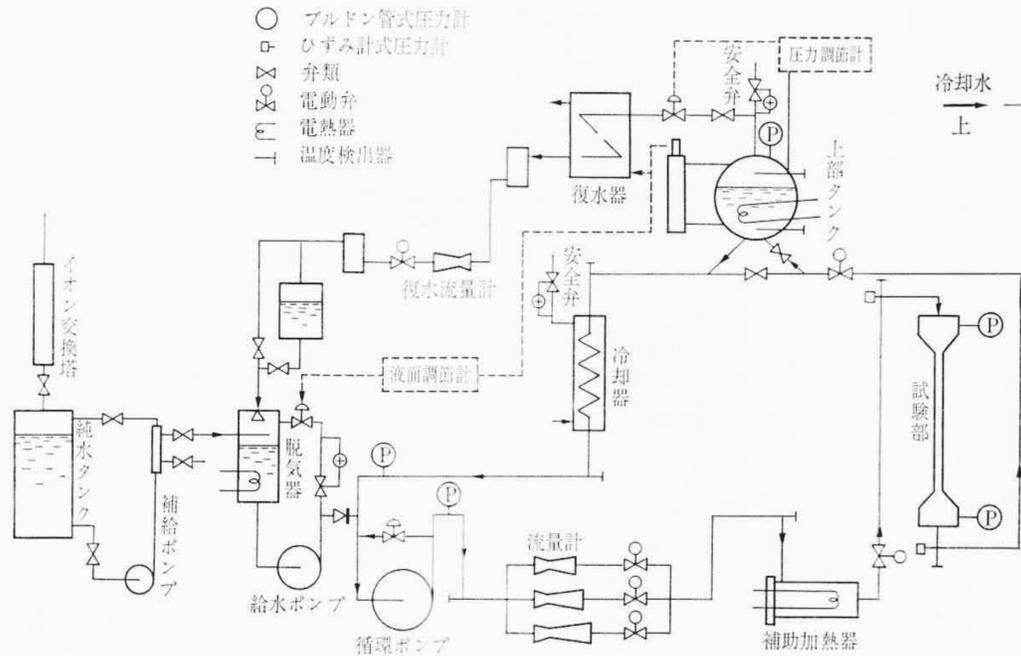


図10 伝熱試験回路系統図

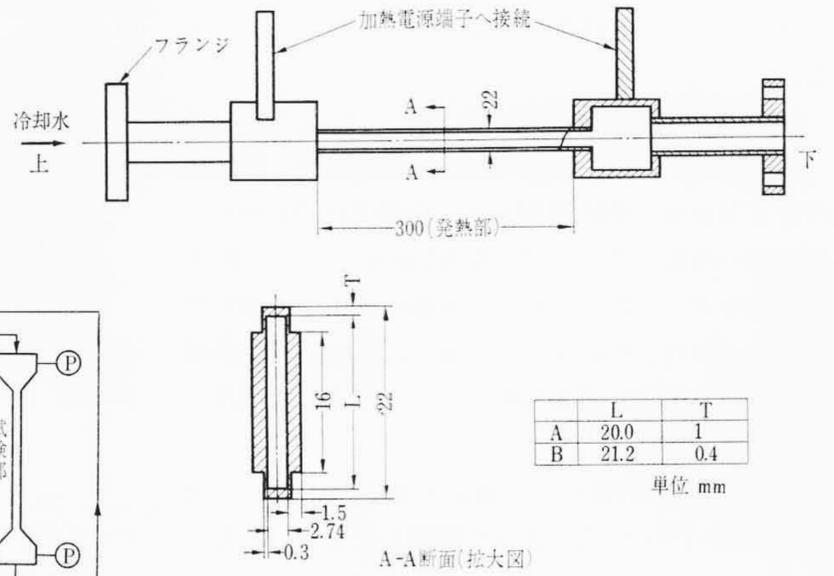


図11 パーンアウト試験試験部

