

# 水流動試験施設と一年半の試験成果の概要

早野陸彦 \* 石橋英一 \*

## 1. まえがき

水流動試験施設の主目的は、原型炉「もんじゅ」用ナトリウム機器構造物をナトリウム中で使用する前に、水流動モデルによって迅速で広範囲の実験を行ない、そのデータを高速増殖原型炉「もんじゅ」の設計資料として役立てることにある。この場合水流動試験が実証試験としての程度有効性があるかは十分吟味する必要がある。\*

水流動試験が有効である理由として次のような理由があげられる。

- (1) 液体ナトリウムと水は流動特性が類似している。(図1、図2参照)
- (2) 水は直接接近して観察できるので、流動状態の可視化が可能であり工学的判断に有力な資料となりうる。
- (3) 水流動試験装置はナトリウム試験設備に

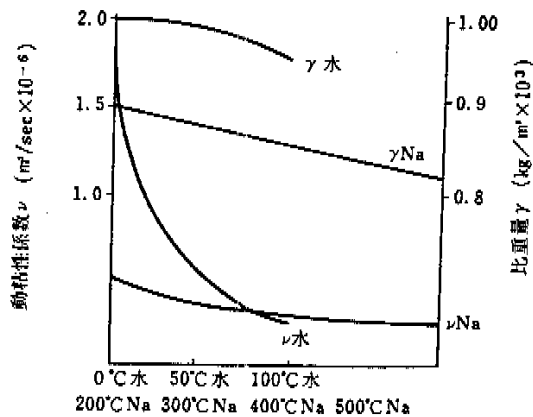


図1 水とナトリウムの動粘性係数と比重

比較して簡単に被試験体の組立据付、部品交換が容易である。

- (4) 水流動試験装置の計装はかなり自由に数多く取付けることができ、しかも計器の信頼性と精度が高く、試験条件を広範に可変にし、定量的なパラメトリックサーベイを行ないうる。
- (5) 試験条件の設定が容易であり、短時間に精度の良い数多くの資料がうることができ

る。水流動試験では経済的な理由から被試験体に縮尺モデルを用いることも多いが、縮尺度を大きくすればするほど、誤差は大きくなり、経済性と技術的観点から一般に1/2～1/10の縮尺モ

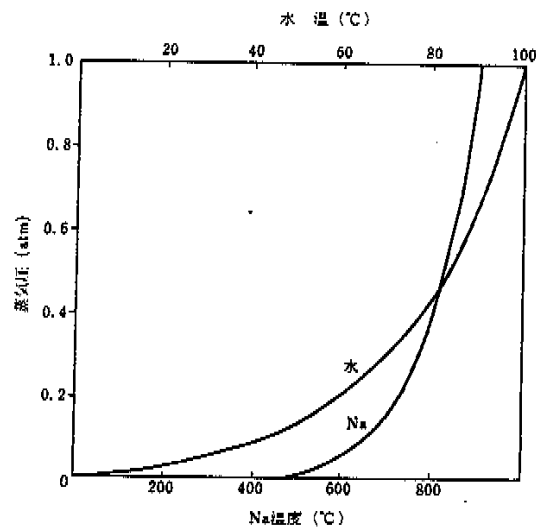


図2 水とナトリウムの蒸気圧

\* 大洗工学センターナトリウム流動伝熱試験室

\*\* LMEC-68-4 An Evaluation of the Applicability of Water Testing to Liquid Metal Engineering Problems

表1 水と液体ナトリウムの熱的特性

物 性	温 度	比 重 量	比 熱	動粘性係数	熱伝導率	温度伝導率	プラントル数
単 位	°C	kg/m <sup>3</sup>	Kcal/kg°C	m <sup>2</sup> /sec	Kcal/mh°C	m <sup>2</sup> /h	-
記 号	T	$\gamma$	C <sub>p</sub>	$\nu$	K	C	Pr
水	80	971.8	1.003	$0.368 \times 10^{-6}$	0.578	$5.93 \times 10^{-4}$	2.23
ナトリウム	390	858.1	0.30	$0.33 \times 10^{-6}$	62.0	0.239	0.0050

デルが用いられることが多い。例えば、「もんじゅ」の場合原子炉モデル、中間熱交換器モデルに対しては高精度が要求されるため縮尺モデルが採用されている。

しかし、これら縮尺モデル採用に先立ち、各試験対象部の部分試験、縮尺モデルによる予備試験を行ない、縮尺モデルへの外挿性、ひいてはこれから実機への外挿性（流体が異なることによる差違が大きい）がこれに関して別途考慮する）を検討した。また逆に、実験操作、解析上実寸大で取扱い難い部分に対しては拡大モデルを用いることもある。

縮尺モデルに対する実験でもループ側からの制限として、流速を実機に合せる運転は充分可能であるが、動粘性係数を合せるために試験水を昇温できない場合が多い。

したがって、実機炉心部のレイノルズ数は $10^6$ オーダーであるが水試験の場合 $10^4$ オーダーという値になる。しかし、この程度のレイノルズ数の相違は実験結果の精度をそこなうことはないと考えられる。

一方、熱伝達現象に関しては表1に示すごとく水とナトリウム間の諸物性値が著しく異なっているため一般的に相似則の成立は期待できない。しかし実用範囲では乱流熱伝達領域が大部分であるが、このような場合には全熱伝達量に対する熱伝導量（一般的にナトリウムの場合これが大きな割合を占める）が著しく小さくなるので慎重な検討を行なえば水による近似実験でも大局的な傾向をつかむことはできる。

