

大形沸騰水原子力発電所制御系の特性解析

Analysis of Control System for Large BWR Power Station

大 木 新 彦* 鈴 木 守**
Arahiko Ōki Mamoru Suzuki

要 旨

最近建設中の大容量沸騰水形原子力発電所 (Boiling Water Reactor) には、経済性にすぐれた単一サイクルプラントの採用例が多い。大形単一サイクルプラントでは良好な出力調整能力を得るために、原子炉冷却水の流量を変化し誘起される炉心内の蒸気体積変化を利用して出力を調整する再循環流量制御方式 (Recirculation Flow Control) が使われているが、さらに急激に出力を変更するために原子炉内の保有蒸気を短時間流出させ流量制御の時間遅れを補う目的の補助制御系も考案されている。これらを中心に BWR に採用されている種々の制御系の特長を述べ、電気出力 30 万 kW 級の単一サイクルプラントにつき制御特性の解析結果を報告する。

1. 緒 言

原子力発電所の開発初期においては単基プラントあたりの出力も小さく系統における負荷分担も少なかったうえに、低発電コストを狙い稼働率を高くとりたかったなどの理由で基底負荷運転を目的として計画されるプラントが多かった。このような場合の制御法は給電指令により運転員が原子炉出力を手動によって調整しタービン発電機がこれに追従する Turbine Slaved to Reactor 方式で十分であった。しかし原子炉特性の把握によりその制御性が新鋭火力発電所にまさるとも劣らないことが明らかとなるとともに、単基プラント出力の著しい増加にともない自動的に負荷調整を行ない系統の出力変動に応ずることも考えねばならなくなってきた。この場合は負荷変更の要求がタービンのガバナを通して原子炉出力を自動的に調整するもので Reactor Slaved to Turbine 方式といわれる。

BWR においても比較的小出力の炉では早くから制御棒の操作により出力の自動制御が行なわれていた。大形炉でも自動制御特性の良好な 2 重サイクル BWR が実用化された。2 重サイクル BWR は制御性の良好な点だけでなく種々の特長をもつすぐれた形式として迎えられたが、建設コストが安く効率のよい大容量単一サイクル BWR の採用が多くなるにしたがってこの制御性を良好にするための再循環流量制御方式が実用化されるようになった。最近では流量制御に圧力調整器設定値の変更を加え急激な出力追従を可能とする補助系も考えられ多くの興味をよんでいる。

本報告では BWR に採用されているこれらの制御方式を展望し、特に興味ある単一サイクル BWR の流量制御特性を解析し、その特長を明らかにしている。

2. BWR プラントの制御方式

BWR の出力を変化する際に考えられる有効な制御因子を図 1 に示す。

2.1 制御棒位置調整による制御方式

比較的小出力の BWR (EBWR, VBWR, JPDR⁽¹⁾) では制御棒の位置を調整する制御方式が採用されている。図 2 はその一例であるが、タービンガバナにて蒸気流量の調整が行なわれ、この際炉心圧力を検出し設定値との偏差に応じて制御棒位置を自動的に変える方法である。負荷追従速度は制御棒の操作速度で制限される。しかし一般に安全性の見地から低速に押えられているうえに同時には一本の制御棒しか操作できないようインターロックが設けられている。

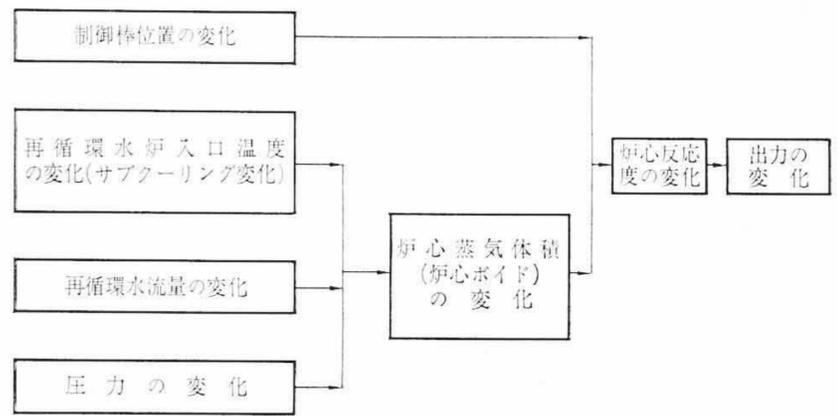


図 1 BWR の出力制御に有効な因子

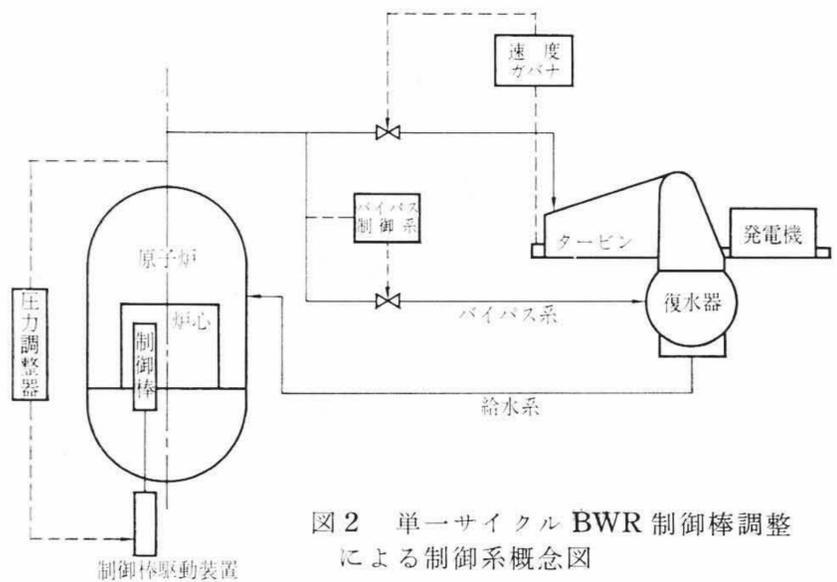


図 2 単一サイクル BWR 制御棒調整による制御系概念図

小形炉に設けられている制御棒本数は 10~20 本程度と少なく、一本当たりの中性子吸収量も比較的大きいので制御の際操作する制御棒のストロークも小さくてよく良好な負荷追従性が得られている。しかし制御棒を操作する本質上炉心内の中性子束分布にひずみを生じやすく出力分布を不均一にする傾向がある。

電気出力 50 万 kW 級の大形炉になると制御棒本数も 130 本程度と増加し一本当たりの吸収量が減少するため負荷変化の際多数の制御棒を操作しなければならない(たとえば 50% の出力減少に際し 10~15 本の制御棒を完全そう入しなければならない)。しかも中性子束分布を平坦に保つよう留意しつつ行なわねばならぬので自動制御系にて運転することはむずかしくなる。しかし手動によれば運転員の判断をも含めて 1~2%/min の出力変化が可能である。この際プラントは圧力調整器により炉内圧力一定の自動制御を行なっている。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

