

炉 物 理 実 験 の 研 究

Experimental Studies on Thermal Reactor Physics

和 嶋 常 隆* 菊 地 宏*
Tsunetaka Wajima Hiroshi Kikuchi

要 旨

昭和37年に臨界に達して以来、王禅寺臨界実験装置(OCF)を用いて主として沸騰水形原子炉(BWR)を対象にした炉物理実験が行なわれてきた。まず燃料棒の配列が単純で解析しやすい均一格子体系で、“臨界量”や“中性子増倍を因子別にした4因子”などの基礎的な量を測定し理論モデルの改良点を指摘した。ついで、国産開発動力炉の一つである新形転換炉や核過熱炉に用いられているクラスタ形状燃料要素の4因子の測定を行ない、中性子スペクトルの空間分布や、共鳴吸収の取り扱い方など燃料棒配列がこのように複雑な場合の理論的取り扱いの問題点の検討資料を与えた。

さらに引き続き実施されたアセンブリ燃料炉心の実験はBWR動力炉の核計算方法の改良を目的としたもので、動力炉炉心をできるだけ模擬した炉心を組み立て、BWR核特性で重要な蒸気ボイドや制御棒の効果を測定した。この実験解析から、水ギャップの取り扱いや制御棒による中性子吸収量の計算などに関する改良点が明らかになった。

新形転換炉炉心のクラスタ燃料要素の取り扱いに関する検討実験を引き続いて現在実施中である。

1. 緒 言

王禅寺臨界実験装置(OCF: Ōzenji Critical Facility)を主体にして今までに実施した炉物理実験の研究は、次の三つに大別することができる。

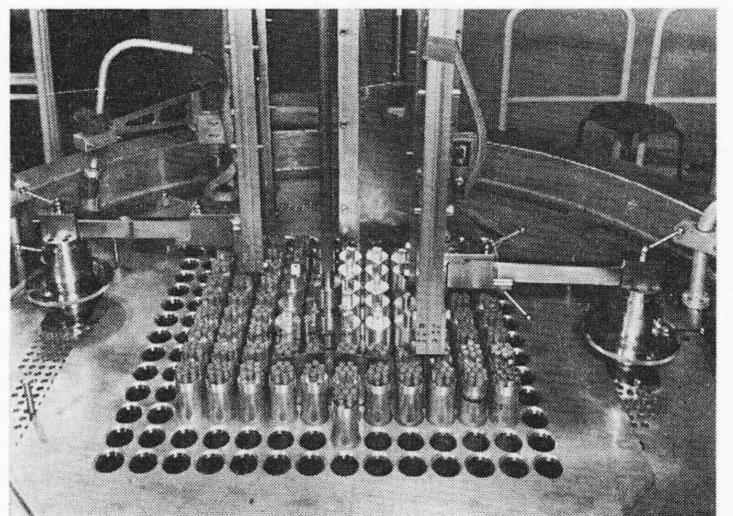
- (1) 均一格子系: 燃料棒が規則的に正方形または三角形に配列された単領域または二領域炉心。最も基礎的な実験。
- (2) クラスタ燃料炉心: 7本の燃料棒をクラスタ状に並べた燃料要素を正方格子に配列した炉心。核過熱炉心を模擬(図1参照)。
- (3) アセンブリ燃料炉心: 燃料棒を8×8列に並べたアセンブリ燃料要素から成るBWR動力炉の模擬炉心(図2参照)。

(1)では主として2.5%濃縮燃料棒を用い、水対燃料体積比を変えて臨界量、中性子束分布、各種反応度係数、4因子に関連した各種マイクロパラメータ、漏れない確率などの基礎的な物理量を測定し、核設計コードの信頼性を検討するとともに改良を提案した。またマイクロパラメータの実験式を導いた。(2)ではマイクロパラメータとボイド反応度効果を中心にして実験し、クラスタ状に配列された燃料棒のリング化近似、共鳴吸収に対するダンコフ効果の入れ方、高速核分裂の非均質効果などを検討した。また(3)では静的なボイドを模擬し、ボイド率を数種類変えて、臨界性、出力分布、温度係数などを測定して、ダンコフ効果の入れ方と熱中性子スペクトルの空間変化の効果を検討し、また制御棒を模擬した十字形 B_4C 吸収体をそう入して主として反応度効果の解析を実施した。以下アセンブリ燃料炉心に重点をおいて代表例をあげながら説明する。

2. 均一格子系の実験⁽¹⁾

2.5%濃縮燃料棒を用いて水対燃料体積比を0.43, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5の5種類に変えて、主として臨界量と4因子に関連したマイクロパラメータを測定した。結果は日立製作所中央研究所王禅寺支所で開発したJUPITER(高速組定数計算コード)、TAT(熱組定数計算コード)、THERMOS(熱組定数計算コード:熱中性子スペクトルの空間変化がある)、コードで解析された。水対燃料体積比を変えると実効増倍係数 k_{eff} の計算が実験とどのように食い違ってくるかを検討した結果、実験値からの計算値のずれが水対燃料体積比の減少に対

