資 料

JPDR-I の 炉 物 理 特 性

江 連 秀 夫*

(1971年 7月8日 受 理)

(1971年 8月28日 再受理)

Operational Characteristics of JPDR-I

By Hideo EZURE

Power-up tests of Japan Power Demonstration Reactor with recirculation flow (JPDR-I) were carried out in Oct. 1963. It was operated at the enhanced level up to 4,437 MWd/T and shut down in Sept. 1969. Many tests were carried during this operation. The resulting data are very useful for the understanding of the operational characteristics and verifying the 3-dimensional boiling water reactor model. For example, it was found that the position of control rods which had been logged the operation each hour reflected the history of burnup, and that also the temperature which the temperature coefficient had been zero increased with burnup. The reactor physical characteristics of JPDR-I differed between high and low power operations and these characteristics, together with the outline of reactor physical and hydrodynamic characteristics are outlined. As part of the studies on the measurements and analysis of burnup, a series of destructive and undestructive tests was carried out. The absolute γ -intensity of ^{137}Cs and isotopes ratios of U and Pu were also measured.

I. ま え が き

JPDR-I は日本原子力研究所がアメリカの GE 社から輸入して建設した自然循環型の BWR である。その熱出力および電気出力はそれぞれ 45 MW および 12.5 MW である。出力上昇試験は 1963 年 10 月から約 2 ヶ月間行われた。その後 1969 年 9 月に運転を停止し、JPDR-II**改造工事までに多くの人々の協力により、特性試験が行われ、それぞれの立場で報告された。これらは BWR の炉心特性を把握できるばかりでなく、3 次元核熱水力燃焼計算コードの検証にも大いに寄与した。例えば、運転時の制御棒引き抜き位置は 1 hr ごとに運転日誌に記入され、データ数も莫大であるが、炉出力および燃焼度をパラメータにして整理すると、引き抜き位置が増加していることがわかる。また、温度係数の測定は約 10 回行われ、温度係数がゼロである温度は燃焼とともに上昇していることがわかる。さらに

出力分布の測定は 5 回の γ プローブ試験および約 20 回のワイヤ照射試験により行われ、3 次元核熱水力計算コード FLARE、改良 FLARE 等の比較検討がなされ、その問題点もわかった。このように、炉特性のデータを整理すると、非常に貴重な結果が得られる。そこで、できるだけ生データの形で炉物理特性およびそれに関係の深い熱水力特性を報告する。

II. JPDR-I の概要と運転経過

JPDR-I は自然循環型の BWR で、第 1 表に示すような核熱水力特性(設計値であるので測定値と必ずしも一致しない)である。

JPDR-I の積算出力は、1963 年 10 月に出力上昇試験を開始してから 1969 年 9 月の停止までに、18,500.8

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

**JPDR-I の炉出力を 2 倍にし、強制循環型にした BWR である。

第1図 JPDR-I の出力量

MWD, 平均燃焼度4,437 MWD/Tである。その毎月の出力状況を第1図に示す。稼動率は月によって大幅に違い、燃焼度の解析は複雑になり、労力がかかり好ましくないが、5回にわたる γ プローブ試験による出力分布、約20回の中性子束の分布の測定がなされた。

第1表 核熱水力設計値

等 価 半 径	1,307.8mm
制 御 棒 プ レ ード	BC, 16本 寸法1460.5×225.42 ×9.525mm
フ ォ ロ ワ ー	Zr-4 114.30×6.350mm
ポ イ ゾ ン カ ー テ ン	24枚 1651.0×247.65 ×3.175mm
チ ャ ン ネ ル ボ ッ ク ス	Zr-4 122.10×1.524mm
実 効 燃 料 長	1,466.85mm
燃 料 棒 ピ ッ チ	6×6, 19.558
ク ラ ッ ド	Zr-2 14.122mm(外径) 0.762mm(厚)
ベ レ ッ ト	UO ₂ 12.497mm(外径)
U 初 期 装 荷 量	4.18 kg
²³⁵ U	2.6% 108 kg
燃 料 体 本 数	72体
停 止 マ ー ジ ン	0.04 $\Delta k/k$
軸 方 向 ピ ー キ ン グ	1.5
半 径 方 向 ピ ー キ ン グ	1.4
再 循 環 流 量	2065 t/hr
平 均 ボ イ ド	19%

第2表 JPDR における炉物理試験経過

事 項	年 月	備 考
最小臨界試験	'63. 8	ポイズンカーテンなし・あり最小炉心
出力上昇試験開始	'63.10	72本炉心
出力上昇試験	'63.11	40 MW 試験
定格出力達成	'63.12	45 MW 試験
100 hr 運転	'63.12	45 MW 達成
γ プローブ試験	'63.12	Half core について行う
燃料炉心配置変更	'64. 1	6体変更, 計装燃料装荷
制御棒シール水事故	'64. 3	
最小臨界試験	'64.10	
起動前炉物理試験	'64.11	
IPR 試験	'65. 2	シール水事故後の出力試験
竣工検査開始	'65. 2	
BPR 試験	'65. 5	
1,000 hr 運転	'65. 7	
γ プローブ試験	'65. 7	全燃料について行う
国産燃料装荷	'65. 9	6体変更
パイルオシレータ施設	'65. 9	B4 制御棒86 cm 以上引抜き不可
起動前炉物理試験	'65.11	

