

# 軽水形原子炉における自己制御性の実験的研究

## Self-limiting Power Excursion Test on Light-water Reactor

山田周治\* 今井宗丸\* 井上清\*  
 Syūji Yamada Munemaro Imai Kiyoshi Inoue  
 田上嵩\*\* 飯塚富雄\*\*\*  
 Takashi Tagami Tomio Iizuka

### 要 旨

軽水形原子炉の反応度事故に対する自己制御性を実証するために、日立製作所中央研究所王禅寺支所と東京原子力産業研究所とが協力して、王禅寺支所に設置の HTR (日立教育訓練用原子炉) のパルス運転を実施した。HTR は定常出力 100 kW のプール形原子炉であるが、これをパルス運転可能な原子炉に改造した。運転方法、機器の性能および制御系などについては、特に安全性の確保に留意した。投入反応度 1%  $\Delta K/K$  の実験では、炉周期 29 ms, 最大出力 38 MW, 放出エネルギー 5.1 MWs, 燃料最高温度 625°C に達した。一方、2 点近似動特性モデルを用いた原子炉反応度事故解析用計算コードを開発し、HTR の実験結果と比較しながら修正を加えて、実験的裏付けのある計算コードを確立した。計算と実験との結果は、10% 以内で一致し、軽水炉の自己制御性を実証した。

### 1. 緒 言

原子炉の安全性を評価する際の重大事故としては、反応度事故による炉出力の異常遷移と冷却材の喪失による核燃料体の異常過熱が代表的な二つの想定事故である。その事故現象の推移を、原子炉計測制御装置および安全防護施設の機能と関連づけて解析するのが、安全性評価、逆にいえば事故評価の方法である。このような事故解析の信頼度は、解析の方法、およびその中で使用される種々の物理量、実験式などの精度によるのは当然であるが、一方、これらをすべて含んだ全体の体系についてのマクロな解析結果に対する信頼度の確認が必要であり、これを実験によって実証することは特に重要である。

#### 1.1 HTR パルス運転実施の動機

前述の二つの想定事故の中で冷却材喪失については、昭和 38 年、日本原子力産業会議安全特別研究会に SAFE プロジェクト小委員会が設けられ、冷却材喪失事故と、それに伴う後備安全防護装置の機能に関する試験研究が実施されて、日立製作所でも日立研究所を中心として、積極的にこれに参加した<sup>(1)</sup>。しかし、もう一つの反応度事故に関しては、系統的な計画はなかった。昭和 40 年にわれわれは、反応度事故解析に関する理論計算コード (REACT) を開発し、これを実証する計画を進めた。すなわち、昭和 40 年 8 月より、王禅寺支所と東京原子力産業研究所とが共同し、HTR において反応度事故に対する自己制御性を実証することを目的としてパルス運転を計画した。昭和 41 年度、科学技術庁の原子力平和利用委託研究に指定されて、実際の作業を開始した。このような原子炉の自己制御性の実証実験は、急激な出力上昇によって、負のフィードバック反応度を生じ、自動的に再び出力が下降するので、その出力のふるまいからパルス運転と呼ばれている。

#### 1.2 パルス運転による研究の目標

この研究の目標は、前述のごとく原子炉の反応度事故に対する自己制御性を実証することであるが、その具体的内容を次に列挙する。

- (1) 炉心動特性パラメータ ( $l/\beta$ , 反応度係数) を実測し、理論計算値と比較照合して計算コードに修正を加える。
- (2) 炉出力、温度、圧力、ボイドなど炉心状態の変化による反応度フィードバックの定量的な分析と、ドップラー効果な

ごによる自己制御効果の実態を確認する。

- (3) 一連のスクラム系統、すなわち炉計装からのスクラム信号の発生からスクラム動作、制御棒落下に至る自動制御機構を機器の信頼性の立場より試験する。
- (4) 以上の反応度事故現象を解明する計算コードの精度と信頼性を実験的に確認する。
- (5) 炉出力の急激な過渡変化に伴って変化する中性子束、温度、圧力などの測定技術と手法を確立する。

#### 1.3 海外の状況<sup>(2)(3)</sup>

原子炉の重大事故時の現象と、その対策に関する研究は、アメリカのアイダホ州にある国立原子炉実験場が最も盛んで、しかも最も着実な成果をあげている。反応度事故に関する SPERT (Special Power Excursion Reactor Test) 計画と、冷却材喪失事故に関する LOFT (Loss of Fluid Test) 計画が、そのおもなプロジェクトである。

