

50MW蒸気発生器ナトリウム液位制御

Sodium Level Control for 50MW Steam Generator

動力炉・核燃料開発事業団より受注製作した、高速増殖炉用蒸気発生器の試験装置である50MW蒸気発生器は、その構成要素である過熱器、蒸発器ともにナトリウム自由液面をもつ構造であり、液位制御上の問題の解明が必要であった。

この問題点を明確にし、問題点を踏まえたうえでの有効な設計を行なえるよう液位制御系のシミュレーションを行ない、種々のパラメータを変えて動特性解析を行なった。

この結果、採用した液位制御系は実機試験で良好な制御性能をもっていることが確認され、また解析結果と試験結果の良好な一致から解析コードの有効性が確認された。この解析コードを用いて、高速増殖炉原型炉「もんじゅ」蒸気発生器の液位制御系の検討を試み、良好な制御性能を得ることができる見通しを得た。

金森昭士* Akiji Kanamori
藤平一重** Kazushige Tohei
広瀬正雄** Masao Hirose
鈴木 守** Mamoru Suzuki
河島弘明*** Hiroaki Kawashima
阿部興司**** Kôji Abe

1 緒 言

化学的に活性なナトリウムと水又は蒸気が共存する蒸気発生器は、液体金属冷却高速増殖炉(Liquid Metal Fast Breeder Reactor, 以下FBRと略す)の開発上最も重要な機器の一つである⁽¹⁾。このFBRの原型炉「もんじゅ」蒸気発生器開発のため、動力炉・核燃料開発事業団により試験装置の建設が計画され、日立製作所は、1MW蒸気発生器に引き続き、50MW蒸気発生器を受注し、昭和49年6月に本体及びその付属機器一式を納入した。50MW蒸気発生器は、納入後の試験運転を順調に経過し、昭和50年3月末に運転を終了した。

50MW蒸気発生器は過熱器及び蒸発器から成り、それぞれにナトリウム液面をもっているため、ナトリウム流量急変時の液面変動によるカバーガスの巻込みや、熱衝撃などの未確認の問題⁽²⁾が懸念された。そこで液位制御系を模擬した解析

コードを開発し、種々のパラメータサーベイを行ない問題点を検討し、その検討結果を蒸気発生器及び液位制御系の設計に反映した。また実機試験では、動特性解析から予想どおりの良好な制御性能が得られることを確認した。

以下、50MW蒸気発生器の液位制御系とその解析コードの概要、動特性解析結果、及び実機試験との対応について報告し、更に「もんじゅ」蒸気発生器の液位制御について述べる。

2 50MW蒸気発生器の液位制御系

2.1 50MW蒸気発生器の概要

50MW蒸気発生器の概略系統図を図1に、図2に液位制御系の系統図を示す。

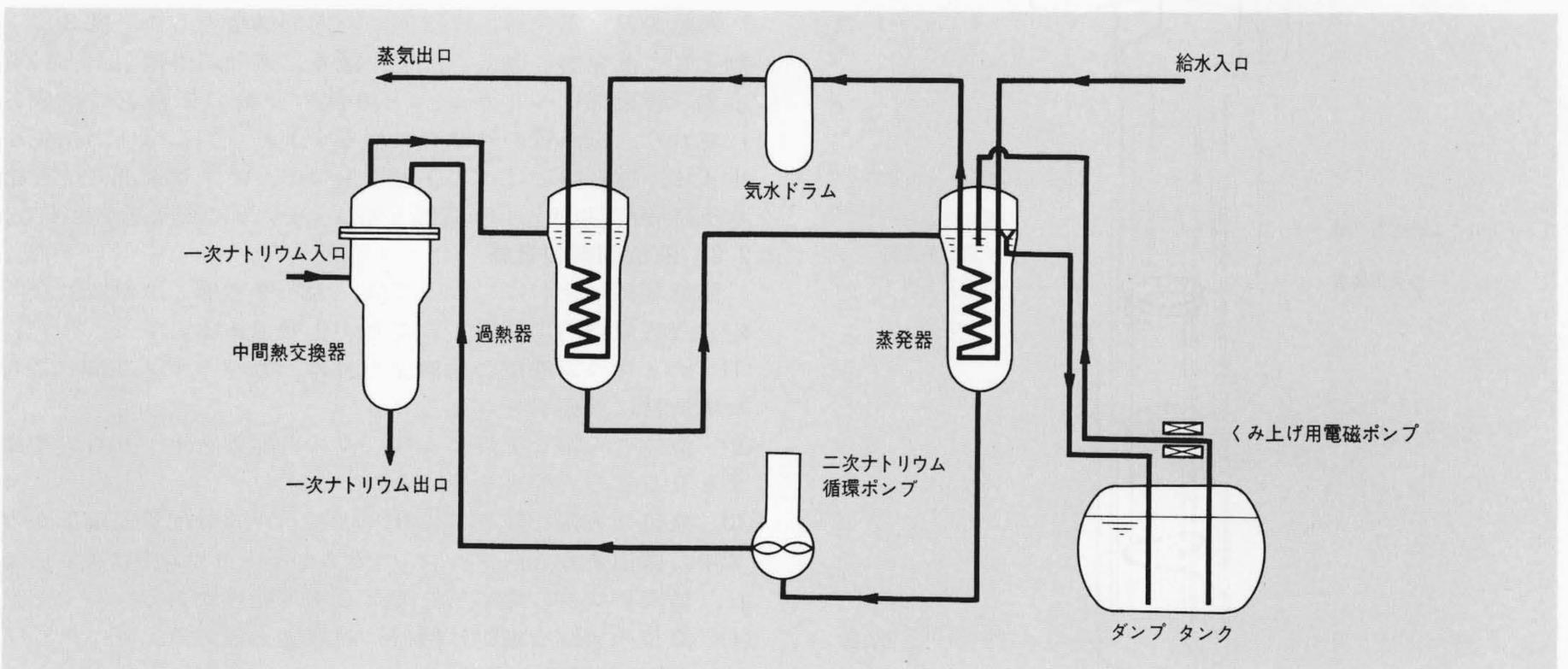


図1 50MW蒸気発生器概略系統図 50MW蒸気発生器試験装置の系統図(主として二次ナトリウム系)を示す。

* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部 主任研究員 ** 日立製作所電力事業本部計装技術本部 *** 日立製作所日立工場 工学博士
**** 日立製作所日立工場