また、伝熱現象と流動現象が共存する場合が一般的であるが、このような場合は伝熱によって流体の物性値が変化し、これが流動のメカニズムに影響を及ぼし、ひいてはこれが熱伝達現象へもどってくるが、このような流動と伝熱の

相互干渉したような場合はナトリウムの場合水に比較して無視しうるほど小さい。したがって、伝熱と流動の実験は別々に行なって差し支えない。すなわち、このような場合に対しても水流動実験の応用可能領域が充分にあることになる。

このように水による現象解析を行なうことでその応用分野を拡げることもできる。しかし言うまでもなく水のシミュレーションですべての試験が成り立つものではなく、高温ナトリウムに対する機能試験、ナトリウム中耐久試験、そして総合的なナトリウム中確認試験等ナトリウム固有の問題の解明のためにはその目的にそったナトリウム試験が必要である。

しかし、解析対象としての水流動試験は機動性があり、短期間に多くの参考資料を与え得る点で、研究開発のひとつの重要な手段となりうる。

## 2. 装置および計画

### 2.1 水流動試験ループ

図3に水流動試験ループのフローダイアグラムを示す。ループに使用される水は300m<sup>3</sup>で地下の貯水槽に貯えられる。実験用水は主ポンプで汲み上げられ、100メッシュのフィルタ、サージタンク、四方向切換弁、電磁流量計を通過してバルブテストステーションまたは流動モデルステーションに運ばれる。各ステーションを通過した後は実流量測定のためパッチ式流量計に入るか、または貯水槽内にもどる。サージタンクは各テストステーションにポンプの脈動が侵入するのを避けるためのもので、タンク内には圧縮空気が送られていて、水は自由液面を持っている。四方向切換弁は26B逆止弁の水撃作用を調べるためにつけられたもので、バルブテストステーションに正逆方向の流れを与えることが

表2 水流動試験ループ主要機器の仕様

No.	主要機器	仕様
1	主ポンプ	定格流量 4,000m <sup>3</sup> /H, 揚程 105m, 1,550kwモータ使用, オメガドライブ(クラッチ)により回転数可変
2	フィルタ	5基, 100メッシュ, 自動逆洗方式
3	サージタンク	1,800φ×6,400H, 耐圧15kg/cm <sup>2</sup> , 液面コントロール
4	電磁流量計	測定範囲 -4,500~4,500m <sup>3</sup> /H
5	四方向切換弁	切換時間2秒以内可変, エアーシリンダ駆動
6	バッチ式流量計	測定重量20トン以内, 精度±5kg

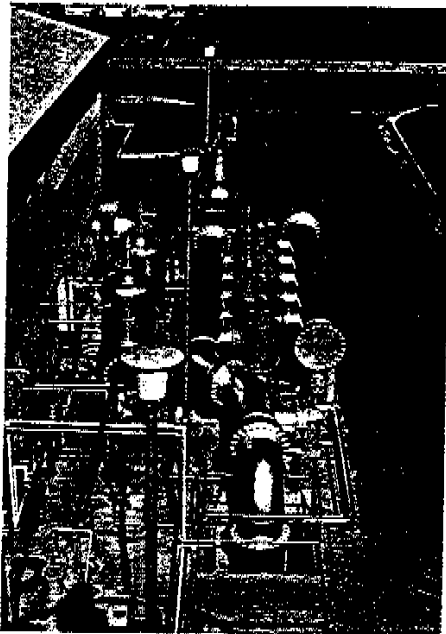


写真1 ポンプハウスおよび濾過装置

できる。切換時間は最小0.8秒で可変であり、水撃作用によってライン内の水圧が20kg/cm<sup>2</sup>を越えた時はラプチャーディスクが破裂して、圧力を下げようになっている。

実験用水ラインは錆などによる水の汚れを防止するため、ゴムライニング施工されており、バルブ、機器なども防錆処理がされている。実験時の水温は40℃以下で、ポンプ運転によって生ずる水温上昇はクーリングタワーによっておさえるようになっている。

そのほか配管系および機器としては、サージタンクおよび計装機器に圧縮空気を送るエア系(コンプレッサ、エアレシーバ、クーラ、脱湿器など)、ポンプ潤滑油、エア冷却などのため

に、冷却系、各種ポンプ起動時の呼び水用として真空系がある。

各主要機器の仕様を表2に示す。ここで定格流量4,000m<sup>3</sup>/Hは“もんじゅ”実機のほぼ1ループ分に相当する。

この水流動試験装置以外に、現在燃料集合体水流動試験ループを計画中である。

本試験装置は“もんじゅ”、“常陽MK-II”の実寸大の燃料集合体について、ナトリウム中耐久試験前後の経時変化等を各部分に区別して詳細に調べることが主目的とし、他にもエントランスノズル、連結管の単体試験、集合体内に閉塞物を挿入した局所流路閉塞試験等を計画している。

