U.D.C. 621.039.546.8: 536.2.023

クラスタ形燃料要素のバーンアウト熱流束

Prediction of Burnout Heat Flux for Rod Clusters

之* 永 井 将 Masayuki Nagai

要 旨

重水減速形動力用原子炉に用いられるクラスタ形燃料要素は、相隣る燃料棒の間隔がきわめて狭いため、バ ーンアウト熱流束が従来の軽水炉の値より低下する。そこで、これまでに公表されている実験データをもとに 各種パラメータの効果を吟味するとともに、予測の方法を検討した。すなわち、重要なパラメータとして従来 の整理式にも用いられている(1)流量、(2)沸騰長さ(または蒸気重量率)のほかに(3)燃料棒最小間隙 (げき)、(4)熱的に過酷なサブチャンネルの寸法を新しいパラメータとして加え、それらの2次式として多重 回帰法によりフィッティングさせた。クラスタの内側の燃料棒でのバーンアウトと外側でのそれとを分けて扱 うことにより、実験データを±10%の精度で再現できる計算式を作成することができた。

1. 緒 言

原子炉燃料要素はそれぞれの原子炉形式に応じてきわめて多種類 が考案され,また実用化されている。本来,動力用原子炉は小さい 炉心部で多量の熱交換を行なうものであるから,燃料要素も熱除去 特性を考慮した設計がなされる。冷却材の除熱特性が比較的良好な 場合には,単純な燃料被覆管に二酸化ウランなどの燃料をつめた燃 料棒を集合体の形に組んで用いるのが通例である。



クラスタ形燃料は、図1のように単純な燃料棒を比較的稠密(ちゅ うみつ)に、相隣る燃料棒間隔をできる限り狭く配列して束ねた形 式の燃料集合体であり、通常、冷却チャンネル管(圧力管という) 内に収納され、この圧力管が適当な間隔をもって数百本配列されて 原子炉の炉心を構成する。重水減速動力炉にクラスタ形燃料がよく 用いられるのは、中性子減速材としての重水(D₂O)の特性が燃料 チャンネルの間隔をある程度離して配置する、いわゆる圧力管形原 子炉を構成するのに適しているためである。各クラスタを構成して いる燃料棒を稠密に配列することによって、冷却材である軽水 (H₂O)による余分な中性子吸収を減らすなど種々の利点を生み出す が、一方、バーンアウト熱流束が低下したり、製造上の困難が増大 するなど実用上の限界が問題になる。

図2に従来のバーンアウト熱流束データ(円管,4本アセンブリ, 9本アセンブリ)とクラスタ形テストセクションのデータとを比較 して示した。実線および破線は従来の軽水炉で計算に使用される限 界式である。この図から,燃料棒間げきの狭いクラスタ形燃料要素 に従来の式を適用することができないことは明らかであろう。

本報は、このように相隣る燃料棒の間隔がきわめて狭いクラスタ 形燃料要素のバーンアウト熱流束について、これまでに公表されて いる実験データを吟味し、信頼のおける予測法を生み出すことを目 的としたものである。

影響する諸因子

従来のバーンアウト実験は単純な単一円管(内側が流路になって いるもの)または単一棒(冷却チャンネル管内にそう入し,冷却材 が棒とチャンネル管との間の円環状流路を流れるもの)を用いたも のが大部分であり,次のような因子が実験パラメータとなっていた。 (1) 冷却水の圧力 (2) 冷却水の流量 (3) 流路等価直径 (4) 加熱部入口エンタルピ(または蒸気重量率) 図1 代表的なクラスタ



図2 各種データと従来の計算式との比較

(5) 加熱部出口エンタルピ(または蒸気重量率)

(6) 加熱部長さ

(7) 流路配置(水平,鉛直など)