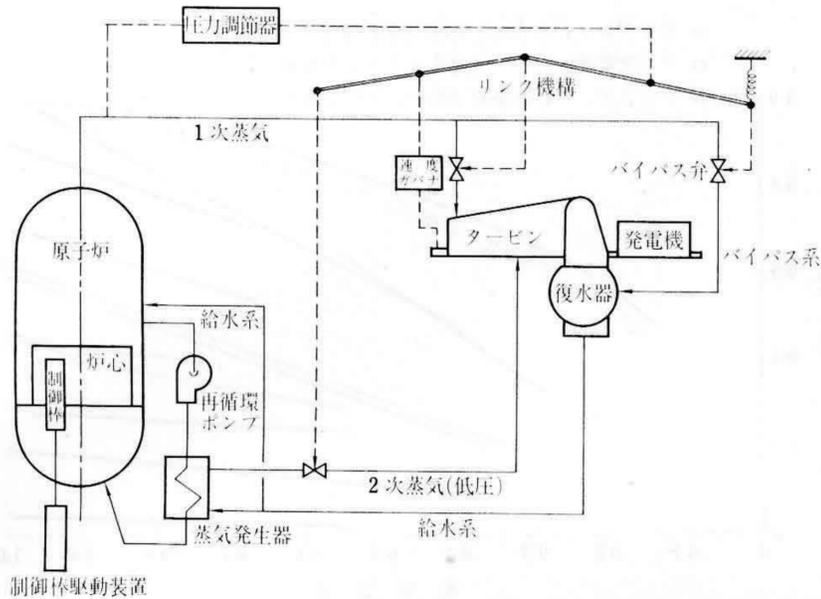


図3 2重サイクルBWR制御系概念図

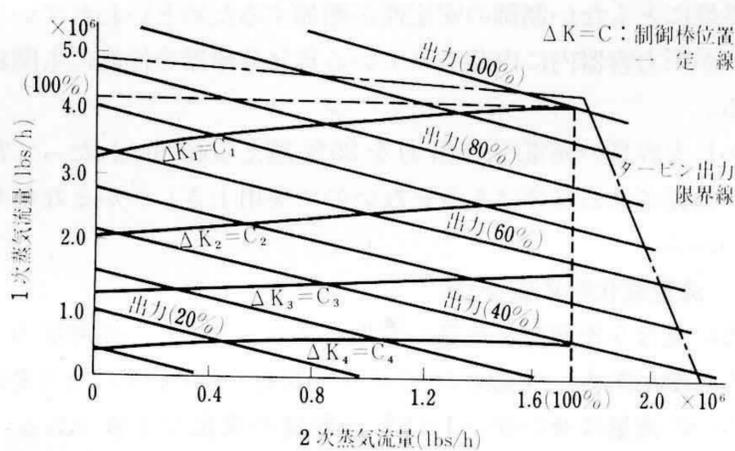


図4 2重サイクルBWRでの流量と出力の関係

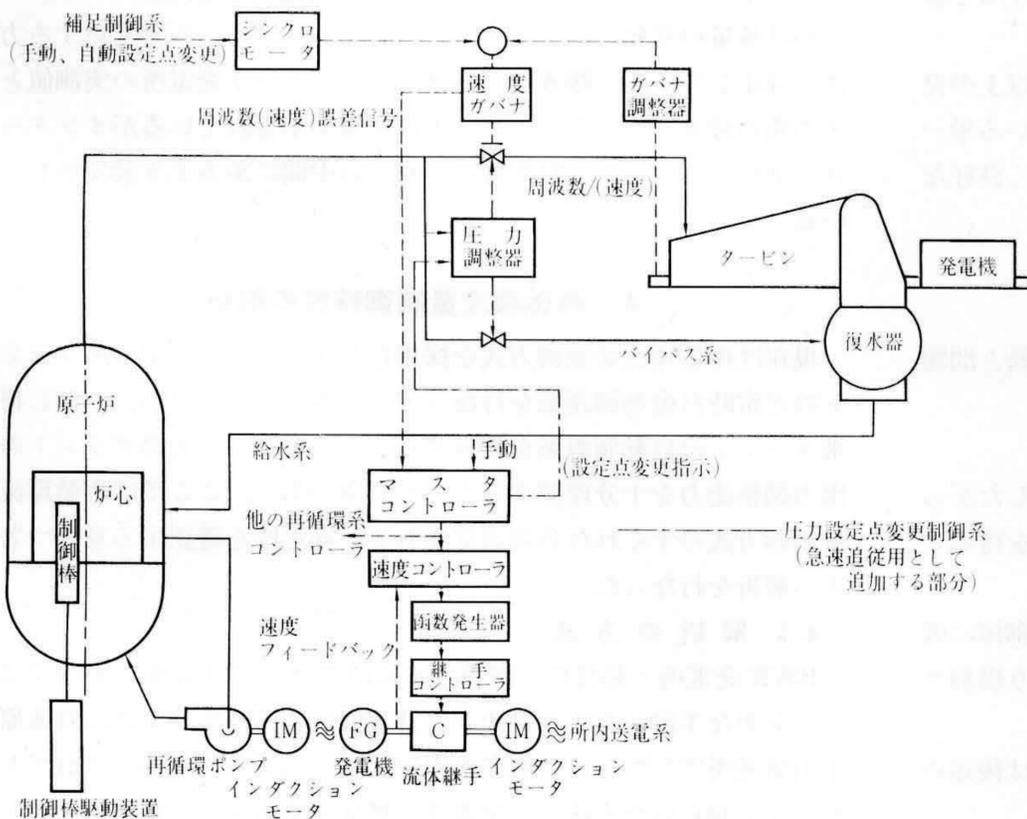


図5 単一サイクルBWR再循環流量制御系概念図

2.2 サブクーリング変化による制御方式⁽²⁾

初期の大容量BWRとして2重サイクル形が考案された。2重サイクルBWRでは図3に示すように蒸気の一部を飽和水との熱交換により発生させるため(2次蒸気)炉心より直接発生する蒸気量(1次蒸気)が少なくなり炉心の設計条件が楽になると同時に2次蒸気流量の調節により良好な負荷追従性が得られる。制御系概念図は図3に示してある。タービンガバナからの出力変化に応じた指令によ

って1次2次蒸気流量を適当に調節し、炉心入口における冷却水の温度(したがってサブクーリング)を変化し、それともなうボイド変化を利用して制御棒位置一定のまま出力を制御することができる。しかも炉内圧力を一定に保つよう操作する圧力調整器よりの指令も自動制御系に組込んでいるので負荷追従の際圧力変動ともなう出力変動を避けることができ安定な運転が可能である。ドレスデン一号炉の実績をもとに50万kW級のプラントにつき計画した蒸気流量と出力との関係⁽³⁾を図4に示す。図中で $\Delta K=C$ の線は制御棒位置を一定のまま流量を変えた場合に得られる発電所出力を表わしている。制御範囲は定常出力時の1次2次蒸気流量比で決まるが図4の例では約40%となっている。これより大幅に出力変化を行なう場合には制御棒位置操作を併用して行なわねばならない。このように2重サイクル形ではサブクーリングの調整により容易に出力を変化できるが、一方低圧の2次蒸気を一部使っているためプラント効率が悪くなるうえに再循環系に2次蒸気発生器を設置しなければならないため建設コストが高くなるなどの欠点がある。

2.3 再循環流量変化による制御方式⁽⁴⁾⁽⁵⁾

最近では炉心設計の進歩により大容量の発電所にも経済的な単一サイクルBWRを採用する例が多くなってきた。この形式で制御特性を良好とするため再循環流量制御方式が用いられている。図5にその概要を示す。流量制御のアイデアは古くから提案されていたが最近ドレスデン一号炉、ビクロックポイント炉などで可能性が確認され実用化の段階となった。流量を変化する手段は再循環ループ内に設けた弁の開閉による方法、流体継手などによりポンプの回転数変化による方法などが考えられたが最終的には流体継手により回転数変化を与えた発電機の周波数変化を利用しポンプ直結モータの回転数を調節している。この方法によると制御機器の大部分を格納容器外に設置できるため保守が容易となる。制御遅れの主要部分は

流体継手の慣性と流量変化の時間遅れであるが比較的小さく設計できるので良好な出力調整能力が得られている。また制御棒の不均一な入りにともなう中性子束分布の局所的なピークがさけられる利点も大きい。

大形プラントの出力自動調整は不必要であるという見解により、現在の発電所はガバナよりの指令を圧力調整器の制御範囲よりずらしておき、タービンの回転数が異常に上昇した場合のみガバナ指令に応じ炉出力の自動調整を行なうよう計画されている。

流量制御系では4~8秒の時間遅れで30%/minの出力変化が可能でその範囲は約25%である。これ以上の制御範囲を要求される場合には制御棒操作を併用する必要がある。

さらに制御系の時間遅れを少なくするため図5に示すように、ガバナよりの指令を流量制御系に伝えると同時に圧力調整器の設定点を一時変更する補助系統(圧力設定点変更制御系(急速追従用として追加する部分))が考案された。これにより初期の約5秒間は原子炉系の保有蒸気を流出させることにより60%/minの出力変更を可能とする。