事 項	年 月	備 考
パイルオシレータ試験開始	'65.11	0~4/4 出力まで行う
Xe 空間分布測定	'66. 2	
炉雑音測定開始	'66. 3	
燃料炉心配置変更	'66. 8	
起動前炉物理試験	'66. 9	
制御棒過渡応答試験	'66.11	制御棒の挿入, 引抜きによる試験
GE スウェーデン産燃料取出し	'67. 2	
国産燃料装荷	'67. 3	4体の燃料移動, 計装燃料装荷
起動前炉物理試験	'67. 3	
TA #2F, TA #2R' 炉心装荷	'67. 7	6体の燃料移動
起動前炉物理試験	'67. 7	
IPR 特性試験	'67. 9	
格納容器漏洩試験	'67.11	
原子炉炉底検査	'67.12	
Monkey I, STA, TTA 炉心装荷	'68. 1	14体の燃料移動
圧力容器検査開始	'68. 6	
圧力容器検査終了	'68.12	
燃焼炉心炉物理試験	'68.12	ポイズンカーテンあり・なし炉心最小臨界試験, 温度係数, 制御棒の反応度, 燃料反応度
起動前炉物理試験	'69. 5	
A-1 制御棒交換	'69. 6	
燃料移動	'69. 6	6体の移動
起動前炉物理試験	'69. 7	
γ プローブ試験	'69. 9	全燃料について実施

これらの各種の炉物理試験の経過を第2表に示す。燃焼度の計算に欠かせないデータは炉心構成の変遷である。炉心構成は一連の国産燃料の照射試験, パイルオシレータの設置のため複雑な経路をたどっている。燃料体の種類も多く, GE 製の燃料体(マトリクス6×6)をはじめとし, 7×7, 8×8の国産および計装燃料がある。これらの燃料体は核定数の分類をすると15種類にもなる。代表的な燃料体の断面を第2図に示す。

炉心の制御材は制御棒および初期の余剰反応度を抑制するポイズンカーテンである。これらの炉心配置を第3図に示す。

中性子検出器は¹⁰B 検出器, CIC, インコアモニタ等がある。¹⁰B 検出器は起動用として用いられ, 2チャンネルある。CIC は出力計の3および log N 計の2系統である。インコアモニタはインコアワイヤ照射をするインコアチューブ内にある。インコアワイヤは8

第2図 燃料集合体断面図(GE 6×6 assy)

第3図 炉心配置図

本が炉心に挿入され, 1/4対称炉心の中性子束の分布を測定することにより, 全炉心の中性子束分布がわかるように配置されている。

Ⅲ. 低出力炉物理特性

動力炉は低出力と高出力によって大きく異なるので, それぞれにわけて説明する。

1. 最小炉心試験

最小臨界試験は初回臨界試験, 燃焼度が182および4,100 MWD/T のとき行われた。第1回および第2回は未臨界法およびペリオド法を併用して臨界量の測定が実施された。第3回は未臨界法, パルス中性子法, ペリオド法を用いて実験が行われた。とくに第3回の燃

焼した燃料を用いての最小臨界試験は γ 線が強く($10^4 \sim 10^6$ R/hr), ^{10}B 検出器の中性子に対する信号が γ 線の電離作用によってマスクされ、検出器としての機能を果さなくなる。そのため中性子対 γ 線比の大きい核分裂中性子検出器を用いなければならない。また、CICが高い γ 線の雰囲気では不完全な γ 線補償のため、未臨界でも制御棒の駆動による γ 線の強度の変化の結果、短周期で原子炉の安全系がスクラムすることがある。

臨界位置は制御棒の引き抜き、挿入による正負のベリオドを測定し、ベリオドがゼロになる臨界制御棒位置を求めた。炉心周辺に装荷された検出器、中性子源、制御棒の挿入長さ等の反応度効果を求めて、すべての制御棒が全引き抜きの状態の増倍係数を得た。これらの実験結果を第3表に示す。また、その炉心構成の1例を第4図に示す。

第3表 最小臨界試験

炉 心 構 造	ポイズンカーテン			
	あり	なし	あり	なし
増 倍 係 数	1.0072	1.016	1.004	1.013
燃 料 体	15	9	20	13
燃 焼 度 (MWD/T)	0.	0.	4,700.	4,800.