(8) 軸方向発熱分布

クラスタ形燃料のバーンアウト熱流束に関しても、これらの因子 がそのままパラメータとなりうるが、このほかに次の因子を考慮す る必要がある。

(9) クラスタ内の燃料棒本数

ここでいうクラスタとは、隣りあう燃料棒の間げきがきわめて 狭いもので、冷却チャンネル管が円管であるような燃料集合体を さし、実験例としては7本、19本、37本などがある。 (10) 燃料棒最小間げき 相隣る燃料棒の間げきが狭い場合にはバーンアウト熱流束が低 下するものと考えられる。 (11) 燃料棒一冷却チャンネル管間げき 冷却チャンネル管は非加熱面であるから、クラスタ最外周の燃

47

* 日立製作所日立工場

v	OL.	52	NO	5	1970
-			4 • • • •		1010

		臣人	PT-1
XX I	-	与击	1/21
	~	MX.	21

No.	実 験 者	クラスタ内本数	文 献
1	B. Matzner ほか	7	(1)
2	B. Matzner (3.2)	19	(1)
3	B. Matzner 13.	19	(2)
4	N. Adorni ほか	7	(3)
5	E.D. Waters And	19	(4)
6	G. M. Hesson Ath	19	(5)
7	G. M. Hesson Ath	19	(6)
8	R. J. Haslam	19	(7)
9	P.A. Edwards 12.	19	(8)
10	E.O. Moeck At	19	(9)

料棒と冷却チャンネル管との間げきは冷却材のエンタルピの局所 的な不均一度に影響する。

(12) クラスタ内発熱分布

原子炉内で発熱する場合,外周の燃料棒のほうが内側の燃料棒 よりも発熱量が大きいという特性がある。これはクラスタを構成 する燃料棒のなかのどれが最初にバーンアウト条件に達するかと いうことと密接な関係をもつからである。

(13) スペーサの構造

燃料棒の間隔を正しく保持するためには、なんらかのスペーサ が必要であり、板バネ、組合セリング、スパイラルワイヤその他 種々の構造が考案されている。

このように数多くのパラメータが複雑に影響しあってバーンアウ ト熱流束を与えるため,各因子の効果を正しくは握して信頼度の高



い予測を行なうことはきわめて困難であるといえよう。

3. 実験例とパラメータ効果

これまでに表1のような実験報告が発表されており、なかでも19 本クラスタはデータが豊富である。これらの報告に含まれるおもな パラメータ範囲は次のとおりである。

冷却材圧力	500~1,200 psia (35~84 ata)
冷却材流量	$(0.1\sim5.0)$ ×10 ⁶ lb/ft ² h ((0.49~24.4)
	$\times 10^{6} \mathrm{kg/m^{2} h})$

加熱管直径 $0.550 \sim 0.780$ in. $(14.0 \sim 19.8 \text{ mm})$

加熱部長さ 18.5~108 in. (470~2,740 mm)

- 最小間げき $0.015 \sim 0.083$ in. $(0.38 \sim 2.11 \text{ mm})$
- スペーサ spiral wire, wart, wear pad

これらのデータから各種パラメータの効果が概略次のように示さ れる。

(1)圧力の効果(図3,4参照)

クォリティー定の場合, 圧力が高くなるにつれてバーンアウト 熱流束(以下 CHF と略す: Critical Heat Flux) は減少する。 1,000 psia (70 ata) の CHF は 1,200 psia (84 ata) のデータより 約10%高い。

(2) 流量の効果(図3,4参照)

圧力・クォリティ・加熱長が一定のとき,流量が増すとCHF は増加する。流量の効果が著しいのは1×10⁶ lb/ft²h より低流量 の場合である。

(3) 加熱長さの効果

長さ3ft(91.5cm) のクラスタより6ft(183cm) のクラスタの CHF のほうがやや(0~30%)低い。圧力・流量・クォリティが 一定のとき、加熱長さが増すと CHF は減少する。加熱長さを増 すにつれ, CHF を生ずる棒はクラスタの外周棒から中央に近い 棒に移行する。 (4) 出口エンタルピ (蒸気重量率)



 Δ

400 500 600 700 800 出口エンタルピ(Btu/lb)