## 2.2 被試験体

表3に昭和47年度より昭和49年度までにわたる被試験体およびそれらの仕様について示す。

表3において項目1および2はバルブテストステーションで行ない、項目3および4は流動モデルステーションで行なう。現在(昭和48年

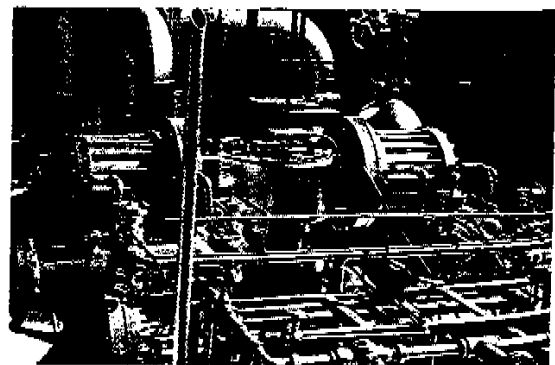


写真2 四方向切換弁

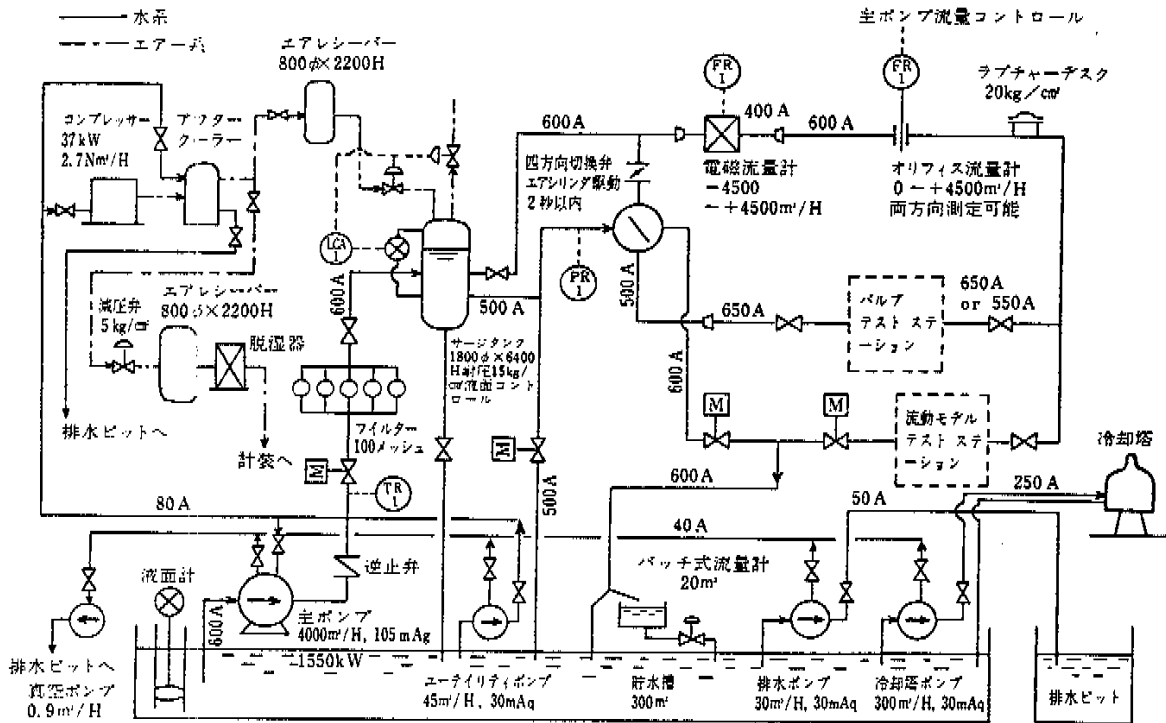


図3 水流動試験ループ

度末)では項目3までの試験が完了し、中間熱交換器モデルの据付が始まろうとしている。

この他に昭和49年度において22B隔離弁、16B流調弁(ともにバタフライ弁)の試験が予定されている。

一方燃料集合体水流動試験装置では前述のように、“もんじゅ”3次試作燃料集合体、常陽MK-II燃料集合体の水流動試験、局所流路閉

塞試験等が計画されている。

表4に水流動試験施設の今後の経過および今後の予定を示す。

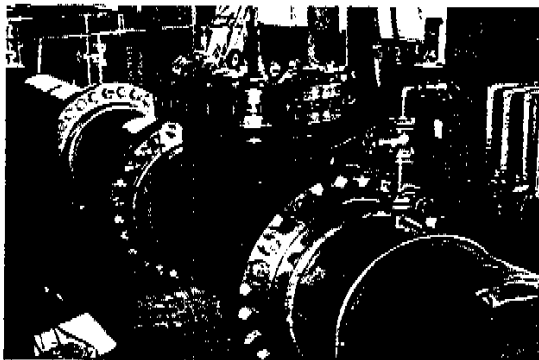


写真3 26B 逆止弁

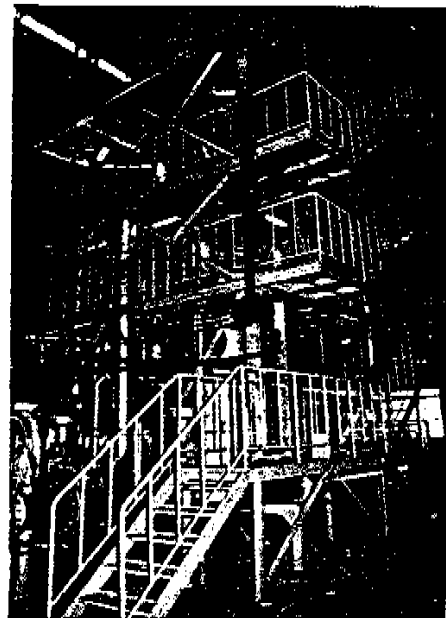
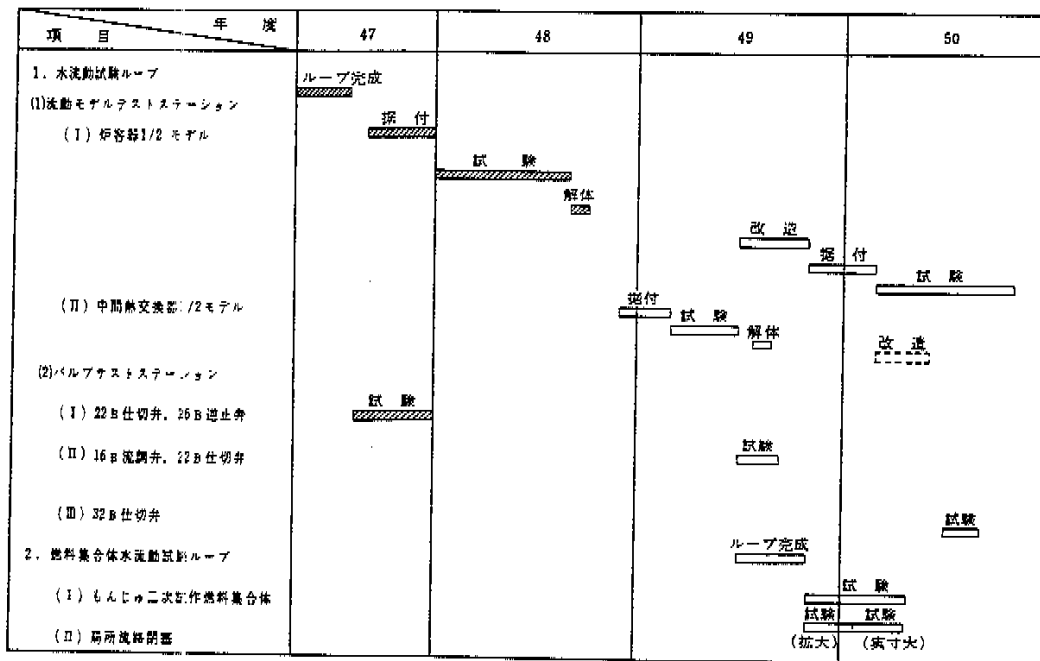


写真4 原子炉モデル3スケール

表3 水流動試験ループに組込まれる試験体

項目	試験体	仕様
1	22 B 仕切弁	主要寸法 約550φ×1,600L×4,000H (mm) 主要材質 ステンレス鋼 形式 ウェッジゲート弁 軸封 フリーズシール 駆動電動
2	26 B 逆止弁	主要寸法 約650φ×1,150L×2,000H (mm) 主要材質 ステンレス鋼 形式 スウィングチェック弁