No. of fuel elements in core 20 □: Fuel element
No. of poison curtain in core 14

第4図 最小臨界炉心構成の1例

燃焼した燃料体を用いた最小炉心実験では、燃料装荷本数と増倍係数との関係をパルス中性子法で測定した。その結果を第5図に示す。

ポイズンカーテンなし最小炉心は、初回のとき9体で臨界になった。平均4,800 MWD/Tの燃焼度の燃料体を用いた炉心は12体で臨界になり、9体炉心の増倍係数は0.9739である。

第5図 臨界量の計算値と実験値との比較

ポイズンカーテンあり炉心の初期の最小炉心は15体で臨界に達した。182 MWD/T 燃焼した15体炉心の増倍係数は、初回臨界試験の炉心構成と同じようにポイズンカーテンを挿入したとして、反応度を補正($0.183\% \Delta k/k \times 5$ 枚)すると0.9960になる。平均燃焼度が4,820 MWD/Tの燃料体の15体炉心の増倍係数は0.9721である。したがって、 S_m や核分裂生成物質の毒作用による反応度効果は約 $0.0112 \Delta k/k$ と求められる。また、ポイズンカーテンあり、およびなし12体炉心の増倍係数も測定した。それらはそれぞれ0.9446および1.0022である。ポイズンカーテンは6.5枚であるので、1枚当り $0.000886 \Delta k/k$ となり、初回臨界試験の結果の約 $1/2$ におちている。

2. 燃料体反応度

燃料体が燃焼によって反応度がどのようにかわるかを最小臨界炉心にテスト領域を作りパルス中性子法で調べた。たまたま未照射燃料体があったので、燃料体の平均燃焼度が0から5,300 MWD/Tまで計6体の反応度を測定した。この結果を第6図に示す。

この実験で次のようなことがわかった。

- (1) 燃焼度対反応度変化は1次関数で表わされる。
- (2) 計算結果の方が燃焼度に対する反応度変化を大きく見積っている。

実験値 $-0.220\% \Delta k/k/1,000 \text{ MWD/T}$

計算値 $-0.267\% \Delta k/k/1,000 \text{ MWD/T}$

- (3) 測定誤差は $\pm 250 \text{ MWD/T}$ である。

燃料体の燃焼度と反応度との関係が充分な精度で測定ができることがわかった。

第6図 燃料体反応度

3. 温度係数の測定

温度係数は初回から JPDR-II 改造工事に伴う炉停止までに約10回実施された。測定は主にペリオド法によって行なった。燃焼した炉心についてはパルス中性子法によっても行なった。

まず、初めに所内ボイラーを熱源として、炉心温度を約5℃おきに上げて炉心温度、制御棒パターンを一定にし、臨界にしてある1本の制御棒を引き抜いてペリオドと温度とを測定する。次に、制御棒を挿入して未臨界にし、炉心温度を約5℃上げて制御棒を前回の引抜き位置まで引き抜いて温度、ペリオドの測定をする。この手順を高温までくりかえすことにより、温度係数が測定できる。

温度と反応度との関係を2次および3次式にフィッティングし、測定データの最適な定数を求めた。これまでの測定結果を第7図に示す。

温度係数は30℃以下で正になり、温度係数がゼロである温度は燃焼とともに約4℃/1,000 MWD/Tの割合で高くなる。また、高温の温度係数は常温の値にくらべて約10倍も大きい。

4. 停止マージン、スタックロッドマージン

停止マージンおよびスタックロッドマージンは炉心構成をかえるたびに測定した。停止マージンは制御棒落下法で測定し、スタックロッドマージンはペリオド法と未臨界法を併用して行なった。これらの測定結果を第8, 9図に示す。停止マージンの設計値は4.7% $\Delta k/k$ であるが、測定値は8% $\Delta k/k$ 以上ある。また、スタックロッドマージンの設計値および測定値はそれ

第7図 反応度の温度係数

ぞれ0.3および1.8% $\Delta k/k$ 以上であり、設計値よりはるかにマージンがあることがわかった。停止マージンもスタックロッドマージンも燃焼が進むにつれて大きくなる。

第8図 スタック・ロッドマージンの増加

第9図 停止マージンの増加

5. 燃焼に伴う制御棒臨界位置

初回臨界から JPDR-I 運転終了まで約1,100回の臨界操作をした。これらの制御棒位置の変化をできるだけ同一の運転条件のデータを集録して、燃焼度をパラ

メータにして整理した結果を第10図に示す。

第10図 制御棒位置と燃焼度

制御棒パターンには制御棒高さ一定(Gang rod pattern)および通常運転パターン(Normal rod pattern)の2つがあり、制御棒高さ一定による臨界位置の測定は、燃焼度の測定の一貫として初回臨界から計画され実施された。通常運転パターンは起動の過程で行うので、データ数は1,000回を越える。これらのデータは炉心温度が高かったり、Xe 効果があったりして、必ずしも同一運転条件とみなすことができないので、次のような条件のもとで整理した。

- (1) Xe 効果が少ないこと。
- (2) 出力が上昇または下降していて臨界位置が不明なものは除く。
- (3) 炉心温度が40°C以下である。
- (4) Normal および Gang rod pattern から著しく離れていない。

燃焼度に対する制御棒の臨界位置は1次関数として表わすことができる。これは前に述べた燃料体反応度と燃焼度が1次関数で表わされるのと類似している。ゼロ燃焼度の制御棒臨界位置は燃焼度と臨界位置との関数から外挿した値と異なる。これは S_m や核分裂生成物の効果の現われである。

