
軽水動力炉の安全評価特集

反応度事故評価のためのパルス炉実験とその解析.....57

軽水動力炉冷却材喪失事故時の安全解析に関する研究.....63

活性炭フィルタの放射性ヨウ素除去性能.....70

しゃへい貫通部の放射線漏えいに関する実験解析.....75

反応度事故評価のための パルス炉実験とその解析

Pulsed Reactor Experiment and Analysis for Reactivity Accident Evaluation

今井 宗丸*
Munemaro Imai

加藤 英正**
Hidemasa Katô

西川 元之***
Motoyuki Nishikawa

田上 嵩****
Takashi Tagami

山田 周治*****
Shuji Yamada

井上 清*****
Kiyoshi Inoue

要 旨

軽水冷却形原子炉の反応度事故時の安全性研究を目的として、スイミング・プール形の研究用原子炉(HTR)を改造し、パルス運転も可能なものとした。投入反応度 $1.2\% \Delta k/k$ のパルス運転を行ない、実験的にこの種の炉のドップラー効果による、自己抑制効果をあきらかにした。またこの実験の解析には、原子炉反応度事故解析コード(REACT-R II)を用いた。実験結果とコードを用いた理論計算の一致は満足すべきものであった。これによって計算コードが実験的裏付けを得たことになり、信頼度が確認された。

1. 緒 言

軽水冷却形原子炉の安全性を評価する際の想定事故として冷却材喪失事故と反応度事故がある。前者は、1次系破断などの原因で冷却材が炉心から流出することによる燃料の異常過熱であり、後者は、誤って過大な反応度が加わった際の炉出力の異常上昇である。ここでは後者の事故評価のための実験と解析について述べる。

わが国では従来実験的な反応度事故評価の研究は全くなかったけれども、アメリカではBORAX(Boiling Reactor Experiment)による破壊実験をはじめとして、SPERT⁽¹⁾(Special Power Excursion Reactor Test)による一連の研究が継続して行なわれてきた。さらに大形のPBF⁽²⁾(Power Burst Facility)計画が進められ、反応度事故時の燃料の安全性の研究が強力に遂行されようとしている。

一般にいて、事故解析の信頼性は、解析方法そのものおよびその中に含まれているおのおのの物性値や実験式などの精度に依存するが、そうしたミクロ的な要素の信頼性のほかに、現象全体のマクロ的な解析結果に対する信頼性が確認されなければならない。このような立場から、反応度事故評価に対する実験的ならびに解析的研究が計画された。

昭和40年夏ころより、日立製作所中央研究所は、東京原子力産業研究所所有のスイミング・プール形研究用原子炉(HTR)を利用して、反応度事故現象の実証研究計画を進め、昭和41年度および昭和42年度の原子力平和利用委託費を受け、研究を行なった。本研究を実施するにあたり、この炉をパルス運転も可能な原子炉に改造することが必要であったが、この炉は酸化ウランペレットの棒状燃料を用いた炉であるため、パルス炉に改造するには適していた。すなわち、本文にて述べるように、パルス運転にも耐えるような燃料体に交換する以外は、パルス実験用制御棒、炉計装を追加するのみで、パルス運転が可能となった。また解析には先に開発していた反応度事故解析用コードを若干改造したREACT-R IIコードを使用した。

2. 研究目的⁽³⁾

反応度事故の現象は、炉心に誤って正の反応度が投入されることに始まって、炉出力の上昇とそれに伴う燃料体や冷却材の温度上昇という異常状態に推移する。このとき、炉心が持つ固有の自己制御性(ドップラー効果、負の減速材温度効果やボイド効果など)による負のフィードバック反応度の付加効果と、安全装置(スクラムなど)による負の反応度投入効果とが作用して、炉出力の上昇が抑制される。その場合、全抑制効果の大きさと作用時間の迅速さとに依存して、ある場合は、炉出力は直ちに減衰して炉心の安全性は確保され、ある場合は、炉出力の上昇がなお続いて、燃料体の破損、溶融、炉心の解体という経過をたどる。

前者の場合の過程を軽水炉のパルス運転によって実現させ、その状態変化を詳細に観測することにより、

- (1) 炉心動特性に關与する諸特性 ($1/\beta_{\text{eff}}$ 各種反応度係数など)の実態と理論計算値とを照合し、
- (2) 炉心の状態変化によるフィードバック反応度を定量的に解析して自己抑制効果の実態を確認し、
- (3) スクラム信号の発信から制御棒そう入による自動停止装置の効果と機器の信頼性をチェックし、
- (4) 反応度事故に伴う諸特性を解析する計算コードの改良と精度を確認し、さらに
- (5) この種の急激な過渡変化に伴う中性子束、温度、圧力などの計測手法を確立する。

以上の項目が原子炉パルス実験とその解析の目標であった。

3. HTR パルス実験⁽⁴⁾⁽⁵⁾

反応度事故解析法の開発およびパルス実験による検証のため、研究用原子炉 HTR をパルス運転ができるように一部改造した。改造後の炉心を HTR-P 炉心と名づけた。表1は HTR-P 炉心の特性を示したものである。

3.1 炉 心

パルス運転のために、HTR の炉心を次のように改造した。燃料ペレット外径を8 mm から7 mm に細くし、被覆管をアルミニウムからステンレス鋼に変更し、同じ寸法の燃料集合体1本あたりの装てん燃料棒を4本から9本に増大し、水対ウラン比を約1/2に小さくして中性子寿命を短くした。

* 日立製作所中央研究所 (東京原子力産業研究所出向)
** 日立製作所中央研究所 (動力炉・核燃料開発事業団出向)
*** 東京原子力産業研究所
**** 日立製作所中央研究所 理学博士
***** 日立製作所中央研究所

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 質		UO ₂ セ ラ ミ ッ ク	
濃 縮 度		10%	
燃 料 体	形 状	棒	
	寸 法	7 mm ϕ × 400 mmH	
被 覆	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	材 質	グ ラ フ ァ イ ト	
冷 却 材		軽 水	
減 速 材		軽 水	
冷 却 方 式		強 制 循 環	
減 速 材 / 燃 料 体 積 比		1 m ³ /min	
		4.8	
炉 心	断 面 高 さ	30 cm × 30 cm	
	燃 料 棒 数	40 mm	
	ア セ ン ブ リ 数	296 本	
		32 本 (標準) + 3 本 (特別)	
燃料装てん量	k eff	1.0125	
	U 量	41.5 kg	
	UO ₂ 量	47.1 kg	
制御棒反応度	シ ム 体	1.78% Δk/k	
	安全棒 No. 1	1.74% Δk/k	
	安全棒 No. 2	1.76% Δk/k	
	調 整 棒	0.29% Δk/k	
パルス制御体	本 数	1 本	
	反 応 度	1.3% Δk/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	
過 剩 反 応 度		1.35% Δk/k	
平 均 熱 中 性 子 束		9.2 × 10 ¹¹ /cm ² ・s	
温 度 係 数	水 温	-1.5 × 10 ⁻⁵ Δk/k/°C (25°C)	
	即 発	-1.4 × 10 ⁻⁵ Δk/k/°C (20°C)	
出 力 係 数		-4.3 × 10 ⁻⁴ Δk/k/100 kW (40°C)	
ボ イ ド 係 数		-5.2 × 10 ⁻³ Δk/k/% ボ イ ド	
	β_{eff}	(7.7 ± 0.3) × 10 ⁻³	
	1/ β_{eff}	(7.6 ± 1.2) × 10 ⁻³ s	

燃料棒製作上の配慮としては、UO₂ ペレットの寸法精度をきびしくし、蒸発性不純物の混入率を小さく規定した。被覆管内のプレナム容積を大きくし、封かん溶接部に対しては、すべて厳重な非破壊検査を行なった。溶接試験の結果は、すべてのサンプルが 500 kg/cm² 以下の内圧では破損は起こさず、溶接部の健全性が確認された。図 1 は燃料集合体を、また図 2 (a) は HTR-P の炉心配置を、図 2 (b) は同炉心のパルス運転時に撮影したチェレンコフ写真を示したものである。

3.2 制 御 系

炉心に急速に反応度を投入するため、空気圧作動によって、ボロンステンレス鋼製の円柱状中性子吸収棒を炉心から急速に引き抜く構造のパルス実験用制御棒を設けた。全ストロークを 0.1 秒で引き抜き、ある待ち時間後、自動的に炉心に再そう入して炉の停止に寄与させる。始動位置をずらせてストロークを加減することにより、投入反応度量が選択できる。HTR に設置したパルス実験用制御棒の概略図は図 3 に示すとおりである。

炉の停止は、2 本の安全棒と 1 本のシム棒の重力落下による。中性子束をイオンチェンバーで監視し、炉出力が定格値 (100 kW) の 10% 高になったとき、スクラム信号が発せられ、0.15 秒の時間遅れ

