

高速実験炉「常陽」一次冷却系の総合機能試験

Pre-operational Tests of Primary Cooling System of Experimental Fast Breeder Reactor "JOYO"

ナショナルプロジェクトとして製作が進められてきた、動力炉・核燃料開発事業団の高速実験炉「常陽」は、我が国初の高速増殖炉であり、かねてより国産技術を用いて開発された原子炉として注目されていたが、昭和52年3月に総合機能試験を完了し、燃料装荷の後、4月24日に臨界に到達した。

本論文は、2年にわたり実施された「常陽」の総合機能試験の概要と、その中で実施された一次冷却系関係の主な試験について述べたものである。

野本昭二*	Nomoto Shôji
八巻秀雄**	Yamaki Hideo
田口豊平**	Taguchi Toyohira
鈴木 守***	Suzuki Mamoru
水野雄弘****	Mizuno Masahiro
伊藤喜夫*****	Itô Yoshio

1 緒 言

動力炉・核燃料開発事業団の高速実験炉「常陽」(以下、「常陽」と略す)の総合機能試験は、昭和50年1月から実施され昭和52年3月に無事終了した。「常陽」はその後、燃料装荷が行なわれ、4月24日に臨界に達し、現在は種々の特性試験が実施されている。

本プラントの特徴は下記に述べるとおりである。

- (1) 我が国では初の高速増殖炉であり、国産技術を駆使した開発品として、国内原子力メーカー4社の手により設計・製作が行なわれた。
- (2) 冷却材として、化学的に活性であり、常温では固体状態となる液体金属ナトリウムを使用している。
- (3) 原子炉冷却材の定格出口温度が500℃で、現在、実用化されている熱中性子炉に比較して約200℃高い。
- (4) 冷却材としての液体金属ナトリウムは熱容量が小さく、かつ熱伝達が大きいう特性に加えて、高速増殖炉では冷却材の原子炉出入口温度差が大きく、熱衝撃に対する考慮が必要である。

本論文は、2.で総合機能試験の概要を、3.で総合機能試験期間中に実施した一次冷却系の主な試験を、4.で本試験より得られた今後のプラントへの改善提案を述べる。なお、「常陽」の一次冷却系設備の建設については、本誌別掲の『高速実験炉「常陽」原子炉容器及び一次冷却系の建設』を参照されたい。

2 「常陽」の総合機能試験

「常陽」は、据付後、定格出力運転に至るまでの試験は、次の三つに分けて定義された。

- (1) 据付試験
 - (2) 総合機能試験
 - (3) 臨界試験、出力上昇試験などの原子炉運転試験
- このうち、(1)及び(2)は設計・製作・据付を担当した原子力メーカーにより実施され、(3)は動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃団と略す)により実施中である。

総合機能試験の目的は、プラントを構成する各系統の設備・機器が現地に据付け調整された後、完成状態で系統としての機能を確認し、炉心燃料装荷が可能となる条件を確立することであり、次の3段階に分けて実施された。

- (a) 常温空気中試験

常温の空気中で系統の性能が確認できるものについて実施し、ナトリウム充填前に問題がないことを確認して、本試験に続く高温ガス中試験及びナトリウム中試験を容易にする。

(b) 高温ガス中試験

ナトリウムの充填に先だち、高温状態での系統の気密性、機器の動作、変位、耐熱性などの性能を確認し、ナトリウム充填が安全に行なえることを確認する。なお、本試験はナトリウムを充填するための準備として、系統内のアルゴンガスによる置換及び予熱を兼ねて行なわれた。

(c) ナトリウム中試験

ナトリウム充填状態での系統の機能及び機器の動作を確認し、更にはプラントの総合的な安全保護機能を確認して、炉心燃料装荷前にプラントの性能を確認するためのものである。

図1に総合機能試験の実績工程を示す。

3 個々の試験の概要・結果

総合機能試験期間中に実施した一次冷却系関係の主な試験を表1に示す。次にこれらのうち、同表中の番号に丸印を付けた試験について記述する。試験結果は計画値を満足し、今後の運転が支障なく実施できることが確認できた。

3.1 予熱試験

(1) 目 的

高速増殖炉の冷却材であるナトリウムの融点は純粋なものでも約98℃と高く、冷却材を循環させる系統は、あらかじめ150℃程度以上に予熱しておく必要があり、そのために、予熱窒素ガス系統設備及び電気ヒータ予熱設備が用意されている。本試験は、それらの設備を使用して、原子炉容器、一次主冷却系及び一次補助冷却系の機器・配管をナトリウム充填に必要な150℃以上に加熱し保持できることを確認するため、また2.の(b)で述べた高温ガス中試験の目的のために行なわれた。

(2) 予熱設備

ナトリウム漏洩対策のため、二重構造になっている炉容器、一次主冷却系及び一次補助冷却系の機器・配管の中空部に、高温窒素ガスを循環して予熱する予熱窒素ガス系の系統図を図2に示す。

* 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター高速実験炉部 工学博士
**** 日立製作所大みか工場 ***** 日立製作所土浦工場

** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所電力事業本部計装技術本部

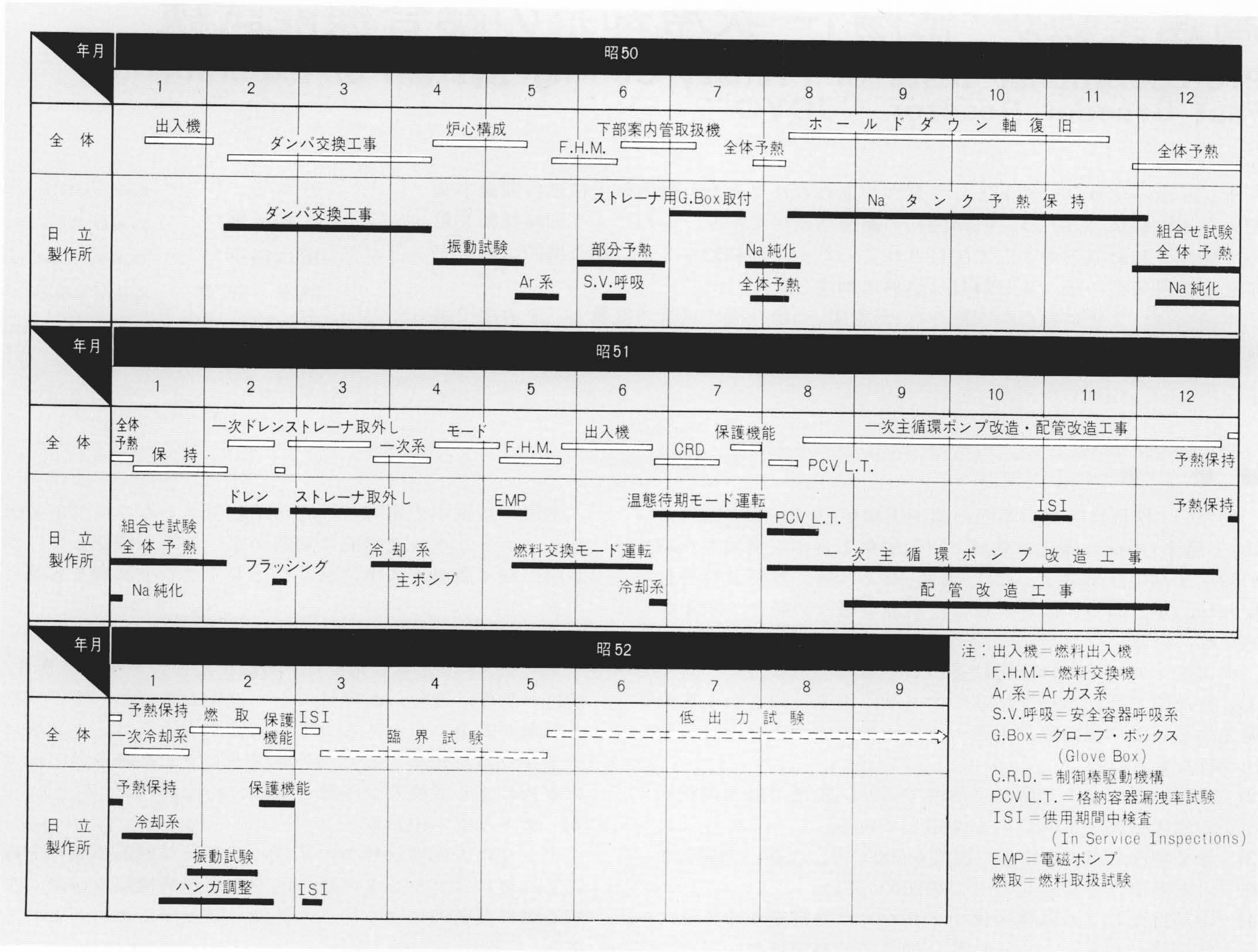


図1 総合機能試験実績工程表 総合機能試験は、改造工事期間も含め、約2年にわたり実施された。

表1 一次冷却系関係の主な試験項目 番号に丸印を付けたものについては、試験の概要について記述した。

No.	試験項目
1	真空引き・アルゴンガス置換
②	予熱試験
③	ナトリウム受入れ及び純化
④	一次主冷却系内フラッシング
⑤	一次主冷却系ナトリウム流動試験 ①流動抵抗確認 ②フロー・コーストダウン時定数測定 ③過渡応答試験 ④瞬時停電後の再起動特性の確認
6	サイホンブレーカ作動試験 (1)一次主冷却系 (2)一次補助冷却系
7	配管内ナトリウム凍結・溶融試験
8	一次冷却系停電模擬試験
9	二重管アニュラス部漏洩率試験
⑩	配管振動試験 ①一次主冷却系 ②一次補助冷却系

(3) 試験結果

試験は、昭和50年11月28日から昭和51年1月9日までの43日間にわたり実施され、必要条件の150℃以上は達成でき、高温状態での機器の動作、変位、耐熱性などはほとんど計画どおりであることが確認された。なお試験中、窒素ガス加熱器を最大200kW投入した時の加熱器出口温度及び原子炉容器温度の最高値は、それぞれ311℃及び241℃であった。