* 日立製作所中央研究所王禅寺支所



(7本クラスタ)

図1 クラスタ燃料炉心の一例

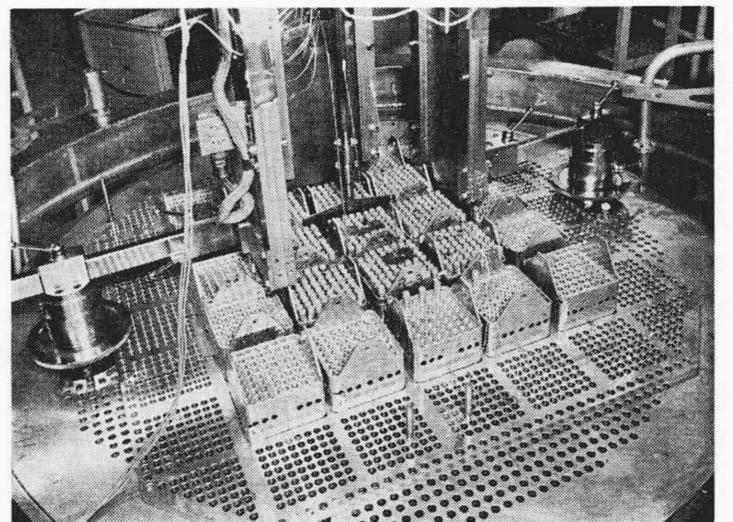


図2 アセンブリ燃料炉心の一例

して負側にいく傾向であることがわかり、これをさらに4因子の測定から導いた無限増倍係数 k_{∞} と比較してみると k_{eff} と同様に水対燃料体積比が減少するにつれて計算値の実験値からのずれが大きくなり、 k_{eff} の不一致が k_{∞} によるものであることがわかった。この原因が4因子のどれに原因するかをさらに調べてみたところ、体積比が1.5以上の領域では共鳴吸収をのがれる確率 p と高速核分裂効果 ϵ のずれが互いに打ち消しあってみかけ上実験と計算との一致がよ

表1 Dy 放射化分布と熱中性子利用率
(分布は燃料平均を1に規格化)

位置	フラッド炉心					ボイド炉心		
	測定	THERMOS 計算			測定	THERMOS 計算		
		A-法	B-法	C-法		A-法	B-法	
Dy 放射化量	中心燃料	0.86 ± 0.02	0.765	0.886	0.879	0.90 ± 0.02	0.862	0.885
	外側燃料	1.02 ± 0.02	1.039	1.019	1.020	1.02 ± 0.02	1.023	1.019
	冷却材通路	1.32 ± 0.03	1.221	1.394	1.359	1.19 ± 0.02	1.169	1.300
	減速材	1.93 ± 0.04	1.867	2.017	1.936	1.77 ± 0.04	1.715	1.756
	燃料被覆	1.16	1.047	1.112	1.101	1.09	1.102	1.175
	プロセス管	1.63	1.520	1.669	1.605	1.48	1.270	1.358
熱中性子利用率	0.741 ± 0.003	0.7505		0.7404	0.795 ± 0.003	0.7998	0.7952	
熱中性子利用率のフラディング効果	0.068 ± 0.004	-0.0616		-0.069				