2.4 圧力変化にもなう出力変化

BWRでは圧力の反応度に及ぼす効果は正である。すなわち圧力上昇は炉出力の増加をもたらす。したがって一般に圧力調整器を設置し炉内圧力が一定となることに主体を置いた制御法がとられている。

しかし圧力容器内のかなり大きな保有エネルギーの効果やボイド変化の遅れ、反応度変化と出力変化との間の遅れなどのため炉出力は小さな圧力変化に対してかなり安定な性質を示すことが知られており実際には負荷追従特性の障害にはならないと考えられる。

表1 BWRプラントの出力追従特性

出力変化	単一サイクル 制御棒操作による制御	二重サイクル サーブクーリングによる制御	単一サイクル 再循環流量変化による制御	火力 ⁽⁴⁾
ステップ ⁽¹⁾	少	10%	15%	4~8%
ステップ変化率	2%/分	10%/分	1%/秒	3.3~5.3%/分
ランプの範囲	100%	30%	25 ⁽³⁾ ~50%	20~30%
負荷低減	瞬時 ⁽²⁾	瞬時 ⁽²⁾	瞬時 ⁽²⁾	瞬時 ⁽⁵⁾

- (1) 10秒以内にタービンに作動し得る出力(全出力の%として示す。)を意味する。
 (2) 適当なバイパス系があればスクラムなしで行ない得る。
 (3) 燃焼初期に於て25%である。
 (4) 文献(6)および従来の実績より表示した。
 (5) 安全弁よりの蒸気放出を許すとしている。

2.5 バイパス制御系⁽⁴⁾⁽⁵⁾

タービン負荷の急激な低下に際してタービン保護系の作動により蒸気流量の急速遮断が行なわれる。この際炉内圧力の急上昇が生じ中性子のピークまたは出力の急上昇によって原子炉はスクラムされる。これを避けるために蒸気配管より復水器に直接蒸気を送るバイパス系が設けられている。バイパス容量はトリップ時炉出力の減少速度と蒸気バイパス能力のバランスで決まる。

全負荷トリップに際しスクラムを生じないためには100%蒸気量を吸収できるバイパス系を設けるのが望ましい。プラントの良好な出力調整能力はトリップ時の蒸気不均衡を補ないバイパス容量の減少に有効に働く。全負荷トリップの機会が少ない場合には経済性に重点を置きバイパス容量を小さく設計しており実際には40%程度の容量を設けている例が多い。またバイパス処理速度はバイパス弁の開放速度で押えられる。弁操作はタービン入口弁との連動機構を採用したり発電機負荷変動より直接指令を与える方法を使ったりして急速開放を可能とするよう種々の工夫が行なわれている。

2.6 制御特性の比較⁽⁵⁾⁽⁶⁾

代表的な大形BWRプラントにつき出力追従特性を比較すると表1のようになる。

上記性能は従来の火力発電所に匹敵するかあるいはそれ以上の良い性能を持っていることがわかる。特に経済的にまさっている単一サイクルプラントが再循環流量制御方式の採用により著しく良好な出力調整能力を有していることは注目に価する。

3. 再循環流量制御方式の特長

有効な単一サイクルBWRの流量制御方式につきその特長と問題点を考察する。

3.1 流量制御系の利点⁽⁵⁾

- (1) 炉心内に局所的な中性子束のひずみが生じない。したがって効率のよい反応度の利用が行なわれ高い燃焼度を得ることができる。
- (2) ボイド体積変化を使用していることは中性子を制御棒に吸収させるかわりに燃料の転換に利用することになり燃料サイクル向上に寄与する。
- (3) 出力変更能力が著しく良好である。その際の特性は後述の解析結果からも明らかのように非常に安定である。

3.2 流量制御可能性の確認

実際に流量変化を利用して出力を調整する可能性を確認するためにいくつかの実存プラントにおいて実験が行なわれている。

図6は再循環ポンプをトリップする際流量と出力が変化する関係を実測した一例⁽⁷⁾であるが非常によい線形性を示しておりまたその際の安定性もきわめて良好であったことが伝えられている。

3.3 出力変化範囲

制御可能な範囲は表1に示すように燃焼初期において全出力の25%といわれているが燃焼の進んだ段階で50%程度に拡大する。こ

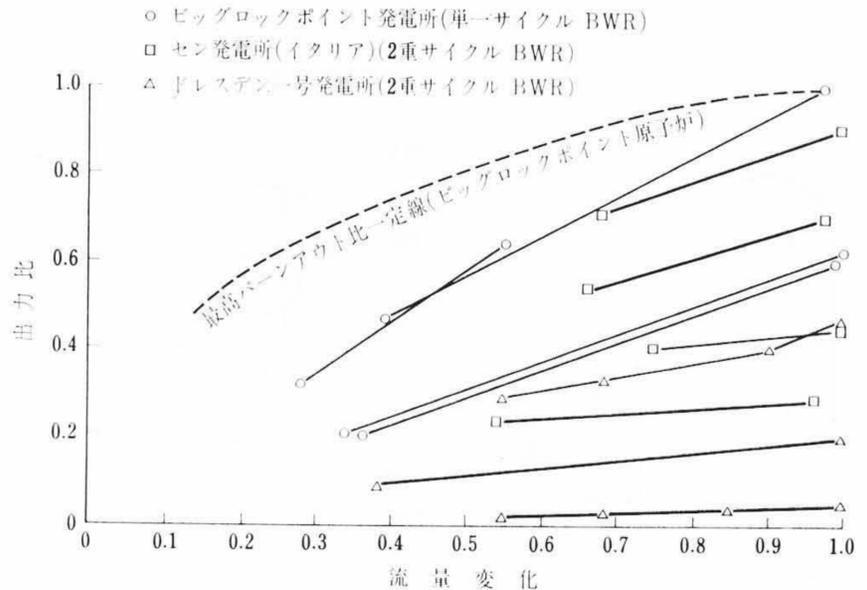


図6 流量制御範囲測定値

れは燃焼にともない制御の安定性が増加するためといわれている。そのほか圧力容器内に内蔵されている蒸気分離器の性能にも関係している。

しかし大容量の発電所の出力を25%越える範囲にわたって常時急速に追従させる必要はありえないので実用上さしつかえないものと思われる。

3.4 流量変化時の安全性⁽⁴⁾

出力に見合う不適当な流量の変化を与えると炉心の冷却能力が不足する心配がある。実際には追従性が良好で30%/sの出力変化を与えるのに流量はせいぜい1~2%/s程度の変化で十分である。しかし安全性をいっそう高めるため絶対に出力と流量のアンバランスを生じないようインターロックが設けられている。一例として炉の高中性子アラームトリップ回路中に再循環流量と比例したバイパスをかけ流量の変化に応じてアラームのトリップレベルを変更する方法を採用している。図6にビッグロックポイント発電所の実測値とその際の最大バーンアウト比一定の曲線が示されているがインターロックによるトリップ限界線はこれらの中にあるよう設定されている。