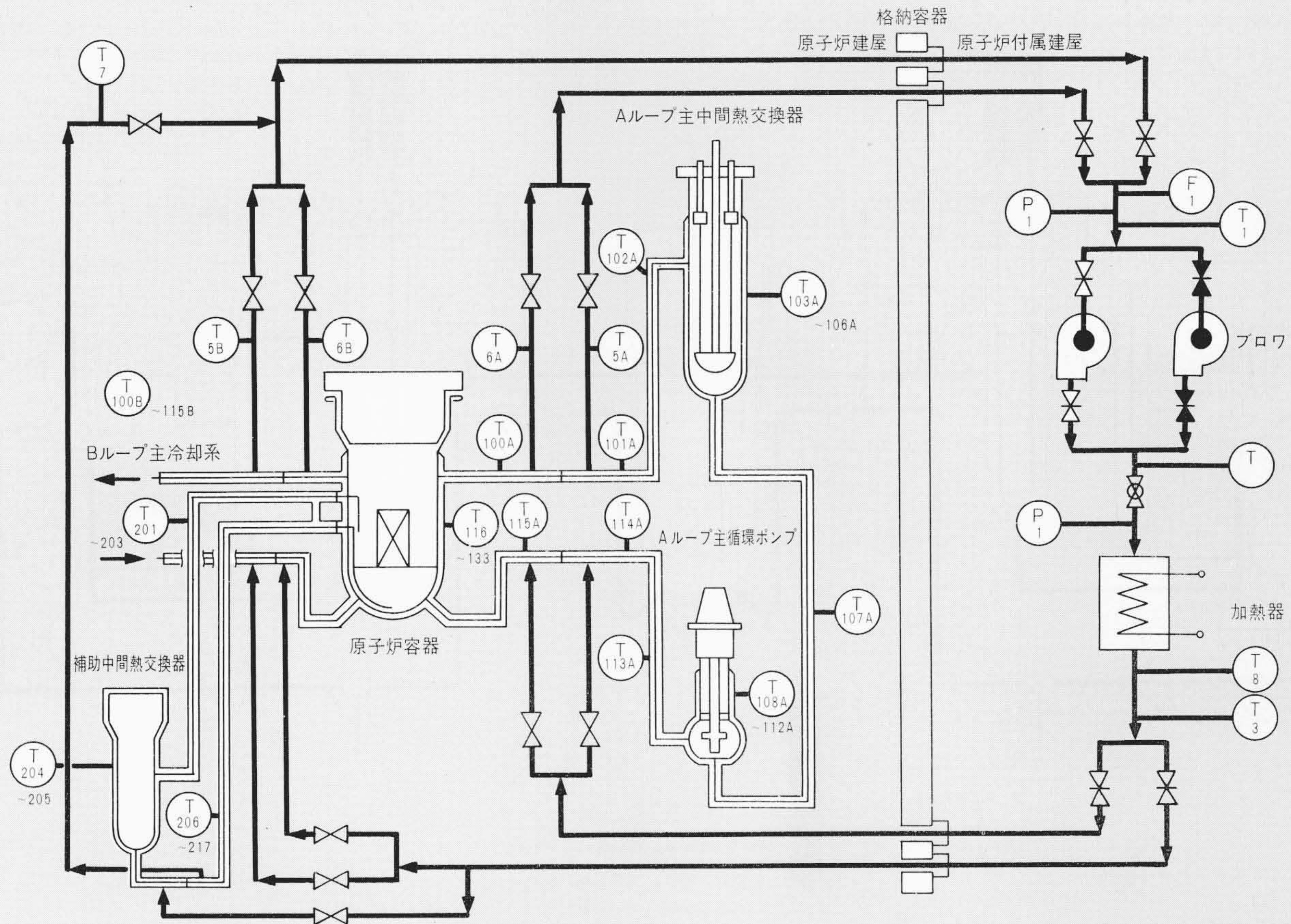
3.2 ナトリウム受入れ及び純化

一次系ナトリウムはタンク内に固化されたもの(3.5t)を現地へと運び込み、仮設加熱電気ヒータで溶融し、一次タンクへと受け入れた。受入れ総量は126tである。

タンク内ナトリウムの純化には、不純物溶融量が温度低下に従って減少するコールド・トラップ方式を使用した。純化運転によりナトリウム中の酸素不純物濃度を、有効運転時間約300時間で、約14ppmから運転仕様である10ppm以下の約5ppmに純化することができた。

3.3 一次主冷却系内フラッシング

高速増殖炉では、冷却材であるナトリウムの化学的活性により、通常の火力プラント及び軽水炉プラントで実施されるような水、又は蒸気によるフラッシングは実施できない。このため、工場内製作、輸送及び現地据付を、厳重な清浄度管理の下に実施し、機器・配管内への不純物混入を防止した。総合機能試験時には、仮設の60メッシュストレーナを逆止め



注：記号説明 T=熱電対, F=流量計, P=圧力計

図2 予熱系統流路図 ブロウで加圧し、加熱器で昇温させた窒素ガスを、機器・配管の二重構造アニュラス部に循環させ、一次主冷却系及び一次補助冷却系を予熱する。

弁の弁箱部に取り付け、ナトリウムを系統に充填後、一次主循環ポンプによるフラッシング運転を実施した。運転は約220℃で50時間にわたり実施した。この間、ナトリウムの一部を純化系内に循環させ、純度管理及び純化運転を実施し、規定の純度を保持した。ストレーナを取り出して異物の付着状況の調査を行なったが、問題となるような異物は見いだされなかった。図3に一次主冷却系系統図を、図4にフラッシングに使用したストレーナを示す。

3.4 一次主冷却系ナトリウム流動試験

一次主冷却系は、図3に示すようにA、B2ループで構成され、原子炉容器内で発生した熱を主中間熱交換器を通して二次主冷却系へ伝えるための設備であり、原子炉容器、主中間熱交換器、一次主循環ポンプ、配管・弁類などから構成されている。

3.4.1 系の流動抵抗確認

(1) 目的

静止セルビウス方式による制御装置を用いて、一次主循環ポンプを2台併列運転し、回転数を変えることにより定格流量の30～100%の間で一次主循環ポンプ運転が円滑に行なえることを確認するとともに、系の流動抵抗を実測する。

(2) 試験結果

図5に一次主冷却系流動抵抗の実測値と計算値の比較を示す。両者は、ほぼ良い一致を示した。

また、一次主循環ポンプの運転に関しては、円滑な運転が実施できることが確認された。

3.4.2 フローコストダウン時定数測定

(1) 目的

原子炉定格出力時での電源喪失によるスクラム及び一次主循環ポンプのトリップを想定し、原子炉崩壊熱除去に関する安全上からの要求である一次主冷却系流量減少の時定数(流量が定格値の36.8%まで降下するのに要する時間)が10秒以上であることを確認する。

(2) 試験結果

図6に一次主冷却系フローコストダウンの実測値と要求値の比較を示す。Aループ及びBループの測定値は、要求値よりはるかに上にあり、安全上の要求を十分に満足していることが確認された。