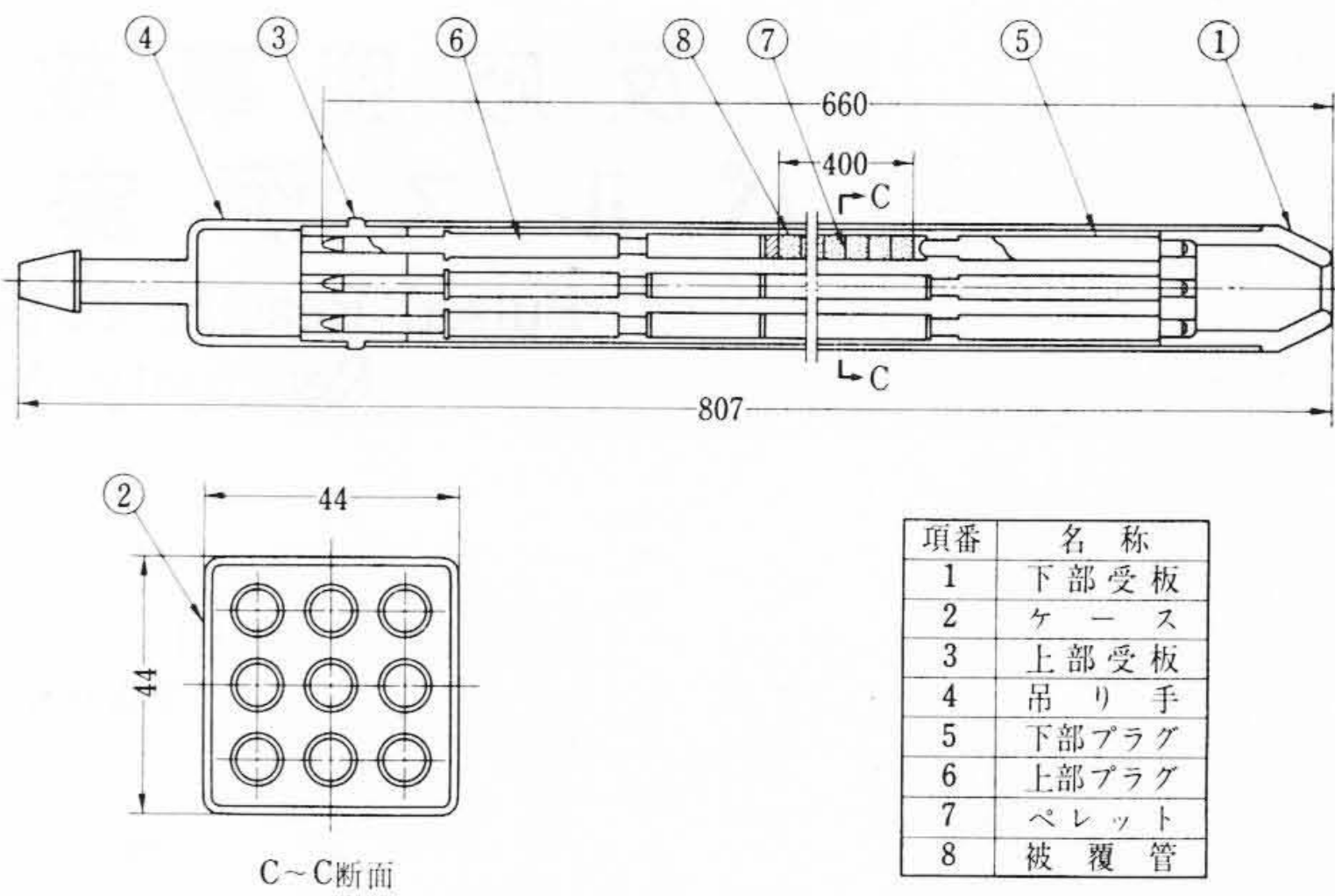


図 1 燃料集合体

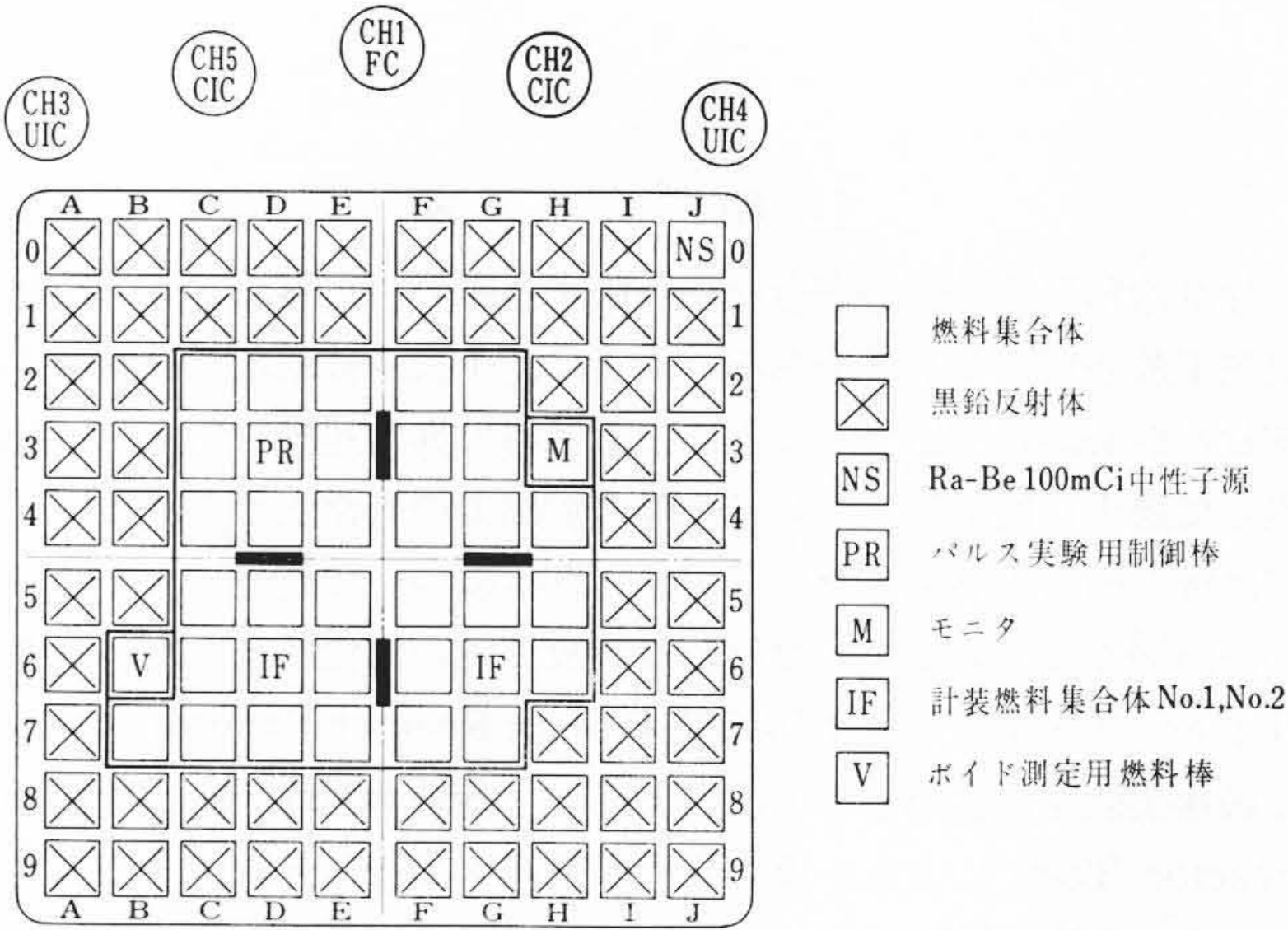


図 2 (a) HTR-P パルス炉心配置