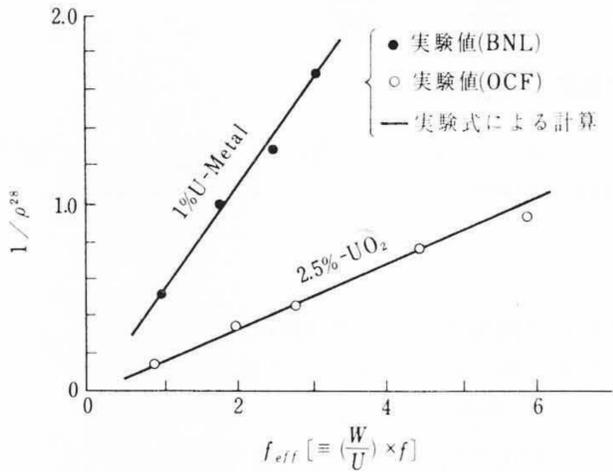


図3 ミクロパラメータの逆数の直線性の一例

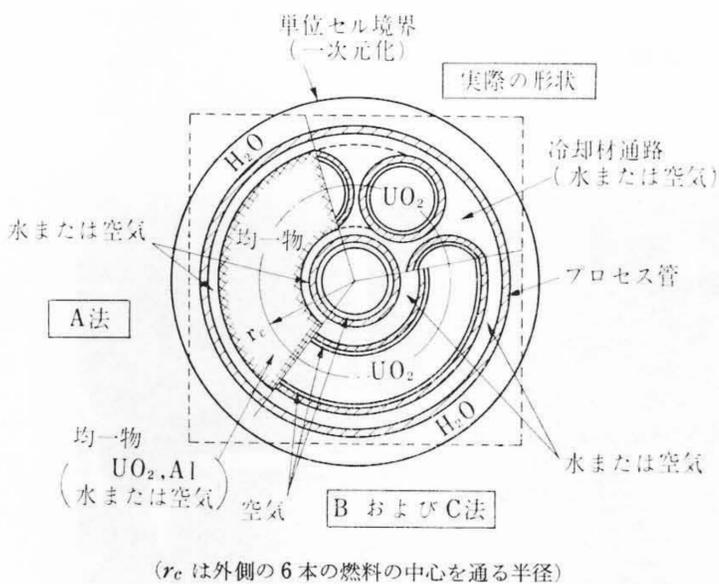


図4 単位セルのリング化

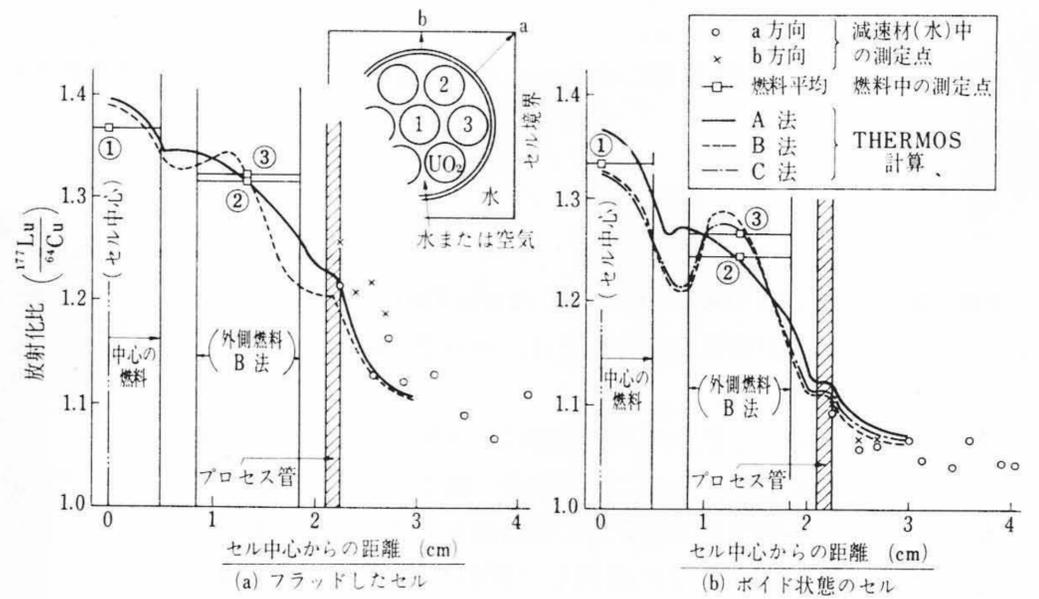


図5 熱中性子スペクトル、インデックス (Lu/Cu 放射化比) の分布

いようになるが、体積比が1.5より小さくなると ρ の過小評価が原因で k_{∞} の計算値が実験値より大幅に小さくなる傾向がわかった。この体積比の小さい領域での ρ の過小評価の原因は、U 238 の共鳴吸収と U 235 の共鳴核分裂の過大評価に原因する。このように水対燃料体積率が減少するにつれて臨界性を示す増倍係数の計算値が次第に過小評価となる傾向の原因は ρ の計算の過小評価によるものであり、これは体積率の小さくなったときの遮へい効果(ダンコフ効果)の計算がこのような体積率のときに十分正確に取り扱われていないことを示すものである。

さて、共鳴領域での U 235 の核分裂効果は従来の4因子公式では無視されることが多く、また実験的にもあまり確認されていなかったが、この効果は体積率が小さくなると急速に大きくなり、20% 近くの効果を増倍係数に与えることがわかった。

また、この均一格子系の実験の結果、4因子に関係したミクロパラメータの逆数が実効的な水対燃料体積率(体積比×熱中性子利用率)に対して一次関数で記述されることが実験的に見いだされ、この実験式の導出と物理的意味づけを試みた。一例を図3に示す。図中にはアメリカのブルックヘブン国立研究所の実験例もわれわれの実験式による計算と比べて比較してあるがわれわれの考え方の正しいことを裏付けている。われわれはこのような形でミクロパラメータを組織的に整理した。

この均一格子系の実験では、また、炉心からの漏れない確率: P を炉心内外の中性子束分布から直接実験的に求める方法を開発した。この P の逆数は k_{∞} そのものであり、前述の4因子の測定から求めた k_{∞} とは $1\% \Delta k/k$ 以内で一致している。