3.4.3 瞬時停電後の再起動特性の確認

(1) 目的

一次主冷却系の流量が一定値以下になると、原子炉はスクラムされて安全に停止されるようになっている。一次主循環ポンプは、原子炉スクラムに結び付かないような、動力母線の瞬時停電(約1秒以下)が生じてもトリップするようになっているので、この場合には再起動して、不必要なスクラムを防止する必要がある。この瞬時停電後の再起動が計画どおり実施できることを確認する。

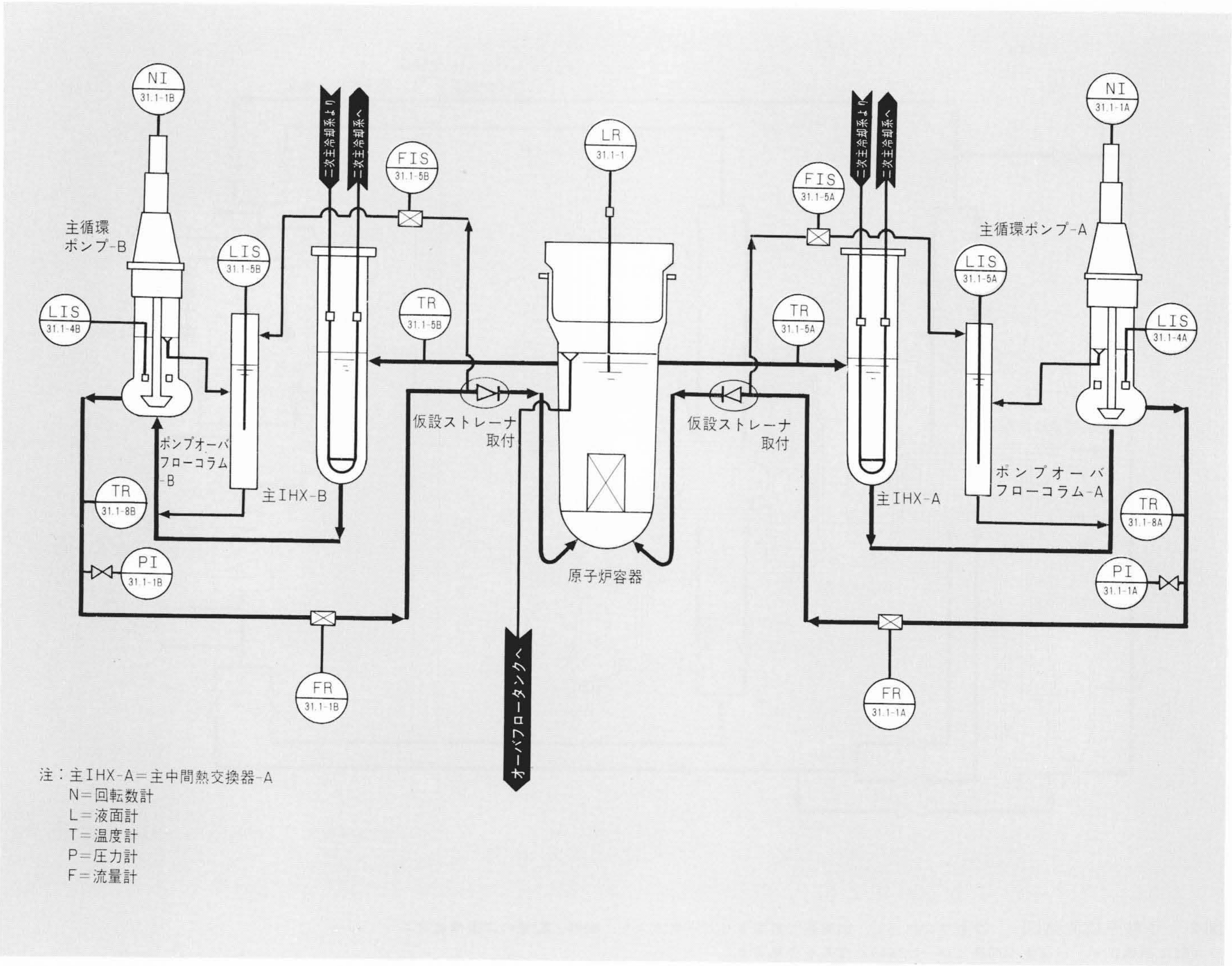


図3 一次主冷却系概略系統図 流体力学的にほぼ対称な2ループから成り、炉心で発生した熱を主中間熱交換器を通して、二次主冷却系へと伝える。

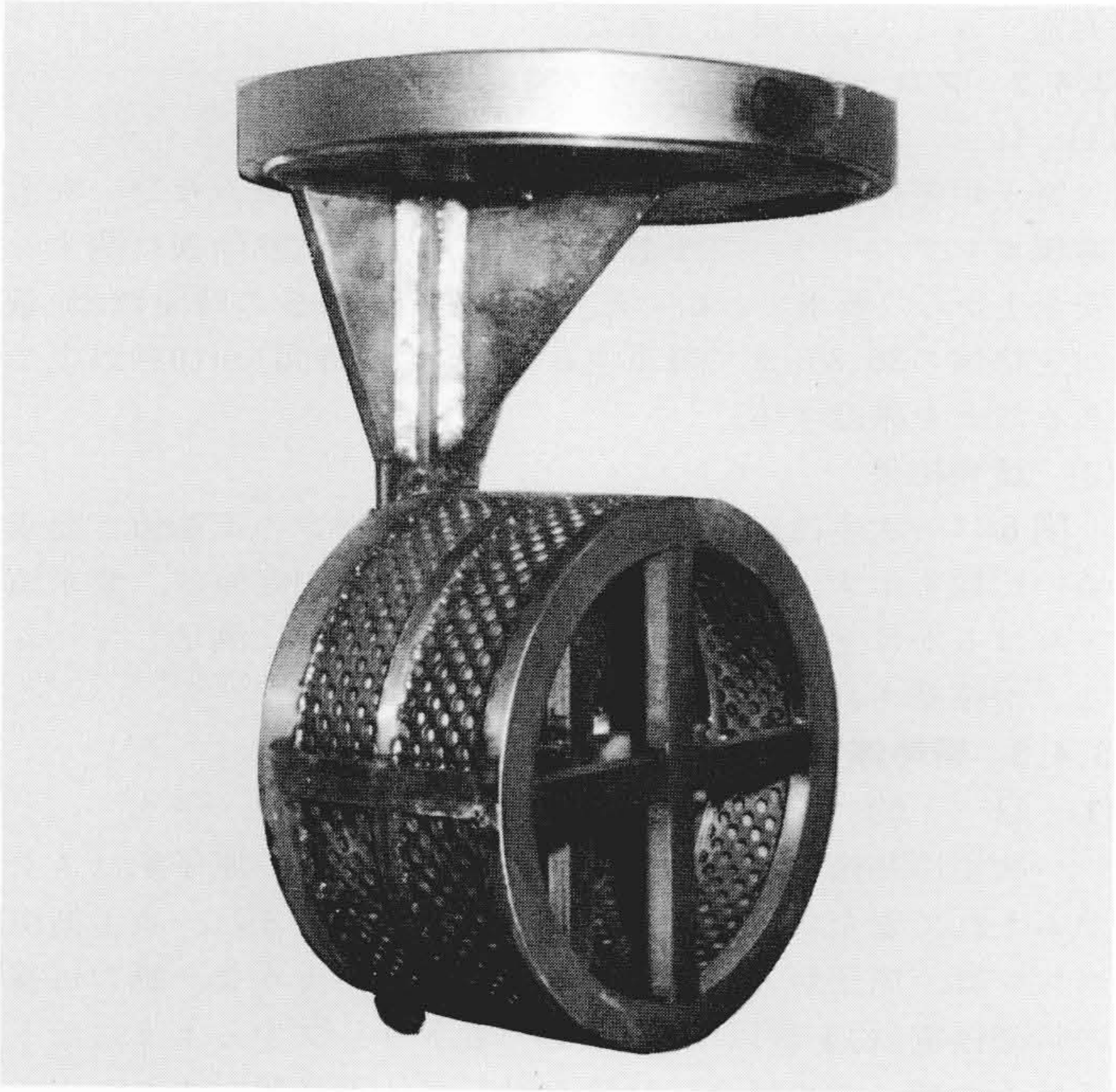