SPERT-I では、反応度事故時の炉の動特性、自己制御性、スクラム効果、過渡伝熱、バーンアウトなどを研究目標として、過去 10 年間実績をあげ、1964 年に高濃縮金属ウラン燃料の破壊試験まで遂行した。SPERT-III では、現在、HTR と同じ酸化ウラン棒状燃料炉心について、同様の研究を続行中である。また、核暴走時の燃料体のふるまい、特に事故時の燃料体の溶融破損の実態と、それによる炉心の機械的損傷、反応度へのフィードバックなどの現象を解明するために、SPERT-CDC (Capsule Driver Core) と SPERT-PBF (Power Burst Facility) の二つの計画が進行中である。いずれも核暴走時のエネルギーを、試験燃料に与える方法をとっているが、前者では試験燃料の照射装置が小形カプセルであり、後者では大形ループである。

そのほか、核暴走時の原子炉の工学的破壊試験、冷却材喪失事故の工学的試験、冷却材喪失事故時の熱流体现象、金属-水反応などに関する研究が計画または進行中である。同じアイダホ州にあるアルゴンヌ国立研究所の TREAT (Transient Reactor Test Facility) では、高速炉燃料としての酸化ウランや炭化ウラン燃料体に関する溶融実験が進行中である。

なお、HTR と同様にスイミングプール形原子炉を改造して、パルス運転を実施している例としては、アメリカの西ニューヨーク原子力センターに、PULSTAR<sup>(4)</sup>があり、フランスのカダラシュ研究所に CABRI<sup>(5)</sup>がある。

\* 日立製作所中央研究所王禅寺支所

\*\* 日立製作所中央研究所王禅寺支所 理学博士

\*\*\* 日立製作所日立研究所

## 2. HTR パルス運転炉心 (HTR-P)

HTR は昭和 36 年 12 月に臨界に達し、その後、約 6 年間、炉物理、制御、動特性、計測、炉工学など原子炉自身に関する基礎的な研究、放射線の研究および放射性同位元素の生産に利用されてきた。定格出力は 100 kW である。昭和 41 年、パルス運転可能な炉に改造計画し、翌 42 年 4 月に改造炉心が臨界に達し、HTR-P と名づけた。HTR は、スイミングプール形の研究用原子炉であるが、設計当初より軽水形動力炉に用いられている燃料体と同じ  $UO_2$  ペレットを用いているので、その自己制御効果も軽水形動力炉と同じドップラー効果を主体としており、この種の動力炉の自己制御性を実証する実験炉として適していた。ただ費用の関係で、たとえば濃縮度 (HTR は 10%、動力炉は 2% 前後) など、必ずしも HTR-P が動力炉の安全性評価のためのパルス運転に最適のものとはいえないが、少なくともその必要条件は満たしている。

### 2.1 パルス運転のための炉心の改造

パルス運転を実施するために、HTR を次の点を主として改造した。

- (1) 原子炉に正の反応度を急激に投ずるためにパルス制御棒を追加した。
- (2) 非常の場合の後備停止装置としてボロン鋼球落下装置を追加した。
- (3) 燃料棒は、 $UO_2$  ペレットの径を従来の 8φ から 7φ にかえて細くし、被覆もアルミニウムからステンレス鋼にかえた。
- (4) 燃料集合体 1 本当たりの燃料棒本数を、従来の 4 本から 9 本に増加し、水対ウラン比を約 1/2 に減らした (10 より 5)。これは即発中性子平均寿命を短くして、急峻(しゅん)なパルス出力をうる事が主たる理由である。
- (5) 燃料体、被覆管および減速材温度の過渡的な変化を測定するための計測用燃料を製作して追加した。
- (6) 炉心の中に故意に中性子束のピーキングを作り、ここに試験用燃料をそう入して、常にほかよりも過酷な条件にしておいて、温度、圧力、ひずみ、FP の放出状況などを計測するためのモニタ燃料を設けた。
- (7) 炉周期スクラムバイパスを可能とし、これに代わるべきスクラム装置として、パルス出力スクラム系を 1 系統設けた。