3. クラスタ燃料炉心の実験⁽²⁾

7本クラスタ燃料要素を5×5列、(25本) 正方格子に配列し、このテスト領域まわりをOCF燃料棒で囲んでドライバーとした炉心を組んで、テスト領域中央の単位セル内で、4因子に関係したミクロパラメータおよび中性子スペクトル・インデックスを測定した。実験解析には前述のJUPITERコードとTHERMOSコードを使用した。特に注意を払った点は、

- (1) 熱中性子スペクトル計算のための単位セルのリング化の取り扱い方
- (2) 共鳴吸収の非均質性(ダンコフ効果)の入れ方
- (3) 高速核分裂効果の非均質効果の考慮

の3点であり、これらの取り扱いを考慮することにより実験結果を正確に理解し、理論的に再現できた。

表1は単位セル内のDyの放射化量分布を示したものである。計算は図4に示すように外側6本の燃料棒を被覆とその付近の冷却材も含めてドーナツ状に均質化したA法、同様6本の燃料のみを等面積のドーナツに近似したB法、およびB法にドーナツ状と同心円上に並んだ6本の棒との非均質性の効果の差を考慮したC法の三つの方法を試みた。このC法の取り扱いは冷却材通路が水で満たされたフラッド炉心に対して有効であることが表からも明らかであり、冷却材通路が空気のときのボイド炉心に対してはB法でも十分の精度が得られることがわかる。結局、ボイド炉心にはB法、フラッド炉心にはC法を用いることにより熱中性子利用率で0.1%、そのフラディング反応度効果で0.1% $\Delta k/k$ 程度の精度を得ることがわかった。

表2 高速およびエピソード領域マイクロパラメータ

パラメータ	ボイド炉心		フラッド炉心	
	測定	計算	測定	計算
δ^{25}	0.090±0.003	0.083 0.087*	0.066±0.002	0.062 0.065*
δ^{28}	0.056±0.003	0.045 0.057**	0.039±0.002	0.034 0.039**
ρ^{28}	1.25 ±0.05	1.25 1.27*	1.05 ±0.05	1.04 1.05*

* $F_{Cd}=0.5$ ev
** 非均質効果を補正

表3 4 因子

	ボイド炉心			フラッド炉心			フラディング効果**		
	実験	計算	差(%)	実験	計算	差(%)	実験(%Jk)	計算(%Jk)	差*(%Jk)
ϵ	1.124±0.003	1.122	-0.2	1.092±0.002	1.091	-0.1	-2.9±0.3	-2.8	+0.1
p	0.824±0.004	0.824	0	0.863±0.004	0.862	-0.1	+4.7±0.7	+4.6	-0.1
f	0.795±0.003	0.795	0	0.741±0.003	0.740	-0.1	-6.8±0.6	-6.9	-0.1
η^b	(1.770)	1.770		(1.771)	1.771				
k_{∞}	1.302±0.009	1.300	0.1	1.236±0.007	1.232	-0.3	-5.1±1.1	-5.2	-0.1

* 絶対値
** $\nu=2.442$

た。これは一番単純な均一格子系での計算精度と同程度である。参考までに図5に熱中性子スペクトル・インデックスであるLuとCuの放射化比を示したが、採用した熱中性子スペクトル計算法がフラッド炉心のd方向を除いて5%以内で実験と一致する放射化比を与えることがわかる。

表2には4因子に関係したマイクロパラメータの測定量とその計算値に対する非均質効果を示してある。マイクロパラメータ δ^{25} 、 δ^{28} 、 ρ^{28} はそれぞれU235の共鳴核分裂、U238の高速核分裂、U238の共鳴吸収に関連した量である。 δ^{25} に対してはCdのカットオフ・エネルギーの補正、 δ^{28} と ρ^{28} に対しては非均質効果を考慮することにより、マイクロパラメータは2~3%の誤差で計算と実験が一致することがわかった。

以上の結果を4因子で示したのが表3であるが ϵ 、 p 、 f ともに実験と計算の誤差は0.2%以下、 k_{∞} で0.3%で、これらは均一格子系の誤差と同程度であり、クラスタセル計算においてリング化や非均質効果の入れ方が正しく行なわれたことを実証している。

4. アセンブリ燃料炉心の実験

BWRでは数十本の燃料棒で1燃料アセンブリが構成され、この内部では燃料棒は一定のピッチで正方格子状に配列されている。しかし燃料アセンブリは制御棒や炉内計装のそう入、また燃料交換を容易にするため10~20mmの間げきをおいて配置される。この間げきが水ギャップとなり、均一格子にはみられなかった水ギャップの効果に関する炉物理の問題点を提起している。このため均一格子炉心の実験に引き続き、アセンブリ燃料炉心を組み、以下に述べる一連の実験を行なった。