6. 制御棒ワース

制御棒ワースの測定はクリーンな炉心で行うことが理想であるが、JPDR-I では燃焼した炉心で未臨界法およびパルス中性子法によって求めた。未臨界炉心を作り、制御棒の全挿入、全引抜きで、パルス中性子法により α 値を測定して制御棒の吸収反応度を求めた。また制御棒のワース曲線を未臨界法で測定した。これらの結果と実験体系の例を第4表(1)、(2)および第11図に示す。

7. 燃料体内の中性子束分布

低出力の燃料集合体内の中性子束分布は、初回臨界および燃焼した炉心の実験のとき実施された。燃焼炉心体系では、燃料体内にホイルホルダの取付けを遠

第4表 (1) 9体燃料炉心におけるA-3制御棒のワース

	α (sec^{-1})	反応度 (% $\Delta k/k$)
制御棒4本全引抜き	980.0 ± 3.1	-3.921
A-3制御棒全引抜き 制御棒3本全挿入	$2,191.4 \pm 2.1$	-9.627
A-3制御棒のワース		5.706

(2) 制御棒4本の合計ワース

		9体燃料	12体燃料
α (sec^{-1})	全挿入	$4,810.86 \pm 0.45$	$4,047.30 \pm 20.0$
	全引抜き	980.00 ± 2.44	167.14 ± 1.19
反応度 (% $\Delta k/k$)	全挿入 ρ_I	-21.9681	-18.3741
	全引抜き ρ_W	-3.9205	-0.0902
制御棒ワース ($\rho_W - \rho_I$) (% $\Delta k/k$)		18.0476	18.2839

第11図 制御棒ワース曲線

隔操作で行わねばならない。初回の実験は Dy ホイルを用いてポイズンカーテンあり炉心で実施された。また第2回の実験はポイズンカーテンなし最小炉心のほぼ中央で Cu ホイルを用いて行われた。この結果を第12、13図に示す。

8. 低中性子源下での起動

JPDR-I の起動用中性子源は Sb-Be であるので、原子炉の長時間停止すると中性子源は弱くなり、起動が困難になる。起動に際しては運転の技術基準が定められ、信号対雑音比が3以上なければならないので、この実証ならびに起動の方法を検討した。

炉心内外に設けられた2系統の中性子検出器の中性子計数および中性子源との間には、1点近似モデルに従うと、

第12図 Cu ホイルを用いた制御棒
近傍の中性子束分布

第13図 Cu ホイルを用いたフォロ
ワー近傍の中性子束分布

$$N = \frac{S}{1-k}, \quad N' = \frac{S}{1-k} + n \quad (1)$$

N : 炉心内の検出器の計数

N' : 炉心外の起動用検出器の計数

n : 雑音

S : 中性子源の強さ

k : 増倍係数

なる関係があるから、増倍係数をかえて計数すると信号対雑音比が求められる。この結果は5~7と得られた。

通常の起動手順に従った制御棒引抜きで、起動用中性子検出器と、炉心に一時的に挿入した検出器との計数率の関係を測定し、信号対雑音比が3以上になる制御棒引抜き位置で、充分に未臨界であることを確かめて通常起動の手順で運転を再開した(第14図参照)。

IV. 高出力炉物理試験

1. 燃焼に伴う制御棒引抜き

初回臨界試験から JPDR-I 運転停止まで、運転データは運転日誌に1hrごとに記入されている。運転の方法も実験によって種々雑多であるので、運転データの整理の方法を確立して統一的な考え方で整理しなければならぬ。1hrごとの制御棒引抜き位置を炉出力を重みとして、月ごとの平均制御棒引抜きを求めた。すなわち、

$$\langle H_i \rangle = \frac{\sum_i P_i H_i}{\sum_i P_i} \quad (2)$$

H_i : 制御棒引抜き, P_i : 炉出力

さらに、(2)式で炉出力が90%以上のときの制御棒引

第14図 計数率と制御棒引抜き

抜き位置を第15図に示す。JPDR-I は制御棒16本のうち真中の4本は対角の2本を1つのグループとして全出力で50日運転した後、スワッピングする。したがって、制御棒の配置が運転時間によってかわる。それぞれのグループの制御棒の反応度は制御棒の構造および均一性試験の結果から充分に均一性が保障されている。制御棒のスワッピングをしても、それぞれのグループの反応度効果は同一であるとした。

第15図から、燃焼が進むにつれて制御棒が徐々に引き抜かれ、段違いがあるのは燃料のシャフリングや交換をしたためである。この詳細については炉心構成歴

第 15 図 平均制御棒位置と燃焼度

を図示しなければならない。その概略を第15図の上部に矢印で示す。さらに燃焼度の計算は制御棒パターン変更に従って行えば理想であるが、JPDR-I のように実験のため炉出力および制御棒パターン変更が多い原子炉については、計算量のみが多くなり得策でない。したがって、燃焼度計算のため、5%以上の出力を重みとした月間の平均制御棒引抜き位置を求めた。この結果を第5表に示す。これからわかるように、月によって炉出力が異なるため、制御棒引抜き位置と燃焼度との関係を一義的に表わすことはできないが、出力運転時の制御棒引抜き位置を追跡し、燃焼に伴う余剰反応度の変化を求められることは貴重な結果である。