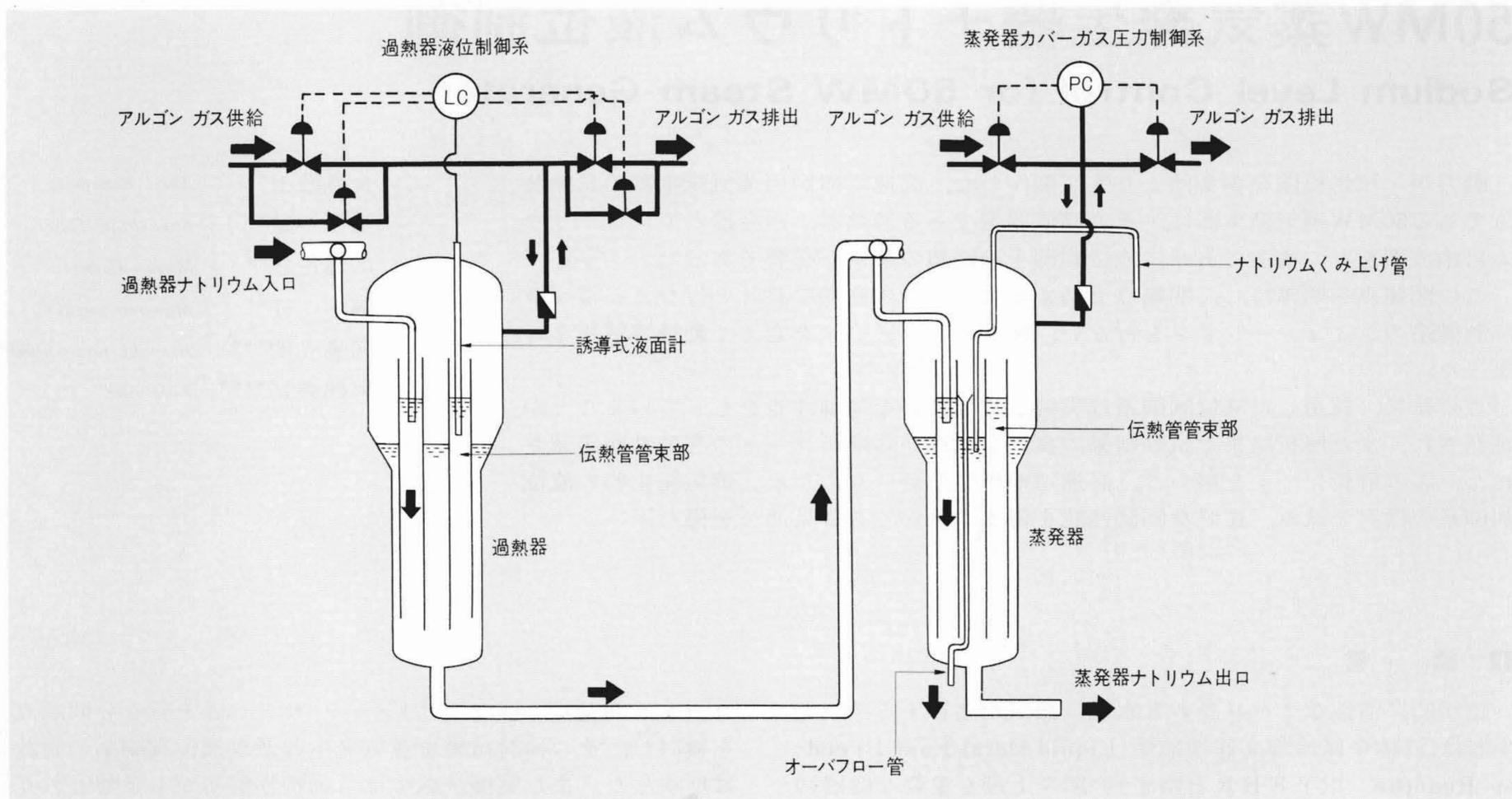


図2 50MW蒸気発生器液位制御系 蒸気発生器まわりの液位制御系の概略を示すものである。

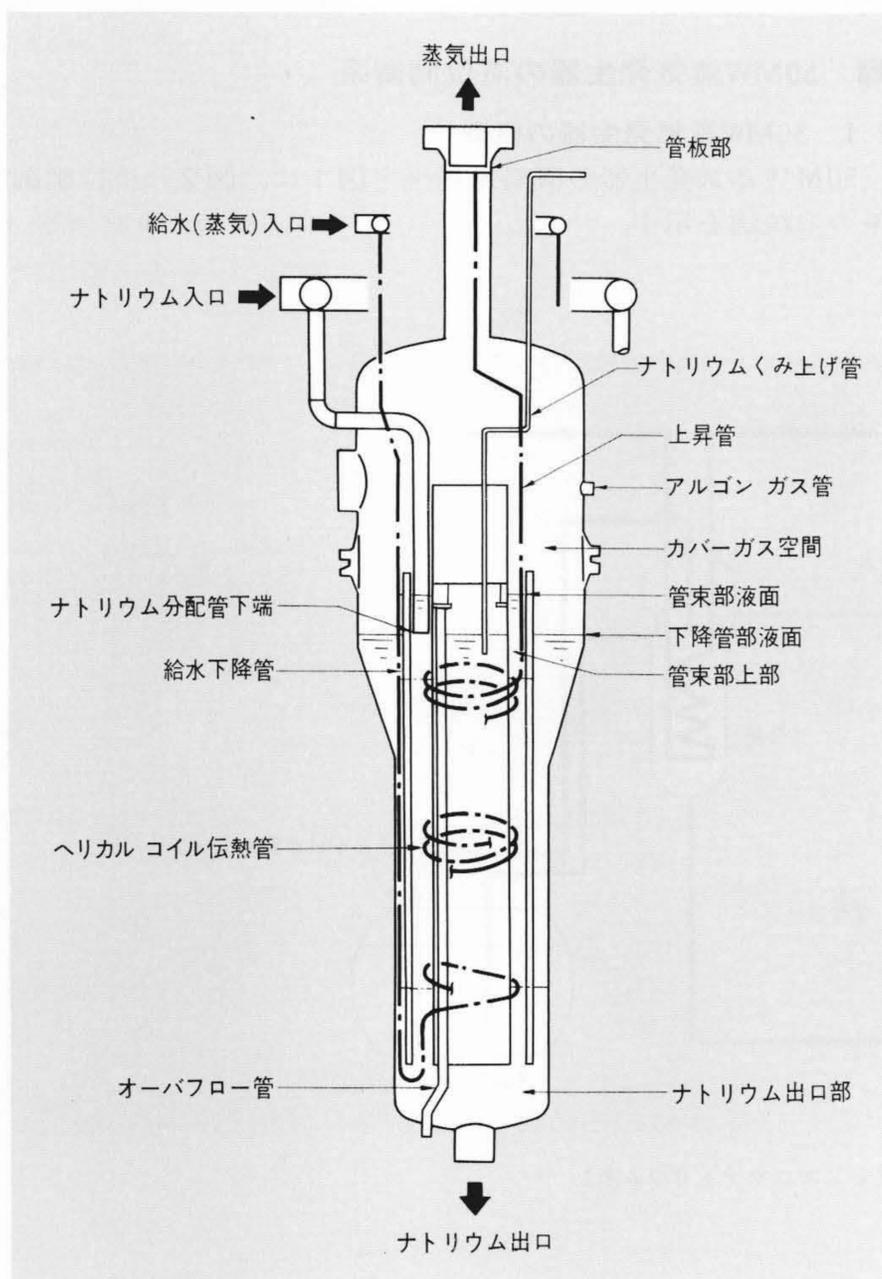


図3 蒸気発生器 蒸発器の断面図を示す。過熱器についてはオーバーフロー管及びナトリウムくみ上げ管はないが、形状はほぼ同一である。

中間熱交換器で加熱された 505°C のナトリウムは、過熱器のナトリウム入口ノズルより入り、ヘリカルコイル状に巻かれた伝熱管管束部(以下、管束部と略す)で、伝熱管内を流れる蒸気と熱交換を行ない、 470°C のナトリウムとなって過熱器下部より流出し、次いで蒸発器のナトリウム入口ノズルより入り、蒸発器の管束部で伝熱管内の水-蒸気と熱交換を行ない、 328°C のナトリウムとなって蒸発器下部より流出し、循環ポンプを経て中間熱交換器に戻る。

過熱器及び蒸発器はほぼ同一の内部構造をもつ。図3に一例として蒸発器の概略を、また図4に過熱器外観(据付時)を示す。管束部はヘリカルコイル状の多数の伝熱管で構成されており、伝熱管の外側を流れるナトリウムには圧力損失が生ずる。運転時にはこの圧力損失に応じて、管束部液位と給水下降管部(以下、下降管部と略す)液位とに液位差が生ずる。

2.2 液位制御の目標

液位制御の検討に当たっては、次項を考慮し液位変動を所定の許容値以内に制限することが必要である。

- (1) ナトリウム液位の急激な上昇は、カバーガス空間に設けた構造材に熱衝撃を与える。