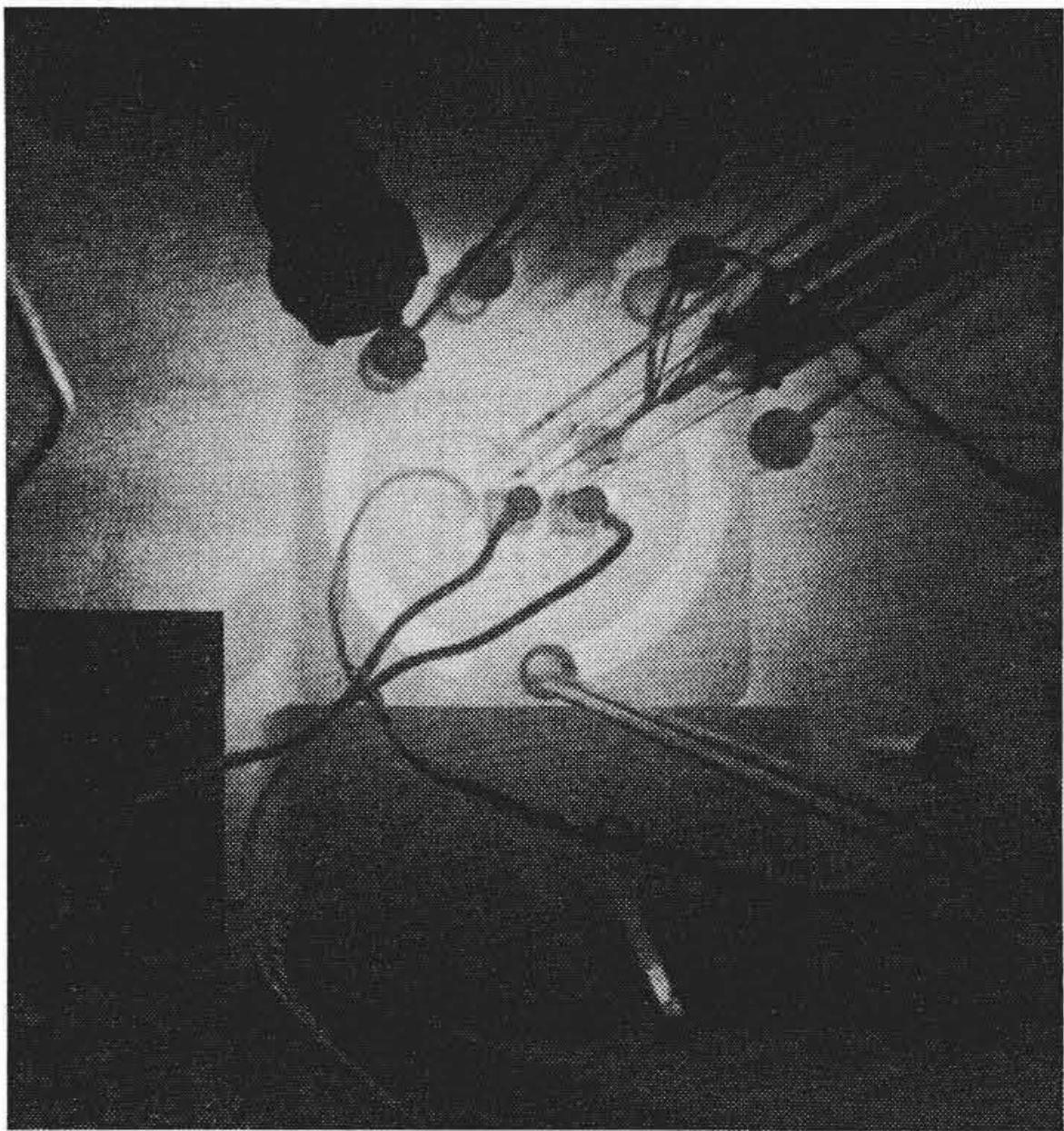


図 2 (b) HTR-P チェレンコフ写真

ののちに上記の制御棒が落下を開始する。スクラム信号回路としては 2 out-of 3 方式を採用している。

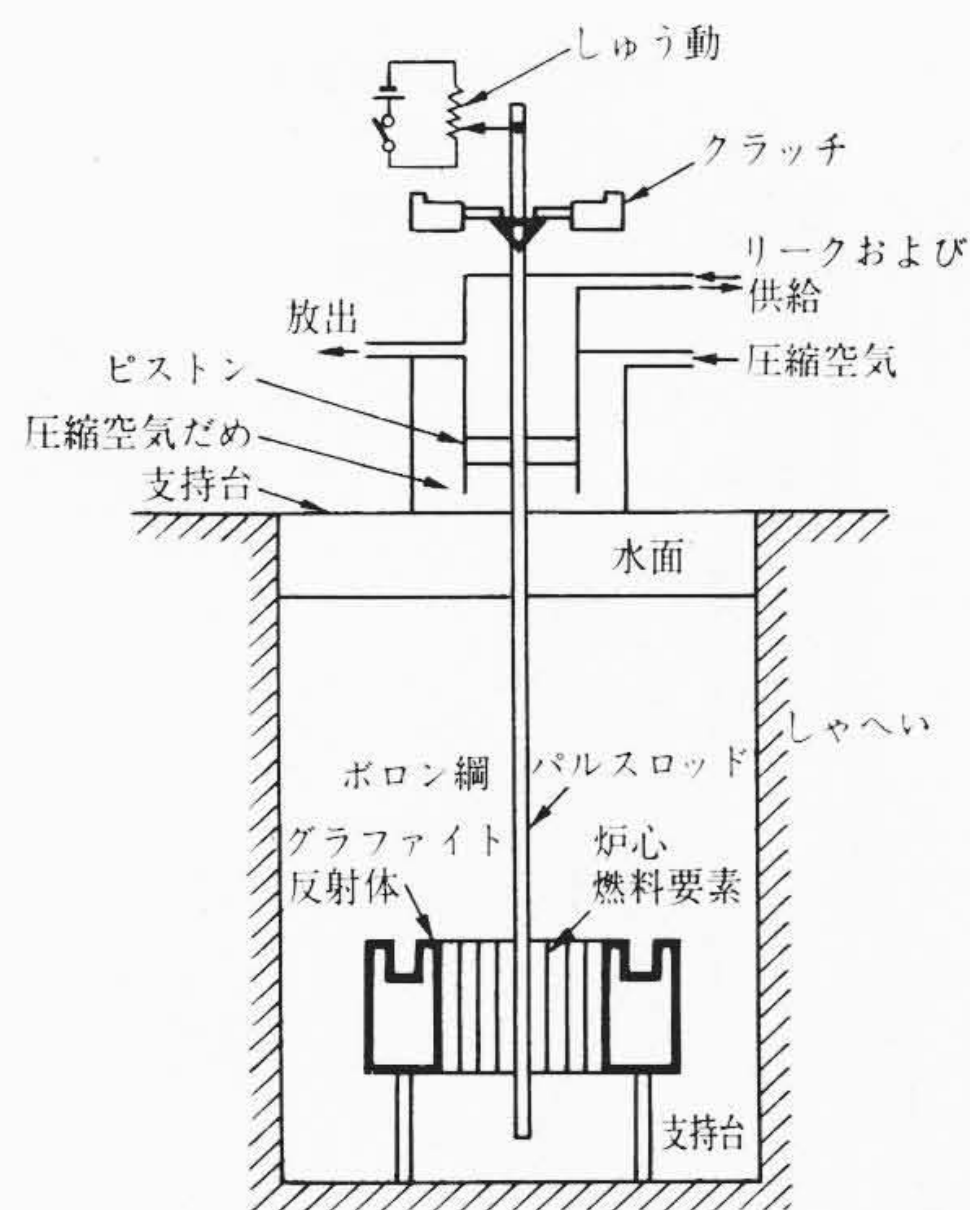