3	炉容器 $\frac{1}{2}$ モデル	主要寸法 約3,250φ×8,750H (mm) (炉容器実機の約 $\frac{1}{2}$ スケール) 材質 炭素鋼内面亜鉛メタリコン 主要構成要素 1) 炉内構造物 (炉心支持板, パレル構造等) 2) 炉上部機構 (炉内流動に関与する部分のみ模擬) 3) 炉心構成要素 { 炉心燃料集合体 制御棒要素 ブランケット燃料集合体 中性子反射体 (オリフィス孔のみ)
4	中間熱交換器 $\frac{1}{2}$ モデル	主要寸法 約1,350φ×5,950H (mm) (実機の約 $\frac{1}{2}$ スケール) 型式 縦型自由液面シェルアンドチューブ平行向流型 材質 胴、内部構造物等炭素鋼 (接液部は亜鉛メッキ), 伝熱管、黄銅 伝熱管本数 3,220本

表4 水流動試験施設の経過および予定



3. 試験

3.1 22B仕切弁\*、26B逆止弁\*\*

これら大型ナトリウム弁開発の第1段階として、試作試験、水流动試験、ナトリウム中熱衝撃試験等の一連の確認試験が計画され、水流动試験施設による最初の試験として、これらの大型弁の水流动試験を行なった。

22B仕切弁は、「もんじゅ」の主2次冷却系3ループが格納容器を貫通していることから、格納容器の気密性を確保するため貫通部において隔離の機能を果たす必要がある。

したがって通常運転状態では全開の状態で使用される。

このような理由から22B仕切弁に要求される機能としては

- (1) 全閉状態において、漏洩を許さない。
  - (2) 通常運転状態（全開時）で、圧力損失、ひずみ、振動等が小さい。
  - (3) 全開から全閉に到る所要時間が短かく、熱衝撃等に対しても十分な信頼性がある。
- などがあげられる。したがって、これらの試験項目について、水流动試験では下記の事項について実験を行なった。