燃料アセンブリは図6に示すように燃料棒8×8(64本)からなり、アルミニウム製の箱に組み込んだものである。通常動力炉を模擬して、アセンブリの周囲にはWideおよびNarrowの水ギャップを設けた。水対燃料体積比は燃料棒セルで約1.5、水ギャップまで含めた単位アセンブリ・セルで約2.4であり、燃料濃縮度はBWRの設計点に近い2.5%のものをを用いることにした。

実験では主として、BWRの炉物理特性にとって重要なボイドと制御棒効果をみるため、蒸気ボイドを模擬した炉心と制御棒をそう入した炉心を取りあげ、その炉心反応度や中性子束分布の測定を行

表4 一様ボイド管仕様とボイド率測定結果

ボイド形	形 状	ボイド率(%)*	
		燃料セル平均	アセンブリ平均
A	中空円筒	20.4±0.1	10.1±0.06
B	中空4角柱	28.4±0.2	14.0±0.1
C	中空多角柱	49.4±0.6	24.3±0.3

* ボイド管材質のポリエチレン部分の水素原子まで考慮し、水素原子数の減少率から求めた実効的なボイド体積率である。

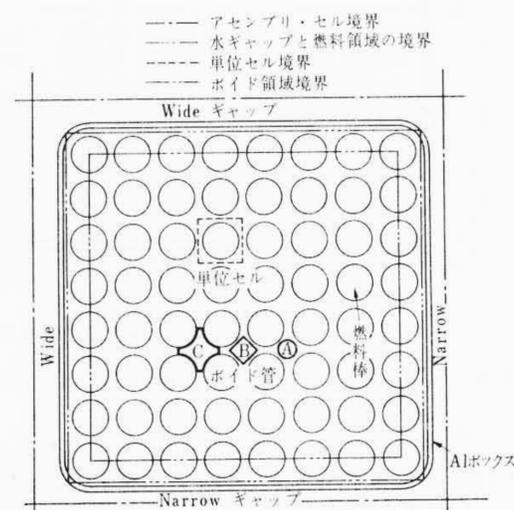
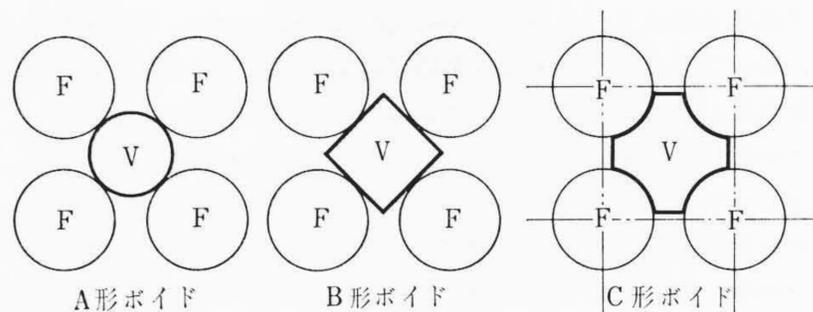


図6 ボイド管そう入単位燃料アセンブリ断面図



(Vはボイド管、Fは燃料棒を示す)

図7 一様ボイド管断面図

なった。

4.1 ボイド模擬炉心

BWRの蒸気ボイドを模擬するため、ポリエチレン製の中空管を燃料棒の間にそう入したが、これにより炉心内に核的に余分な物質を持ち込まず、しかもボイドを確実に定量することができた。このボイド管としてはボイド率が炉心高さ方向に一定の一様ボイド管と、動力炉と同様に高さ方向にボイド率が変化している分布ボイド管を用いた。一様ボイド管は図7に示すようにその断面を変えて3種類のボイド率のものを使用した。また分布ボイド管では円すい状のポリエチレン棒を中空管内部に詰めて、そのボイド率を連続的に変化させた。表4はボイド率測定の結果を示したものである。ボイド率は水ギャップも含めたアセンブリ・セルの平均値であり、ボイド管材質のポリエチレンの水素原子まで考慮し、水素原子数の減少率から求めた実効的なボイド率である。

これらのボイド管をそう入した各炉心で、おもに次の量を測定した。

- (1) 一様および分布ボイド炉心の炉心反応度 k_{eff} (≈ 1.0)
- (2) 分布ボイド炉心の高さ方向中性子束分布
- (3) 一様ボイドそう入単位アセンブリ・セル内の熱中性子束分布