4. 再循環流量制御特性の解析

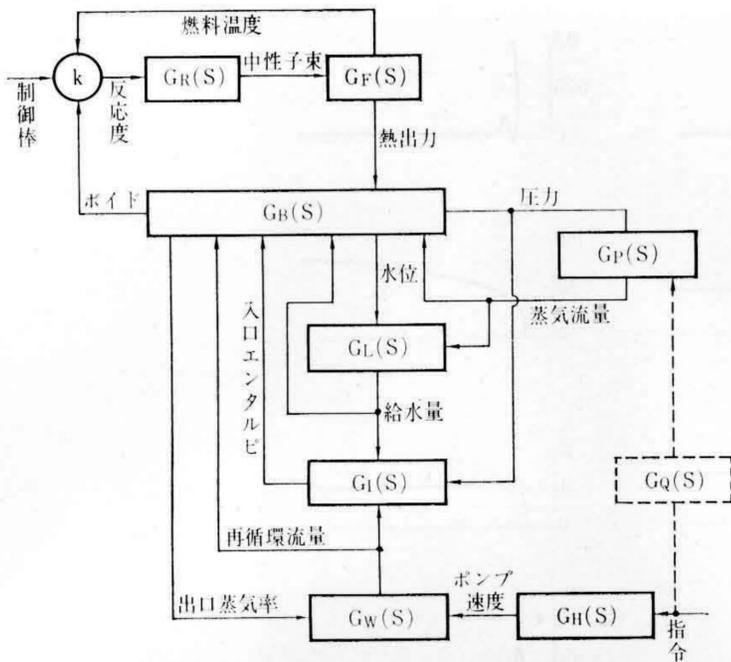
現在は再循環流量制御方式を採用した単一サイクルBWRプラントの定常時自動制御運転を行なっている例は見られない。しかし将来プラントの自動制御系を検討するうえにおいてもそのプラントの出力調整能力を十分理解することが必要であり、ここでは再循環流量制御方式のすぐれた負荷追従性および安定性を確認する意味で若干の解析を行なった。

4.1 解析の方法

BWR発電所の動特性を解析するにはアナログ計算機を利用するのが有力な手段である。アナログ計算機による解析の方法は日本原子力研究所^{(8)~(10)}や日立製作所⁽¹¹⁾をはじめ各所⁽¹²⁾で開発されており、よく知られた方法で、発電所を構成する各部の特性をアナログ計算機上に再現して全体を組合せた場合の特性を解析するものである。

BWR発電所の構成はその動特性の面より見れば図7のようになっている。図に示したBWR発電所の構成およびその各部の特性は種々の仮定のもとに求められる。今回の解析では、

- (1) 核反応特性は一点近似で取扱い、6群の遅発中性子を考える。
- (2) 崩壊熱は全出力の7%とし、内3%は時定数32秒で出力変化に追従し残り4%は解析した時間内では変化しないと



k: 反応度係数
 GR: 核反応特性
 GF: 燃料熱伝達特性
 GB: 熱力学特性
 GL: 水位制御系
 GI: 再循環系
 GW: 水力学特性
 GP: 圧力制御系
 GQ: 圧力設定値調節系

図7 単一サイクルBWR動特性ブロック線図

考える。

- (3) 崩壊熱はすべて燃料中で発生するものとする。
- (4) 出力の4%は水中で直接発熱する。
- (5) 炉心内の圧力は圧力容器内の圧力に等しい。
- (6) 再循環水に含まれるキャリアンダは無視する。

などを仮定した。

核反応特性 $G_R(S)$ や燃料棒の熱伝達特性 $G_F(S)$ などには周知の伝達関数を用いた。熱力学特性 $G_B(S)$ は冷却水の質量収支と熱量収支を炉心内と圧力容器内についてそれぞれ考え、上記仮定(5)を用いて整理して得られる。この場合炉心内の蒸気体積(ボイド量)は炉心出口蒸気率(Exit Quality)からボイドマップによって算出するのが従来の方法で、ボイド発生が遅れとして適当な時定数を仮定する。今回の解析では上記仮定(5)を基にして炉心内の冷却材の質量収支を計算することにより炉心内のボイド量をさきに算出し質量収支の計算に必要な炉心出口蒸気率を、ボイドマップを逆に利用して、ボイド量より求める形とした。そしてボイド流出の遅れとして炉心出口蒸気率の変化に炉心内の冷却材の滞留時間に見合う時定数を考えた。このため従来の方法で炉心出口蒸気率を厳密に解くのに必要となるボイド量変化の微分演算が積分演算に置き換えられた。従来は多くの場合この微分演算は省略されるかまたは近似計算されていた。炉心内の水力学特性は強制循環を考慮してほとんど循環ループで定まるものと考えた。すなわち再循環ポンプの揚程と見合う循環ループの損失ヘッドは再循環流量のみによって変わるものとし、炉心内の種々の変化の影響は無視するかまたはこの影響を炉心出口蒸気率で代表させて損失ヘッド変化に採り入れることとした。再循環水の慣性はダウンカマと再循環管路内の冷却材について考えた。ポンプの特性はいわゆる2乗法則から線形化を行なって次式を用いた。

$$p_p = 2 A_p \frac{P_{P0}}{N_{P0}} n_p + 2 B_p \frac{P_{P0}}{W_{I0}} W_I \dots \dots \dots (1)$$

$$t_p = 2 C_p \frac{T_{P0}}{N_{P0}} n_p + 2 D_p \frac{I_{P0}}{W_{I0}} W_I \dots \dots \dots (2)$$

ここで P_P はポンプの揚程, N_P は回転速度, W_I は再循環流量, I_P はポンプ駆動トルク, A_p などは係数である*。

再循環流量制御系は流体継手を制御素子として交流発電機と誘導

表2 発電所諸元

分類	項目	単位	数値	
一般	発電所定格出力	MW	325	
	原子炉定格熱出力	kcal/h	831.6×10^6	
	定格圧力	kg/cm ²	71.4 (飽和)	
	定格蒸気流量	kg/h	1.73×10^6	
	再循環流量	kg/h	17.69×10^6	
燃料	燃料棒直径	mm	12.4	
	被覆内径	mm	12.66	
	被覆外径	mm	14.5	
	燃料部長	mm	3,660	
	燃料比重	g/cm ³	10.3	
	燃料比熱	cal/g°C	0.073	
	被覆材質	—	ジルカロイ 2	
	燃料棒本数	本	15,092	
	ホットスポット係数	—	3.0	
	設計比出力	cal/cm ³ s	124.67	
	設計燃料中心温度(最高)	°C	2,540	
	炉心および圧力容器	流路容積	m ³	11.1
		上部プレナム部ほどの全容積	m ³	100.4
同上内部などの蒸気容積		m ³	62.7	
同上内部などの構造物重量		kg	25,000.0	
圧力容器内小面積		m ²	13.6	
ボイド反応度係数		δk/k/%	$-2.1 \sim -1.1 \times 10^{-3}$	
燃料温度反応度係数		δk/k/°C	$-2.2 \sim -1.1 \times 10^{-5}$	
再循環系	再循環ポンプ駆動系慣性定数	s	10.55	
	定数 α	—	0.75	
	A _p	—	1.25	
	B _p	—	-0.25	
	C _p	—	1.45	
	C _p	—	-0.45	

表3 運転状態の諸数値

項目	数値			
負荷 (%)	100.0	80.0	60.0	40.0
炉出力 (%)	100.0	81.4	63.0	43.5
蒸気流量 (%)	100.0	80.0	60.0	40.0
再循環流量 (%)	100.0	83.0	68.0	50.0
給水量 (%)	100.0	80.0	60.0	40.0
給水エンタルピ kcal/kg	185.0	175.0	163.2	148.5
ボイド/出口蒸気率	2.09	2.09	2.09	2.09
ボイド/入口エンタルピ (%/kcal/kg)	0.217	0.217	0.217	0.217
ダウンカマ滞留時間 τ _{iD} (s)	2.98	3.59	4.38	5.96
再循環管路通過時間 τ _{iP} (s)	3.06	3.69	4.50	6.12
下部プレナム滞留時間 τ _{iL} (s)	6.78	8.17	9.97	13.56
K _{h2} (% トルク/% 回転速度)	2.900	2.000	1.340	0.725
ポンプ回転速度 (%)	100	83.0	68.0	50.0

電動機を介して再循環ポンプの回転数を制御する系を考えると、回転部の慣性をまとめて I_p とすれば

$$I_p \frac{dn_p}{dt} = t_u - t_p \dots \dots \dots (3)$$

の関係式が成り立つ。ここで t_u は流体継手駆動トルクの偏差分である。流体継手の制御特性はあまり明確にされていないが、本解析では制御動作によってそのトルクが変えられるものとする。制御系は回転速度指令と検出された回転速度の偏差に応じて積分動作するものと考え、検出部および操作部の遅れをそれぞれ0.1秒および0.25秒とし、操作部には飽和特性を考慮する。水位制御系はいわゆる3要素制御系を考え検出部および操作部の遅れ時定数をそれぞれ0.25秒および0.5秒と仮定し給水流量の遅れの時定数を4秒と考える。