- (1) 定格流量運転時における全開、全閉所要時間の測定。
- (2) 各弁開度における弁抵抗係数、容量係数の測定。

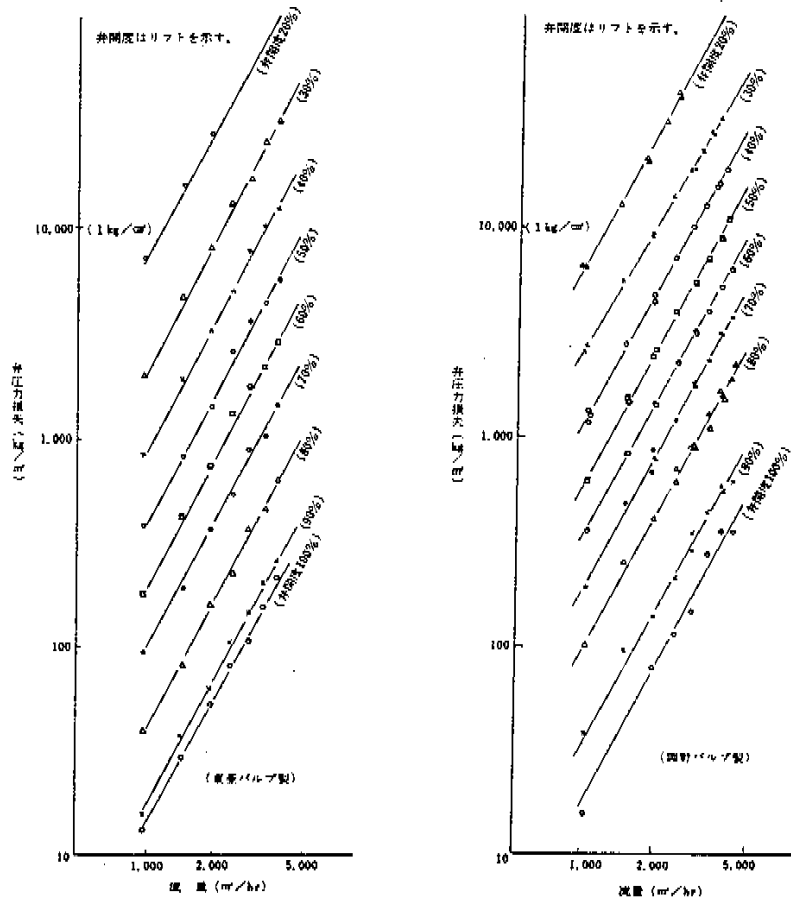


図4 22B仕切弁の各弁開度における流量と弁圧力損失の関係

\* SN941 73-35 高速原型炉「もんじゅ」ナトリウム用大型仕切弁(22B)水流动試験

\*\* SN941 73-36 高速原型炉「もんじゅ」ナトリウム用大型逆止弁(26B)水流动試験

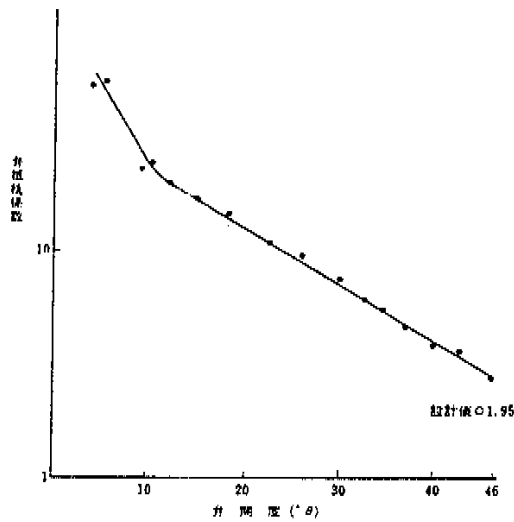


図5 26B 逆止弁の弁抵抗係数と弁開度の関係

(3) 各弁開度、流量におけるひずみ、振動の測定。

以上の試験終了後、弁各部の分解、点検調査を行なったが、変形、焼付等の異常もなく水中試験の結果からは問題ないと考えられる。対象となった22B仕切弁2種類についての特性を図4に示す。

図4から、これら22B仕切弁の抵抗係数を求めた場合、設計値に比較してあまり相違が見られなかった。このことは従来の小口径仕切弁の設計計算が大口径仕切弁に対しても妥当であることを示している。

このように流動特性として小口径のバルブの外挿は可能であるが、弁抵抗係数以外に測定したものとして弁体と弁座の水中の摩擦係数、弁体上昇時の弁棒張力等を考えると、ナトリウム中での表面精度の変化、フリーズしたナトリウムの影響があり、まだ多くの確性試験を必要とする。

一方26B逆止弁は、“もんじゅ”の主1次冷却系コールドレグ側に配置されたポンプの下流側に設けられる。

したがってこの原子炉冷却系が何らかの原因により破断した場合、あるいはポンプスティック事故、電源喪失事故等の生じた場合には原子炉容器下部プレナムからポンプへの逆流が発生すると考えられ、これを防止する機能が要求さ

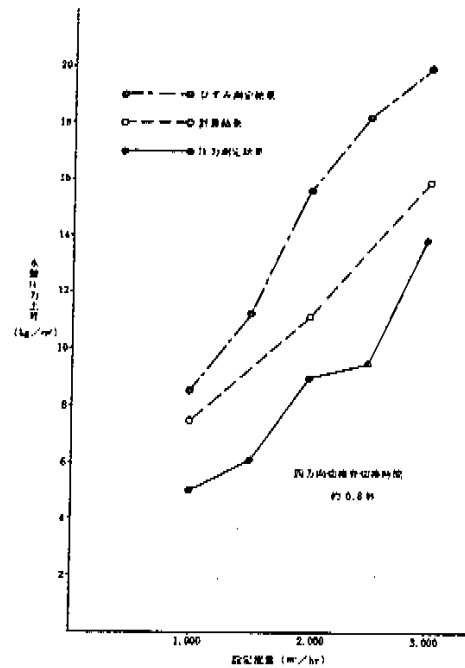


図6 26B 逆止弁設定流量と水撃圧力上昇の関係  
また定格運転時、燃料交換時等の低流量運転状態においても、圧力損失が小さく流量が確保されるように設計されなければならない。