図3 パルス実験用制御棒説明図

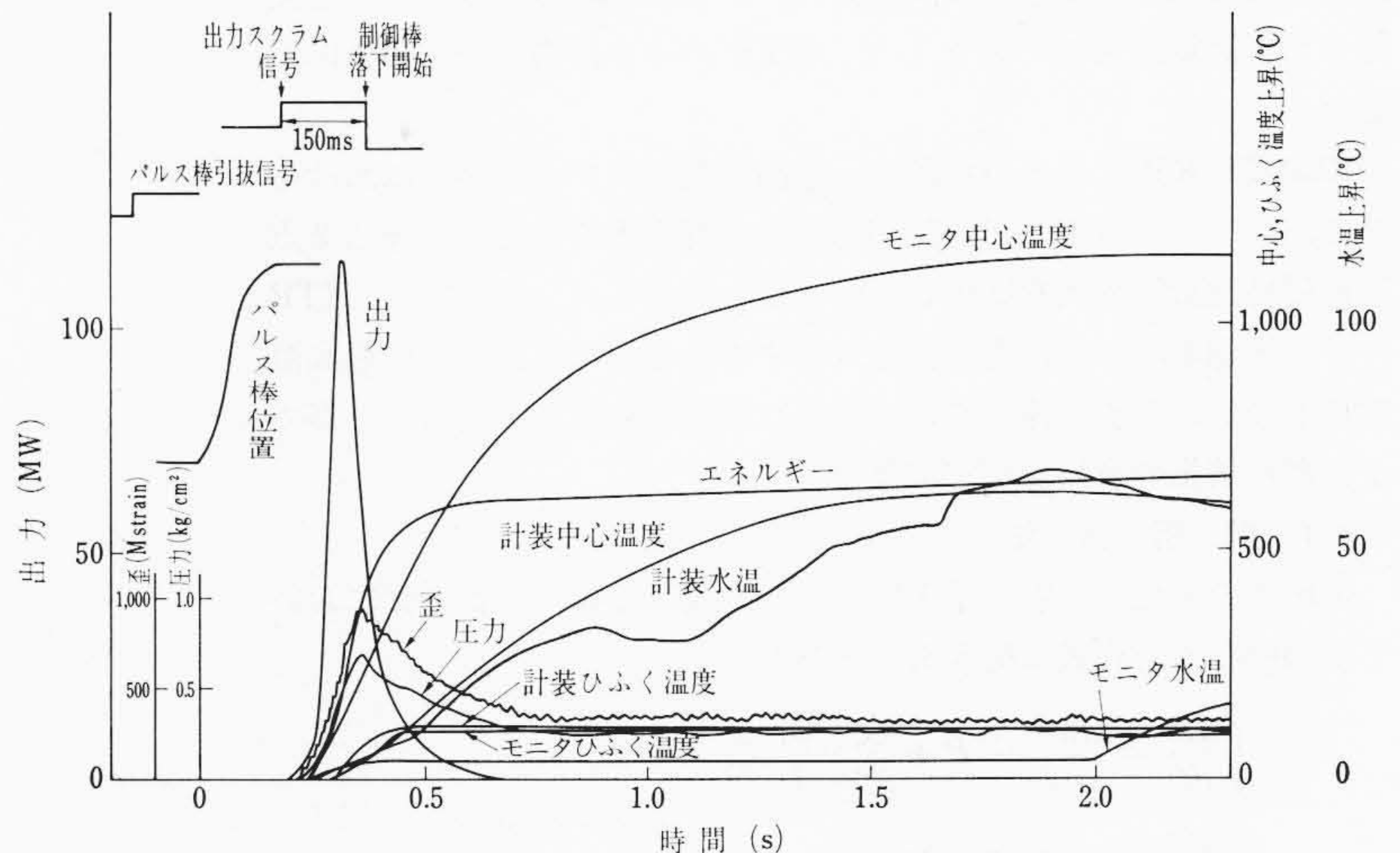
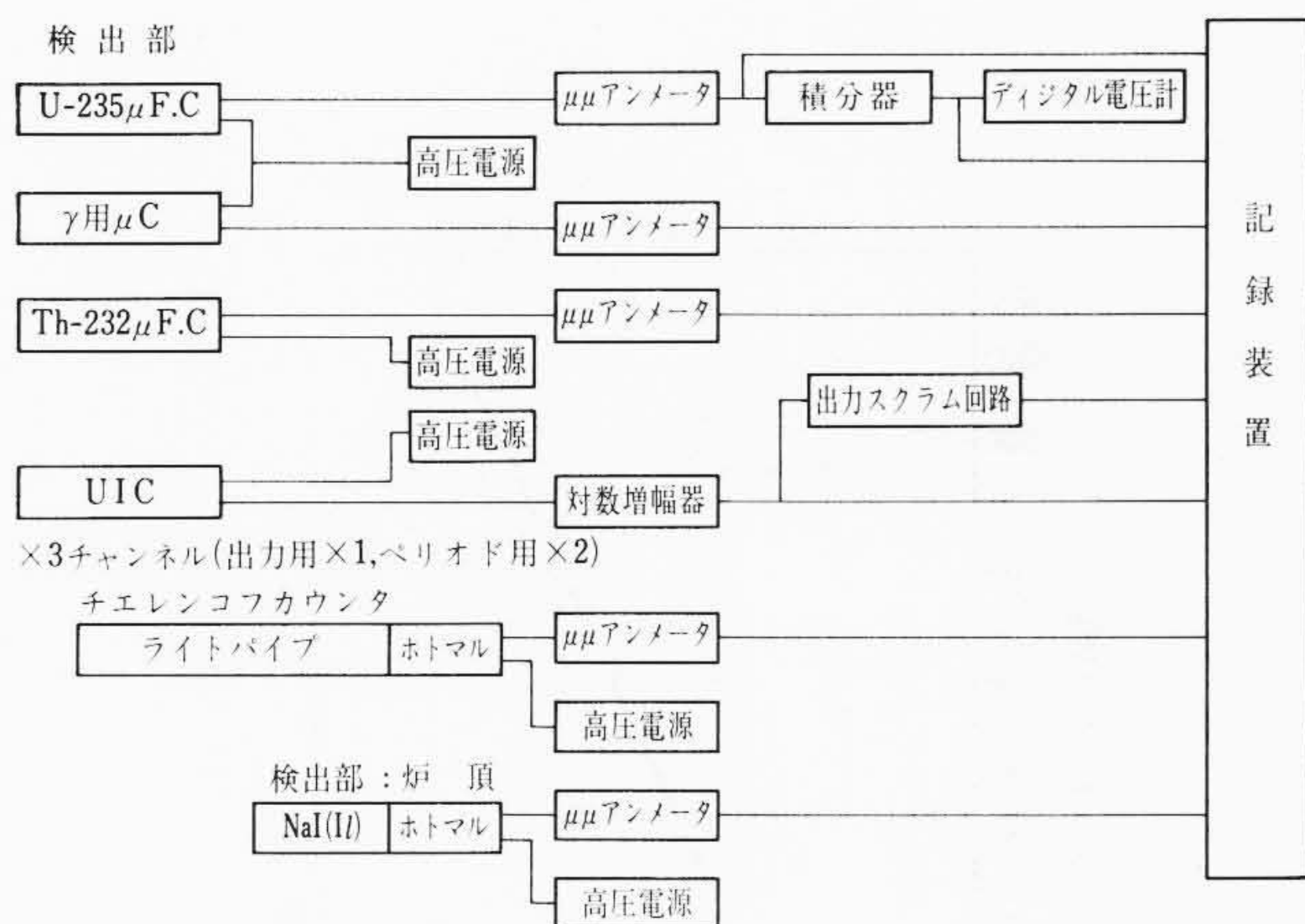
図6 投入反応度 1.20% $\Delta k/k$ パルス実験データ