圧力制御系は圧力変化に対して

$$G_P(S) = \frac{K_{p0}}{(1+0.25S)(1+S)} \left[1 + \frac{K_{p1}S}{1+0.25S} \right] \dots \dots (4)$$

なる伝達関数で蒸気流量が変えられるものと仮定した。蒸気流量は圧力変化に応じてタービンの特性上直接変化する部分を別に考慮に

*註) 変数は大文字の添字で示し、小文字の変数は定常状態よりの偏差分をとったことを示す。

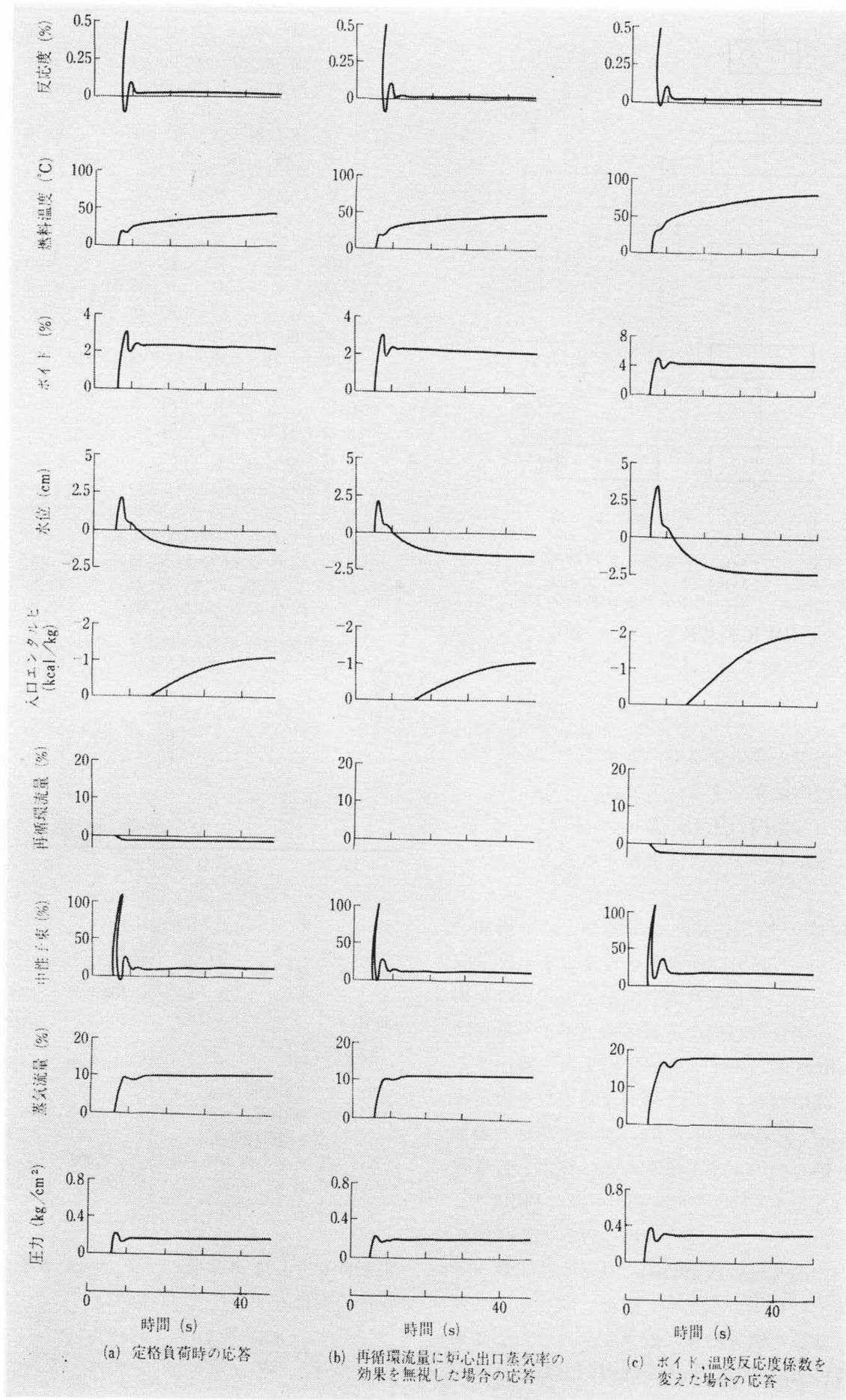


図8 定格負荷時の0.5%ステップ反応度変化に対する応答

いれねばならない。

再循環系 $G_I(S)$ は炉心入口冷却水エンタルピに関するもので再循環に要する遅れを考慮して次式の伝達関数を用いた。

$$G_I(S) = \left(\frac{2(1+\alpha_i) + \alpha_i \tau_{iP} S}{2(1+\alpha_i) + \tau_{iP} S} \right)^2 \cdot \frac{1}{(1+\tau_{iD} S)} \cdot \frac{1}{(1+\tau_{iL} S)} \dots \dots \dots (5)$$

ここで τ_{iP} は再循環路通過時間、 τ_{iD} および τ_{iL} はそれぞれダウンカムおよび下部プレナムでの滞留時間、 α_i は1より小さい定数である。

4.2 解析に用いた諸元

解析は電気出力30万kW程度の単一サイクル発電所を対象にし、図5のような制御系を考え、その諸元として表2に示す値を使用し

た。解析は定格負荷運転状態のほか定格80, 60, 40%負荷時について行なった。各運転状態での諸量は表3に示す値を採るものとした。

圧力制御系の利得 K_{p0} が大きいほど種々の外乱に対する圧力変化が小さくなると考えられるが、圧力制御の安定性の面で K_{p0} は制限される。微分項は応答の改善と安定性を増すのに用いられるが、今回の解析では K_{p0} を $50\%/kg\text{-cm}^2$ と大きくとっても安定に制御されることが知られたので微分項は省略し $K_{p1}=0$ とした。

水位制御系の利得も水位制御の応答や安定性の面から定められるべきものである。本解析では給水流量制御の一巡利得を6dBとし水位変化に対する給水流量の制御利得を $8\%/cm$ に選んだ。この値が大きいのは水位検出器の遅れを短く仮定したためと思われる。このため種々の外乱に対する水位変動はきわめて小さなものとなる。