このようなことから、逆止弁に対して要求される機能は

- (1) 定格運転状態で全開とし、弁体の振動もなく、圧力損失が小さい。
- (2) 逆流の生ずるいかなる過渡条件においてもナトリウムハンマを十分小さくするよう作動する。
- (3) 燃料交換時等の低流量運転状態において圧力損失を十分小さくして、自然循環流量も確保できるようにする。

などがあげられ、特に(2)について種々のケースで試験した。これらについて試験した結果の一部を図5、図6に示す。図5は弁開度に対する弁抵抗係数であり、図6は四方向切換弁の切換時間が最小(0.8秒)の場合における水撃圧力上昇について測定結果、計算結果、ひずみ測定結果を示したものである。

図5において弁開度と弁抵抗係数の関係は同種8Bの逆止弁と傾向、値とも類似している。しかし弁抵抗係数に与える要因として弁体支持

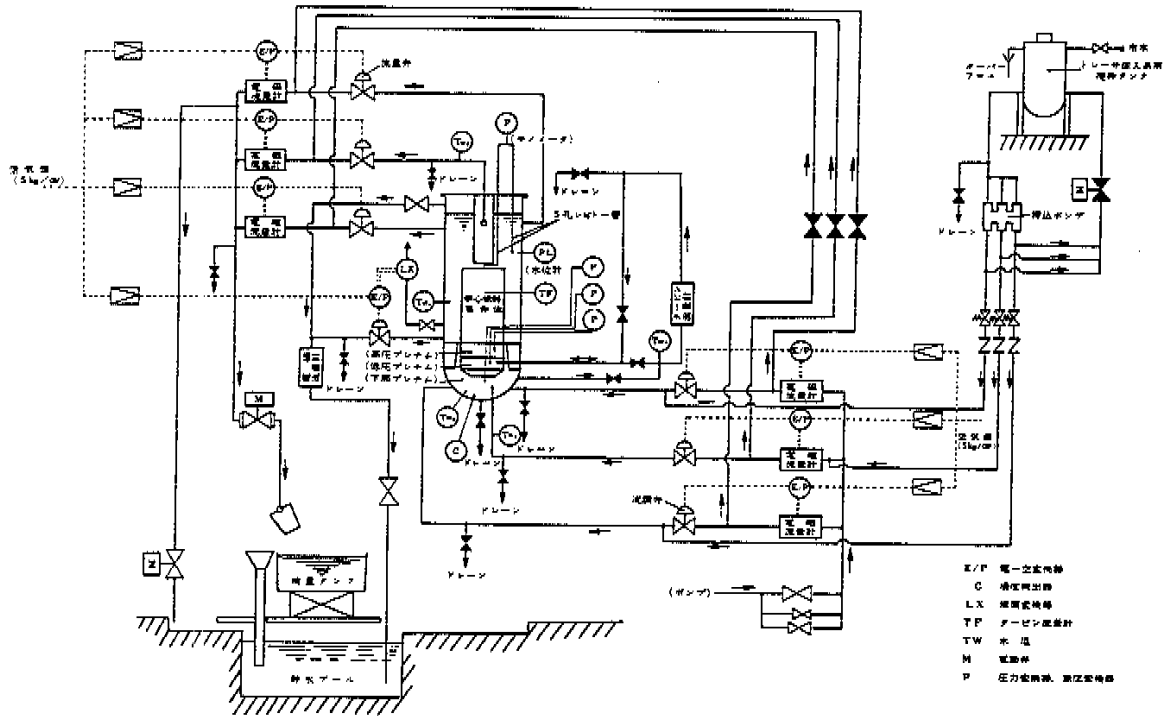


図7 原子炉 $\frac{1}{2}$ モデル系統図

部の摩擦の影響があり、(支持部はナトリウム中での固着を避けるためナイフエッジ構造になっているが)これがナトリウム中で弁抵抗係数にどれほど効くか確認する必要があり、後述のナトリウムハンマにも影響を与えるであろう。

図6では圧力測定については配管内の空気混入、圧力検出端と配管内面間距離の複振幅の評価、計算結果については配管要素区分、盲端、配管曲がり部の処理、ひずみ測定結果についても静的内圧応力と衝撃圧の相違、弁全体の内圧によるひずみと片側圧力によるひずみの相違等種々の問題が生じ、各々に検討を加え、評価する必要がある。

本試験結果は水流動試験装置における結果であり、逆止弁前後の配管状況は“もんじゅ”実機と全く異なるものであるが図6におけるこれらの相違を吟味することによって実機におけるナトリウムハンマを推定することは可能である。

また水撃試験を行なう場合、配管内の空気混入は許されないが、大口径の配管では特にエア抜きが困難で一部高くなった場所ではエアが溜まりやすいので充分注意しなければならない。

### 3.2 原子炉 $\frac{1}{2}$ モデル\*

原子炉 $\frac{1}{2}$ モデル試験では、“もんじゅ”炉容器内各部とくに炉心部における種々の運転状態での冷却材流動状況、流量配分を知ることを主目的としている。