2. γ プローブ試験

γ プローブ試験は一定出力で長時間運転して停止し、直ちに核分裂生成物質の γ 線を小型電離箱で測定して出力分布を求める試験である。燃料体を炉心から移動し、2個所に小型電離箱を挿入して、5cmおきに軸方向の γ 線の強さを測定する。これらのデータの検出効率を補正して、出力分布を求めた。この補正は

$$M_i = \sum_{j=i-1}^{n-i} a_{ij} \rho_{i-j} \quad (3)$$

ρ_{i-j} : 測定点 $i-j$ の γ 線の強さ

a_{ij} : 測定点 i から j 点の幾何学効率

M_i : 小型電離箱の位置 i の γ 線の強さ

をとくことによって、 ρ_k を求めることができる。幾何学的効率は簡単な遮蔽計算によって求めた。この結果によると、測定点 i に対する効率は測定点の間隔を5cmにとると $a_1 : a_2 : a_3 : a_4 : \dots = 1.0 : 0.1646 : 0.0279 : 0.0001 : \dots$ と求められ、測定点から3個以上離れた位置の γ 線は考えないでよい。補正値も約30%あるこ

とがわかる。したがって、(3)式による補正計算は $a_4 = a_5 = \dots = 0$ として、軸方向、半径方向のビーキング係数およびグロスビーキング係数を求めた。これまでに行われた5回の γ プローブ試験(第6表)の結果の実例を第16, 17図に示す。これらの測定結果から次のことがわかった。

- (1) 第1回と第2回試験のときの最大グロスビーキングは炉心中心高さから20~30cm下方にあるが、第5回試験では20~30cm上方にある。
- (2) 第3回試験では、周辺部の半径方向のビーキング係数が第5回試験にくらべて大きい。逆に中心部は第5回が大きい。

一般に出力分布は燃焼によって平坦化する傾向にあるが、制御棒引抜きとボイド分布とが複雑にからみ、ビーキングが大きくなって振動する傾向がある。JPDR-I についても、これらの現象が観察された。したがって、燃焼によって余剰反応度が減少することによって、炉心寿命が減少することよりもビーキングが大きくなり、最大限界熱流束に近くなって、炉心寿命がなくなることが起りうる。極端な場合、余剰反応度があっても燃料シャフリングや交換を行わねばならないので、出力密度の高い原子炉を作る場合は、燃焼度変化による出力分布の変化と限界熱流束との関係を検討する必要がある。

3. 燃料集合体内の出力分布

燃料体を解体して燃料棒ごとの軸方向の γ 線を測定し、出力分布あるいは燃焼度分布を求めることができる。JPDR-I では燃料体のうち2体を解体し出力分布を測定した。

燃料棒の軸方向の γ 線をコリメータを介して NaI

第 5 表 出力運転時の制御棒位置

月 別 (年 月)	運転時間 (hr)	燃 焼 度 (MWD/ T)	平均出力 (%)	標準偏差	誤 差 (%)	平均制御棒高さ (cm)						
						D グ ル ー プ			E グ ル ー プ			
						B-2	C-3	平均	B-3	C-2	平均	
1963	12	193	130	81.83	21.45	0.268	102.80	104.20	103.50	3.13	3.30	3.22
1964	3	135	170	63.77	37.00	0.580	85.16	85.38	85.27	0.39	0.39	0.39
	12	177	200	35.84	23.08	0.6444	34.67	34.19	34.53	0	0	0
1965	1	239	240	45.88	25.40	0.554	46.14	46.13	46.23	2.23	2.12	2.18
	2	216	290	45.53	32.36	0.711	60.43	60.33	60.38	0	0	0
	3	376	390	57.95	30.94	0.534	76.13	77.96	77.15	2.22	0.82	1.52
	4	462	540	71.27	30.14	0.423	38.31	88.40	88.36	12.01	11.99	12.00
	5	487	740	84.33	24.43	0.290	23.55	23.57	23.56	104.76	104.97	104.87
	6	678	1,030	91.09	9.64	0.106	28.82	28.82	28.82	108.76	108.78	108.77
	7	65	1,060	90.94	0.5566	0.00612	30.00	30.00	30.00	110.49	111.06	110.78
	9	146	1,100	66.42	30.72	0.462	98.05	98.23	98.14	25.61	25.57	25.59
	10	388	1,270	63.68	27.57	0.433	93.70	93.78	93.74	18.32	18.32	18.32
	11	690	1,380	74.98	25.93	0.346	58.83	58.87	58.85	65.44	65.38	65.41
	12	416	1,500	66.24	26.81	0.405	88.52	88.38	88.45	19.03	19.04	19.04
1966	1	511	1,690	79.92	24.15	0.302	98.71	98.51	99.61	33.08	33.23	33.16
	2	466	1,810	61.46	29.56	0.481	26.13	26.05	26.09	80.36	80.46	80.41
	3	402	1,940	66.88	30.72	0.459	89.52	89.89	89.71	33.56	33.76	33.66
	4	632	2,180	85.80	20.42	0.238	42.00	43.26	42.63	99.04	100.52	99.78
	5	209	2,280	97.32	0.5023	0.00516	48.00	48.00	48.00	108.85	109.09	108.97
	9	169	2,320	60.90	24.42	0.401	19.09	19.38	19.24	92.81	92.65	92.73
	10	501	2,470	54.93	26.44	0.407	52.17	51.95	52.06	68.68	68.45	68.57
	11	548	2,690	90.45	18.52	0.205	105.05	104.97	105.01	48.68	48.58	48.63
	12	425	2,820	71.10	27.44	0.386	41.95	41.86	41.91	99.96	100.00	99.98
1967	1	593	2,940	43.32	6.183	0.143	27.46	27.35	27.41	105.68	105.74	105.71
	2	18	2,950	42.57	0.149	0.00349	29.00	29.00	29.00	109.67	169.00	109.34
	4	581	3,070	50.12	16.22	0.324	16.61	16.63	16.62	80.56	80.28	80.42
	5A	328	3,190	80.74	26.43	0.327	43.07	43.08	43.08	98.69	98.53	98.61
	5B	214	3,280	89.07	15.37	0.173	100.68	100.80	100.74	46.60	46.60	46.60
	6	483	3,450	80.00	23.01	0.288	87.90	88.03	87.97	58.01	58.55	58.28
	8	52	3,460	31.93	32.57	1.020	85.38	84.31	84.85	4.26	4.26	4.26
	9	704	3,730	85.54	21.68	0.253	100.66	101.50	101.08	53.78	54.88	54.83
	10	163	3,800	97.03	9.632	0.0993	109.20	109.29	109.25	62.23	62.50	62.37
1968	4	555	4,010	78.33	24.33	0.311	51.66	51.57	51.62	103.91	104.25	104.08
	5	166	4,060	69.11	34.24	0.496	46.36	46.27	46.32	98.68	97.81	98.25
1969	7	156	4,110	65.58	19.41	0.296	30.81	30.92	30.87	101.06	100.75	100.91
	8	741	4,440	94.98	11.32	0.119	65.14	65.18	65.16	107.44	107.44	107.44