ボイドの存在は単に減速材原子数を減らすだけで、計算上はボイドのない炉心と本質的に異なることはない。しかし水対燃料体積比

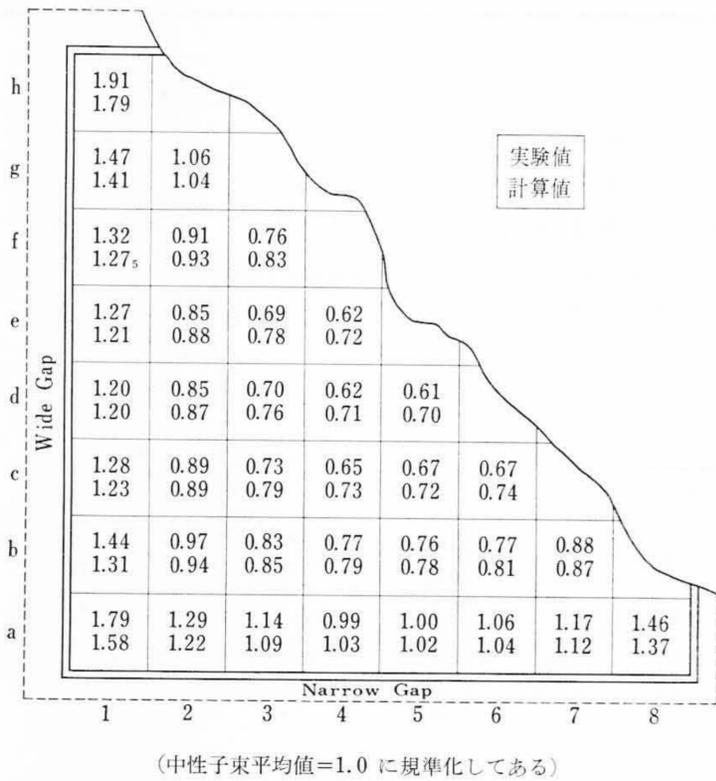


図8 C形ボイド管そう入単位アセンブリ内熱中性子束分布

という核的に基本的なパラメータを変化させるため、水ギャップ効果も含めて中性子スペクトルや組定数をいかに正確に計算できるかが実験解析のキポイントになると思われる。

まず、最初に JUPITER-TAT コードを用い、アセンブリ・セル内各領域の漸次スペクトル (Asymptotic Spectrum) 平均定数を求め、ついでアセンブリ・セル平均の定数を拡散計算で求める解析法を試みた。高速組は水ギャップをふりわけ一様格子で近似した。

この計算の結果と実験データを比較した一例が図8, 10である。アセンブリ内中性子束分布については、計算が実験に比べてよりへいたんな分布をしており、全体の平均値を1.0に規準化したため実験との食い違いは中央部で大きくなっているがその差は約15%である。炉心反応度では、ボイド率増加による反応度減少の割合(ボイド係数)を計算がより大きく評価している。これは均一格子系で体積比の減少につれて計算で求めた反応度減少の割合が大きくなったことと一致している。

以上の解析法を改良して実験と計算の一致をよくするため、種々の方法を試みた。たとえば、スペクトル定数計算に JUPITER-TATよりも精密な HRG-THRMOS コードを用いた。また模擬ボイドが塊状のボイドであるため中性子ストリーミングが考えられるが、これに対する補正計算も行なってみた。しかし、これでは結果はほとんど改良されず図10の曲線は多少平行移動はしているものの傾斜は変わらない。結局、最も効果的であったのは組定数計算で水ギャップの扱い方を次のように改良した解析法であった。

(1) 熱組

単位アセンブリ内の熱中性子束分布計算に、熱中性子スペクトルの水ギャップ付近での空間変化をとり入れたこと。これを厳密に行なうには多数組二次元計算を必要とするが、われわれは Over-lapping モデルで近似的に扱うとともに、単位アセンブリ・セルを円筒形状で近似し、拡散近似に対する中性子輸送効果を補正した。

(2) 高速組

共鳴吸収計算の燃料棒間遮へい効果(ダンコフ因子)に水ギャップの非均一性を考慮した。すなわち、水ギャップに接している燃料棒と内部燃料棒を区別して別々に遮へい効果を考慮してアセンブリ平均のダンコフ因子を求めた。