> 燃料棒間げきの効果 図 5

(5) 流路配置(水平・鉛直の別)の効果

流量が1×10⁶ lb/ft²h (4.9×10⁶ kg/m²h) 以上の場合,水平・ 鉛直の差はほとんどみられない。 流量が 0.5×10⁶ lb/ft²h (2.4× 10⁶ kg/m²h)のときは明らかに差がでてくる。

(6) 軸方向発熱分布の効果

4

2

1.-

公表されているデータはない。

(7) 燃料棒最小間げきの効果

エンタルピ(蒸気重量率)が高いほど CHF は低いという通常 の傾向を示す。

隣り合う加熱面同士(もしくは加熱面と非加熱面)の最小間げ きの効果については次のような実験結果が参考になる。 (a) Waters, E. D. 氏らの実験⁽⁴⁾ (図5参照) 低流量において間げきの効果が著しい。流量が大きい場合で も間げきが 0.015 in. (0.38 mm) になると CHF はかなり低下 する。 間げきが 50 mil (1.27 mm) のデータをみると, 流量が

48

クラスタ形燃料要素のバーンアウト熱流束 441



1×10⁶ lb/ft²h (4.9×10⁶ kg/m²h) 以上であれば著しい差は現 われない。

(b) Lee, D.H. 氏らの実験⁽¹⁰⁾

Dumb-bell 形のテストセクション (図 6 a) の最小間げきを変 えて実験したもので, 流量が 2×10⁶ lb/ft²h (9.8×10⁶ kg/m²h) で出口蒸気重量率約10%のとき,最小間げきを31 mil (0.79 mm) まで狭くしてもそれによって CHF が低下することはなかった。 (c) Janssen, E. 氏らの実験⁽¹¹⁾

二重管の内管が発熱する実験(図6b)で,偏心させて最小 間げきをパラメータとしたものである。61 mil (1.55 mm)およ び96 mil (2.44 mm)の最小間げきの場合には偏心させない実 験データによく合うが,33 mil (0.84 mm)の間げきで入口サブ クールが大きい場合には偏心なしのデータより小さい CHF を 与える。



図7 サブチャンネル分割

ている。この間げきが狭くなるほど,その位置でバーンアウト条 件に達する可能性が大きい。

(3) 同じ円環状に2列ないし3列並んでいる場合,列ごとに燃料棒の発熱量が異なる。外側の列の熱料棒のほうが内側の列より も表面熱流束が大きい。しかしバーンアウトは外側の燃料棒で必 ず起こるとは限らない。

(4) 冷却チャンネル管の内径がかなり大きいから, 蒸気泡が中 心部に集まりやすいなど, フローパターン効果が現われるかもし れない。

これらの特質に関連するパラメータを並べてみると

(d) Hesson, G. M. 氏らの実験⁽⁶⁾

(a) に似たテストセクションを用いているが,間げき 40 mil
 (1.02 mm) で流量が1×10⁶ lb/ft²h(4.9×10⁶ kg/m²h) のとき
 に(a) の間げき 50 mil (1.27 mm) の結果より低い CHF を得ている。

(8) 燃料棒,冷却チャンネル管間げきの効果

とくに参考になるデータはない。

(9) クラスタ内発熱分布の効果

系統的に調べたデータはないので明確な結論が出せる段階には ないが、この発熱分布はクラスタを構成する燃料棒のどれが先に 熱的限界に達するかという問題と密接に関係するものである。

(10) スペーサの構造の効果

これまでのデータからは特に顕著な影響は認められない。

4. 実験データの整理法

バーンアウト熱流束の実験データの整理法には大別して三つの方 法が考えられる。すなわち

(1) 理論的にバーンアウト条件を考察して得た式の係数などを 実験データと合わせる。

(2) 沸騰熱伝達に関係する無次元数を組み合わせ、その指数などを実験データと合わせる。

(3) 影響するパラメータを使って最小自乗法そのほかの方法で 実験式を作る。

本報ではこのうち(3)の方法を採用した。そのため,整理式に 加えるべきパラメータを選ぶにあたって,クラスタの特長として次 (1) 账款公子购购样不具工用)发表

- (1) 隣り合う燃料棒の最小間げき
- (2) サブチャンネルの等価直径(とくにその最小値)
- (3) サブチャンネルの蒸気重量率の分布
- (4) 冷却チャンネル管の内径
- (5) 平均等価直径
- (6) クラスタ内発熱分布