検出器で測定した。燃料体中の全燃料棒について測定ができなかったので、測定値を最小自乗法でカーブフィッティングし、測定できなかった燃料棒の出力分布を内外挿して求めた。チャンネル内の出力分布は、測定および内外挿点の平均を規格化して定めた。第18図は6×6燃料体のローカルピーキングを示す。また、

第19図は軸方向の相対出力分布を示す。

すでに燃料体内の出力分布が測定された燃料体は、周辺制御棒の影響の少ないものと多いものの2体である。インコアモニタ内の中性子分布から燃料体内の出力分布を外挿する補正係数の検証もできる。ローカルピーキングはボイド量の大きい炉心上部のコーナロッ

第 6 表 γ プローブ試験

	1st run	2nd run	3rd run	4th run	5th run
原子炉出力 (MWt)	43.9	43.7	44.5	20.1	44.3
出力分布一定 運 転 日 数 (日)	6	14	23	9	12
原子炉停止日	12/11/'63	7/3/'65	5/9/'66	2/1/'67	9/1/'69
試 験 開 始 日	12/21/'63	7/12/'65	5/15/'66	2/8/'67	9/11/'69
冷 却 期 間 (日)	10	9	6	7	10
燃 焼 度 (MWD/T)	130	1,060	2,280	2,950	4,440

第16図 軸方向ピーキングと燃焼度

第17図 燃料要素間の出力分布

ドほど大きくなるのが特徴である。また、 6×6 燃料体で燃料棒の軸方向のピーキングは設計値を越えるものもあるが、ローカルピーキングと軸方向ピーキング

		Poison Curtain			
		1.2601	1.0665	1.0236	0.9076
		0.9201	0.9638		
		1.2717	1.079	0.9567	0.8969
		0.8907	0.8710		
		1.2592	1.0566	0.9148	0.8799
		0.8433	0.469		
		1.1968	1.0174	0.9165	0.8746
		0.8432	0.8603		
		1.0995	1.0317	0.9620	0.8933
		0.8987	0.8898		
		1.3449	1.1504	1.0790	0.9924
		1.0334	1.0076		
Follower		Local peaking (Top 30 cm)			
		Poison Curtain			
		1.1676	1.0258	1.0184	0.8811
		0.8766	0.9293		
		1.2217	1.0570	0.9757	0.8662
		0.8759	0.8863		
		1.2410	1.0547	0.9211	0.8811
		0.8388	0.8477		
		1.1802	1.0354	0.9419	0.8825
		0.8239	0.8246		
		1.1787	1.0607	1.0251	0.8640
		0.9397	0.9159		
		1.3450	1.1832	1.1342	0.9998
		1.0651	1.0525		
Follower		Local peaking (Top 70 cm)			
		Poison Curtain			
		0.8911	0.9721	0.9221	0.9261
		0.9561	0.7731		
		1.1241	0.9551	0.9861	0.9261
		0.9341	0.9501		
		1.1551	1.0071	0.7261	0.9341
		0.9491	0.9541		
		1.0051	1.0271	0.9591	0.7751
		0.9051	0.9451		
		1.2491	1.0551	1.0151	0.9851
		0.9851	0.9621		
		1.3171	1.2101	1.2311	1.1771
		1.1371	1.0261		
Follower		Local peaking (Bottom 30 cm)			