以上の方法で計算された結果を最初に試みた計算と比較し、中性

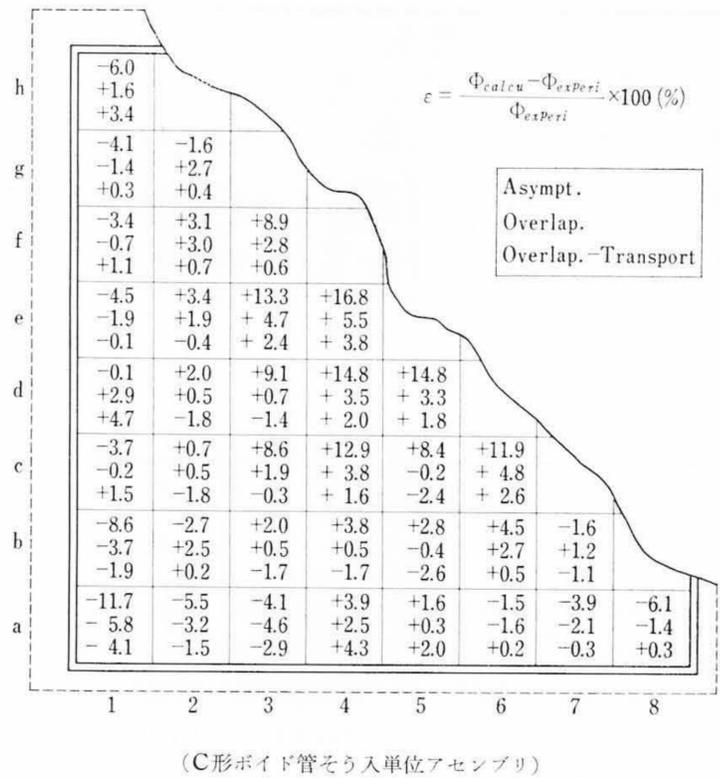


図9 熱中性子束分布の実験と計算の比較

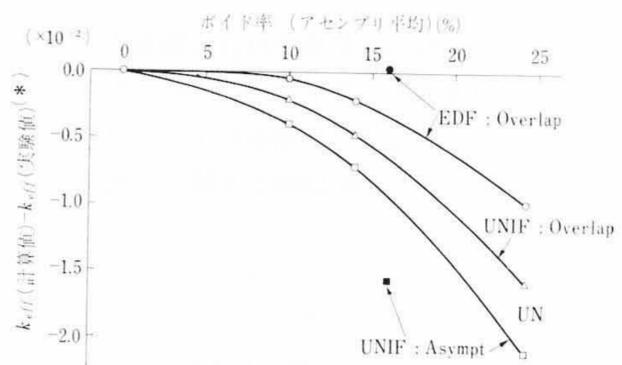


図10 ボイド炉心反応度 (・は分布ボイドの結果)

表5 アセンブリ内熱中性子束分布の実験と計算の比較

ボイド率	ε *	
	Asympt Spect	Overlap
0	4.3	3.4
10.1	7.5	3.7
14.0	7.5	3.5 (2.6)**
24.3	7.1	2.7 (2.1)**

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum \left\{ \frac{\phi_{cal} - \phi_{exp}}{\phi_{exp}} \right\}^2}{64}} \times 100(\%)$$

** () 内の値は Overlapping モデルにさらに中性子輸送効果を補正したもの。

子束分や炉心反応度の解析が改良された様子を示したのが図9, 10および表5である。図9はアセンブリ・セル内の中性子束について実験値と計算値の相対的な差を、表5はこの差の全測定点に対する自乗平均 (Root Mean Square) を実験したすべての炉心について示したものである。図および表から、このような考察を加えることによって反応度効果、中性子束分布とも実験と計算の差を約半分にするができることがすぐわかる。

4.2 制御棒そう入炉心の結果

BWR でよく用いられる B₄C-SUS の十字制御棒および Cd-Al 合金板 (灰色な吸収体となる厚さのもの) を中心にそう入した炉心で、炉心反応度や制御棒まわりの中性子束分布などを測定した。こ

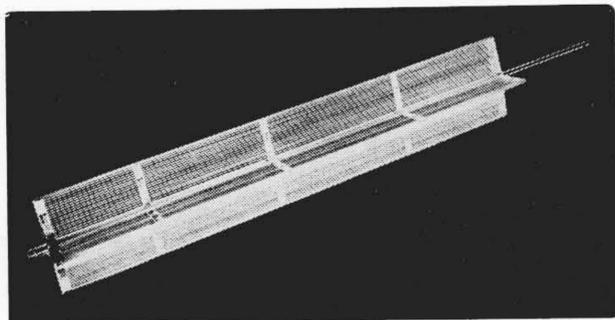


図 11 B₄C 十字形吸収体

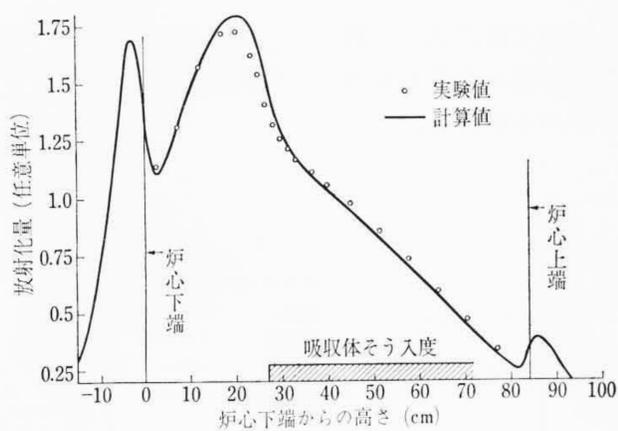


図 12 A-V 炉心熱中性子束縦方向の分布

ここでは紙面の都合で B₄C-SUS 制御棒の結果に限って述べる。この制御棒は中性子吸収体である B₄C 焼結ペレットをつめたステンレス鋼管を最大 72 本十字形に組み立てたもの (図 11 参照) で、燃料アセンブリ間の広い水ギャップにそう入されている。