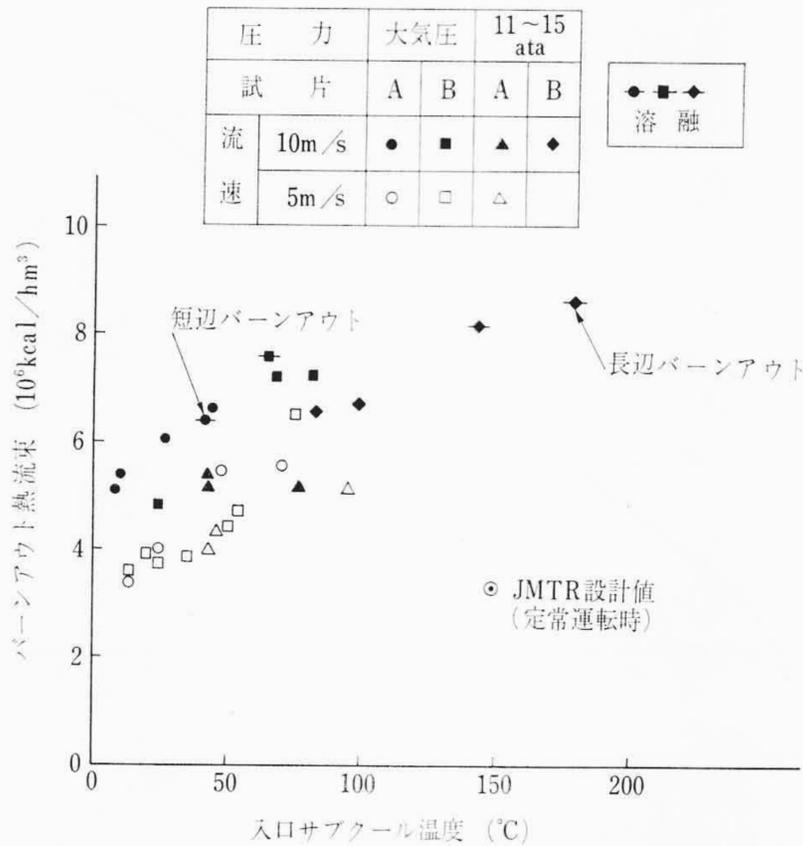


図12 パーンアウト熱流束と入口サブクールとの関係

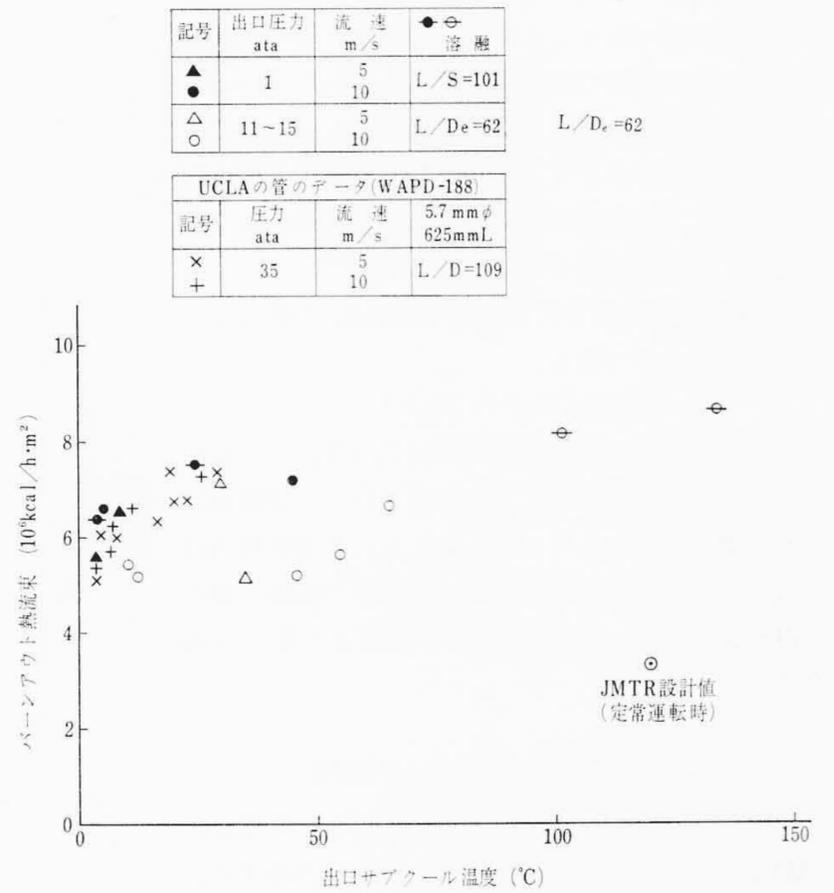
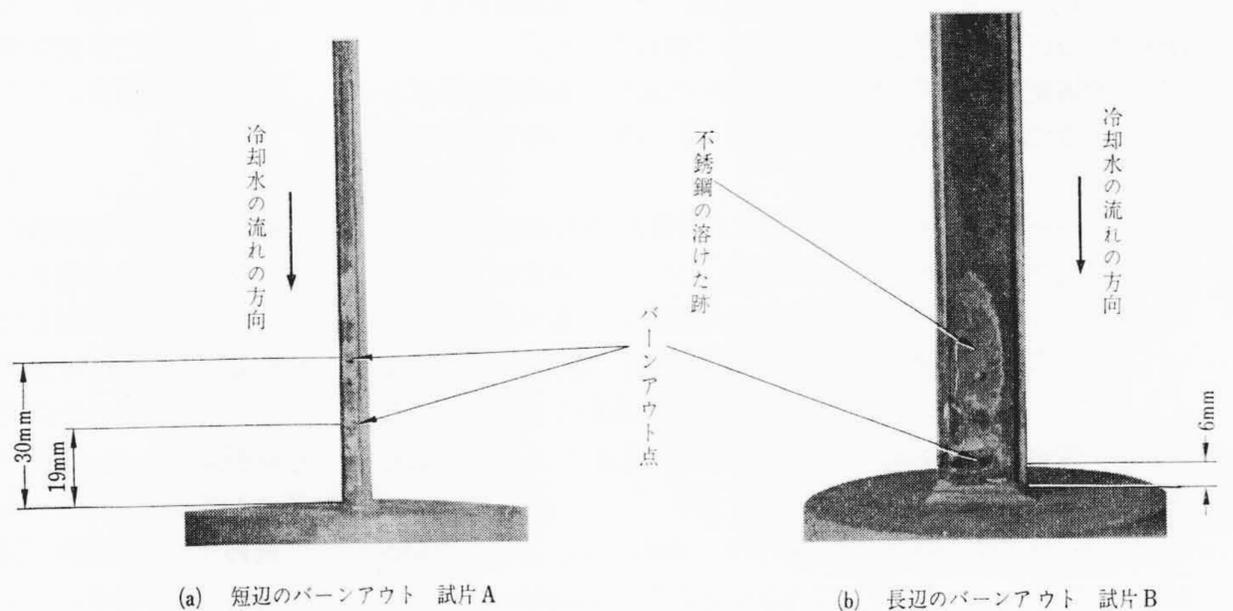