### 2.2 改造における安全上の配慮

以上の改造の際に、特にパルス運転のために意を用いた安全上の配慮は、次のとおりである。

- (1) パルス制御棒は、引き抜き後、必ず自動的に再そう入する構造とし、機構をすべて fail safe とした。
- (2) 後備停止装置を新たに追加した。手動操作であるが機構は fail safe である。
- (3) 燃料棒被覆を、アルミニウムからステンレス鋼にかえて、機械的強度ならびに耐食性を大にした。
- (4) 燃料温度が異常上昇しても、内圧上昇が少ないようにペレット内の蒸発性不純物の量を規定し、かつ燃料棒内のプレナムの容量を従来より大きくとった。
- (5) 燃料被覆管には、厳重な非破壊検査を実施して、500 kg/cm<sup>2</sup> 以上の耐圧性をもたせた。
- (6) パルス運転と 100 kW 定常運転との間には、インタロックとしてモード切換スイッチを設け、定常運転モードでは、パルス制御棒の操作は不可能で、逆にパルス運転モードでは、通常の制御棒の操作は不可能である。ただし、スクラムはいかなる状態でも可能である。
- (7) 炉周期スクラムバイパスは押ボタン方式で、手でこれを押

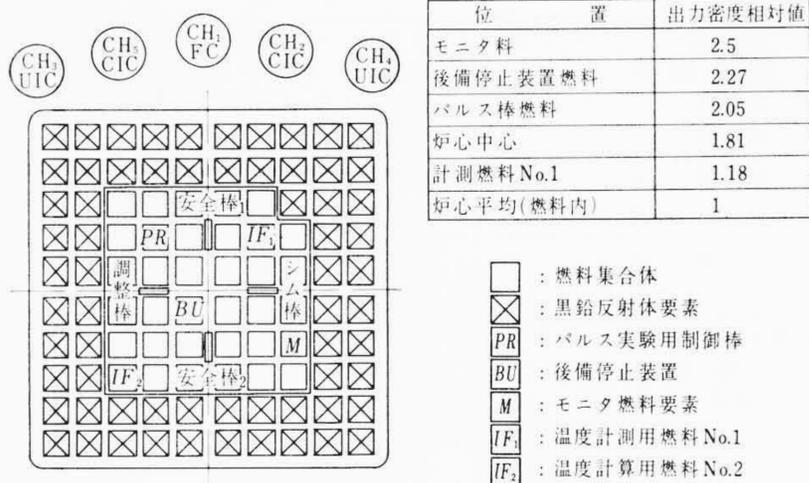


図 1 パルス運転炉心 (HTR-P)

しているとき以外は動作せず、しかも定常運転モードでは、これを押しても動作しないようにした。またこのスクラムバイパスが動作するとき必ずパルス出力スクラム系が自動的にはいることになっている。

- (8) そのほか詳細は省略するが、パルス運転の運転要領、安全回路、インタロック、安全確保などについては厳重な検討ならびに審査を行なった。

### 2.3 HTR-P 各部の構造と特性

#### (1) 炉心の概要

パルス運転のための HTR-P の炉心配置を図 1 に、またその特性を表 1 に列記する。

#### (2) パルス制御棒

図 2 はパルス制御棒の概要を示したものである。ピストンの下部より 5 kg/cm<sup>2</sup> の空気圧をかけ、これを上部クラッチにて保持しておく。クラッチをはずすことにより、ピストンが飛ばされて、制御棒を炉心より引き抜く。引き抜きストロークは、投入反応度によって任意に選択できるが、そう入の際は必ず自動的に全ストロークがそう入されるよう安全側に設計してある。

パルス制御棒の時々刻々の位置は、しゅう動抵抗の 1 端としゅう動子との間の電圧によって記録される。

#### (3) 後備停止装置

後備停止装置は、ボロン鋼球を炉心に落下させる方式である。電磁石用の電源を切断すると電磁石が消勢され、ボロン鋼球を保持している受け板がはずれて、ボロン鋼球が重力により炉心内に落下し炉を停止する。

#### (4) 計測用燃料およびモニタ燃料

計測用燃料集合体は、他の燃料集合体と寸法構造とも変わらないが、9 本の燃料棒のうち、中心の 1 本について、ペレット中心、被覆表面(互いに反対方向に 2 点)およびすぐ近傍の減速材の位置にそれぞれ温度計測用として計 4 本の熱電対を装着してある。

モニタ燃料は、長さ 40 mm 程度の  $UO_2$  ペレットを内蔵した燃料棒を 1 本だけ装てんしたもので、外観は他の燃料集合体と同じである。ペレット中心、被覆および減速材の温度を測定できるように熱電対を装着してある。

## 3. 理論計算コード

反応度事故解析用コードとして最初開発したのは、炉心内平均値を代表値として動特性を計算する 1 点近似動特性モデルを用いた REACT-RI コードであった。これは炉心全体に関係する量、たとえば炉出力の計算などには実用上問題はないが、燃料温度のように、炉心内で局所的に差のあるような量の計算には精度が悪い。この点を考慮して、平均チャンネルと最高チャンネルの 2 点近似動特性モ