図4 出力測定系ブロック線図

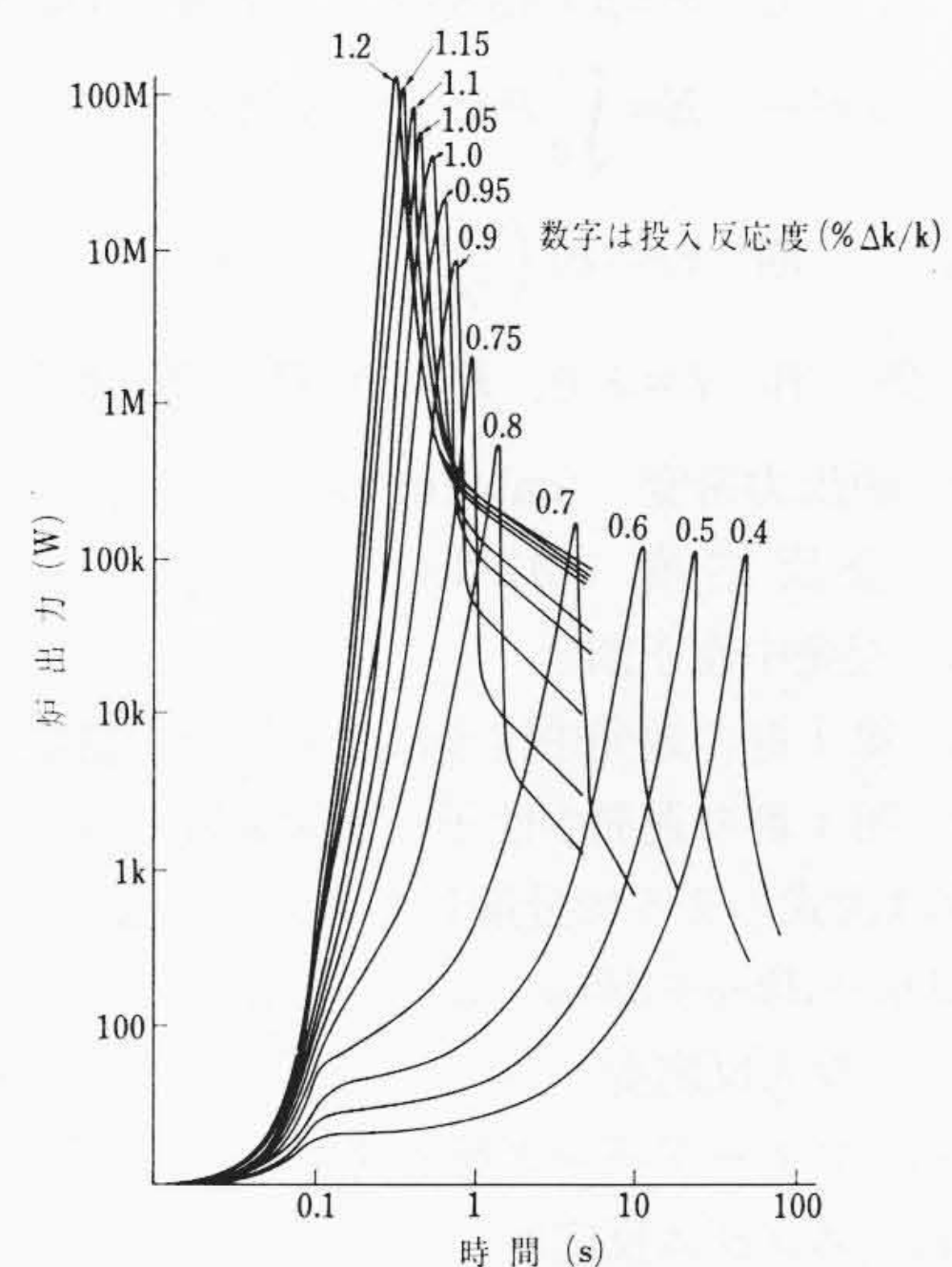


図7 理論計算による HTR-P パルス出力

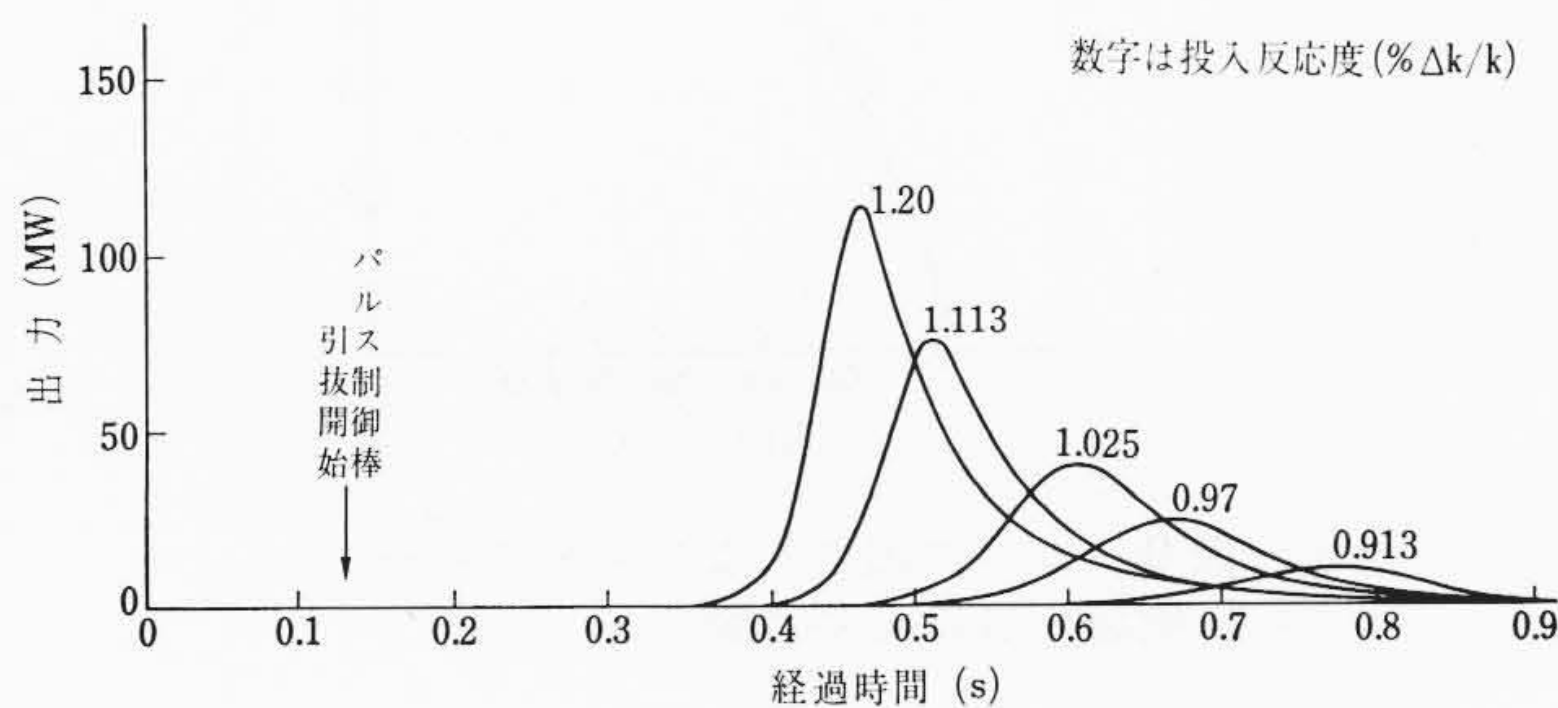


図5 各投入反応度に対する出力波形 (実測値)

原子炉制御盤にはモード切換スイッチを設けて、定常運転とパルス運転をインタロックし、制御棒とパルス棒の同時操作を不可能にした。また、バイパスボタンを指で押している間、定常運転モードの炉周期スクラム系がバイパスされ、同時に出力スクラム系に独立した一系統が別にそう入されるようになっている。

3.3 計測系

出力遷移に伴う炉心の状態を測定するため、燃料集合体の中央の燃料棒1本を、計測用燃料として熱電対を装てんし、ペレット中心温度、被覆管表面温度、冷却水温度などを測定する。また、炉心の

最高温度位置に特殊構造のモニタ燃料要素をそう入し、内部に温度測定用の熱電対やひずみ計を備えた燃料棒を装てんした。要素内冷却水をサンプリングして核分裂性物質の漏えいを検出できるようにして、炉心内燃料棒破損のモニタとして利用した。

炉出力の変化は、対数出力系、線形出力系、チェレンコフ光強度系によって時間変動が計測され、同時に出力積分値も測定される。

以上の測定結果の記録には、24チャンネルのビジューダおよび14チャンネルのデータレコーダを用いた。図4は、その出力測定系ブロック線図を示したものである。図5には、投入反応度を変化させた場合の炉出力波形の時間的変化の実測結果を示してあるが、投入反応度が大になるにつれて、ピークに到達する時刻が早くなり、ピーク出力が急激に増大すると同時に、パルス状の波形の幅も短くなることがわかる。図6には、投入反応度 1.20% $\Delta k/k$ パルス実験のデータを示している。この図によってもわかるように、出力ピークはあきらかに制御棒の落下開始時刻以前になっており、炉心固有の自己抑制効果によって出力が減少し始めていることが認められる。

4. 原子炉反応度事故解析コード (REACT-R II コード)

HTR を利用してパルス運転を行なう際の安全性を、理論的に検

討するため原子炉反応度事故解析コード(React-R II コード)を開発した。計算結果の一例として、HTR パルス出力波形を図7に示した。

React-R II コードの特徴は、最高温度燃料チャンネルにおける温度、ボイド、熱流束などの時間的変化を解析することができる2点近似動特性計算方式を採用していることである。これにより HTR のパルス運転時の炉出力変動を解析するとともに、炉心内の最高温度個所における燃料棒について独立に熱的な検討を加えることができ、燃料破損の有無を判定できる。

4.1 解析方法

炉出力の変化は、中性子1群、遅発中性子6群、点状近似において次の動特性方程式に従うものとした。

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = \frac{\Delta k - \beta}{l} P + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{l} \zeta_i \\ \frac{d\zeta_i}{dt} = -\lambda_i (\zeta_i - P) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

全熱出力 $P = p \times 4,185 \times V_{cf} \text{ (cm}^3 \text{ UO}_2\text{)} \times 10^{-6} \text{ (W)}$

放出熱エネルギー $E = \int_0^t P dt \text{ (MWs)}$

炉周期 $\tau_P = P / \left(\frac{dP}{dt} \right) \text{ (s)}$

初期条件 $t=0$ で、 $P = \zeta_i = P_0$, $\Delta k = 0$

p : 炉出力密度 (cal/cm³・s)

Δk : 全反応度 ($\Delta k/k$)

β : 遅発中性子割合

ζ_i : 第 i 群の遅発中性子による炉出力密度 (cal/cm³・s)

λ_i : 第 i 群の遅発中性子の崩壊定数 (s⁻¹)

全反応度 Δk は次式のように分解して考えられる。

$$\Delta k = \Delta k_{in} + \Delta k_{FB} + \Delta k_{SM} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし Δk_{in} : 投入反応度

Δk_{FB} : フィードバック反応度

Δk_{SM} : スクラム反応度

投入反応度 Δk_{in} は、パルス実験用制御棒の引き抜きによる反応度の投入であり、ステップ投入、ランプ投入、等速投入を任意に選ぶことができる。

フィードバック反応度 Δk_{FB} はさらに次式のように分離される。

$$\Delta k_{FB} = \Delta k_{TF} + \Delta k_{TM} + \Delta k_V \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし Δk_{TF} : ドップラー反応度

Δk_{TM} : 減速材温度反応度

Δk_V : ボイド反応度

ドップラー反応度 Δk_{TF} は、燃料温度上昇によるドップラー効果によるもので、燃料内の温度計算は、半径方向に最大20分割して計算することができる。またドップラー効果の温度依存性については、きめの細かい配慮がされており、平均チャンネルと最高温度チャンネルの温度計算が全く同じようになされる。減速材温度反応度 Δk_{TM} は、即発および遅発の減速材温度変化の影響がとり入れられるようになっている。ボイド反応度 Δk_V は、燃料被覆管表面における冷却水のサブリール沸騰とバルク沸騰およびガンマ線による冷却水の放射線分解ガス発生などのボイド効果が考慮されている。特に燃料被覆管表面に発生するボイドについては、ボイド発生の時間遅れの効果がとり入れられている。

スクラム反応度 Δk_{SM} は、炉の停止用安全棒などの急速落下による負の反応度であり、この効果を精度よく解析するために、出力スクラム信号の発信、検知、制御棒の落下開始、落下中の反応度効果などが細かく計算できるようになっている。