図13 パーンアウト熱流束と出口サブクールとの関係

試験結果を冷却水入口および出口サブクールとバーンアウト熱流束の関係として整理したのが図12, 13である。

流速の効果は、冷却水の入口サブクールが等しいとき流速が速いほどバーンアウト熱流束はやや高くなるが、出口サブクールで結果を整理してみると出口サブクールが等しいとき流速が変わってもバーンアウト熱流束はほとんど影響をうけない。圧力の効果は図13に示したように、出口サブクールの小さいところで、10~14 atgでのバーンアウト熱流束が常圧のそれよりやや低くなっている。また図14の写真に示すようにバーンアウトはいずれも流路出口付近で生じており、ガンマ加熱の大きい試片Aでは短辺でバーンアウトを生じやすく、また試片Bでは長辺でバーンアウトを生じやすい。Levy氏ら⁽⁴⁾は長辺と短辺とが同じ肉厚の試験片で実験



(a) 短辺のバーンアウト 試片A

(b) 長辺のバーンアウト 試片B

図14 試片バーンアウトの様子

して、短辺でバーンアウトを生じたと報告している。JMTRでは短辺でのガンマ加熱が比較的小さいので燃料要素の側板よりも燃料板

のバーンアウトのほうきびしいといふことができる。

3.3 熱伝達係数の測定

本実験に用いた試験部の流路は長方形で、流路間げき 2.74 mm, 流路幅 66 mm, 発熱長は 200 mm, 加熱板の肉厚は長辺短辺とも 0.5 mm である。熱伝達係数を求める際に必要な伝熱面表面温度の測定方法を種々検討した結果、本実験では間接的に発熱板裏面温度を測定し適当な校正を行なう方法を採用した。

図 15 は実験結果を入口効果の補正をしてから次の Sieder-Tate の式によって整理したものである。

$$Nu_b = 0.027 \cdot Re_b^{0.8} \cdot Pr_b^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \dots\dots\dots (2)$$