第18図 ローカルピーキング係数

の積 $1.46 \times 1.5 = 2.19$ (設計値)を越えるものではなく、最大1.82である。

4. インコアワイヤ照射

インコアチューブは圧力容器を貫通して炉心の上部まで達し、途中の2個所にインコアモニタが挿入されている。インコアワイヤ照射の目的は、全出力50日運転ごとの制御棒のスイッチングによる出力分布の歪とインコアモニタの較正である。これらの目的のためJPDR-Iではインコアワイヤ照射が約20回行われた。

初回臨界試験では、制御棒引抜き位置に対する中性子束分布の歪みの様子を43.4~43.5 MWで測定した。その例を第20, 21図に示す。その例からもわかるように、中性子束分布は制御棒引抜きによって大きくかわることがわかる。制御棒の入替交換(炉心中央の4本)によっては中性子分布の対称性もくずされない。さら

第19図 軸方向の相対出力分布

に燃焼が進むにつれて、制御棒が引き抜かれて中性子束の分布が大きくなり、初期炉心では炉心上部にピーキングがあったのがしだいに下部に移り、また上部に移ることが観測され、 γ プローブ試験と対比して考察すると興味深い結果が得られる。

インコアワイヤ照射から得られる中性子束分布と燃料体の出力分布との関係は、運転する立場からすると運転方法や燃焼度の最適化を決定する上に重要である。インコアワイヤ照射と γ プローブ試験との結果を比較した。インコアワイヤ照射の結果からインコアワイヤチューブに燃料体があったと仮定し、ポイド分布の補正をして出力分布を求めた。また一方、同じ実験

条件での γ プローブ試験結果のうち、インコアチューブを囲む4体の燃料について平均を求めた。これら2つの結果の軸方向分布の1例を第22図に示す。これらの結果から、制御棒による出力分布の歪みの少ない燃料体はインコアワイヤ照射から出力分布が推測できる。歪みの大きい燃料についても、約8%以内で両者が合うことがわかった。

5. 燃焼度の測定の経過

JPDR-I に装荷された国産燃料の燃焼度、UおよびPuの同位体比を測定した。燃料体を解体して燃料棒の γ スキャンニングを行なって、燃焼度分布を測定した。破壊試験のサンプリング用として合計5本をと

第20図 インコアワイヤ照射(1963年12月9日 43.5MWt)

第21図 インコアワイヤ照射(1963年12月1日 43.4 MWt)

第22図 インコア照射とγプローブ試験

り、そのうちの比較的燃焼度の高い部分を約1 cm切断して分析した。燃焼度は ^{137}Cs 、U および Pu の消滅生成率から得られた。サンプリング点の燃焼度とそのピーキング係数を第7表に示す。この結果から、燃料体の平均燃焼度は2,307.3 MWD/T と得られる。また、γスキャンニングによる軸方向の燃焼度分布と平均燃焼度から、燃料体の燃焼度の絶対値の分布が得られる。この測定および FLARE による計算結果を第23図に示す。

U の同位体比と燃焼度との測定結果および計算の1例を第24, 25図に示す。Pu の同位体比の百分率組成と燃焼度との測定結果および計算結果を第26図に示す(^{241}Pu については冷却期間の減衰の補正をした)。燃焼度の測定結果と解析結果は $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ の例を除いてはほぼ一致している。

U や Pu の同位体および定量から、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu の断面積の評価ができる。例えば、 ^{239}Pu について考えてみる。 ^{239}Pu および ^{240}Pu の初期量がゼロであるとすると、

$$\frac{N^{40}}{BN^{49}} = \sigma_{a^{49}} \frac{F(a^{28}, a^{49}, a^{40})}{F(a^{28}, a^{49})} \frac{\phi t^{(5)}}{B} \quad (4)$$

第23図 ピーキング係数と燃焼度

B: 燃焼度, N^{40} : ^{240}Pu の個数

N^{49} : ^{239}Pu の個数, ϕt : Flux time

$a^{28} = \phi t \sigma_{a^{28}}$, $a^{49} = \phi t \sigma_{a^{49}}$, $a^{40} = \phi t \sigma_{a^{40}}$

$F(a^{28}, a^{49})$, $F(a^{28}, a^{49}, a^{40})$: a^{28} , a^{49} , a^{40} の関数

と表わされ、 $F(a^{28}, a^{49}, a^{40})/F(a^{28}, a^{49})$ は燃焼度が小さいときはほぼ一定であるので、 $\phi t/B$ を $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ および吸収断面積の1次関数として表わすことができる。したがって、 $\sigma_{a^{49}}$ は $\sigma_{a^{28}}$ の1次式として表わすことができる。これらの結果を第27図に示す。

V. 熱水力特性

BWR の核特性は熱水力特性によって大きくかわるので、核特性は熱水力特性を知ることなしには理解できない。断面積はボイド率によって約1/2にもなる。燃焼度もボイド率によってことなるので、熱水力特性の概略を示す。