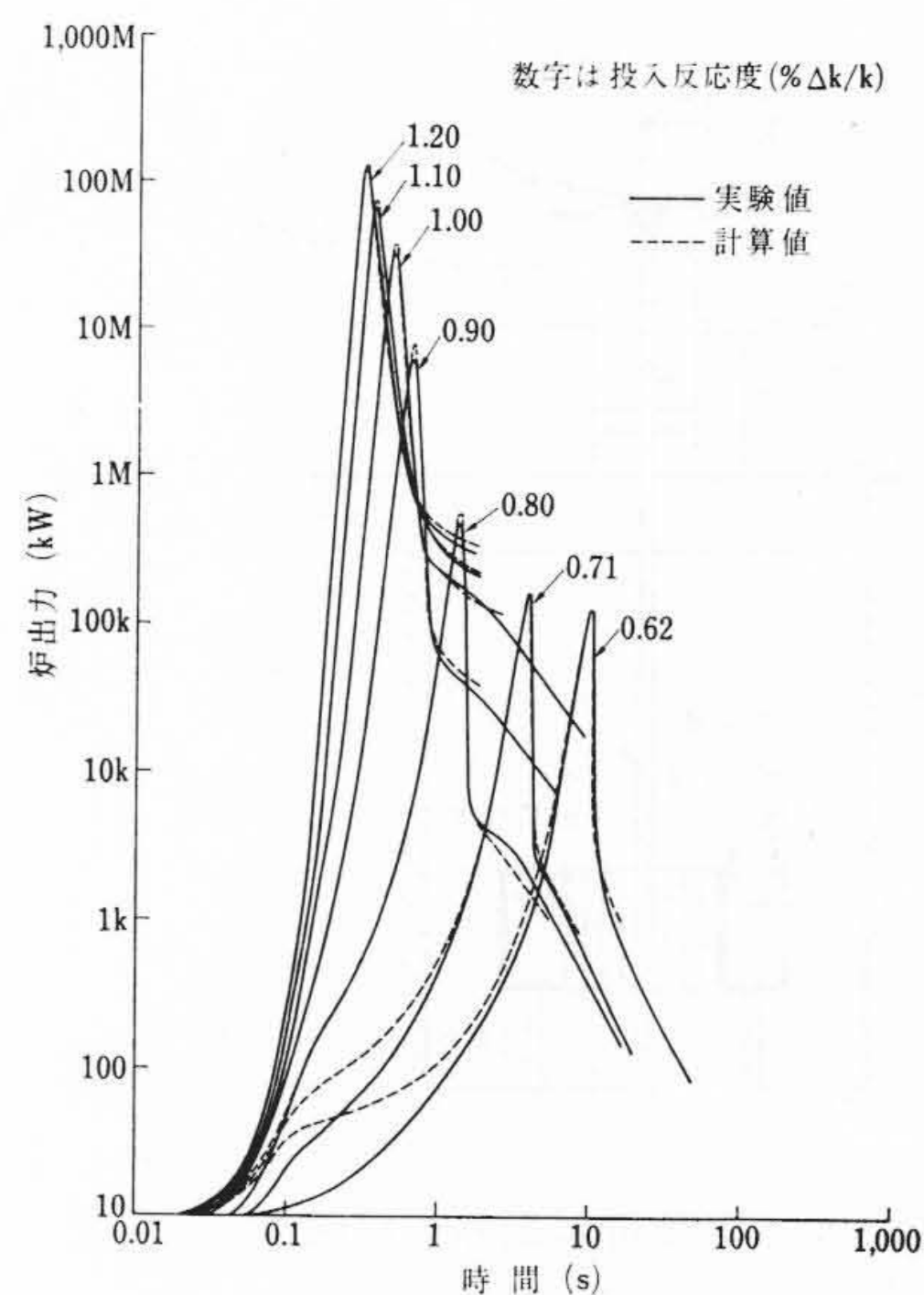


図8 炉出力の時間的変化

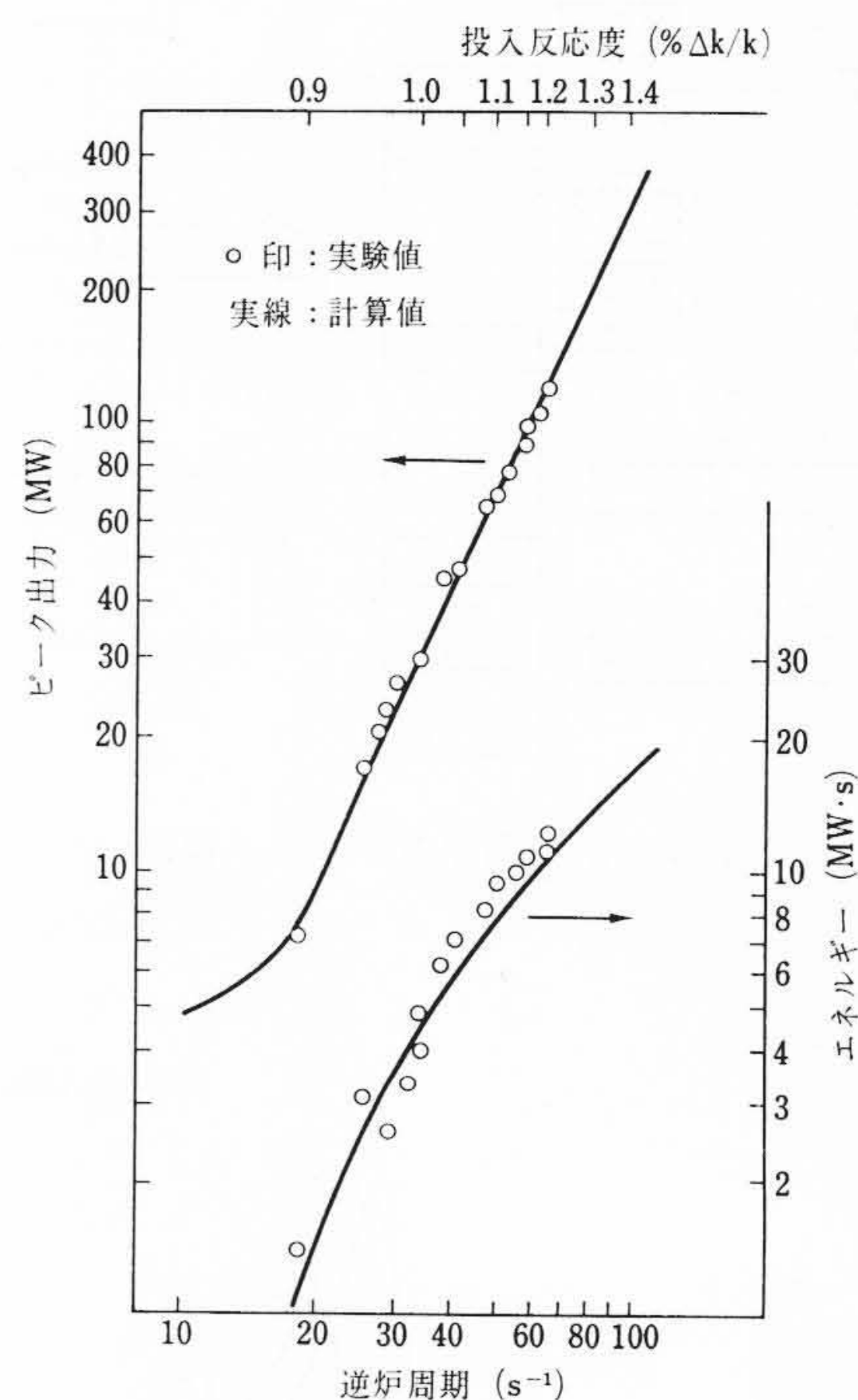


図9 ピーク出力およびエネルギーの実験と計算との比較

4.2 React-R II コードの実用性

このコードの実用性を確かめるために、HTR パルス実験の解析に先立ち、アメリカ、アイダホ実験場で行なわれている SPERT 実験の結果を解析した。この結果じゅうぶん反応度事故解析に役立つことが示された。その後 HTR で実施しているパルス実験の理論解析に用いられ、このコードの信頼性は、実験により検討された。

図8は HTR パルス実験における各投入反応度の出力波形の実験値と理論解析値の比較結果を示したものである。図9はピーク出力と放出エネルギーを、また図10は燃料内最高温度の実験値と理論値の比較データを示したものである。