- (2) 液位の大幅な上昇により、ガス系配管をナトリウムで詰まらせるなどの弊害を生ずる。
- (3) 液位の大幅な降下により、ナトリウム分配管先端部がガス中に露出すると、アルゴンガスがナトリウム中に巻き込まれ、循環ポンプに悪影響をもたらす可能性がある。
- (4) 液位の大幅な振動は機器に熱疲労を与える。

2.3 液位制御系の概要

本蒸気発生器の液位制御方式の選定に際しては、

- (1) 制御性の良好さ
- (2) 簡便で経済的であること。
- (3) 「もんじゅ」蒸気発生器への拡張容易性を考慮した。

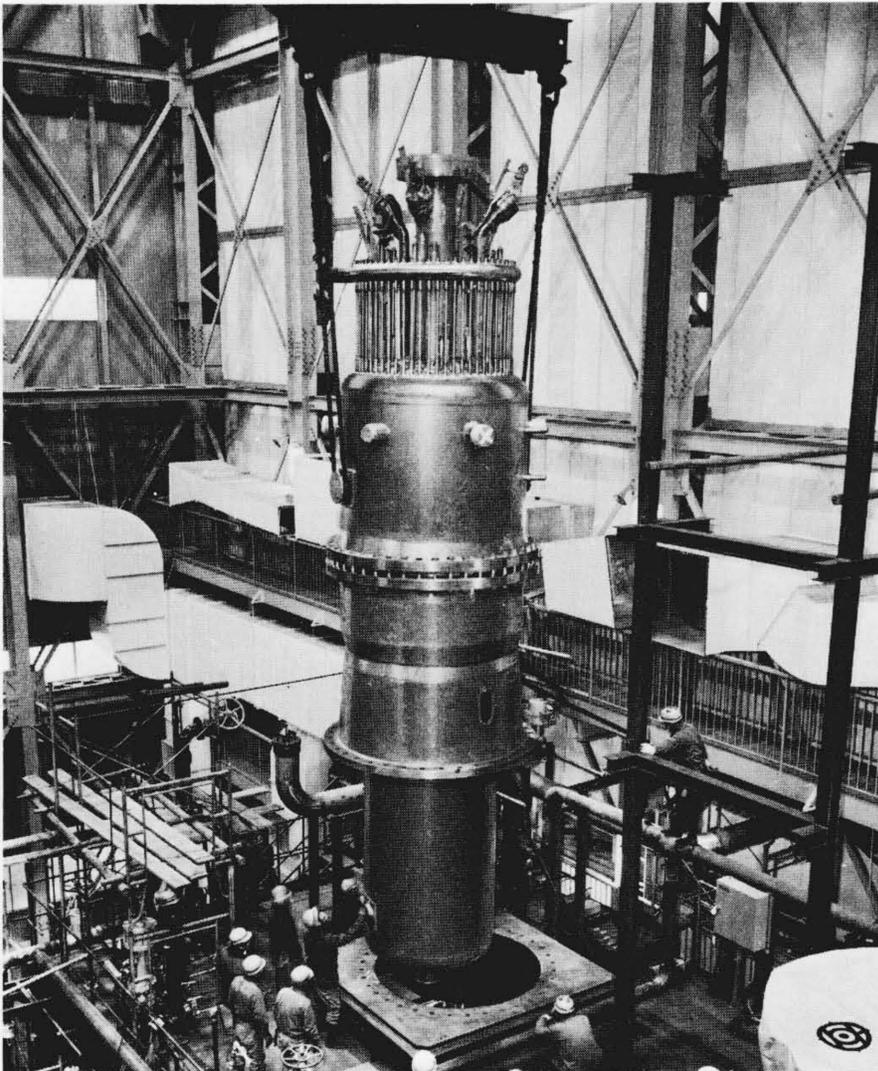


図4 50MW蒸気発生器 過熱器の据付時の状況を示す。

過熱器においてはナトリウム液位を誘導式液面計で計測し、ナトリウム液位の変動に応じてカバーガス空間へアルゴンガスを供給、又はカバーガス空間のアルゴンガスを系外へ排出することにより、カバーガス圧力を調整して液位を一定に制御する方式とした。アルゴンガスの供給又は排出は、一定負荷運転時の液面の小変動に対しては小容量のアルゴンガス制御弁を、負荷変動に伴い大幅な液位変動に対しては大容量のアルゴンガス制御弁をオンオフ動作で開閉して行なう。一方、蒸発器においては、常時ダンプタンクよりナトリウムを

くみ上げ、余剰ナトリウムはオーバフロー管よりダンプタンクに排出することにより、液位を一定に保持する。

また、蒸発器のカバーガス圧力はNaK置換型圧力計で計測しておき、ガス圧力の変動に応じたアルゴンガスの供給、又は排出により一定に制御される。液位制御系のブロック線図を図5に示す。