などである。

次に、クラスタを構成する燃料棒のうちでどれが先にバーンア ウト条件に達するかを検討する。サブチャンネルの考え方からすれ ば場所によって冷却材の流速やボイド体積率が異なり、ボイド体積 率が大きいサブチャンネルに接している発熱量の大きい燃料棒がま ずバーンアウト条件に達すると考えるのが自然であろう。そこで、 図7のように、あるサブチャンネル(j)に注目しそれにつながる サブチャンネル(k; k=1, 2,n) との間のエネルギーおよび運 動量の授受を数式化してみる。簡単のために二相流は均質とし、密 度p, 流速 \bar{v} , エンタルピ \bar{h} で表わされるものとすると、流れの方 向をz軸としてエネルギー保存式は

ここで q_j: サブチャンネル j の流体の単位体積あたり受熱量

 \bar{v}_{kj} : サブチャンネル k から j へ移動する流体の流速

(主流に直角な成分)

を表わし、 \bar{v}_{kj} はサブチャンネル間の圧力差によって駆動されるものであり、 $\bar{v}_{kj} < 0$ のとき右辺第2項()内は $\bar{\rho}_j \bar{v}_{kj} \bar{h}_j$ に変わる。

一方, 運動量の保存式は

$$\frac{d}{dz}(\bar{\rho}_j\bar{v}_j^2) = -\frac{d\dot{p}_j}{dz} - \frac{\lambda_j}{2D_j}\bar{\rho}_j\bar{v}_j^2 - \sum_{k=1}^n (f_{kj}\bar{\rho}_k\bar{v}_{kj}\bar{v}_k)$$

の諸点に注目した。

49

(1) 流路の形状が複雑であるため、サブチャンネル解析の対象
となりうる。サブチャンネル解析とは、複雑な形状の流路全体を
こまかく小流路に分けて、隣り合う小流路(サブチャンネル)間
の流体の質量・エネルギー・運動量の交換を扱うものである。ここで $p_i: サブチャンネル j$ の圧力
 $\lambda_i: サブチャンネル jにおける流体の摩擦係数
<math>D_i: サブチャンネル j$ の等価直径
 $f_{ki}: サブチャンネル k \ge j \ge$ の間の流体移動の抵抗係数
を表わし、右辺第2項は摩擦損失、第3項はサブチャンネル間の運

442 日 立 評 論

動量の授受を示すもので $\overline{v}_{kj} < 0$ のとき第3項()内は $f_{kj}\overline{v}_{j}\overline{v}_{kj}\overline{v}_{j}$ に変わる。

さて、ここでサブチャンネル間の流体の移動を無視することにす れば、運動量の式から各サブチャンネルの圧力差が等しくなるよう に流速の分布が定まる。この過程で関連するパラメータはサブチャ ンネルの等価直径と蒸気重量率である。一方、エネルギーの式から はエンタルピに関連するパラメータとして、密度 $\bar{\rho}_i$ に関係する蒸気 重量率と流速 $\bar{\upsilon}_i$ に関係する等価直径のほかに、サブチャンネルに 隣接する燃料棒から受取る熱量 q_i があることが明らかである。

エンタルピの最も大きい,いわば「熱的に最も過酷なサブチャン ネル」は,単純化して考えれば次のようなものである。摩擦損失係 数がレイノルズ数の1/4 乗に逆比例する。すなわち