図4 ストレーナ(試験終了後、洗浄前) 内径が250mmで60メッシュの金網が取り付けられている。

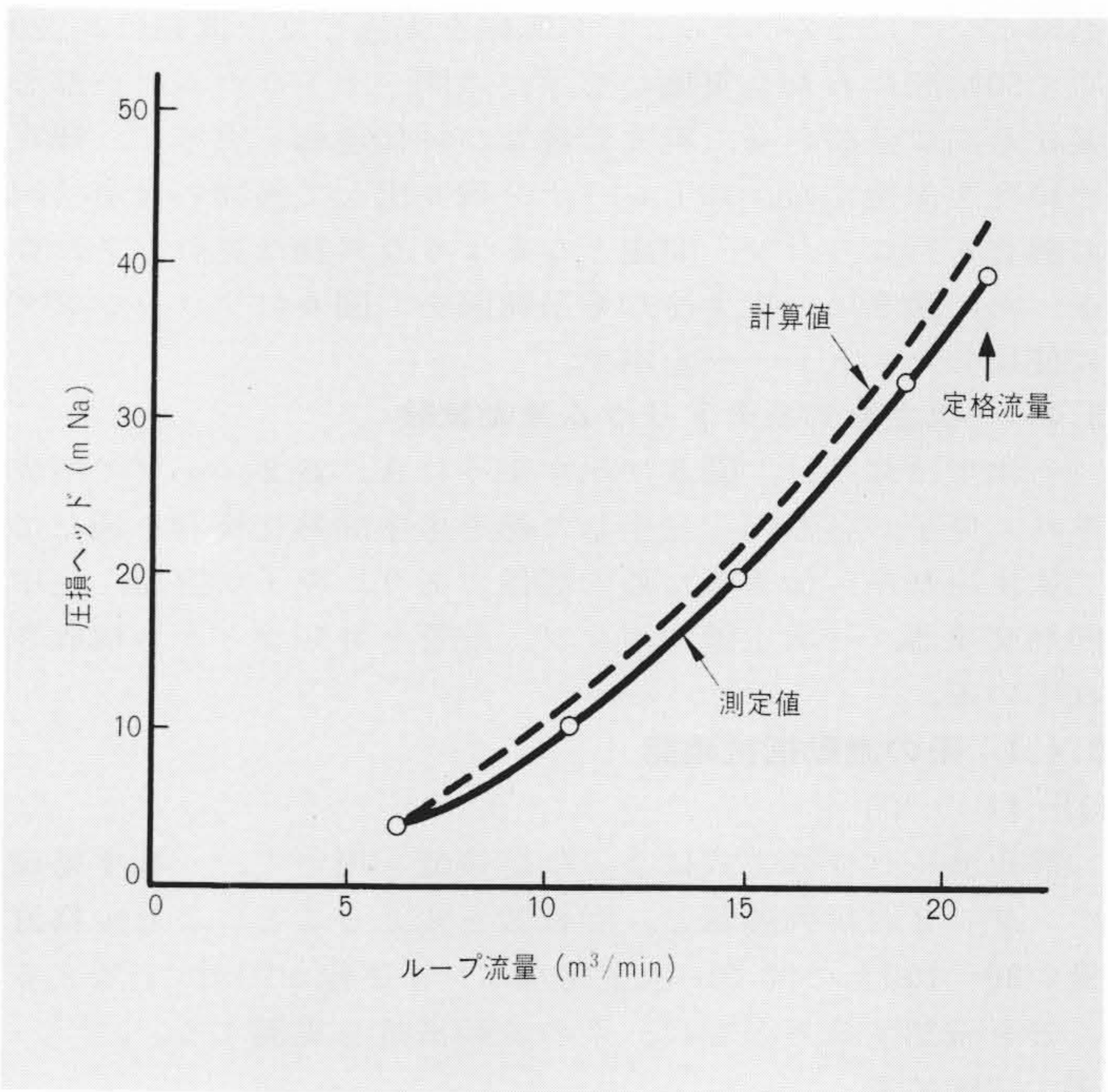


図5 一次主冷却系の流動抵抗 計算値と測定値は、ほぼ良い一致を示している。

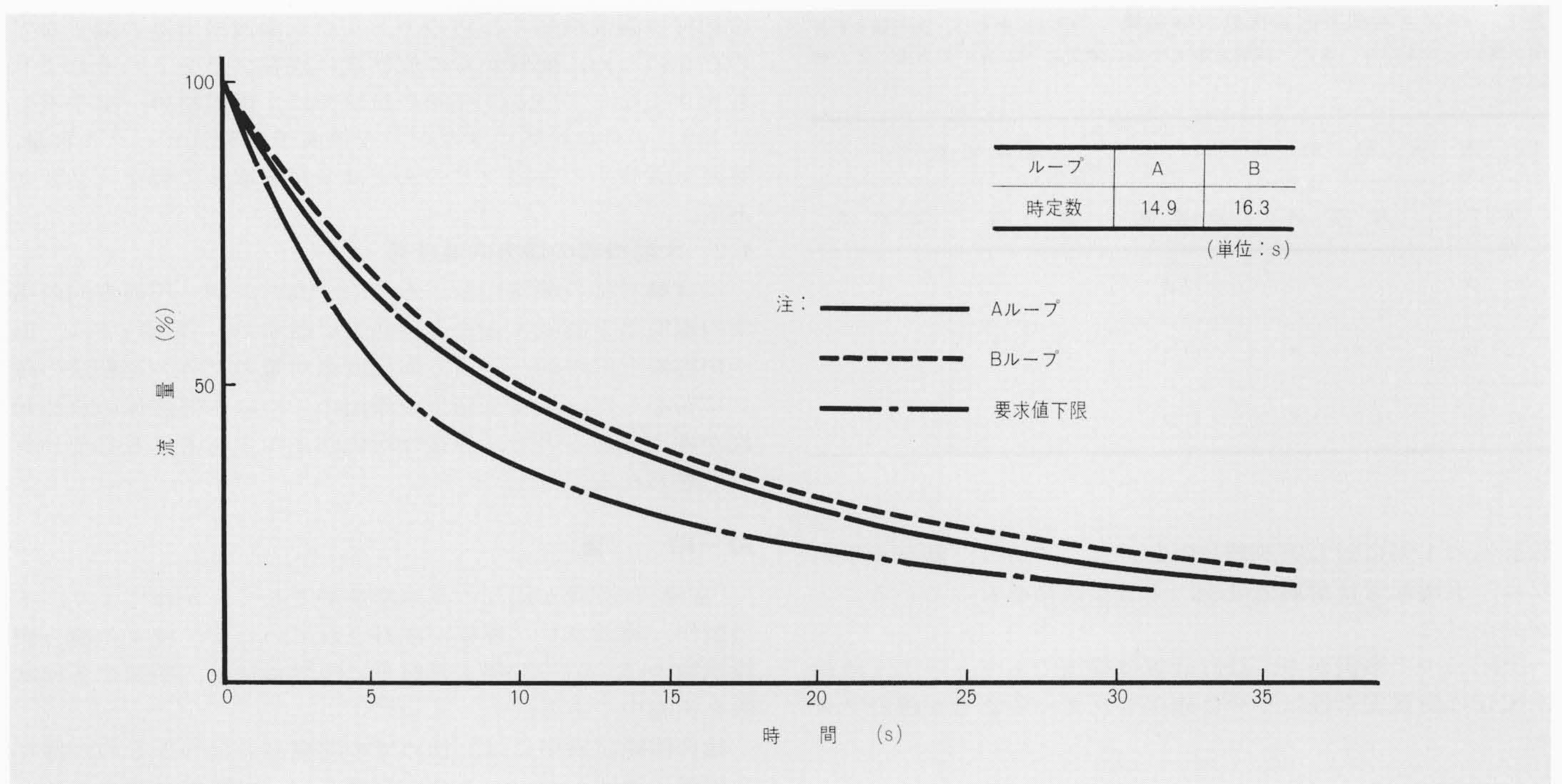


図6 一次主冷却系フローコストダウン特性 A, Bループ共, 要求値下限より上方にあり, 要求を十分に満たしている。

(2) 試験結果

図7に、「常陽」で想定した最も長い瞬時停電である1.5秒の瞬時停電模擬時の一次主冷却系のA, Bループの流量変化を示す。A, Bループ共, 瞬時停電発生後, 約7秒後には元の流量にもどり, 円滑な運転が継続されることが確認された。

3.5 ナトリウム中配管振動試験

(1) 目的

機器・配管内にナトリウムが充填され, 自重も実際の場合と等しくなった状態で配管の振動試験を実施し, 固有振動数及び減衰定数を求め, 次に述べる事項の実証, 及び確認を行なう。

- (a) 耐震解析コードの妥当性の実証
- (b) 耐震解析モデルの妥当性の実証

(c) 実機配管の耐震安全性の確認

(2) 試験対象配管

原子炉容器出口から主中間熱交換器入口までの一次主冷却系の配管で, 内管直径が約500mm, 外管直径が約550mmの二重管につき試験を実施した。

(3) 試験方法

試験は電磁式の加振機を用い, 一次振動モードの腹となる点を加振力約200kgで掃引加振し, 要所に配置した加速度検出器の出力をデータレコーダに記録することにより行なった。