表1 HTR-P 特性表

炉形式	濃縮ウラン軽水減速冷却形	
定常熱出力	100 kW	
燃料材濃縮度	UO <sub>2</sub> セラミック 10%	
燃料体	形状	棒
	寸法	7 mm φ×400 mmH
被覆材	材質	SUS
	厚さ	0.3 mm
被覆-燃料間ギャップ	He 0.1 mm	
燃料配置	アセンブリ形	
燃料棒/アセンブリ	9本	
アセンブリ	材質	アルミニウム
	断面形状	正四角面
	寸法	45 mm×45 mm, 1.5 mm厚
反射体	グラファイト	
冷却材	軽水	
減速材	軽水	
冷却方式	強制循環 1 m <sup>3</sup> /min	
減速材/燃料体積比	4.8	
炉心	断面高さ	30 cm×30 cm
	燃料棒数	40 cm
	アセンブリ数	296本
		32本(標準)+3本(特別)
燃料装てん量	K <sub>eff</sub>	1.0125
	U量	41.5 kg
	UO <sub>2</sub> 量	47.1 kg
制御棒反応度	シム棒	1.78% JK/K
	安全棒 No.1	1.74% JK/K
	安全棒 No.2	1.76% JK/K
	調整棒	0.29% JK/K
パルス制御棒	本数	1本
	反応度	1.3% JK/K (最大)
	引抜き速度	4,000 mm/s
	ストローク	400 mm
	駆動方式	空気作動
後備停止装置	本数	1本
	反応度	2.64% JK/K
	方式	ボロン鋼球(4.5 mm φ)落下
	落下時間	2.2秒
超過反応度	1.25% JK/K	
平均熱中性子束	9.2×10 <sup>11</sup> /cm <sup>2</sup> ・s	
温度係数	水	-1.5×10 <sup>-5</sup> JK/K/°C (25°C)
	水即発	-1.4×10 <sup>-5</sup> JK/K/°C (20°C)
出力係数	-4.3×10 <sup>-4</sup> JK/K/100 kW (40°C)	
ボイド係数	-5.2×10 <sup>-3</sup> JK/K/%ボイド	
β <sub>eff</sub>	(7.7±0.3)×10 <sup>-3</sup>	
1/β <sub>eff</sub>	(7.6±1.2)×10 <sup>-3</sup> s	

表2 パルス運転条件

項目	実験条件
初期状態	10 W 臨界
スクラム信号発生出力	110 kW
スクラム遅れ時間	150 ms
スクラム完了時間	550 ms
初期, 制御棒位置	シム, 安全棒完全引抜
冷却水	強制循環 (1 m <sup>3</sup> /min)

デルを用いた REACT-R II コードを開発した。さらに、HTR パルス運転の実験解析に適合するように細かく修正を加えた。特に、スクラム効果を精度よく解析するために出力スクラム信号の検知、発信、制御棒の落下開始、落下中の反応度そう入効果などを細かく計算できるようにして、実験に適合させることに努めた。また、フィードバック反応度効果を、時間的に変化する燃料温度に応じて自動的に計算できるように、ドップラー係数は、燃料温度から実験式を用いてコード内で計算されるようにした。