③ 液位制御特性解析コードの開発

過熱器と蒸発器とのそれぞれに液面をもち、相互に関連している場合の液位制御について従来は経験がなく、その制御特性に未知の部分が多かったため、液位制御特性解析コードを新たに開発する必要があった。解析コード作成に際し、次の点に留意した。

- (1) 50MW蒸気発生器のナトリウム系統の中で、過熱器及び蒸発器の液位だけに着目し、液面面積の小さい循環ポンプ及び循環ポンプオーバフローコラムの液位は解析対象から除外し、コードを簡略化した。
- (2) ナトリウム側と水側との熱交換量が液位に与える影響は小さく、ナトリウム温度は一定に保たれると仮定し、コードを簡略化した。
- (3) 内部構造を考慮して、管束部液位と下降管部液位の差も解析できるようにした。具体的には過熱器と蒸発器内部の圧力節点として、それぞれカバーガス部、管束部上部(直管領域)及びナトリウム出口部の3点をとった。

解析コードは各圧力節点間のナトリウムとガスの流動を、運動方程式、質量保存則などから計算して各種状態量の微分値を求め、差分近似法によって解を得ている。本コードは動特性解析用汎用コード“HIGDAC”を利用して作成され、データの入出力コントロール及びタイムステップコントロールなどの機能は、すべて汎用コードで行ない、入力データに基づいて初期状態を設定する部分と、過渡状態での各種状態量の変化率、すなわち微係数を計算する部分を作成するだけで開発された。本解析コードにより、アルゴンガス供給流量、オーバフロー流量、ナトリウムくみ上げ流量、ナトリウム配管部圧力損失などをパラメータとする広範な検討が可能となった。

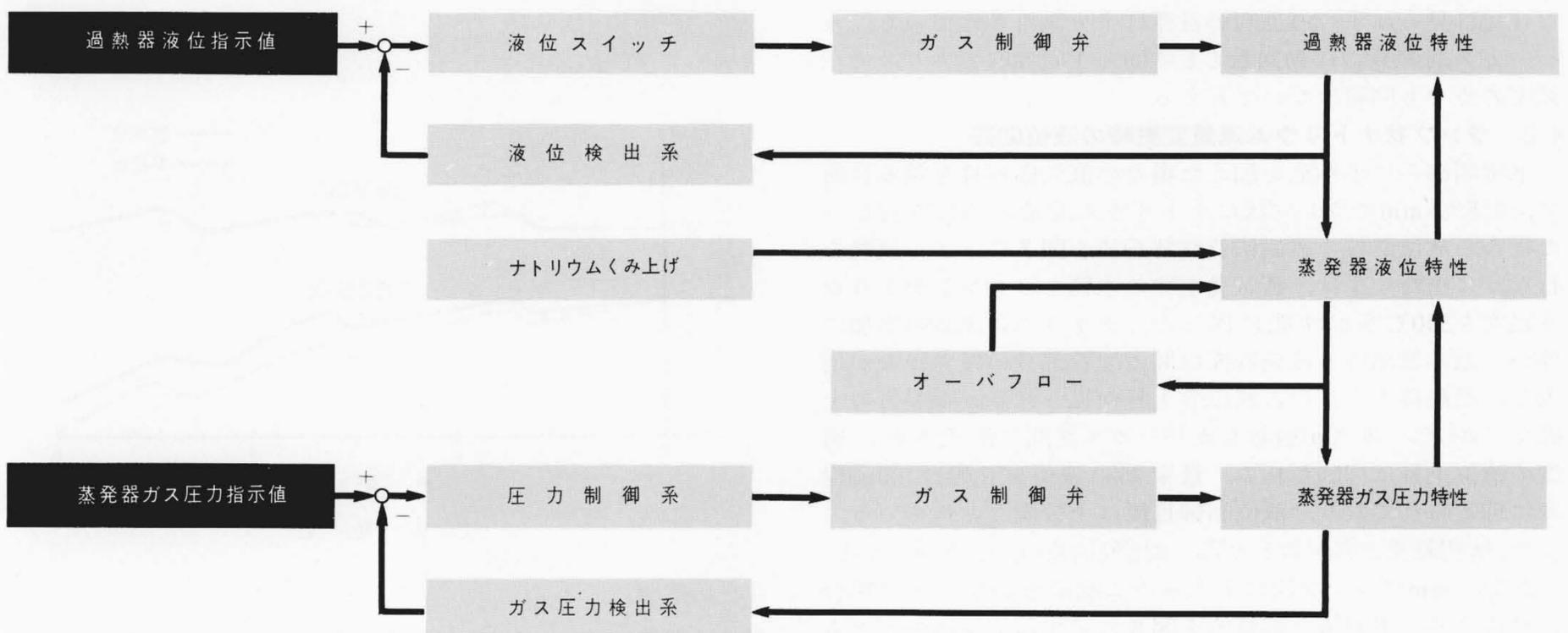


図5 液位制御系ブロック線図 過熱器液位制御は、カバーガス圧制御による。蒸発器液位制御は、ナトリウムのくみ上げ及びオーバフロー制御とカバーガス圧力の制御の組合せによる。