表 6 に実験炉心の仕様をまとめて示す。

中性子束分布の測定は、A-I 炉心で制御棒の翼に直交する水平方向の分布、制御棒まわりのアセンブリ内部の微細分布、A-IV、A-V の中途そう入炉心における高さ方向の分布を求めている。

このような制御棒の解析は、(a) 熱中性子吸収に対して黒色の B₄C と灰色の SUS が複雑に入り組んでおり、(b) 制御棒まわりの媒質が一様でなく約 1 cm 幅の水ギャップがあるためきわめて複雑であり、計算を単純化するため、制御棒まわりの媒質をアセンブリ・セル平均の均質媒質と考えたうえで制御棒と中性子吸収量が等価となる板状吸収体におきかえる近似的な方法によった。こうした近似をすると制御棒の SUS 管の取り扱いや媒質の平均方法などに不確定な要素が残されるが、種々検討の結果ではこの不確定分は炉心反応度に対して +1~0.7% Δk の範囲内にあることがわかった。

大形の炉心で、かつ数多くの制御棒をもつ炉心を想定するとき、制御棒を周囲の媒質と区別して別個の領域として扱うことは、計算機の制限から実際は不可能であり、また可能であるとしても必ずしも得策とはいえない。この点を考えて実験解析では、制御棒の中性子吸収の効果を周囲の媒質の定数を調整することでおきかえることにし、Deutsch の吸収面積を適用した。

実験解析の結果を、制御棒そう入炉心反応度については表 7 に、

表 6 制御棒そう入炉心の仕様と k_{eff}

炉心記号	制 御 棒		炉 心		燃料装荷本数	
	注 1 そう入度	注 2 翼 長	注 3 ボイド率	水 温	2.5%	1.5%
A-I	1.0	18本/翼	0%	23.0℃	784	576
A-II	1.0	15	0	26.3℃	784	444
A-III	1.0	12	0	26.7℃	784	328
A-IV	0.68	18	0	26.5℃	784	312
A-V	0.51	18	0	23.7℃	784	540
A-VI	1.0	18	10	13.2℃	784	716
A-VII	1.0	18	14	10.1℃	784	816

注 1. 炉心全長に対する制御棒のそう入されている部分の割合

注 2. 十字形の翼の長さで B₄C-SUS 棒の本数で示した。

注 3. 制御棒まわりの 4 アセンブリのボイド率

表 7 制御棒そう入炉心の炉心反応度解析結果

炉心記号	k _{eff} (実験値)	k _{eff} (計算値)	Δk _{eff} *	等価反応度**
A-I	1.0011	1.0004	-0.07×10 ⁻²	8.7×10 ⁻²
A-II	1.0010	1.0013	+0.03×10 ⁻²	8.1×10 ⁻²
A-III	1.0002	1.0023	+0.21×10 ⁻²	7.5×10 ⁻²
A-IV	1.0009	1.0018	+0.09×10 ⁻²	7.3×10 ⁻²
A-V	0.9948	1.0013	+0.65×10 ⁻²	5.3×10 ⁻²
A-VI	1.0010	1.0012	+0.02×10 ⁻²	8.26×10 ⁻²
A-VII	1.0020	1.0001	-0.19×10 ⁻²	7.85×10 ⁻²

* Δk_{eff} = k_{eff} (計算値) - k_{eff} (実験値)

** 計算で推定した制御棒反応度

制御棒中途そう入炉心の中性子束分布についてはその一例を図 12 に示した。炉心反応度の計算はエネルギー組み分けを 4 組とし、制御棒まわりの 4 アセンブリ・セルに均質化した例で、第 3, 4 組に吸収面積法を用い、第 1, 2 の高速組では体積率により単純に均質化したものである。中性子束分布は制御棒に隣接したアセンブリの平均的な分布であり、代表的な燃料棒のデータから同一水平面内でのアセンブリの平均値を高さの関数として求めた結果である。計算値は炉心反応度計算で得られたものである。実験も計算も炉心部の平均値が 1.0 になるように規準化されている。表 7 に示されるように 5~9% Δk/k の等価反応度をもつ制御棒計算を 2~3% の相対誤差で通常は計算できることが示された。今回の実験解析では一例のみ 10% 強の誤差が生じたが、この原因はまだ明らかでない。

5. 結 言

以上述べた種々の形状の炉心に対して臨界実験とその解析を進め核設計用コードの信頼性を検討するとともに実験法を確立し、BWR 設計法の明確化、新形転換炉の炉物理実験計画への応用、高速炉の物理実験技術への適用などを図っている。

参 考 文 献

- (1) T. Wajima et al: Proceeding of the International Conference on the Physics Problems in Thermal Reactor Design, p.67 (1967)
- (2) T. Wajima et al: Nuclear Science and Engineering 31, 19 (1968)