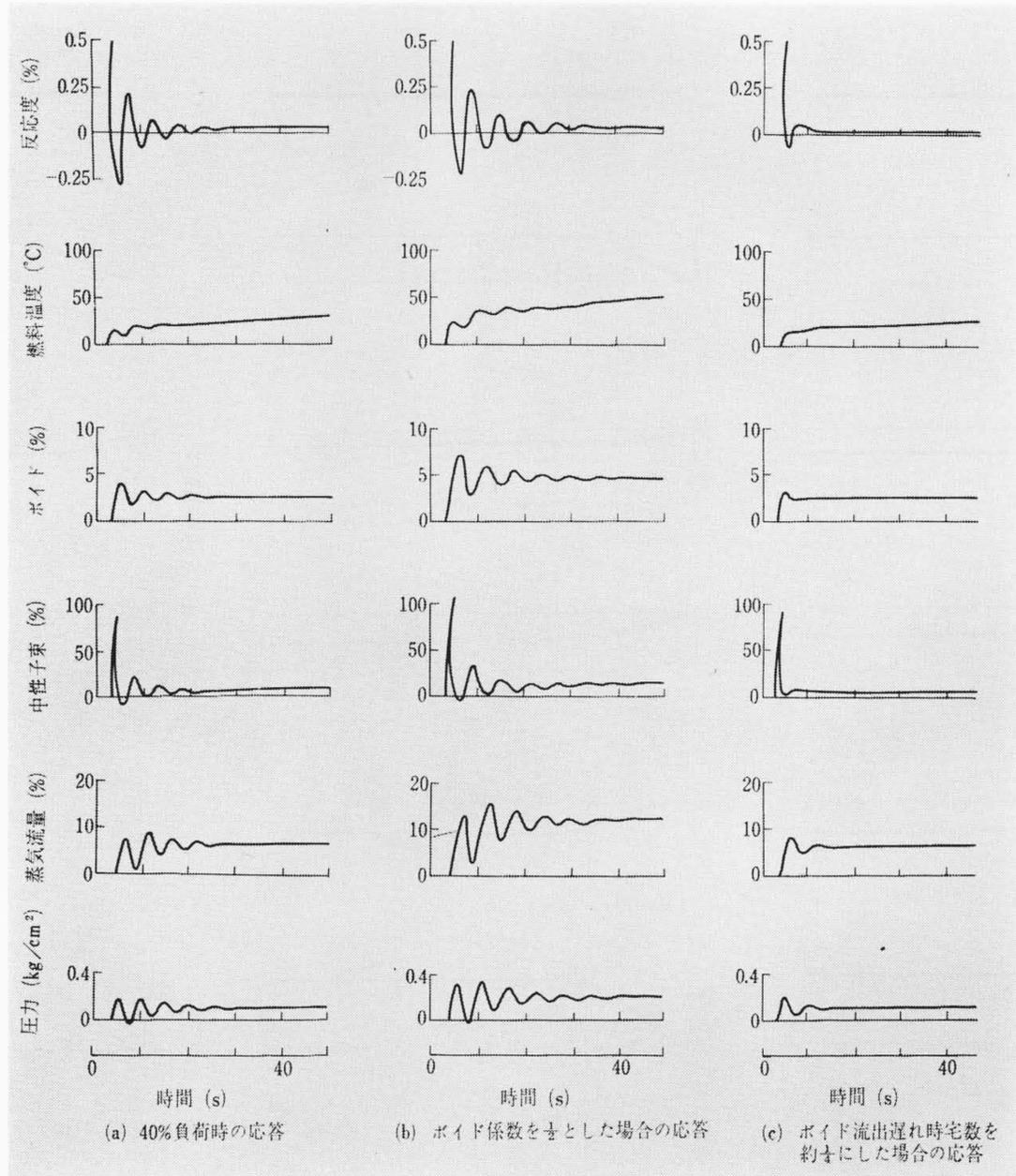


図9 40% 負荷時の0.5% ステップ反応度変化に対する応答

もし水位検出の遅れが長くなれば、それに応じて利得も小さなものとし感度を悪くして安定性を確保することになり水位変動も大きくなると思われるが今回は水位制御についてはこれ以上の検討を行なわなかった。

再循環流量制御系の利得は流体継手の特性を

$$t_H = K_{h1} Z_D - K_{h2} n_P \dots\dots\dots (6)$$

と考えて定める。ここでは Z_D 流体継手可変部のストロークであり K_{h1}, K_{h2} は係数である。利得は K_{h1} を1%トルク/%ストロークとして1%ストローク/s/%回転速度変化に選り可変部の最高移動速度は1.2%ストローク/sに制限されているものとして飽和を考慮した。利得を大きくすると回転速度の整定時に行き過ぎを生ずることになる。部分負荷時にはポンプ駆動トルクは小さくてすむので相対的にこの利得が増したことになり行き過ぎ量はいっそう大きくなると考えられ、この利得に制限が生ずる。最高移動速度が小さいと回転速度を変化するのに時間を要することになるのでこれは大きいほうが急速に循環流量を変えたい場合には望ましいわけである。

再循環系の各係数は表3の値を採ることとする。発電所出力を急速に変えるためには再循環流量を急速に変化すればよいが、上記の最高移動速度制限やポンプ駆動系の慣性および燃料棒の熱伝達遅れによって出力変化はゆっくりとしたものになる。そこで前章で述べたように圧力容器内の保有エネルギーを利用した圧力設定点変更制御系が使われている。この制御系は発電所の特性に合致する特性をもつよう計画されなければならない。本解析ではこの部分の伝達関係を

$$G_Q(S) = \frac{200S}{1+200S} \cdot \frac{K_q}{(1+4S)(1+10S)} \dots\dots\dots (7)$$

とし、 K_q としては0.2 (kg/cm²/%出力要求) なる値を用いた。

10%の出力変化を生ずるには再循環流量を13~15%変えなければならないので、再循環ポンプ速度もそれだけ変えなければならない。

圧力設定値の変更はこの再循環流量変化に重畳して行なわれる。 $G_Q(S)$ 式のうち第1項は負荷変化後ゆっくりと圧力設定値と定格値にもどす作用を与える。圧力設定値の回復をあまり早くすると逆動作して出力に不必要な変動を与えることになる。

4.3 解析結果

最初に系の安定性を確認するため実際には起り得ない過大な反応度変化投入を仮想しその時の応答を解析してみた。図8(a)は定格負荷時の応答で発電所が十分安定に制御されていることを示している。同図(b)は再循環流量に及ぼす炉心出口蒸気率の効果を無視した場合である。安定性の面で両者に大きな差は認められないところから、炉心内での沸騰の変動による再循環流量に対する影響は本解析の場合小さいことが知られる。同図(c)はボイド反応度係数および燃料反応度係数をそれぞれ $-1.1 \times 10^{-3} \delta k/k/\%$ ボイドおよび $-1.1 \times 10^{-5} \delta k/k/^\circ\text{C}$ と小さくした場合で同図(a)と比較して中性子束が同じ反応度変化に対して大きくなるが安定性の面では大差はないことが知られる。中性子束変化や反応度変化に見られる振動は4.1節に述べたボイド流出遅れの時定数を冷却水の滞留時間に等しく採ったのが過大評価であると思われる。この影響は低負荷時に大きく現われ図9(a)に示すように40%負荷時では振動がなかなか減衰しない。ボイド反応度係数などを約半分にした同図(b)でもこの振動のありさまは同様である。同図(c)はボイド流出遅れの時定数を約1/4にした場合で振動が完全に減衰することからボイ