(4) 試験結果

測定結果から求めた固有振動数と減衰定数を表2に示す。これから, 固有振動数は一次, 二次及び三次共, 実測値は計算値に良く一致していることが分かる。一方, 減衰定数は,

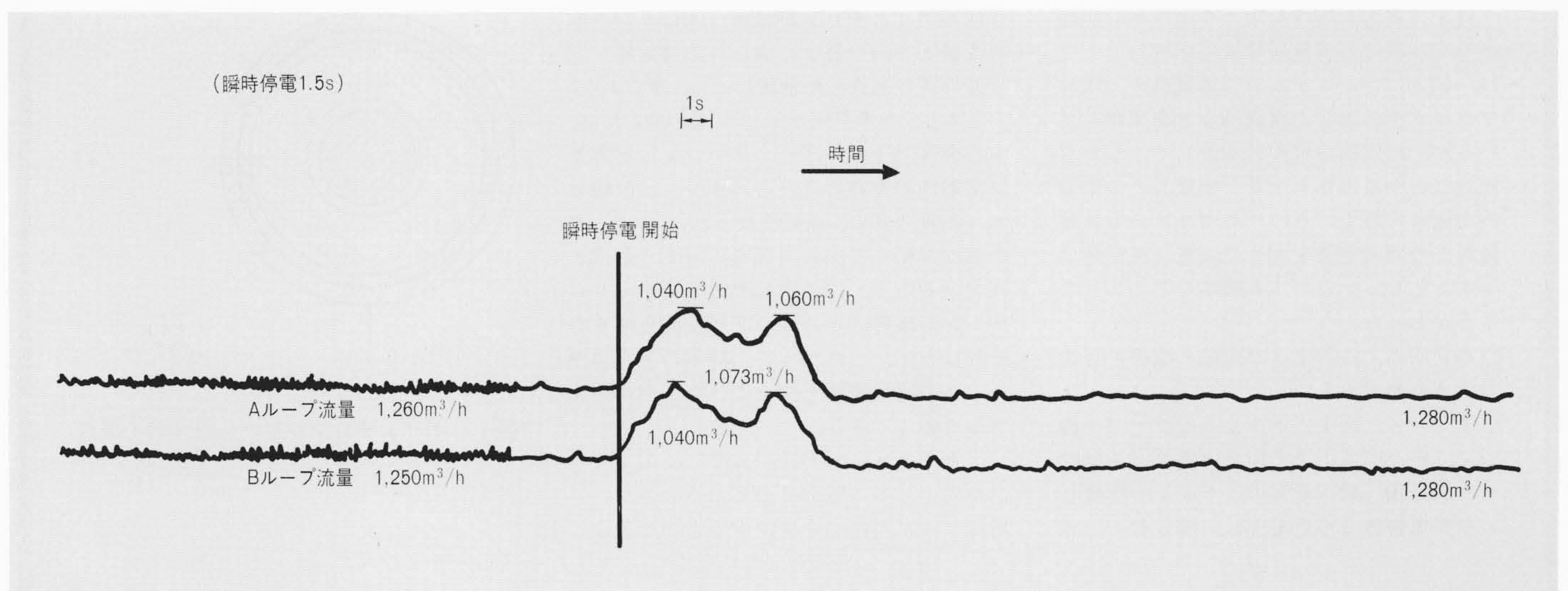


図7 定格流量実負荷瞬時停電試験 A, Bループ共, 瞬時停電後約7秒で元の流量にもどっている。

表2 一次主冷却系配管振動試験結果 固有振動数は、実測値と計算値が良い一致を示し、また、減衰定数も十分に満足のいくものであることが確認された。

固有振動数 (Hz)			減衰定数 (%)	
次数	実測値	計算値	実測値	設計値
一次	~ 7.0	7.5	2.5~7.1	1.0
二次	7.6~ 7.8	7.8		
三次	11.0~11.8	11.2		

設計値の1%に対し実測値は2.5~7.1%であり、減衰が早い
ため、実機配管は耐震強度上、十分な余裕をもっていることが分かった。
上記二つの事実から、設計計算は妥当であり、一次主冷却系配管の耐震安全性は十分に確保されていることが確認できた。

4 今後のプラントへの改善提案

「常陽」の一次冷却系の試験経験より、今後建設が予定されている高速原型炉「もんじゅ」への改善提案を次に述べる。

4.1 保温効率

高速増殖炉は、従来の火力プラント及び軽水炉プラントに比較して配管の単位長さ当たりの支持金物の個数が多いこととともに、予熱のために配管に沿わせる電気ヒータの端子、

冷却材の漏洩検知のためのナトリウム漏洩検出器の端子などの存在のため、配管からの放熱量は既存プラントのそれよりも大きくなっている。今回の試験では、保温材の一部手直しによりこの件に対処できたが、今後共予熱電気ヒータの容量、霧固気調整系の容量などの決定は余裕を取って行なう必要がある。

4.2 大型機器の周方向温度差

ほぼ軸対称の機器でも、その同一高さ、同一円周方向の場所の温度差を制限することは非常に難しい。「常陽」では、原子炉容器上部の同一円周方向温度差対策のための運転法の確立に苦心した。温度差発生の原因の一つに内部流体の自然対流が考えられるので、今後は対流防止などを考える必要があると思われる。

5 結 言

「常陽」は、我が国初の高速増殖炉として、かねてより、その製作、建設及び試運転が注目されていたが、種々の総合機能試験の後、昭和52年4月24日に臨界に達し、順調に各種試験を実施中である。