とすれば、 ムp=一定の条件から

を得るから,流路面積を A; とすればエンタルピ上昇は

で表わされ、クラスタの形状寸法と燃料棒ごとの発熱量が与えられ れば「熱的に最も過酷なサブチャンネル」を選び出すことができる。

以上の考察とこれまでの検討結果から,最終的に最小限必要なパ ラメータとして次の四つを選んだ。



VOL. 52 NO. 5 1970

(1) 流量(単位面積あたり)

(2) 沸 騰 長 さ

(3) 燃料棒最小間げき

(4) 最も過酷なサブチャンネルの等価直径/平均等価直径の比

これらのうち(2)は通常の整理法における蒸気重量率に対応するもので,沸騰長さを用いるとデータのまとまりがきわめて良好⁽¹²⁾なために採用した。

このほか, バーンアウトの起こる位置が外周燃料棒の場合と内側 燃料棒の場合とに分れることに対応させて, これを別々の整理式で 表わすこととした。このような二つのケースが存在することはクラ スタのバーンアウト熱流束がある種の折れ線で表わされることを示 しているものと思われる。

5. 結果と検討

整理式はさきに述べた四つのパラメータの2次式である。しかし ながら項の数が15と大きくなることと、15項の中には効果の小さ い項も含まれているため、多重回帰の計算手法を応用して項数を減 らすよう試みた。

整理式の決定に使用する実験データは、パラメータの範囲が実際 の原子炉(沸騰軽水冷却炉)の運転条件からかけはなれたものは除 き、次の範囲のデータを選んだ。

50

流 量 0.5×10⁶lb/ft²h以上 (2.4×10⁶kg/m²h以上)
 出口蒸気重量率 0~0.5

これ以外のパラメータはとくに範囲を限定しないこととした。

外側燃料棒と内側燃料棒のそれぞれのバーンアウト熱流束の計算 式は次のとおりである。 ただし *qbo*: バーンアウト熱流束 (10⁶ Btu/ft²h)

- G: 流量 (10⁶ lb/ft² h)
 - l: 沸騰長さ (10² inch)
 - δ: 燃料棒最小間げき (10⁻¹ inch)
- β:最も過酷なサブチャンネルの等価直径/平均等価直
 径の比(-)

これらの式を用いてバーンアウト熱流束を予測する場合には,(6) (7)の2式の計算値にクラスタ内の発熱分布すなわち外側と内側 の燃料棒の発熱量の差を考慮して,いずれの燃料棒が先に限界に達 するかを調べればよい。たとえば,ある条件のもとで

(6) による $q_{BO} = 0.8 \times 10^6 \,\mathrm{Btu/ft^2h}$

(7) による $q_{BO} = 0.6 \times 10^{6} \, \text{Btu/ft}^2 \, \text{h}$

と求められたとすれば,発熱量が外側1.0に対して内側が0.7であったとして,(7)による内側燃料棒の熱流束が0.6×10⁶ Btu/ft²hのときに外側燃料棒の熱流束は

 $0.6 \times \frac{1}{0.7} \times 10^6 = 0.86 \times 10^6 \text{ Btu/ft}^2 \text{ h}$

であるから、(6)の計算値と比較すれば、内側燃料棒が限界に達 する以前に外側燃料棒のほうでバーンアウトが起こることになる。

このような方法により計算し,実験値と比較したのが図8である。 実験値は計算値のほぼ ±10% 以内におさまっており,多重回帰法に より項数を減らしても相当の精度が得られることを確かめた。

なお,沸騰長さの代わりに蒸気重量率を用いた場合についても検 討したが,これに関しては別に報告する予定である。沸騰長さを採 用したのは,将来,軸方向の発熱分布をもつクラスタの実験が試み られた場合に,データの整理に沸騰長さの考え方をとり入れると, 円管や二重管の実験データの整理⁽¹²⁾(軸方向に発熱分布がある場