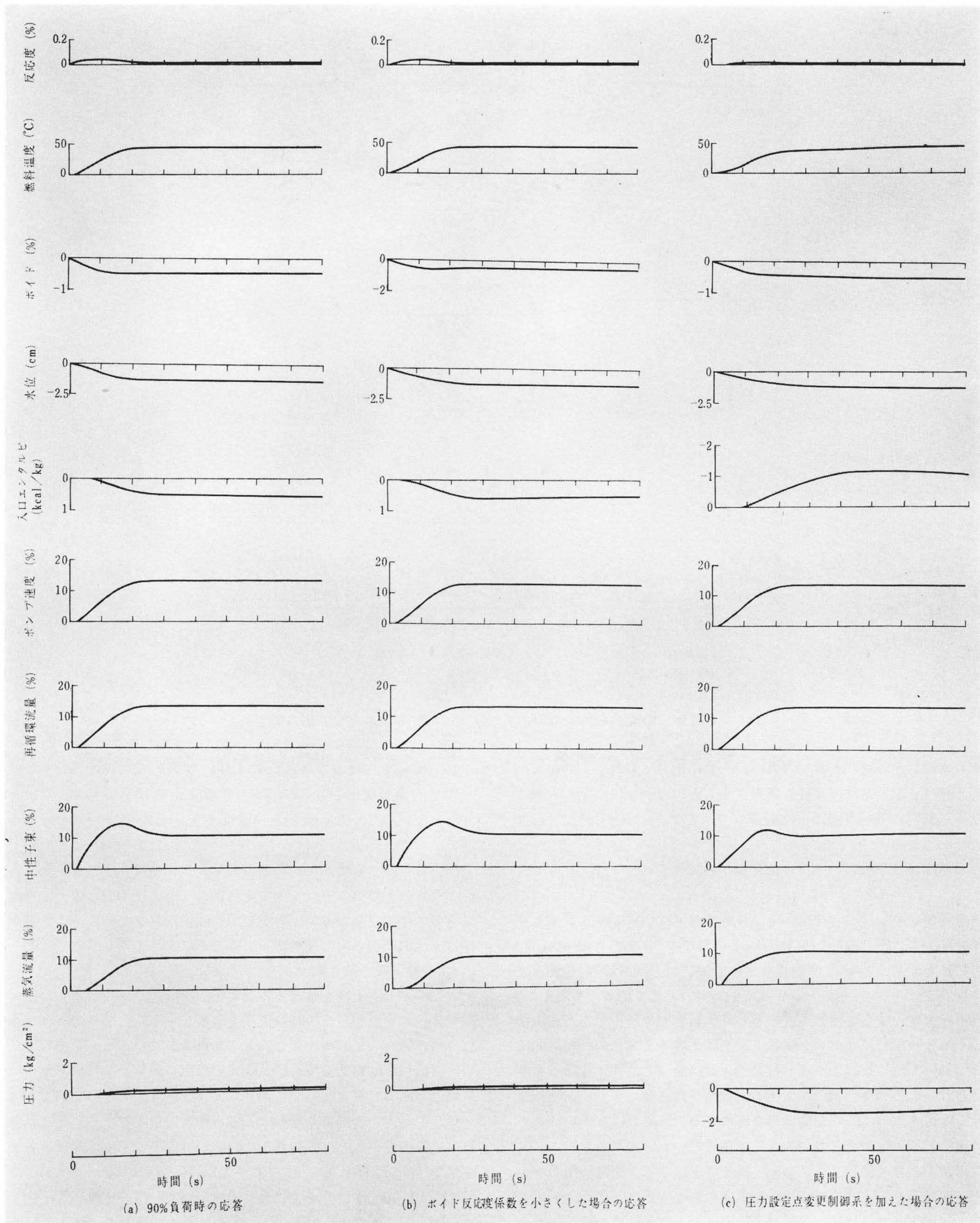


図10 90%より100%まで10%発電所出力変更時の応答

ド流出遅れ時間にはさらに詳細な検討の必要ことが知られる。

つぎに再循環流量によって発電所出力を変化させる場合を解析する。発電所出力は蒸気流量にほぼ比例すると考えられる。蒸気流量は圧力制御系によって圧力容器内圧力またはタービン入口圧力（解析では両者の変動は等しいと仮定した）を一定に保つように制御さ

れているので発電所出力の変更は給電指令またはA. F. C.などによって再循環ポンプ回転速度指令を与えることにより行なわれる。

図10(a)は定格負荷運転時の諸定数で10%の出力増加を生ずるように再循環ポンプ回転速度指令を与えた場合の各部の応答である。蒸気流量すなわち発電所出力は指令後約5秒遅れて増加をはじ

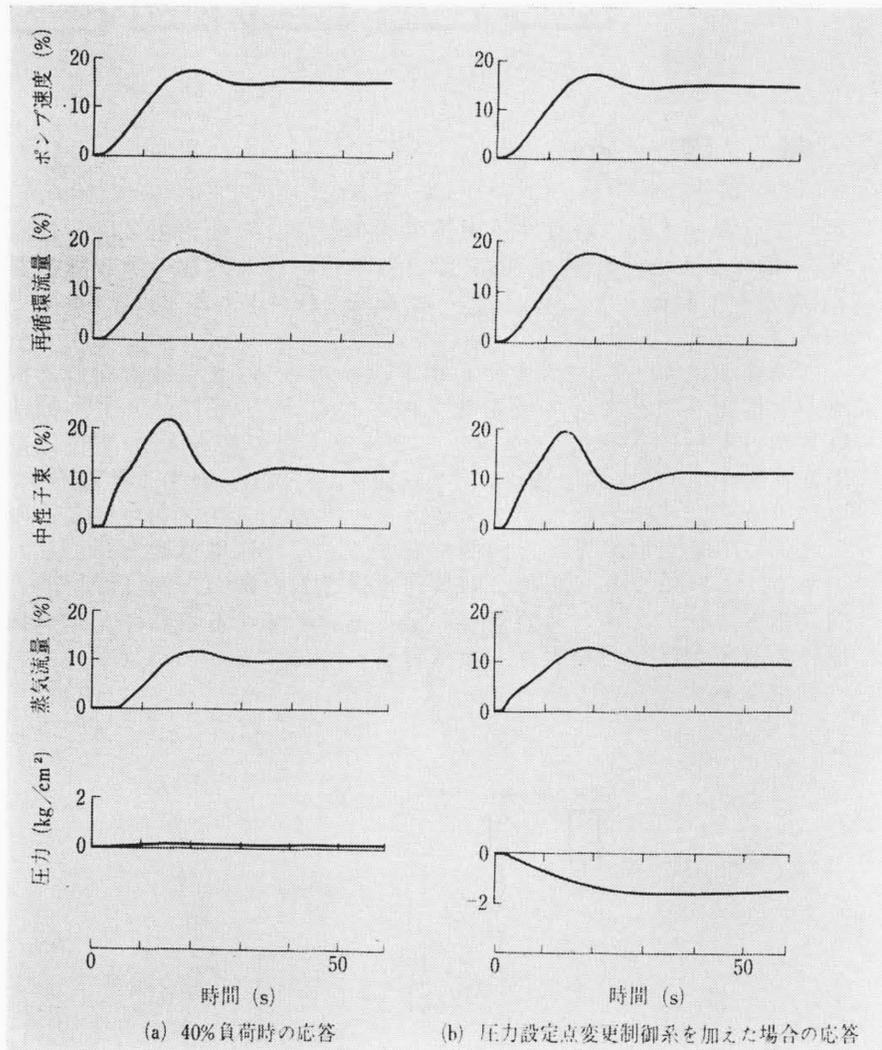


図11 40%より50%まで10%発電所出力変更時の応答

め0.67%/sで上昇して約20秒後に10%増加して落ち着き、中性子束は指令後約2秒遅れて増加をはじめ15秒後には約14.5%まで行き過ぎを生じた後30秒後に10%増加した後に落ち着くことが知られる。燃料温度など他の変数はだいたい蒸気流量と同じような変化をしている。同図(b)はボイド反応度係数などを小さくした場合であるが特性に大きな差は生じていない。

つぎに圧力設定点変更制御系を加えた場合の応答を図10(c)に示す。圧力を約1.6 kg/cm², 30秒間に低下させることによって蒸気流量増加開始までの遅れは2秒以下となり、その初期増加速度は2%/sにも達することが知られる。中性子束の変化は行き過ぎ量が小さくなっている。これは蒸気流量が最終値に落ち着く前の変化速度が同図(a)の場合よりも遅いためである。炉心入口冷却水エンタルピは同図(a)の場合には増加しているが同図(c)の場合には減少している。これは図10(c)の場合には圧力が低下しているためである。図

11に低負荷時の同様な応答の解析結果を示す。図中で(a)は単に再循環流量を変えた場合、(b)は圧力設定値の変更を重畳した場合である。低負荷になるにしたがって再循環ポンプ回転速度制御の行き過ぎが見られるようになり、中性子束の行き過ぎ量も大きくなることが知られる。反応度変化に対して見られた振動は出力制御の場合、外乱の変化速度が比較的ゆるやかなためあまり明確に出ていない。

5. 結 言

BWRプラントに使われている種々の制御方式につき考察し特に興味ある大形単一サイクルの再循環流量制御方式による出力調整能力につき解析したが一般に火力発電所に比べてまさるとも劣らない制御特性を有していることが明らかとなった。しかし現状は大形BWRプラントの大部分は基底運転を行ない Turbine Slaved to Reactor 方式を採用している。これは原子力発電所の燃料費に比べ資本費の高い本質性もあり、経済性を見地から基底負荷運転が好ましいこと、また大形プラントに対し微小負荷追従の要求が迫られていないことなどの理由と考えられる。

したがってBWRの制御系も現在のものが最終的なものとはいいがたく、火力発電所に見られない温度効果、ボイド効果の利用により有効な制御系の開発が可能と思われる。われわれは今後流量制御系の制御範囲と安定性の問題、微小出力追従特性に関する特性解析などの研究を進めてゆく考えである。