以上の結果、HTR パルス実験により原子炉の自己抑制効果を実験的に確認するとともに、原子炉反応度事故解析用コード React-

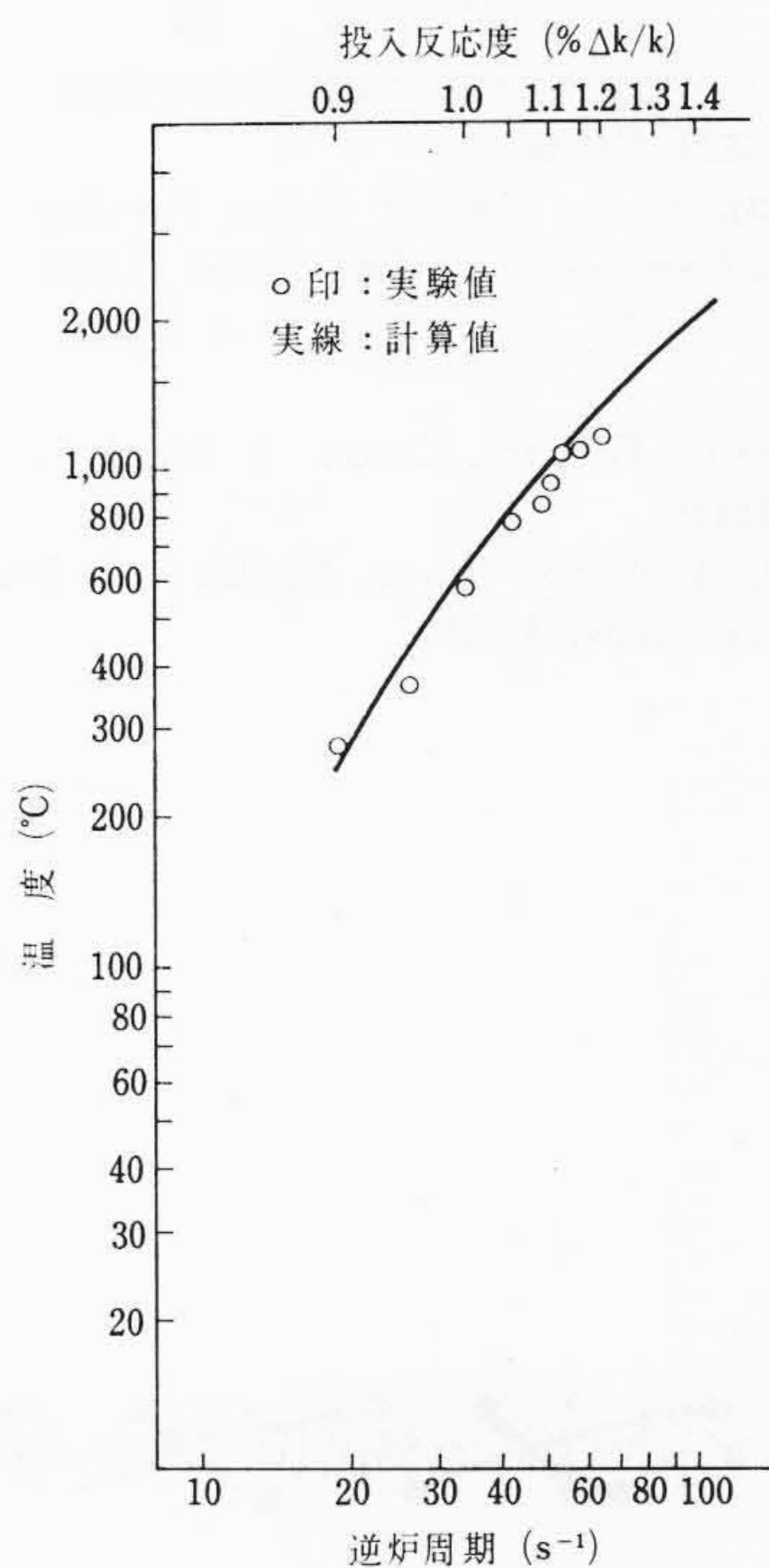


図10 燃料最高温度の実験と計算との比較

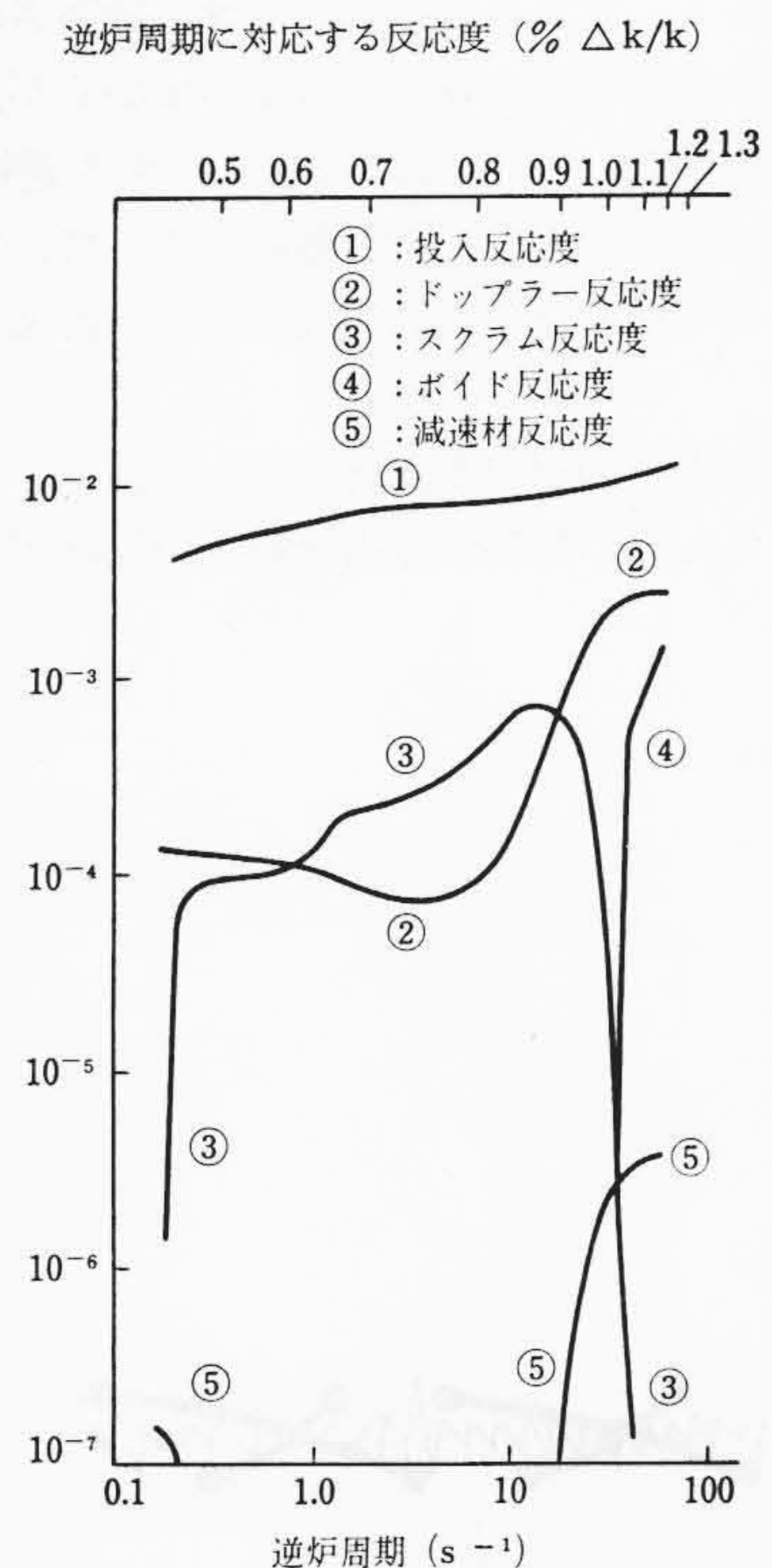


図11 出力ピーク時刻における補償反応度

RⅡの信頼性を確認することができた。HTRは前述のとおり、軽水冷却形原子炉で、 UO_2 ペレットの棒状燃料を用いており、軽水冷却形動力炉に類似した構造である。したがって、本研究で開発された解析方法は、軽水冷却形動力炉の反応度事故解析にじゅうぶん適用しうるものである。

5. 結果の検討

前述のように、パルス運転の場合も定常運転の場合と同じく、出力が110 kWに達するとスクラム信号が発せられて、0.15秒の遅れで制御棒が落下し始める。したがって、炉周期が0.1秒より長いような場合には、自己抑制効果によらずスクラム効果により出力が低下して出力ピークを生ずる。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% $\Delta k/k$ 投入の場合には、スクラムがきき始める前に、ドップラー効果による自己抑制効果で炉出力は低下する。このことは、負の補償反応度の内訳を示す図11を見てもあきらかである。図11はREACT-RⅡより求めた解析データである。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。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、それ以上の投入反応度ではスクラムの寄与は急激に低下する。1.0% $\Delta k/k$ 投入の場合は補償反応度の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。

この事実は実験的にも確かめることができた。すなわち、投入反応度1.0% $\Delta k/k$ のパルス運転の際に、スクラム遅れ時間を0.11秒にしたところ、あきらかにピーク出力の減少が認められたが、0.15秒以上に遅らした場合にはピーク出力は変化しなかった。これはピーク出力の値が制御棒スクラムに影響されずに、ドップラー効果によってのみ定まっていることを示すものである。投入反応度1.0% $\Delta k/k$ 以上のパルス運転では、炉周期がさらに短くなってピーク出

力の時刻が早まるため、ピーク出力の値は当然ドップラー効果によって決定される。図9に示すようにピーク出力についての実験結果と理論計算の値はよく一致している。これによっても、理論計算の中にドップラー効果が適切にとり入れられていることがわかる。