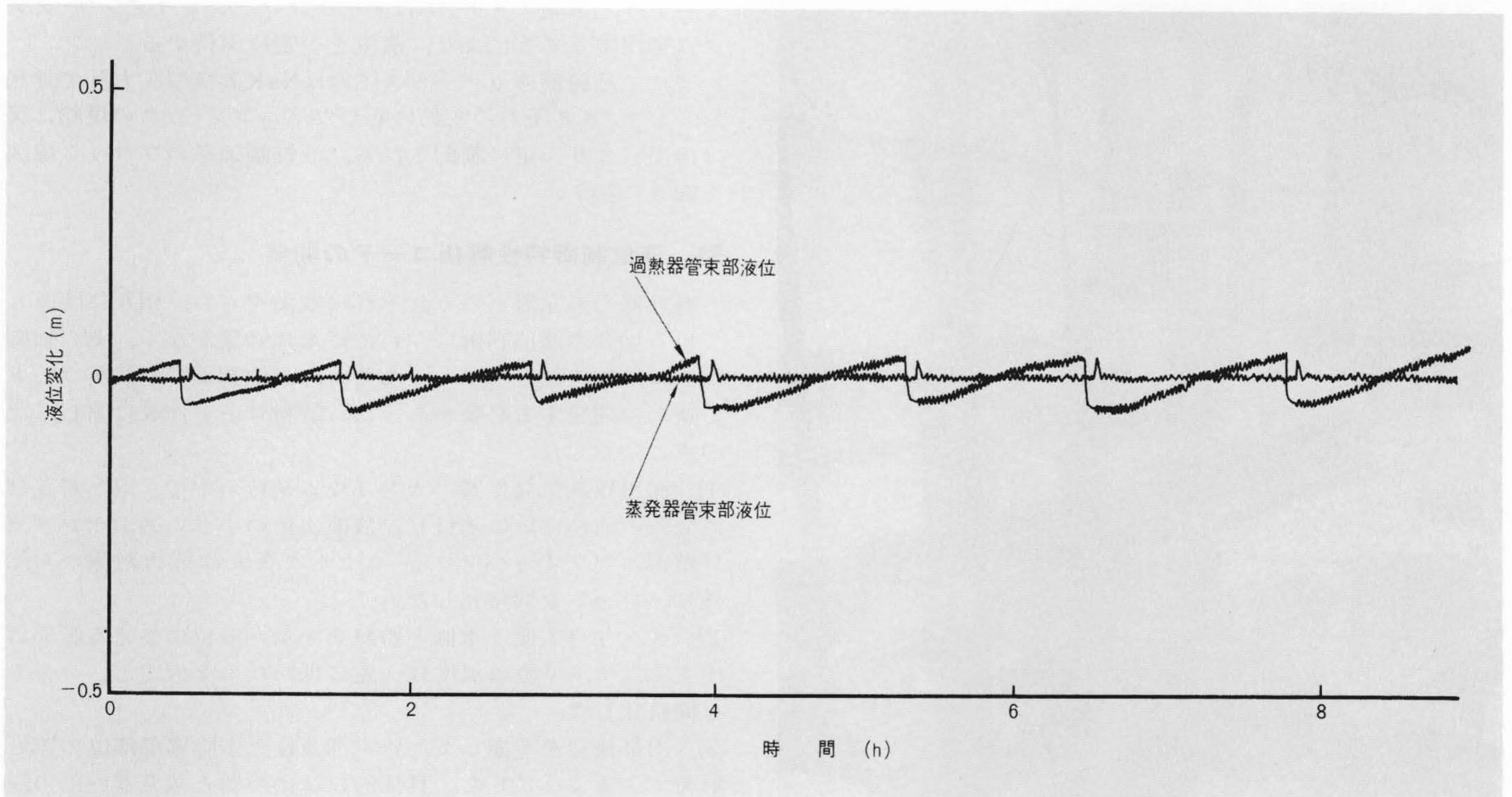


図6 通常運転時の液位応答 水漏れ検出系へのアルゴンガス流出により、過熱器のカバーガス制御弁は1時間に1~2回作動する。

4 試験運転結果とその考察

4.1 通常運転時の液位応答実測値

通常運転時の液位応答の実測値を図6に示す。通常運転時には、カバーガス空間より水漏れ検出系に小流量のアルゴンガスが流出しており、時間の経過とともに過熱器のカバーガス圧力は降下し液位は漸次上昇する。液位上昇が液位制御系で設定した不感帯を超えると直ちにアルゴンガスが吹き込まれ、過熱器液面は不感帯内に押し戻される。このとき蒸発器の液位は一時的にわずかに上昇するが、オーバフロー流量が増加し、直ぐに通常液位に戻る。前もって解析から予想されていたように、液位変動幅は50mm程度であり、蒸気条件に顕著な変化は見られず、液位制御目標は十分満たされている。カバーガス制御弁の作動回数も1時間に1回程度であり、使用頻度の点でも問題はないと言える。

4.2 ランプ状ナトリウム流量変更時の液位応答

液位制御系に小外乱を加えた場合の液位応答性を見る目的で、2.5%/minでランプ状にナトリウム流量の増加を行なった場合の液位応答の実測値及び解析値を図7に示す。試験を行なうに当たっては、蒸気発生器の水側をドレンしナトリウム温度を300°C等温状態に保った。ナトリウム流量の増加に伴い、過熱器出口と蒸発器入口間の配管部分の圧力損失が増大し、過熱器ナトリウム液位の上昇が見られる。不感帯の上限でアルゴンガスが過熱器カバーガス空間に供給され、過度の液位上昇は抑制される。管束部の液位変化幅は100mm程度に抑えられており、液位制御目標は十分満たされている。また、解析結果と実測値との間には比較的良い一致が見られる。

2.5%/minでランプ状にナトリウム流量を減少させた場合の液位応答の実測値と解析値を図8に示す。流量減少とともに過熱器の液位は降下する。不感帯の下限でアルゴンガスが過熱器カバーガス空間より排出され、過度の液位降下は抑