したがって前述のようにこれらの試験に先立ち、 $\frac{1}{2}$ モデルによる各プレナム内の流動試験、エントランスノズル部におけるキャビテーション試験、<sup>\*\*</sup> 高压プレナム内管群試験、燃料集合体実尺モデルによる単体流動試験等の部分試験を行なっている。<sup>\*\*\*</sup>

試験内容は原子炉 $\frac{1}{2}$ モデル内全般にわたる流動試験と、模擬燃料集合体、模擬制御棒などの流動特性を測定する単体ループによる単体流動

\* S J 201 74-05 「もんじゅ」炉内構造水流動試験

\*\* S J 201 73-09 エントランスノズルキャビテーション試験

\*\*\* S J 201 73-08-(1) 「もんじゅ」水流動試験装置用試験モデル部分試験

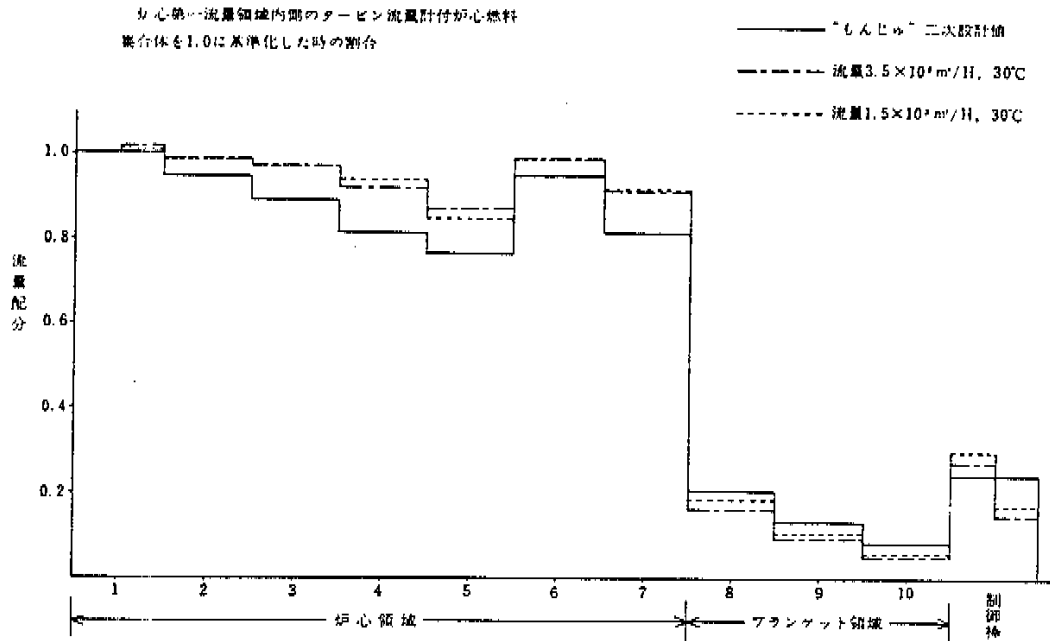


図8 設計値に対する炉内流量配分

試験からなる。

単体流動試験は、炉心構成要素各々について流量-圧損特性のバラツキを調べ、統計的な処理が可能と考えられる本数について行なうと同時に単体流動試験でどれだけ原子炉モデルにアプローチできるかを知る目的も有している。

各種炉心構成要素には下記のように一部タービン流量計付の燃料集合体が入っており、タービン流量計の較正も行なっている。

炉心構成要素	流量計付本数	炉心本数(1)
炉心燃料集合体	25体	196体
ブランケット燃料集合体	9体 (各領域3体)	176体(2)
制御棒	6体	19体

(1)この他に予備(流量計付ではない)が各々10、4、1体づつある。

(2)中性子源2体をブランケット燃料集合体で代用している。

単体流動試験を行なったものは、流量計付燃料集合体については全数、他は炉心燃料集合体10体、ブランケット燃料集合体30体(各領域10体)、制御棒3体についてであり、炉心燃料集合体は流量領域5種類と組合せて試験している。

またこれら以外にスリーブ、連結管、中性子

反射体の単体試験、さらに試験終了後には前記の単体流動試験を行なったものについて一部、事後検査を行なっている。

一方原子炉モデル内全般にわたる流動試験としては、下記について試験した。

#### (1) 炉心流量配分試験

流量計付燃料集合体の装荷位置、流量を変えて実験を行ない、炉心の流量分布を明らかにすると同時に高、低圧プレナム内の各静圧測定点で圧力を測定して圧力分布を知り、流量計の設置されていない燃料集合体の流量を単体試験の結果を用いて推定する。

また流量計付燃料集合体の周囲の集合体に盲蓋を施し、プレナム中の流動状態を変えて、周囲との干渉効果を調べたり、ブランケット燃料集合体の一部を抜取って試験し、試験条件範囲を広げて精度をあげるなど、特殊な操作をも行ない、流量配分に影響する因子を明確にする試験も行なった。(図8参照)