JPDR-I の熱水力特性は IFA 1~3 と一連の実験により測定された。計装燃料によって直接測定できる量は、入口および出口流量、出力分布、出口クオリティである。一方、Bankoff の式を仮定することにより、ボ

第7表 燃焼度の測定

試料番号	セグメント No.	チャンネルピーキング	燃 焼 度 (MWD/T)	チャンネル平均 (MWD/T)
1	SA-559 (Top)	1.498	3,474	2,319.1
2	SA-720 (Top)	1.197	2,771	2,315.0
3	SC-709 (Bottom)	1.395	3,286	2,335.6
4	HC-907 (Bottom)	1.047	2,468	2,357.2
5	HA-905 (Top)	1.125	2,464	2,189.6

平均 2307.3

第24図 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ の燃焼度 第25図 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ の燃焼度

第26図 Pu の同位体比の百分率組成

第27図 捕獲断面積

イド率とクォリティの関係およびスリップ比が得られるので、ボイド率を求めることができる。また、サブクール温度は熱電対で測定される。これらの熱水力特性を燃料体の熱出力を関数として第28図に示す。これらのデータは JPDR-I の出力分布や燃焼特性の解析に FLARE の入力データとして活用されている。

Ⅶ. その他の特性

JPDR-I において大きな炉物理の問題は、圧力容器の速中性子による照射脆性である。反射体内の速中性子のスペクトルは場所によって大きくかわるため、照射サンプル(炉心の近くに圧力容器と同じ材料をおい

第 28 図 熱 水 力 特 性

て照射脆性の加速試験に使用)および压力容器の位置の速中性子スペクトルを正確に評価することができない。その結果、モニタリング母材のしきい値断面積

($^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$)の実効値が不正確になる。例えば、実効断面積が場所により2倍にもなり、压力容器の寿命の評価が $\frac{1}{2}$ になる。炉心から離れた水中および压力容器のスペクトル、照射量の推定が的確にできない。そこで、モニタリング母材の $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ の放射能や、インコアチューブにNi線を挿入して $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ による速中性子束を測定した。また、反射体中の速中性子の減衰をNi, In, Al等のしきい値反応度で測定した。これらの1例を計算とともに第29図に示す。この結果から、計算値が測定値より大きいことは压力容器の安全性からみて好ましくない。速中性子の測定法や遮蔽計算法の改良が望まれる。

VII. あとがき

JPDR-Iの炉物理特性の概要を述べた。データの評価や解析の方法について詳しく述べることは誌面できつくせないで、炉物理特性の概要を述べるにとどめた。

なお、JPDR-Iの燃焼度の測定は現在までに燃料体3体を解体して、 γ スキャンニングおよび破壊試験による燃焼度、およびU, Puの同位体比と組成比の測定を計画し実施中である。

第29図 高速中性子束

これまで述べた炉物理特性データは、JPDR-I に関与した電力会社、国内メーカー、大学を初めとして多くの人々の努力によって得られた。関係各位に厚く御礼申し上げる。

— 参 考 文 献 —

- (1) 原研 JPDR 管理部: *JAERI-1067*, (1965).
- (2) UGA, T.: *JAERI-1136*, (1967).
- (3) 横田光雄, 他: *JAERI-memo* 3229 (未公開), (1968).
- (4) 江連秀夫, 他: *JAERI-memo* 4083 (未公開), (1970).
- (5) 江連秀夫, 他: *JEARI-memo* 4239 (未公開), (1970).
- (6) 小森卓二, 他: *JAERI-memo* 4313 (未公開), (1971).

投 稿 歓 迎 ！ 本「会 誌」各欄の要綱 (42年1月一部改正)

本誌各欄の内容は、大要つぎのとおりです。(有料分の掲載料は6,000円/頁)

- ① 研究論文(6頁まで無料) 独創性のある、結論の明確な、未発表の論文。欧文は「欧文誌」に掲載される。
- ② 技術報告(6頁まで無料) 施設・設備・装置等の建設・試験・運転などの経験や結論をまとめた実用的価値のある技術的論文。欧文は「欧文誌」に掲載。
- ③ ショート・ノート(2頁) 研究・技術上の新知見の速報、掲載論文に対する意見および質疑応答(寄書・討論を含む)。欧文は「欧文誌」に掲載。
- ④ 資 料 (6頁まで無料) 研究・技術に関する参考資料および解説・調査集計報告など。
- ⑤ 私のノートから(2頁) 各専門分野の研究、技術、経験等の報告。
- ⑥ 談 話 室(1~2頁) 本会および本誌に対する希望・提言、および国際会議などの見聞記・感想など。
- ⑦ 巻頭言、総説、講演・討論会要旨、講座、新刊紹介等の各欄は編集委員会で企画の上寄稿を依頼する。

会員投稿欄は、研究論文、技術報告、ショート・ノート、資料、私のノートから、談話室ですから、奮ってご投稿願います。ご投稿には所定の原稿用紙(30枚綴り1部100円千45円。欧文は適宜のタイプ用紙で正副2通)により、「投稿規程」に従って事務局宛ご送付下さい。その他、ご意見・ご希望やご提案は大歓迎です。