ここで下添字の b は冷却水の平均温度における物性値から計算することを示し、 w は伝熱表面温度における物性値であることを示す。図中の符号は伝熱部入口から等間隔の測温点位置 (入口から $T_1 \sim T_5$) における値であることを示す。伝熱部入口における熱伝達係数 h は大きく、入口からの距離が大きくなるにつれて入口効果がなくなり、 h はしだいに小さくなり、一定値に近づいている。

図 16 は実験結果を次の修正 Colburn の式によって整理したものである。

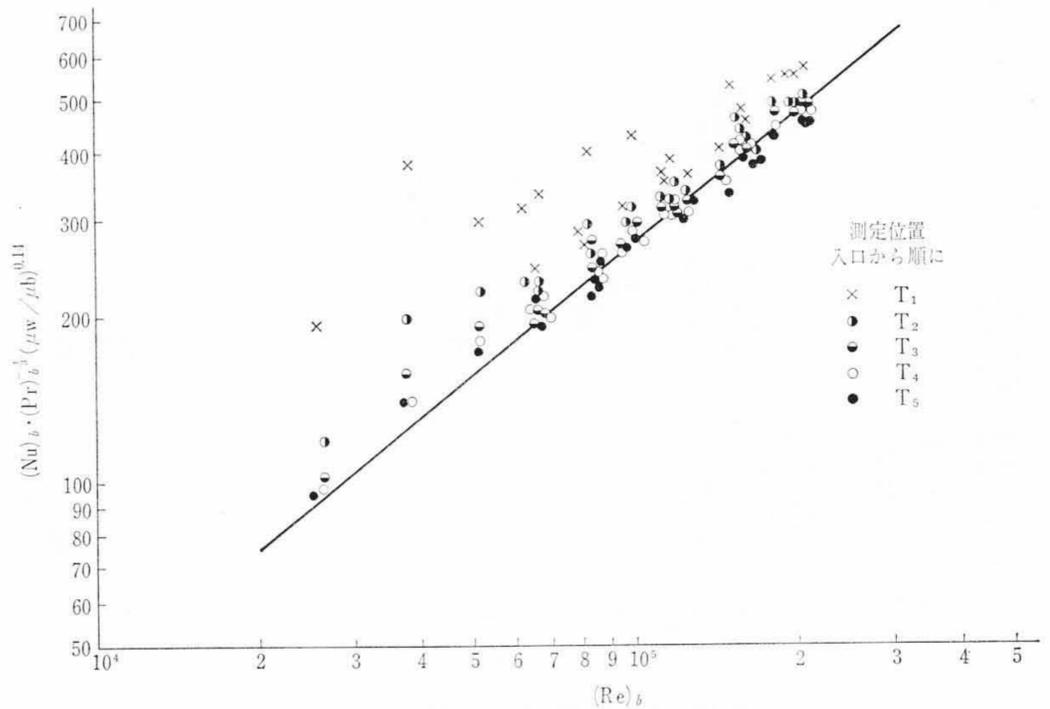
$$Nu_f = 0.023 \cdot Re_f^{0.8} \cdot Pr_f^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

ここで下添字 f は膜温度 $T_f = (T_w + T_b) / 2$ における物性値から計算することを示している。実験点は入口効果のなくなっていると考えられる発熱部出口の測温点 T_5 の値のみを示した。図中の直線は修正 Colburn の式で、実験点はこの直線より最大 +20% の差がある。

4. JMTR 炉心設計への適用

以上述べた各種の開発試験の結果を整理し、JMTR 炉心設計にいかにか適用されたかを列挙する。

- (1) 燃料要素内の流速分布を出力分布と適応させるように燃料板を不等間隔に配列した。要素内流速分布はくら状の分布形となり、流速比は平均値に対し 0.95~1.11 程度で、この流速分布を出力分布と結びつけて炉心熱設計を行なう資料とした。
- (2) 制御要素内流速分布は比較的均一であり、等間隔燃料板を用いて十分である。流速比は平均値に対し 0.95~1.05 の間に納まっている。
- (3) 単一チャンネルの圧力損失は計算値と 10% 以内で一致するが、炉心の中にそう入された複数チャンネルの場合はクロスフロー、出入口の縮流損失などの変化を見込む必要がある。
- (4) 燃料棒振動の限界流速は直接確かめられなかったが、少なくとも 15 m/s までは燃料板の振動が起らないことを実験で確かめた。理論とモデル試験によると、限界流速は 19 m/s 以上と予測される。
- (5) バーンアウト熱流束は、サブクールの小さいところで Mc-Adams の式⁽²⁾、サブクールの大きいところで Buchberg の式⁽³⁾が比較的よく一致する。ガンマ加熱はバーンアウト熱流束に影響を与えるほど大きくなく、Levy の式を適用するには及ばない。JMTR の炉心条件では実験の結果 8×10^6 kcal/m²h 程度のバーンアウト熱流束となり定常運転時に比べて安全率は 2.5 となる。