総合機能試験中には、初めての開発品にはつきものの様々な困難に遭遇したが、それらを乗り切って臨界に達することができた。

この間に得られた経験は、動力炉・核燃料開発事業団及び原子力メーカーの高速増殖炉分野での今後の技術的向上に大きく貢献するものと考ええる。

終わりに、これらの成果は、政府、学界及び電力業界の御指導、御協力により達成できたことに思いを致し、心から謝意を表わす次第である。



ポリエチレン絶縁ケーブル線心

川和田七郎・中川真吉
特許 第739229号 (特公昭47-25236号)

本発明は、高電圧下で使用する電力ケーブル用ポリエチレン絶縁ケーブル線心に関するものである。
従来、電力ケーブル用ポリエチレン絶縁ケーブル線心の導電層形成用組成物としては、例えばポリエチレンに導電性カーボンブラックを添加した組成物などを使用しているが、組成物の可塑性が乏しく、しかも固いことからポリエチレン絶縁層との馴染みが極めて悪く、そのためポリエチレン絶縁層との間に空隙を生じて高電圧課電時にイオン化し、ケーブルの破壊を招くようなことがあった。
本発明は、このような欠陥の改善を目的とするものである。
すなわち、図1に示すようなケーブル線心で、中心導体①上の内部導電層②を酢酸ビニル分10~40重量%のエチレン-酢酸ビニル共重合体 100重量部に、導電性カーボ

ンブラック40~100重量部を添加混和して成る導電性組成物で形成するものである。
なお、③は上記内部導電層②上に押出被覆されたポリエチレン絶縁層、④は上記内部導電層②と同材質より成る外部導電層、⑤は最外周に形成した金属しゃへい層である。
このような本発明ケーブル線心によれば、中心導体①上に、ポリエチレン絶縁層③とは密着性の良いところのエチレン-酢酸ビニル共重合体に、導電性カーボンブラックを添加混和して成る内部導電層②が形成されているので、この内部導電層②とポリエチレン絶縁層③との間に空隙が発生するおそれはなく、したがって、従来のようにケーブルの絶縁破壊を招くことを未然に防止することができる。
以上のように、本発明は高電圧電力ケーブル用として、極めて適したポリエチレン絶縁ケーブル線心を提供するものである。

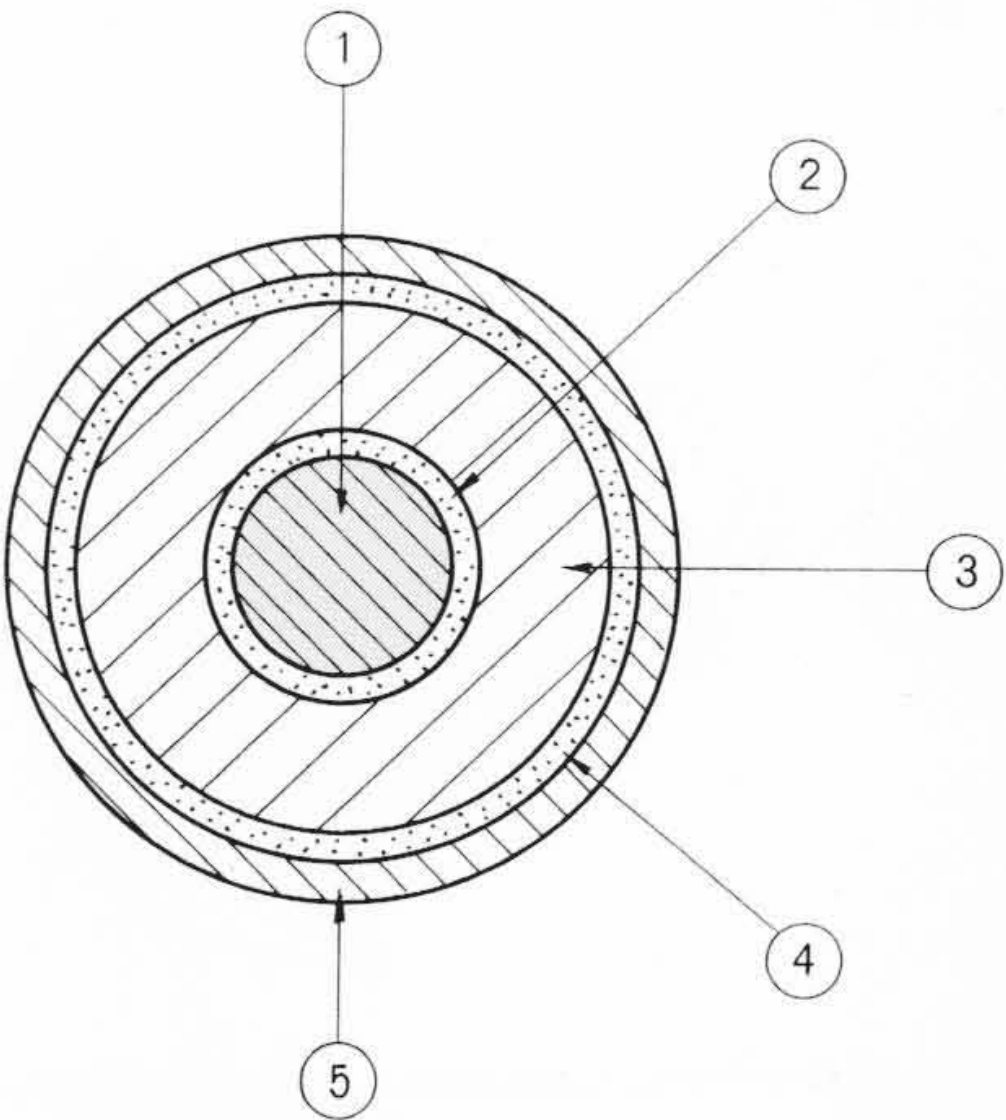


図1 ポリエチレン絶縁ケーブル線心断面