参 考 文 献

- (1) JPDR 管理部: JAERI-1067, JPDR 初回臨界および出力上昇試験 (1964)
- (2) GEI-59315, Dresden Nuclear Power Station Unit No.1 Equipment Manuals Vol. 5
- (3) TID-7672, Nuclear Characteristics of Large Advanced BWR
- (4) Oyster Creek Nuclear Power Plant Unit No.1, Preliminary Safeguards Summary Report
- (5) A.P.Bray: S64-Do, Operating and Control Characteristics of a BWR
- (6) 小林: 火力発電 81, 10 (Jun. 1963)
- (7) E. P. Peabody: S64-Do, Control and Instrumentation
- (8) 三井田, 須田: JAERI 1044 (1963), Derivation of Transfer Function of Natural Circulation BWR
- (9) 三井田, 須田: JAERI 1061 (1964), Dynamic Analysis of Natural Circulation BWR
- (10) 望月: JAERI 1076 (1965), JPDR 炉心動特性モデルの組立と炉心動特性試験の解析
- (11) 鈴木: 昭和36年電気4学会連合大会講演論文集 545 (1961), アナコンによるBWR発電所動特性の解析
- (12) Siemer, R. A.: APED-3984 (1962), Bodega Bay Analog Computer Model



特許の紹介



特許第450239号 (特公昭40-1507)

赤津憲一・北勝敏彦

高速度距離継電方式

この発明は、方向性を有する継電器をオフセットして得られた公知の無方向性距離継電器を、距離測定要素の動作を条件にしてオフセット量を取除き、方向性を有する継電器とし、距離測定要素自体に方向判別を行なわせ、方向要素と距離測定要素との接点協調をとるようにした高速度距離継電方式に関するものである。

図1において1は磁極2,3,4,5を有する電磁鉄心で、磁極2には動作電流コイル6が、磁極3,5には極性電圧コイル7が、磁極4には抑制電圧コイル8がそれぞれ巻回され、かつ各磁極と中心極間の空けきに誘導円筒9が装着される。10はオフセット用の電流-電圧変換器、11は位相調整用インピーダンス素子、12は極性回路のメモリ用同調コンデンサ、 S_A は電流-電圧変換器10の出力を零にし、オフセット量を取除きモー特性とするための接点である。図2においてはP、Nは継電器回路の操作電源給電線、Dは方向要素の接点、 X_1 、 X_2 はリアクタンス要素第1段および第2段の接点、Rは方向要素の接点Dと並列に設置する抵抗でリアクタンス要素第2段の接点 X_2 が動作したとき、補助継電器Aのみが動作し、他の限時継電器 T_1 などを不動作とするもの。 T_c は遮断器の引きはずしコイルである。

この発明はリアクタンス要素第2段の接点 X_2 または方向要素接点Dと前記リアクタンス要素第2段の接点 X_2 の動作により、補助継電器Aを動作させ、リアクタンス要素第1段の接点 X_1 の電流-電圧変換器10の一次側を接点 S_A で短絡し、方向性を有する継電器を、オフセットして得られたオフセットモー形のリアクタンス継電器のオフセット量を取除き、方向性を有するモー特性継電器としたものである。これにより、平行2回線送電線などの電力方向反転時の方向要素と、リアクタンス要素との接点協調に関する誤動作を正規動作時の遮断遅延などの欠点もなく容易に解決することができるという効果を有するものである。

(西宮)

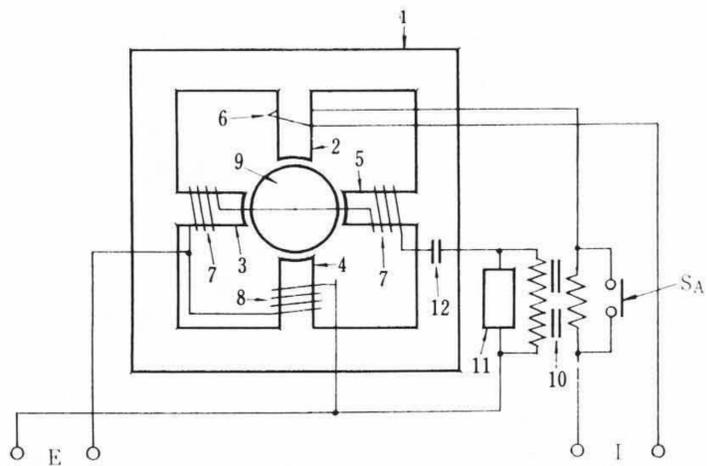


図1

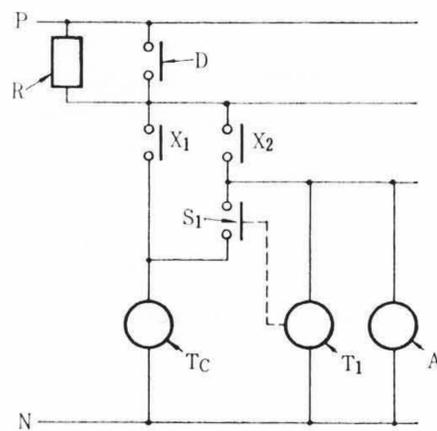


図2



新案の紹介



登録実用新案第768482号

高林乍人・柴田満男
武藤肇

誘導円筒形継電器

誘導円筒形継電器は、高速度動作には適しているが、制動作用を有する装置をもたないため過渡状態に対しては不安定でありかつ、過渡状態において応動するなど考慮すべき問題を有している。

この考案はこのような点を改良するもので、1は磁極2,3,4および5を有する電磁鉄心、6は中心極、7は鉄心1の各磁極と中心極6とにより形成される空けき8内に回転可能に介装された誘導円筒、10は鉄心1の下部に設けた制動用永久磁石で、誘導円筒7の近傍位置に配置され、その中心極11には軸9の通孔12を有し、永久磁石10と中心極11との間に形成した円弧状の磁気空けき13に前記

誘導円筒7が介装される。

継電器が動作するとき誘導円筒7は、永久磁石の発生する磁界を横切って移導するため、移動速度に比例した制動作用をうける。したがってこの制動作用により過渡時における誘導円筒7の動作は鈍感になり動作時間を延ばすいわゆる限時特性が与えられ、過渡状態に対しても安定な動作が得られるものである。

さらに永久磁石の強さを調整すれば、所望の制動力を得ることができ、過渡状態に対する応動範囲が拡大されるなどの効果を有する。

(西宮)

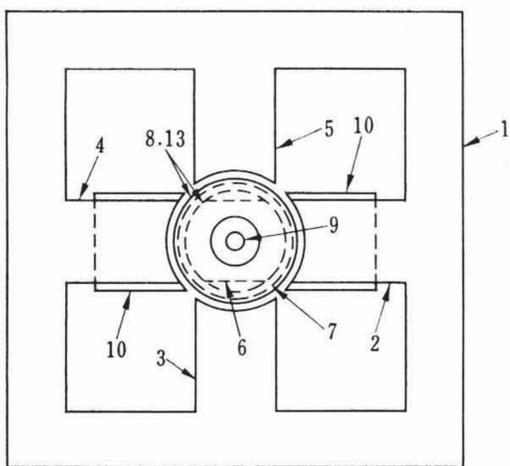


図1

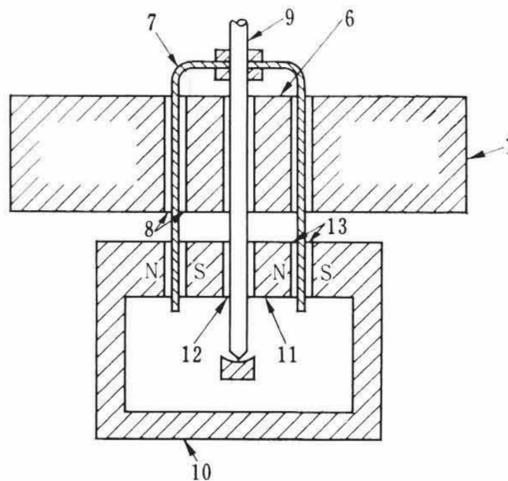


図2