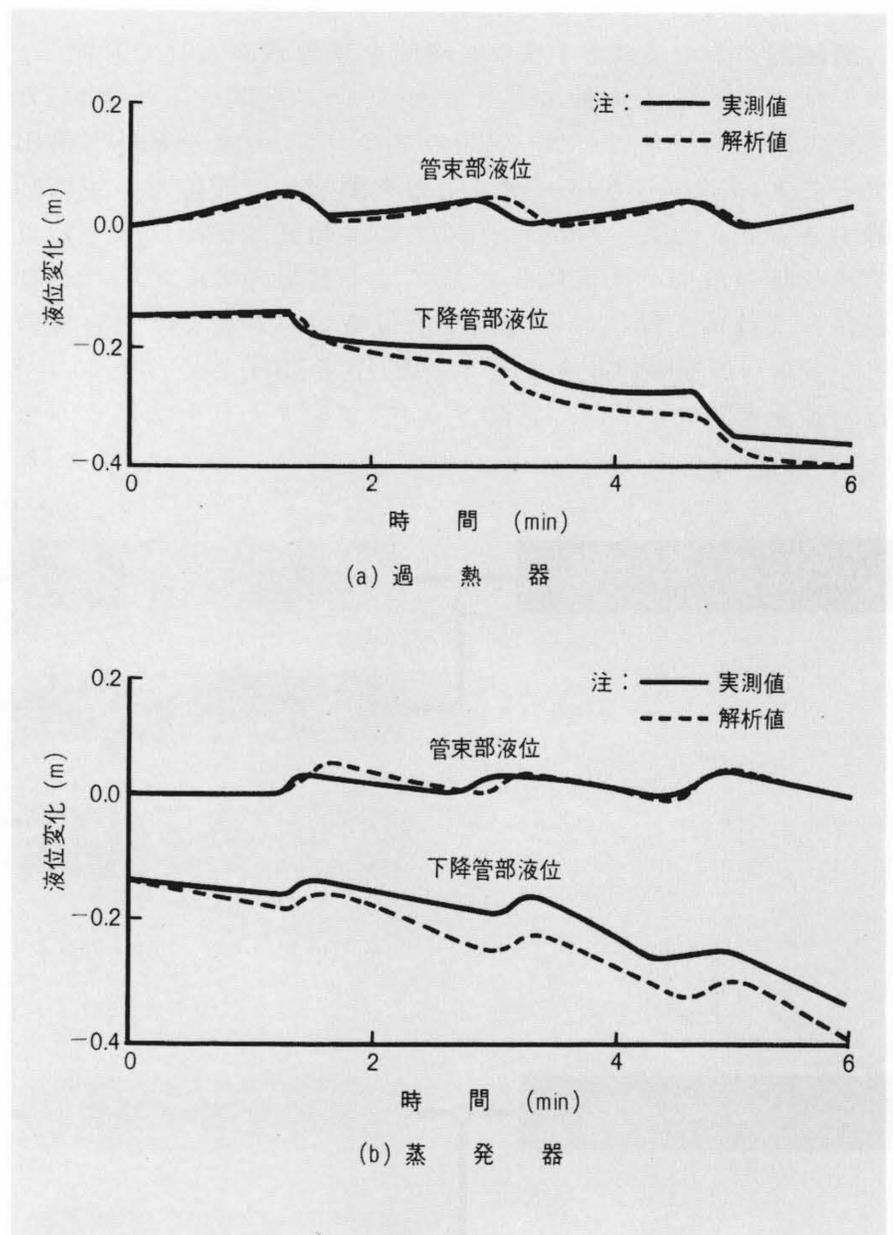


図7 流量増加時の液位応答の解析値と実測値との比較 2.5%/minの流量増加速度で、40%流量からナトリウム流量を増加させた場合の液位応答の計算値と実測値の比較を示すものである。

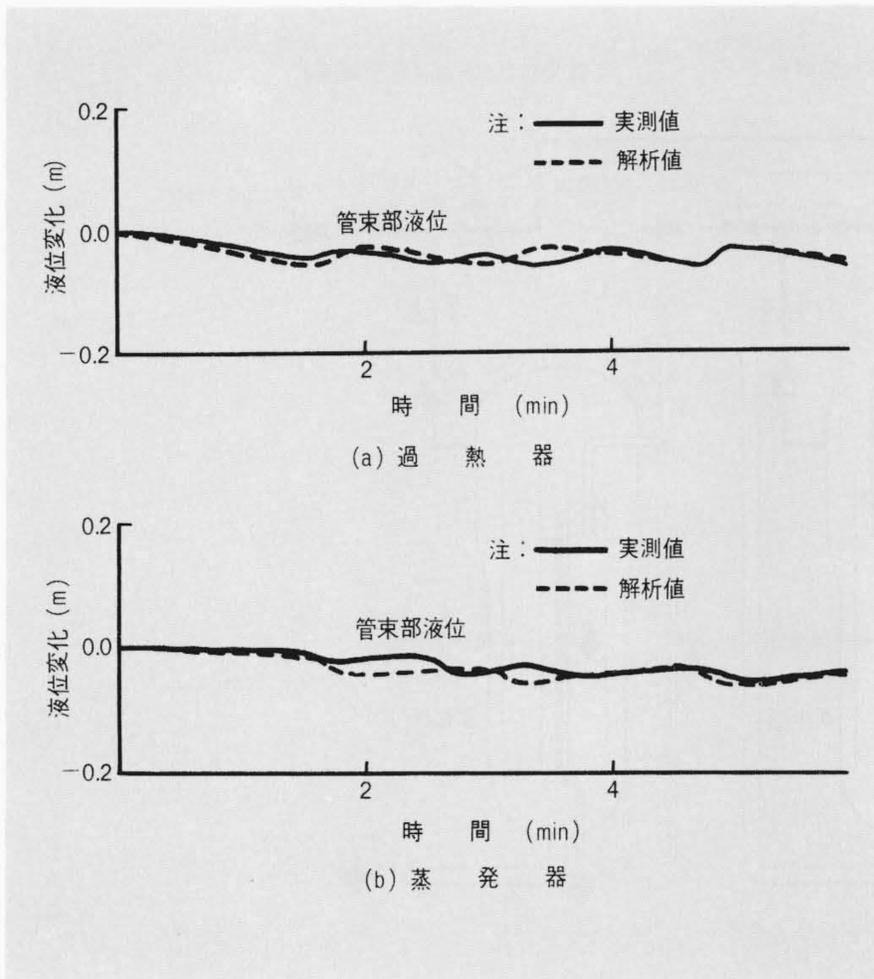


図8 流量減少時の液位応答の解析値と実測値との比較 2.5%/minの流量降下速度で、100%流量からナトリウム流量を降下させた場合の液位応答の解析値と実測値とを示すものである。