炉の自己制御効果に寄与するフィードバック反応度としては、上記のドップラー効果のほかに、即発および遅発の減速材温度変化、

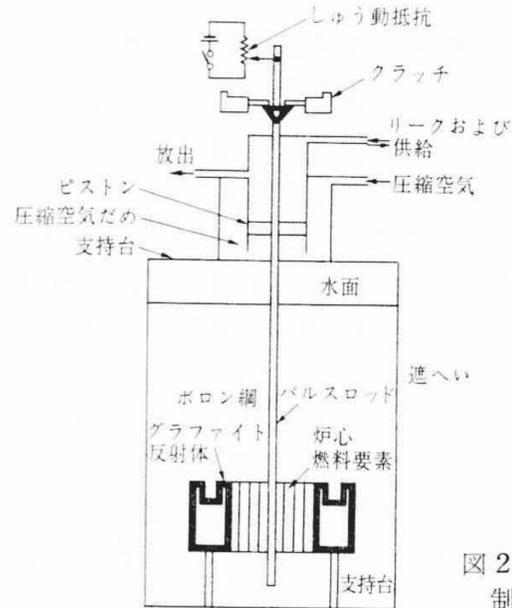


図2 パルス用制御棒概略図

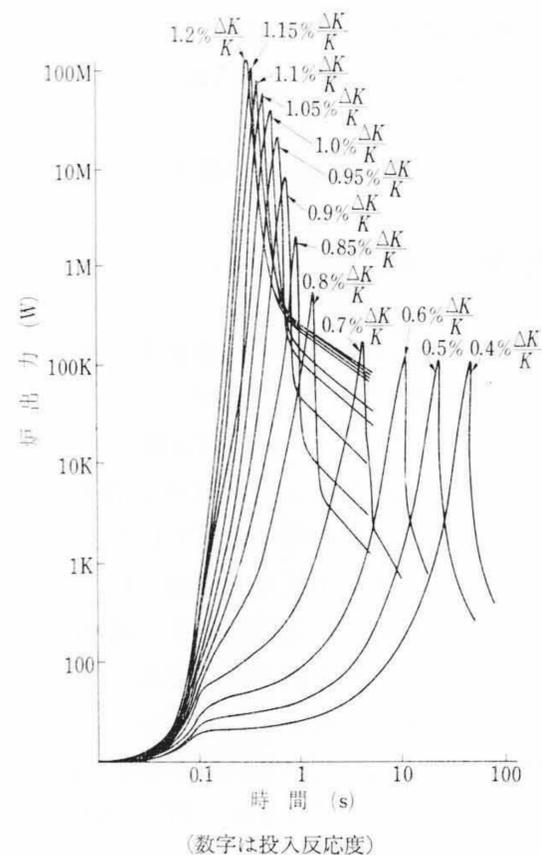


図3 理論計算による HTR-P パルス出力

燃料表面での冷却水のサブクール沸騰とバルク沸騰、ガンマ線による冷却水の放射線分解ガス発生などの効果も考慮してある。図3は、REACT-R II コードで計算した HTR-P のパルス出力波形を示したものである。

#### 4. パルス実験

UO<sub>2</sub> ペレット燃料体は熱伝達時定数が大きく、またこのような燃料体で構成された原子炉は、負の即発温度係数が大きいので、ここに大きな正の反応度が急激に投入されると、炉出力は急速に上昇するが、同時に燃料体温度が急速に上昇し、この負の温度係数のために投入反応度が相殺され、その差し引きゼロになった瞬間から炉の出力上昇は止まる。大きな燃料時定数のために燃料温度はさらに上昇して、反応度は全体として負となり、炉出力は急速に下降し、ここに鋭いピークをもったパルス状の出力特性を生ずる。これがパルス運転と称せられる理由であって、この種の原子炉の自己制御性を示すものである。

以下、HTR-P のパルス実験の実験条件および結果を整理して記述する。

- (1) パルス運転の初期条件を表2に示す。パルス運転は臨界状態にある炉心より、パルス制御棒を引き抜くことによって始まる。

表3 測定項目と検出器

測定項目	測定のための検出器
炉出力(対数,線形)	核分裂電離箱およびチェレンコフカウンタ
炉周期	核分裂電離箱(記録計にて読む)
放出エネルギー	核分裂電離箱(アナコン積分素子にて読む)
燃料中心温度	熱電対
燃料被覆温度	熱電対
減速材温度	熱電対
燃料被覆ひずみ	ストレインゲージ
パルス制御棒位置	しゅう動抵抗

表4 パルス実験測定結果

投入反応度 % $\Delta K/K$	炉周期 ms	ピーク出力 MW	ピークまでの エネルギー MWs	燃料中心 温度上昇 °C
0.62	1,190	0.126	0.191	23
0.71	488	0.162	0.88	14
0.76	260	0.249	0.83	13
0.80	143	0.462	0.98	16
0.86	74.2	1.72	0.21	42
0.91	50.8	6.20	0.55	112
0.97	34.3	23.0	1.71	350
1.00	29.1	37.8	2.57	600