炉出力がピークに達するまでの時間が非常に短時間(0.5秒以下)であるため、燃料棒からの熱の逃げは少ない。しかしピーク時刻を過ぎて、パルスの後半部分になると、燃料棒から冷却水に熱が伝達されボイドが発生し負の反応度効果を与える。また制御棒のスクラム効果も大きな負の反応度を与える。燃料自身の温度もピーク出力時刻よりさらに上昇して負の反応度効果(ドップラー効果)が増大する。これらいくつかの補償反応度が重なり、出力はますます減少する。したがって、パルスの尾をひいた裾(すそ)の部分の炉出力を正確に計算するには、これらの補償反応度を正確に理論計算にとり入れる必要がある。

6. 結 言

HTRパルス実験で、軽水冷却形原子炉の出力逸走を自己抑制する現象を実証し、ドップラー効果のもつ自己抑制性を明らかにした。

HTRのパルス実験に当たって、従来の制御棒が110 kW到達時のスクラム信号より0.15秒遅れて炉心に落下するため、投入反応度1.0 $\Delta k/k$ に達しない実験においては、ピーク出力はスクラムによって決定されるが、1.0% $\Delta k/k$ 以上ではドップラーの負の反応度効果によって決定される。このことは、理論解析からも、また実験的にも確かめられた。また投入反応度1.0% $\Delta k/k$ 以上の実験におけるピーク出力の測定値は、ドップラーを考慮した理論計算値と10%以内で一致しており、この領域においては炉出力ピークはドップラー効果によって定まること、ならびに理論計算にドップラー効果が適切にとり入れられていることがわかる。

またパルス運転時において、急激に変化する炉出力、燃料の温度などを測定する技術が開発された。今日までに400回以上のパルス

運転を行っており、スクラム系の信頼性が確認されるに至った。

1時間に約1回の単発パルス運転を行なっているが、1分間に1回のパルス運転を10回まで可能な、繰返しパルス運転の計画が進行中である。このような繰返しパルス運転によって、あらたに燃料破損検出など安全面で重要な炉内計測技術がいちだんと進展するものと予想される。

本研究は、原子力平和利用委託研究として推進したものであり、有益なご助言をいただいた科学技術庁原子力局関係各位に厚く感謝する。

参考文献

- (1) 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, 329 (1966)
- (2) D. R. Barton et al: Power Burst Facility Preliminary Safety Analysis Report, IDO-17060 (1965)
- (3) 山田，今井，井上，田上，飯塚：日立評論 50, 646 (昭43-7)
- (4) Imai, Yamada, Tagami, Kato: J. Nucl. Sci. Technol., 6, 69 (Feb. 1969)
- (5) Kato, Imai, Yamada, Inoue, Iizuka: J. Nucl. Sci. Technol., 6, 637 (Nov. 1969)



新案の紹介



登録実用新案 第797586号

森田 健・渡辺 晃・笠間良治
小川 隆(日野自動車工業)

チョーク弁自動制御装置

ガソリンエンジンにおいて、始動時に混合気を濃くして始動性を良くするために気化器にチョーク弁が設けられている。このチョーク弁を自動制御するために、動力源としてバイメタルを用い、このバイメタルとイグニッションスイッチを介して電源に接続されるヒータで加熱するようにしたものがある。この方法ではイグニッションスイッチを閉合してからエンジンが始動するまでの時間の誤差が生ずるので、このヒータを充電用発電機の発生電圧で付勢される電磁リレーを介して電源に接続することにより、エンジンの始動と同期的にヒータを動作させようとするものである。

図において、1はY形結線されたバッテリー充電用の交流発電機で発電巻線2は全波整流回路3を介してバッテリー4に接続される。5は界磁巻線で一端は接地し、他端は電圧調整器6とイグニッションスイッチ7を介してバッテリー4に接続される。8は電圧調整器6における電圧検出線輪で一端は全波整流回路3の出力端に接続され、他端は電磁リレー9の接点10を介して接地される。この接点10は常開形で電磁線輪11は交流発電機1の発電巻線2の中性点に接続することにより、エンジンが始動し交流発電機1が動作状態になったときに接点10が閉じるように構成される。12はバイメタル(チョーク弁を動かす動力源)を加熱するヒータで一端はバッテリー4に接続し、他端は前記接点10を介して接地するように構成される。

かくすることにより、イグニッションスイッチ7を閉合してもエンジンが始動されない状態では交流発電機1の発電巻線2に電圧が発生しないので電磁リレー9における接点10は開放されたままである。したがってイグニッションスイッチ7を閉合しただけではヒータ12が付勢されないからチョーク弁は移動しない。次にエンジ

ンが始動すると発電機1の発電巻線2に電圧が誘起されるので、電磁リレー9の電磁線輪11が付勢されて接点10を閉じ、電圧検出線輪8を付勢して電圧調整器6を活動状態にするとともに、ヒータ12を付勢してバイメタルを加熱しチョーク弁を次第に開放する。

以上のように本考案によれば、チョーク弁はエンジンの始動に同期的に制御されるので、イグニッションスイッチの閉合とエンジン始動が時間的にずれてもチョーク弁の制御はエンジンに合わせられる。(仙波)

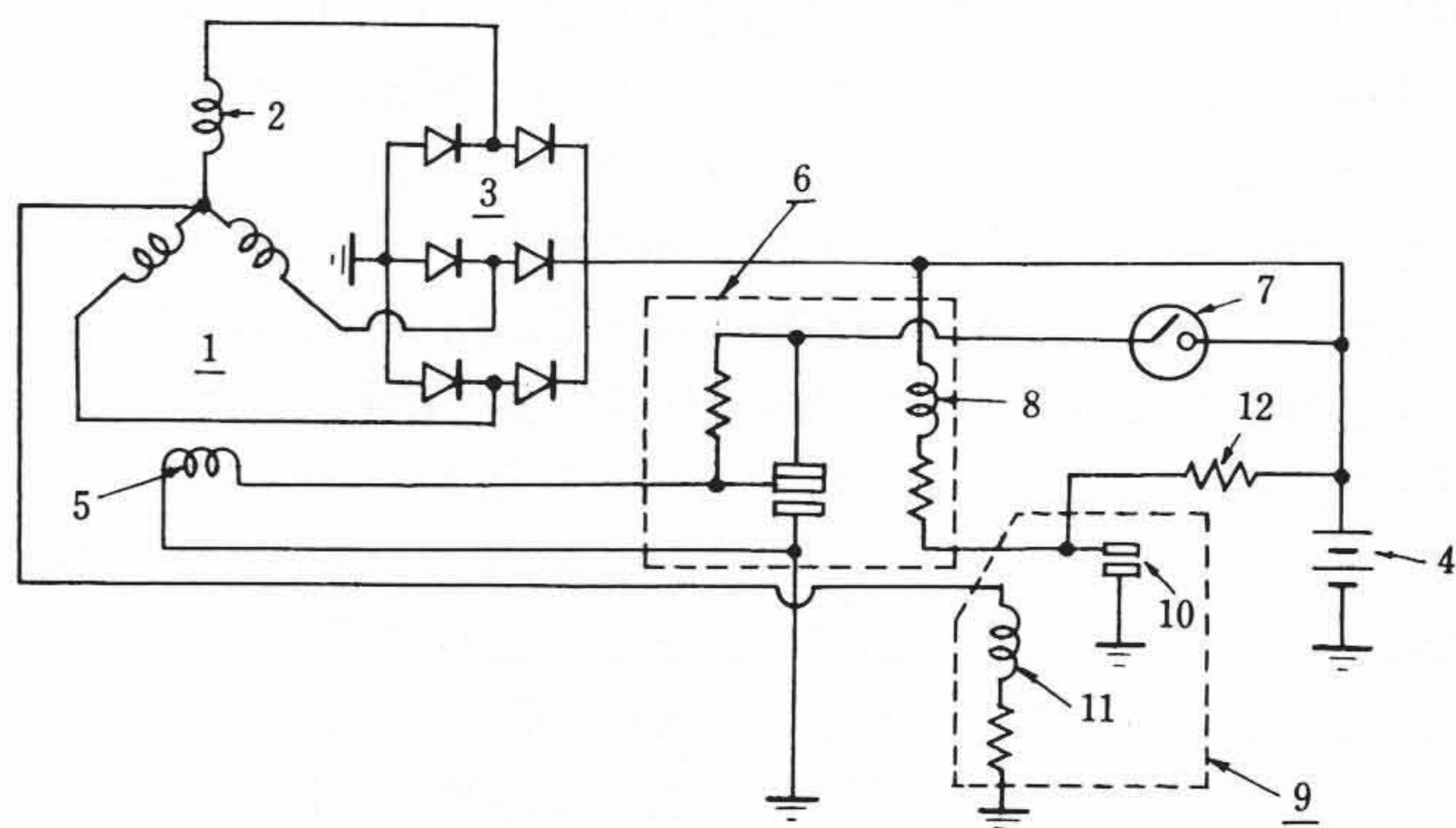


図 1