#### (2) 上部プレナム内流動試験

炉心から炉容器に到る噴流、出口ノズル付近の流れ等の要所を、5孔ヨーメータ、塩水注入後、吹き流し等によって調べ、縮尺モデルでの流動状態との相似性を確認し、液面

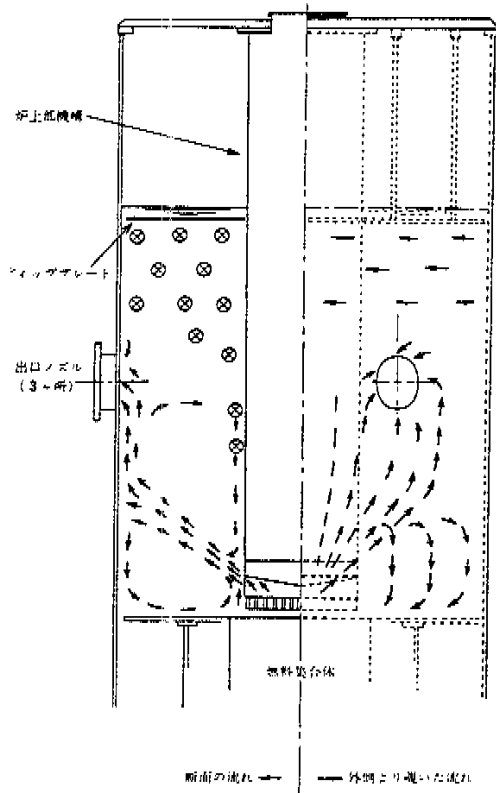


図9 上部プレナム内流動状態

変動、カバーガス巻き込みは実機とフルード数を合せて（フルード数の一致は可能である。）肉眼観察や写真撮影を行なった。（図9参照）

(3) 下部プレナム内流動試験

入口ノズルの一つから塩水を注入し、下部プレナム内に設置してある濃度検出器の応答から流動混合状態を推定し、縮尺モデルにおける流動状態との相似性を調べた。

(4) 2ループ運転時、1ループ運転時試験

2ループおよび1ループ運転状態において、上記(1)~(3)項の試験について実施し、特殊な状況における流れを調べその影響範囲を調べた。

(5) 燃料交換時流動試験

各領域の燃料集合体を1体抜取った状態で、それぞれ炉心流量配分、高、低圧プレナム内圧力分布を測定する。実際の燃料交換は、定格時流量よりはるかに流量を下げた状態で行

なわれるが、低流量では測定精度が悪くなるため1ループ運転で行ない、1台の電磁流量計に多流量流し、((4)の試験経験から1ループ運転でも下部プレナム圧力分布には影響するが、高圧プレナムまでには大きな影響がないことがわかった。)さらに低流量状態まで挿入する。

(6) その他

(1)の流量配分に影響する因子を明確にする試験の一つとして、エントランスノズルに圧力タップを設けて（オリフィス孔のないエントランスノズルに）、管周囲の圧力分布、特に高、低圧プレナム内の高さ方向の圧力分布を調べた。また同時にオリフィス孔径の種々に異なったエントランスノズルを挿入し、流量配分の変化も調べた。

図7に原子炉 $\frac{1}{2}$ モデル系統図、図8、図9に試験結果の一部として、設計値に対する炉内流量配分の結果、上部プレナムの流動状態を示す。

図8は炉心第1流量領域内側の炉心燃料集合体を基準にした炉内各流量領域の配分割合であり、単体流動試験による補正を加えたうえでもまだ設計値との相違がある。（図8はタービン流量計の補正は行なっているが、抵抗係数の補正は行なっていない。しかし抵抗係数の補正を行なっても相違がある。）これを炉心支持板間の圧力分布から見れば、巨視的にはブランケット領域における流速増加にしたがい、静圧が降下し、炉心の吹込み領域ではほぼ一定になるという傾向ではあるが、微視的には各点の静圧分布のばらつきが大きく隣接するエントランスノズルの相互作用等があり、単体流動試験からこれを推定することは困難である。しかし管群試験等の部分試験を加えることによってその相違を説明することは可能である。

図9の上部プレナム流動状態は縮尺モデルと比較し主流においてほぼ相似であるが出口ノズルより上部の緩やかな2次流れについては多少相違があり、この2次流れがカバーガス巻き込みの原因となることもあり、今後検討を要する。

以上原子炉 $\frac{1}{2}$ モデルの試験についても燃料集合体内のタービン流量計の故障、電磁流量計の

小流量時の測定精度、5孔ヨーメータによる上部プレナムの流速測定の困難さ、圧力変換器の精度等種々の問題があったが、実験方法の工夫、装置に少し改良を加え以上の問題を補うことができた。しかし今後50年度に計画されている試験ではこれらの経験を踏まえた上で行なう必要がある。

#### 4. あとがき

以上水流動試験施設の概要と一年半の試験経験について簡単に紹介した。この試験施設は実機の $1/10$ スケールを基調とした大容量のループであるため、試験上、また運転上種々の困難な問題に遭遇したが、それらを乗り越え、順調に試験してきたと首肯するであろう。

さらに今後の計画として2に述べたように中間熱交換器 $1/10$ モデル水流動試験、配管破断時流動安全性試験、大型バルブ水流動試験があり、燃料集合体水流動試験ループの完成に伴って“もんじゅ”2次試作燃料集合体の水流動試験等も加わるであろう。この試験ループでは水流動試験ループに較べ小回りが効くため測定機器についての知識、試験経験が積み重ねられるものと期待してされる。

したがって今迄の経験を生かしたより有効な資料の蓄積とナトリウムの資料の蓄積からそれらの相関をより明確にしてゆく必要がある。

最後に当試験施設以来、御尽力下されたFBR開発本部原型炉グループの方々に謝意を表して、結びの言葉とする。