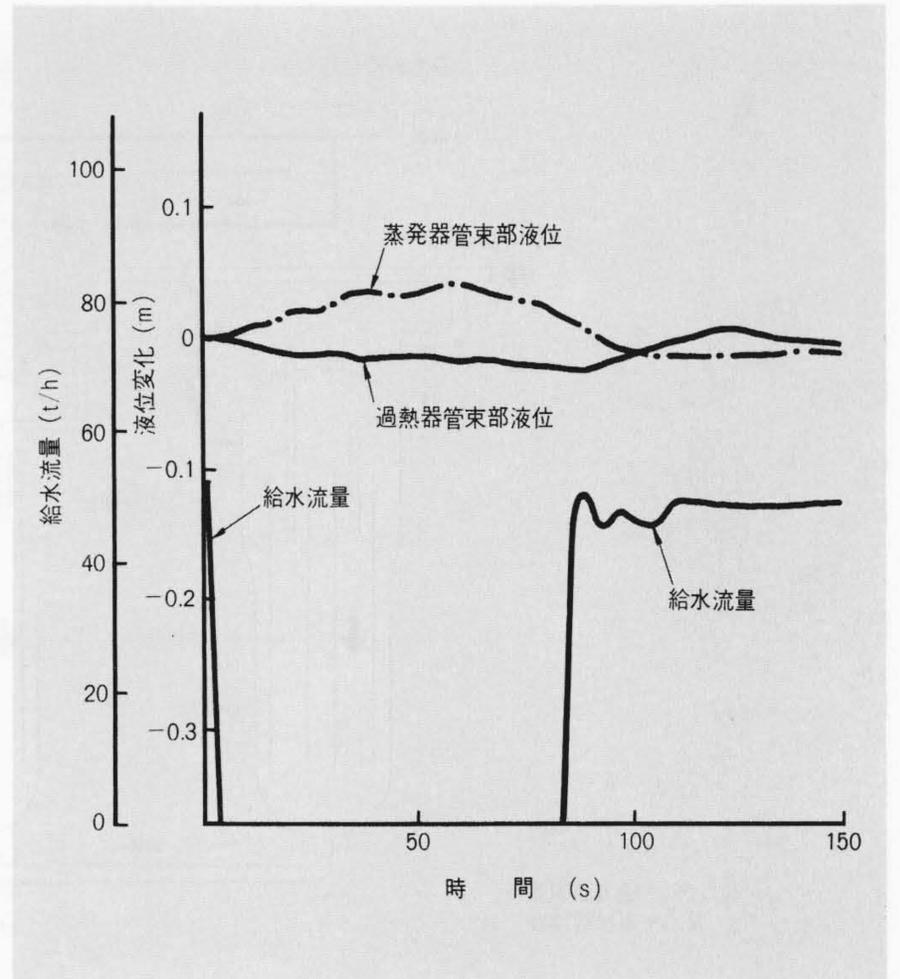


図10 給水流量変動時の液位応答 給水ポンプがトリップし約100秒後、再び立ち上がった場合の液位応答を示すものである。

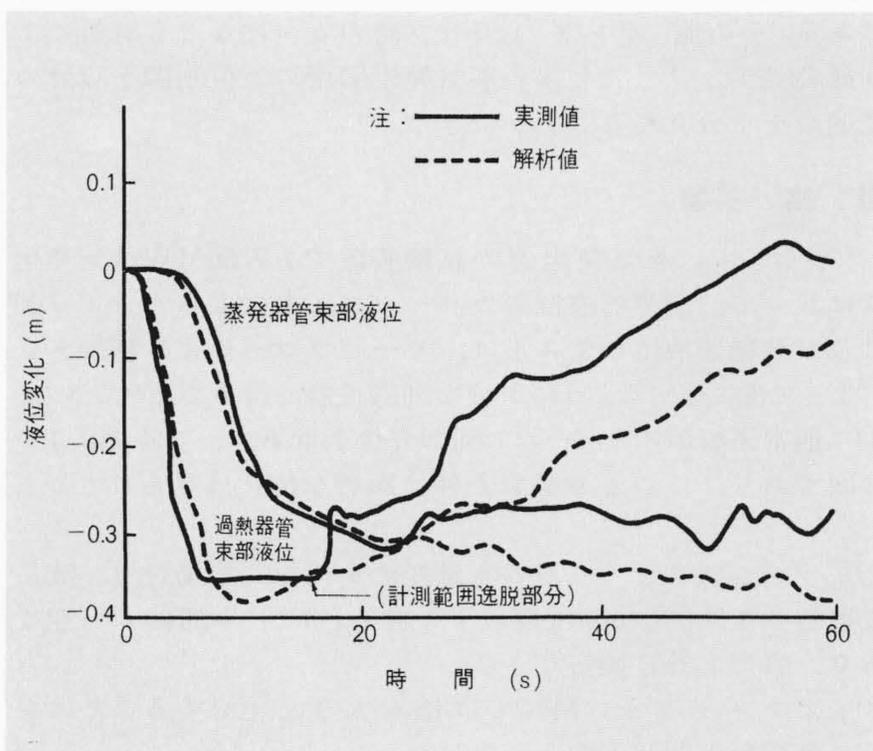


図9 ポンプトリップ時の液位応答の実測値と解析値との比較 ポンプトリップ時の液位応答の実測値と解析値を示すものである。

えられる。しかし、流量降下とともに管束部での圧力損失が減少し、管束部液位と下降部液位差がなくなるので、過熱器と蒸発器内の全ナトリウム量が不足してくる。流量降下速度が大きい場合には、ナトリウムのくみ上げが追いつかず蒸発器の管束部液位は降下を続ける。このため、ナトリウム流量降下速度としては3.5%/minが限度となることが知られた。「もんじゅ」蒸気発生器においては、過熱器、再熱器、蒸発器と三液面が存在するため、この現象がいつそう大きく表われてくることが予想され、今後、液位制御系だけでなく蒸気

発生器の内部構造をも含めた総合的な検討が必要である。

4.3 ポンプトリップ試験

事故時の安全性を確認するため行なったポンプトリップ試験の一例として、定格の70%の流量からの試験の実測値及び解析値を図9に示す。解析値と実測値とは傾向として比較的良い一致を示している。循環ポンプのトリップに伴う流量急減により過熱器管束部液位は急速に降下し、約6秒で計測範囲を一時的に逸脱しているが、アルゴンガスの排出により過熱器カバーガス圧力が降下するに伴い回復する。一方、蒸発器管束部液位はナトリウムが多量に不足するため大きく降下し、液位降下は不足量がナトリウムくみ上げにより補われるまで続く。大幅な液位降下によりカバーガスが巻き込まれるが、循環ポンプは既にトリップされているので問題はない。液位の大幅な上昇は生じないため熱衝撃のうえからは問題がなく安全性は十分であることが確認された。

4.4 給水系外乱時の液位応答

給水系に大きな外乱が加わった場合の液位応答の実測値を図10に示す。給水流量の急激な減少に伴い、伝熱量が減少しナトリウム温度が上昇する。しかし、液位はナトリウム密度変化に応じた小さな変動を示すだけで不感帯内にとどまる。これより伝熱量変化が液位に与える影響は小さいことが分かり、解析コードの仮定の妥当性が確認された。

5 「もんじゅ」蒸気発生器への適用

50MW蒸気発生器の製作目的は、「もんじゅ」蒸気発生器設計製作及び運転上の問題点を明確にし、その対策を立てることにある。液位制御系についても上記した試験運転との対応により、有効性が確認された本液位制御特性解析コードを用いて検討を行なった。「もんじゅ」蒸気発生器液位制御系の概略図を図11に示す。過熱器と再熱器が並列に存在し、そ