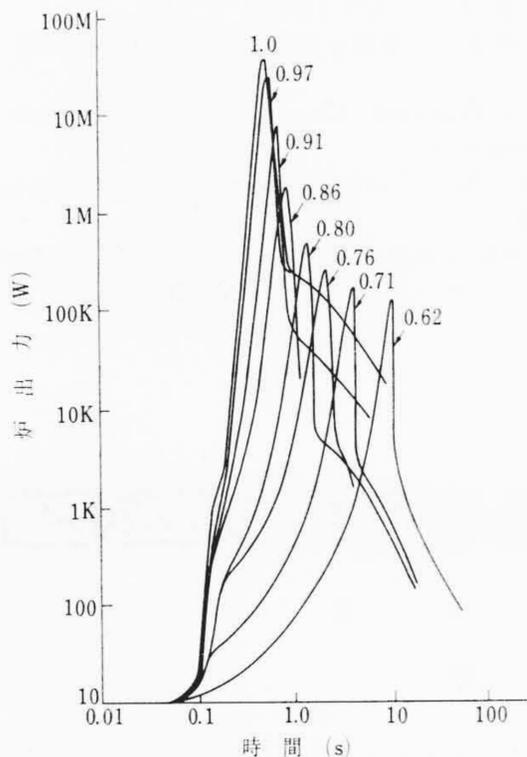


図4 炉出力の時間変化(実測値)

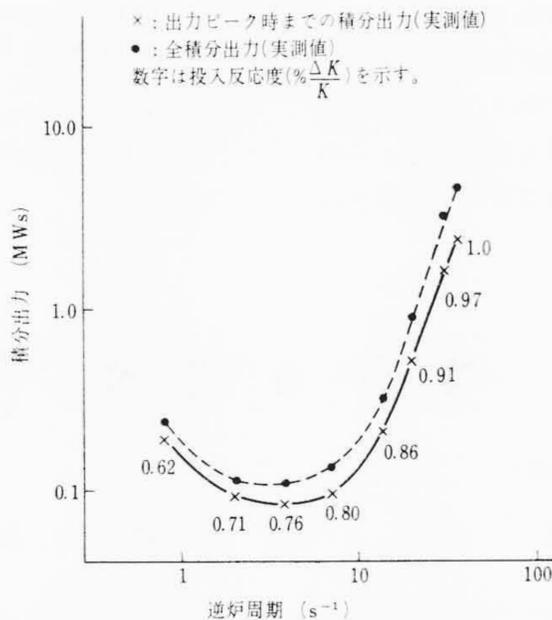


図5 逆炉周期と出力ピーク時までの積分出力および全積分出力(実測値)

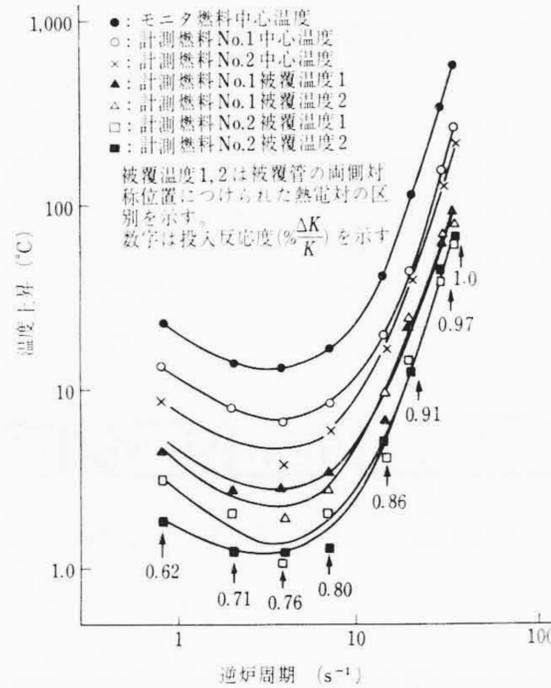


図6 燃料温度上昇および燃料被覆管表面温度上昇と逆炉周期の関係(実測値)

(2) 測定項目と計測方法を表3に示す。炉出力4点, 放出エネルギー1点, 燃料中心, 被覆および減速材温度はそれぞれ3系統(計測用燃料2本, モニタ燃料1本), 被覆ひずみ1点, パルス制御棒位置1点, 安全棒位置1点, 計19点の測定値を同時にビジュオダ上に記録する。

(3) パルス実験の測定結果を図4~6に示す。投入反応度は, 0.62, 0.71, 0.76, 0.80, 0.86, 0.91, 0.97, 1.0%  $\Delta K/K$  の8段階をおのおの数回以上実施し, 現在まで約100回のパルス運転を実施してデータを蓄積した。HTR-Pが即発臨界となるのは投入反応度0.8%  $\Delta K/K$  の場合である。表4に代表的な測定結果をリストアップした。