(A) 外側燃料棒のバーンアウト熱流束

$$q_{BO} = -0.037 + 1.25 \beta + 0.293 G \cdot \delta - 1.42 l \cdot \delta$$

 $-0.0137 G^2 + 0.652 l^2$(6)
(B) 内側燃料棒のバーンアウト熱流束
 $q_{BO} = -0.0193 - 0.469 \delta^2 + 0.133 G \cdot \delta + 1.42 \beta \cdot \delta - 1.02 l \cdot \delta$
 $-0.0211 G^2 + 0.135 G \cdot \beta + 0.214 l^2$(7)

合)と同じようにクラスタでも良好な結果が得られるものと期待されるためである。

6. 結 言

重水減速の動力用原子炉などに用いられるクラスタ形燃料要素の バーンアウト熱流束について,各種パラメータの効果を吟味すると

クラスタ形燃料要素のバーンアウト熱流束 443

- ともに、予測の方法を検討した。その結果,
 - 熱的に過酷なサブチャンネルを導入 (1)
 - 沸騰長さを採用 (2)
 - 燃料棒間げきの効果に注目 (3)
 - (4) 外側と内側の燃料棒の発熱の差を考慮
 - (5) 多重回帰法によりデータをフィッティング

することなどにより,実験データをじゅうぶん良い精度で再現でき る計算式を作成した。

今後の課題としては、実際の原子炉燃料のように軸方向に cosine 分布またはそれに近い発熱分布をもつテストセクションで実験を行 なって, 軸方向発熱分布の効果を調べることが重要であろうと考え られる。

献 考 文 参

- (1) B. Matzner, J. S. Neill: DP-857 (Sept. 1963)
- (2) B. Matzner, J.E. Casterline: TID-22539 (Dec. 1965)
- (3) N. Adorni et al: CISE-R-123 (Dec. 1964)
- (4) E.D. Waters et al: HW-77303 (Aug. 1963)
- (5) G. M. Hesson et al: HW-80523 Rev. 1 (Mar. 1964)
- G. M. Hesson et al: BNWL-206 (Dec. 1965) (6)
- R.V. Macbeth: AEEW-R 358 (June 1964) (7)
- P.A. Edwards: AEEW-R 371 (1964) (8)
- E.O. Moeck et al: AECL-2586 (May 1966) (9)
- D. H. Lee, R. B. Little: AEEW-R 178 (Aug. 1962) (10)
- (11) E. Janssen, J. A. Kervinen: GEAP-3899 (Feb. 1963)
- (12) 永井, 増田: 第5回日本伝熱シンポジウム講演論文集(昭 43 - 5)
- J.E. Hench: GEAP-4358 (Sept. 1963) (13)
- E. Polomik, E. P. Quinn: GEAP-3940 (Sept. 1962) (14)



ま横倒し輸送を行なう場合には、ガス室からのガスが変流器内の下 部に移動し、気泡(ほう)となって変流器内のすみ部分あるいは絶縁 物の表面などに付着してしまうため,再び直立させ元の状態に戻し ても付着したガスがそのまま残り変流器の絶縁劣化を招く恐れが あるので、良好な輸送方法が要求されていた。

この発明は、この問題を解決したものであり、変流器を輸送する 場合に下部タンク4に設けたバルブV3を閉じるとともに上部タン ク3のバルブV2を開き、上部タンク3と接続した油量調整タンク 2(あるいはフィーデングタンク)のバルブ V1を通して,変流器1 内全部および油量調整タンク2の規定位置まで油を充満させ、この 油面上のガス室 GR にガスg(不活性ガスなど)を封入し, バルブ V1 を閉じたのち,変流器1およびこれに接続した油量調整タンク2を 図1の矢印A方向に図2に示すように横に倒し,変流器1内に完全 に油を充満させた状態でしかも油量調整タンク2内の油面を変流器 1より高い位置に存在させて輸送し、現地にて油量調整タンクを取 り去るようにしたものである。

この発明では、油量調整タンクなどの簡単な構造の油量調整装置 を変流器の上部タンクに取り付けるだけで,変流器の横倒し輸送中 の封入ガスによる絶縁劣化を完全に防止することができ、特殊な大 (白土) 形貨車を用いることなく輸送ができる。



1