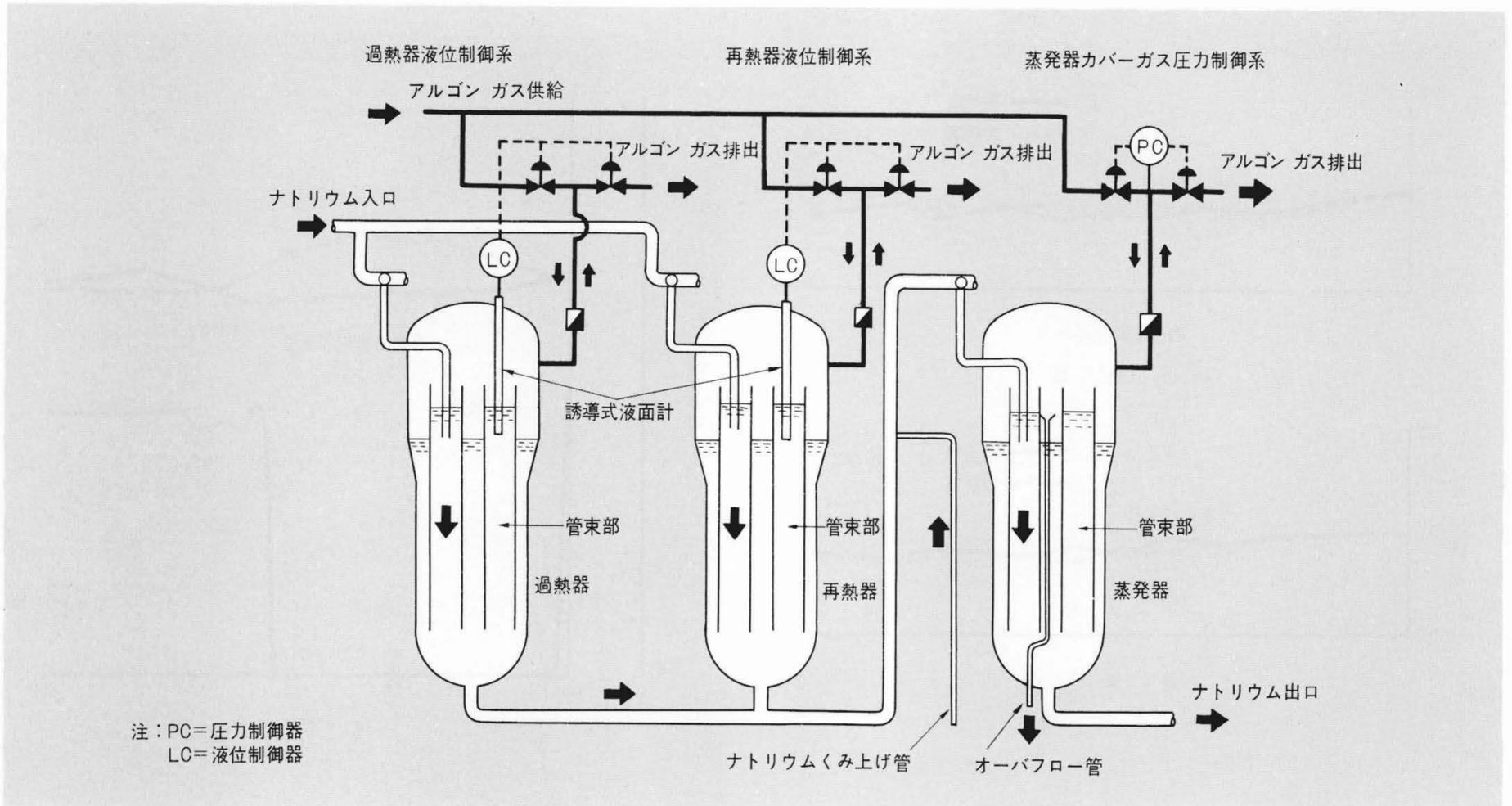


図11 「もんじゅ」蒸気発生器液位制御系 「もんじゅ」蒸気発生器の液位制御系の概略を示すものである。

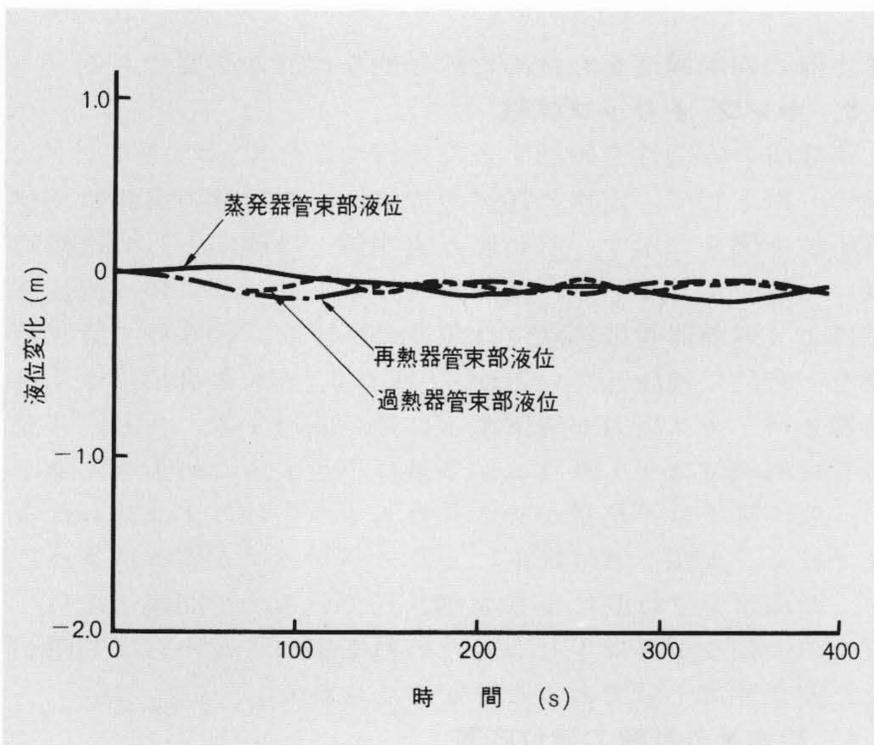


図12 ナトリウム流量減少時の液位応答解析 5%/minの流量降下速度で、ナトリウム流量を降下させた場合の解析値を示す。

それぞれ誘導式ナトリウム液面計で液位を検出し、液位変動に基づいてアルゴンガスを流入、又は排出させて液位を一定に制御する。蒸発器においては、ガス圧力を一定に制御する一方、ナトリウムのくみ上げ及びオーバーフローによって液位を一定に保持する。過熱器と再熱器が並列に存在しているため、50MW蒸気発生器に比べ液位変動の相互干渉がもっとも大きくなると当初予想された。液位応答の解析を種々行なったが一例として図12にランプ状ナトリウム流量降下の場合の解析結果を示す。液面間の相互干渉が見られるが、大きな振動現象は生じておらず、また、蒸発器の液位降下もカバーガ

ス巻き込みを引き起こすほどではなく十分安定な制御が可能である。その他、ポンプトリップ時の安全性なども解析により確認され、「もんじゅ」蒸気発生器用の液位制御系設計の見通しを十分立てることができた。

6 結 言

「もんじゅ」蒸気発生器の試験装置である50MW蒸気発生器において、過熱器液位のカバーガス圧力によるオンオフ制御及び蒸発器液位のくみ上げ、オーバーフローによる制御方式によって次に述べるように十分な制御性能を得ることができた。

- (1) 通常運転時のカバーガス制御弁作動回数は、1時間に1～2回であり、このとき蒸気条件に顕著な変化は見られなかった。
- (2) ランプ状のナトリウム流量変更を行なった場合も、流量変更速さを3.5%/min程度以下に抑えれば十分制御が可能であり、負荷応答に適応できる。
- (3) ポンプトリップ時にも液位が大きく上昇することなく、熱衝撃上問題となることはない。

また、液位の応答特性は解析値と実測値とで良い一致を示しており、解析コードの有効性が証明された。このコードを使用し、「もんじゅ」の液位制御系の検討を試み十分な制御性が得られることを計算上から確認した。

終わりに、本試験装置の試運転に当たり種々御指導、御協力をいただいた動力炉・核燃料開発事業団の関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- (1) 河原ほか：「高速増殖炉用蒸気発生器の開発」日立評論 56, 907 (昭49-9)
- (2) 広瀬ほか：「50MW蒸気発生器ナトリウム自由液面制御について」原子力学会(昭和49年秋の分科会)予稿集 D33