5. 結果の検討

前述のようにHTR-Pは, パルス運転用といえども定常運転の場合と同じく, 出力が110kWに達するとスクラム信号が送られて, 0.15秒の遅れで制御棒のそう入が始まる。したがって, 図4に示すように, 炉周期が0.1秒より長いような場合には, 自己制御によらずスクラムにより出力が低下して出力ピークを生じている。炉周期が0.1秒より短い場合, すなわち投入反応度が1ドル(0.8%  $\Delta K/K$ )を越えるあたりからは, スクラムがきき始める0.15秒の間に, 炉出力が急激に上昇し, 大きなオーバーシュートを示す。1.0%  $\Delta K/K$  投入の場合, スクラムがきき始める前に, ドップラー効果による自己制御によって炉出力は低下している。このことは, 負の補償反応度の内訳を示す図7を見てもわかる。出力のピーク時には, 負の補償反応度は投入反応度から1ドルを差し引いた値に達しているはずである。図からわかるように, 投入反応度0.9%  $\Delta K/K$  までは, 負の補償反応度の大部分は, スクラムによるものであるが,

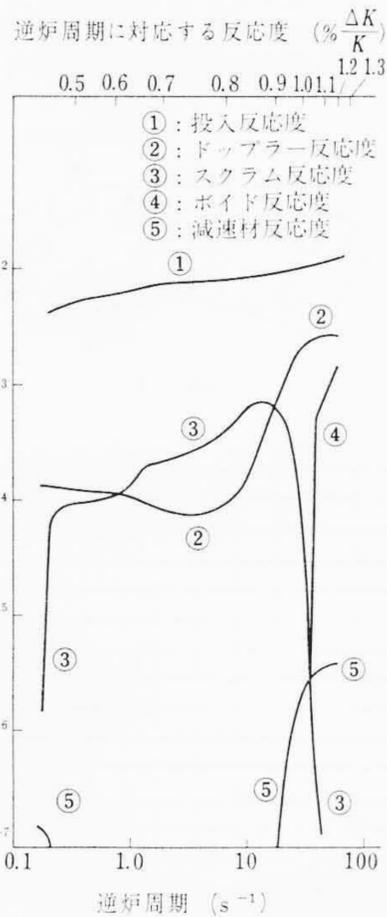


図7 出力ピーク時刻における補償反応度

それ以上では, スクラムの寄与は急激に低下し, 1.0%  $\Delta K/K$  投入の場合, 補償反応度の99%以上がドップラー効果によるもので, スクラムの効果は1%以下である。

図5で, 放出エネルギー(出力積分値)に最小値のある理由は, 投

入反応度の小さい場合、出力上昇がゆるやかで、ピーク出力値は小さくてもパルス幅が大きく、したがって時間積分が大きくなるが、逆に、投入反応度が1ドルを越えると、パルス幅は小さくてもピーク出力値が急激に大きくなり、時間積分が大きくなって、結局、その中間の投入反応度の場合が、最も出力値積分が小さくなるからである。

6. 結 言

HTR-P のパルス運転による実験は、軽水炉の反応度事故時における自己制御性を実証した。理論計算の結果を実験結果と比較し、理論計算に修正を加え、修正された理論計算の結果をふたたび実験結果と比較した。その結果は10%以内で一致した。今後、投入反応度をさらに増加して、高温におけるドップラー係数を確認するとともに、ボイドによる自己制御効果を検討する計画を進める。

本研究は、科学技術庁原子力平和利用委託研究に指定されて東京原子力産業研究所の協力のもとに推進したものであり、原子力局関係各位および東京原子力産業研究所関係各位に厚く感謝する。この報告では、それぞれの担当作業の中心となった者だけが執筆者とな

っているが、実際には現在動力炉核燃料開発事業団の島史朗博士(前王禅寺支所長)、谷口支所長をはじめとして、王禅寺支所全員がなんらかの分野で参加した。また日立製作所日立工場、日立研究所、本社関係者の積極的な協力に負うところ大であった。末筆ながら感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 内田, ほか: SAFE プロジェクト小委員会報告書 日本原子力産業会議 (1966)
- (2) 田上: アイダホにおける安全性研究の展望 日本原子力学会誌 8, 6, p. 329 (1966)
- (3) 石川: SPERT の現状 日本原子力学会誌 9, 10, p. 625 (1967)
- (4) R. F. Lumb: The Transient Characteristics of a New Pulse Research Reactor. Report of Western New York Nuclear Research Center Inc. (May, 1965)
- (5) スイミングプール形炉の事故の場合における核分裂生成物の挙動の実験的研究 フランス原子力 (1967-10)



特 許 の 紹 介



特許第463901号 (特公昭40-13813号)