(入口効果を補正した Sieder-Tate の整理法)
図 15 熱 伝 達 係 数

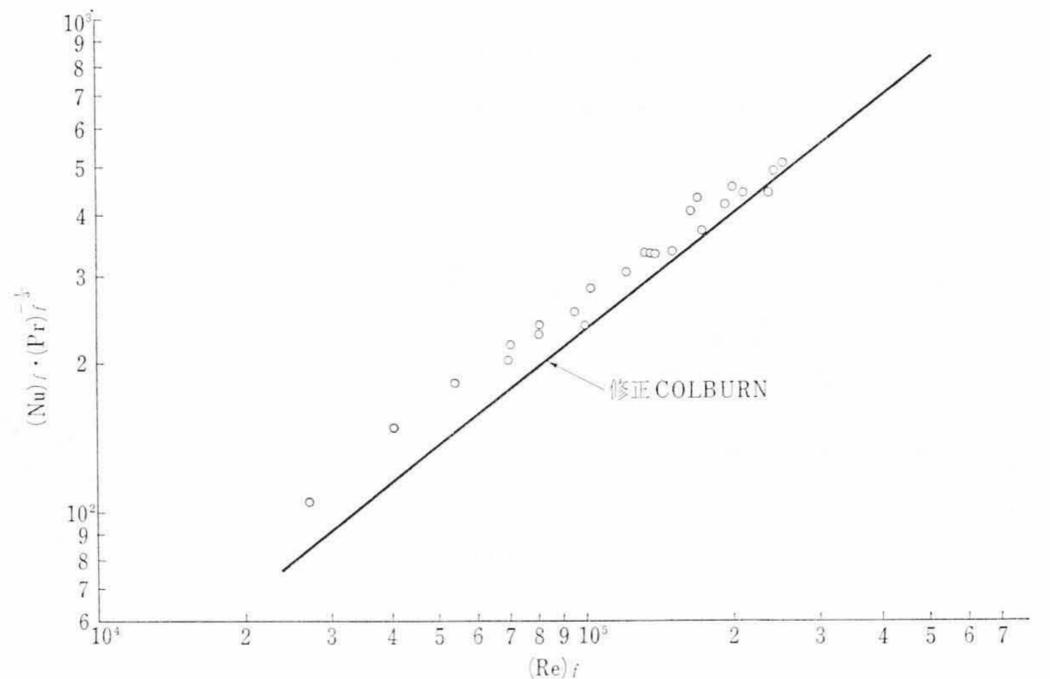


図 16 熱伝達係数の実験値と修正 Colburn の式との比較

- (6) 燃料板表面の熱伝達係数は Sieder-Tate または修正 Colburn の式が実験とよく一致し、しかも実験データの下限をおさえているので設計に用いる式として妥当である。ただし設計に用いる値としては実験誤差、実験と実際条件の差を考慮して 20% の余裕をとる必要がある。

5. 結 言

材料試験炉用の高熱負荷炉心要素の流動・伝熱実験を行ない、単位要素あるいは単位チャンネルにおける特性を確認し、JMTR 炉心設計への適用を検討した。この結果、JMTR 燃料要素、制御要素は、単位要素の範囲では運転中の高熱負荷条件を十分満足することが確認された。これら単位要素の特性のほかに、炉心全体の流動分布、単位要素前後の圧力損失などの巨視的特性を実際の炉心部で実験することが計画されている。

終わりに、本実験に関して終始ご協力いただいた日本原子力研究所材料試験炉部各位に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) Levy et al: J. Heat Transfer, 81, 2, 129 (May 1959)
- (2) McAdams: Ind. & Engng. Chem., 41, 1945~53 (1949)
- (3) Buchberg et al: Heat Transfer and Fluid Mech. Mst., 1951, Stanford Press.