磯部 昭二・北野 豊

回 転 電 機 の 継 鉄

大形回転電機の継鉄は外径が大きく、工作上および輸送上困難が伴うため薄鋼板を扇形に形成したいわゆるセグメント片を積層して組み立てられる。そして従来は図1に示すようなセグメント片を数枚合わせて円形とし、その上に積層する。次の層はこのセグメント片の継目を磁極取付みぞ一つ分だけずらして積層し、その次の層も同様に一磁極分ずつその継目をずらして積層するものであった。このため図2に示すようにセグメント片aとbおよびcの接触面積が、a, c間はラップ長さがBであり、a, b間ではAであるため接触

面における摩擦力が不均一でセグメント片a, c間においてすべりを生ずる。

このすべりを防止するには各セグメント片のラップ長さを最大にするように等分の長さにラップさせればよいが、これではセグメント片の継目が積層方向において一層おきにあらわれ、それが一直線上に並ぶことになり、継鉄の引張応力が継目なし継鉄の約2倍に増加し、継鉄の機械的強度を低下させる。

本発明はこのような継鉄のセグメント片の継目における応力の増加を押えるとともに、ラップ長さを大きくし接触面における摩擦力を増し各セグメント片に生ずるすべりを防止せしめるもので、図3に示すようにセグメント片に設けた磁極取付みぞ数をZ(図3は12個の場合を示す)とし、継目のずれを取付みぞ数で表わした数をX, Y (Y=Z-X)とした場合、これらのXYをZ/2に近い互いに素なる数としたもので、これによりラップ長さをほぼ等しくすることができるため、すべりの発生を防止するとともに、継鉄の引張応力の増加も押えることが可能となる。(石原)

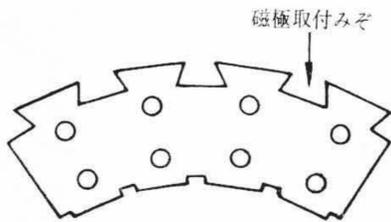


図 1

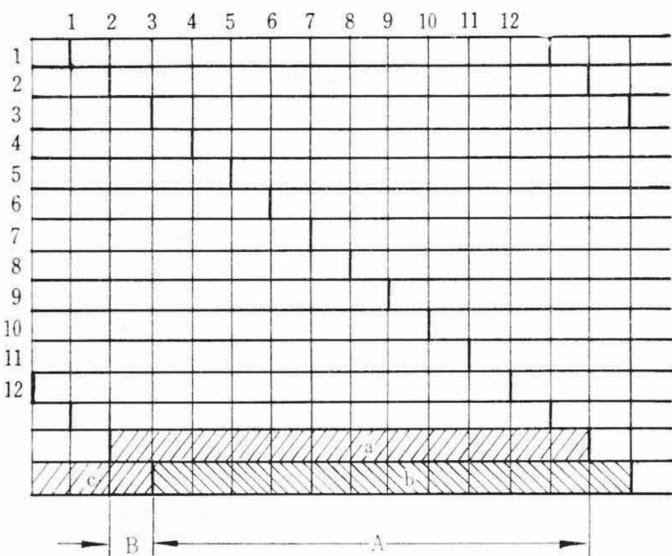


図 2

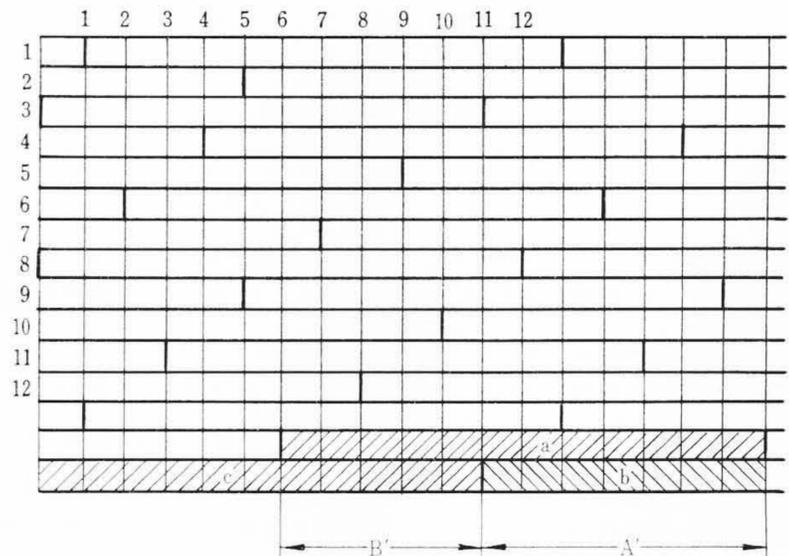


図 3