

# BWRプラント主蒸気隔離弁の漏えい試験

## Leakage Tests of Main Steam Isolation Valve for BWR

雨 宮 滋\* 加 藤 浩\*  
Shigeru Amamiya Hiroshi Katô

Main steam isolation valves for BWR must prevent reactor coolant from being released into the environs from primary containment in case a main steam line breaks down. Therefore, low leakage rate and positive performance are the most essential factors in the design of main steam isolation valves.

Eight of this important valve which were recently delivered to the Shimane Nuclear Power No. 1 Station, Chugoku Electric Power Co., were subjected to various leakage tests and 500-cycle performance tests at the Hitachi Works preceding their shipment, thereby to confirm their performance.

In this article, the author introduce the results of the tests which were extremely satisfactory.

### 1. 緒 言

BWR原子力発電プラントにおいては、図1に示すように原子炉圧力容器で発生した蒸気を主蒸気管を通して直接タービンに送り、タービンを駆動させ発電している。

この主蒸気管の格納容器外部における破断事故時に、原子炉一次冷却水の流出を防止するため、主蒸気管の格納容器の内側と外側には主蒸気隔離弁が設けられている。主蒸気隔離弁は空気(窒素)作動式で、主蒸気管破断事故時には原子炉保護系統からの閉鎖信号により空気(窒素)圧およびスプリングによって閉鎖されるが、その機能上、作動の確実性および漏えい率が低いことが特にきびしく要求される。

中国電力株式会社島根原子力発電所第1号機用の主蒸気隔離弁8台については、現地据付前に弁の作動性を確認し、漏えい量をチェックするために蒸気および常温ならびに高温状態の窒素ガスによる漏えい試験、作動試験を日立製作所日立工場において行なってみた。

本稿は8台のうち最初に500回作動試験を行なった1台の弁の試験結果を中心にしてまとめたものであるが、他の7台の弁の試験結果もほぼ同様に満足すべき結果が得られている。

このような試験はわが国でもデータが少なく、その成果は今後のプラントに使用される弁にも反映し、よりすぐれた安全性を確認することができよう。なお、主蒸気隔離弁は今まで国内での製作実績がなくすべてアメリカメーカーからの輸入にたよっていたが、本試験の結果により国産化も間近になるとの自信が得られた。

以下、試験および試験結果について述べ、さらに原子炉安全解析(原子炉格納容器外の主蒸気管破断事故時の被ばく線量評価)との関連についても言及する。

### 2. 漏 え い 試 験

#### 2.1 試験の目的

下記の事項を目的に蒸気圧下での漏えい試験および作動試験ならびに窒素圧下での漏えい試験を行なった。

\* 日立製作所日立工場

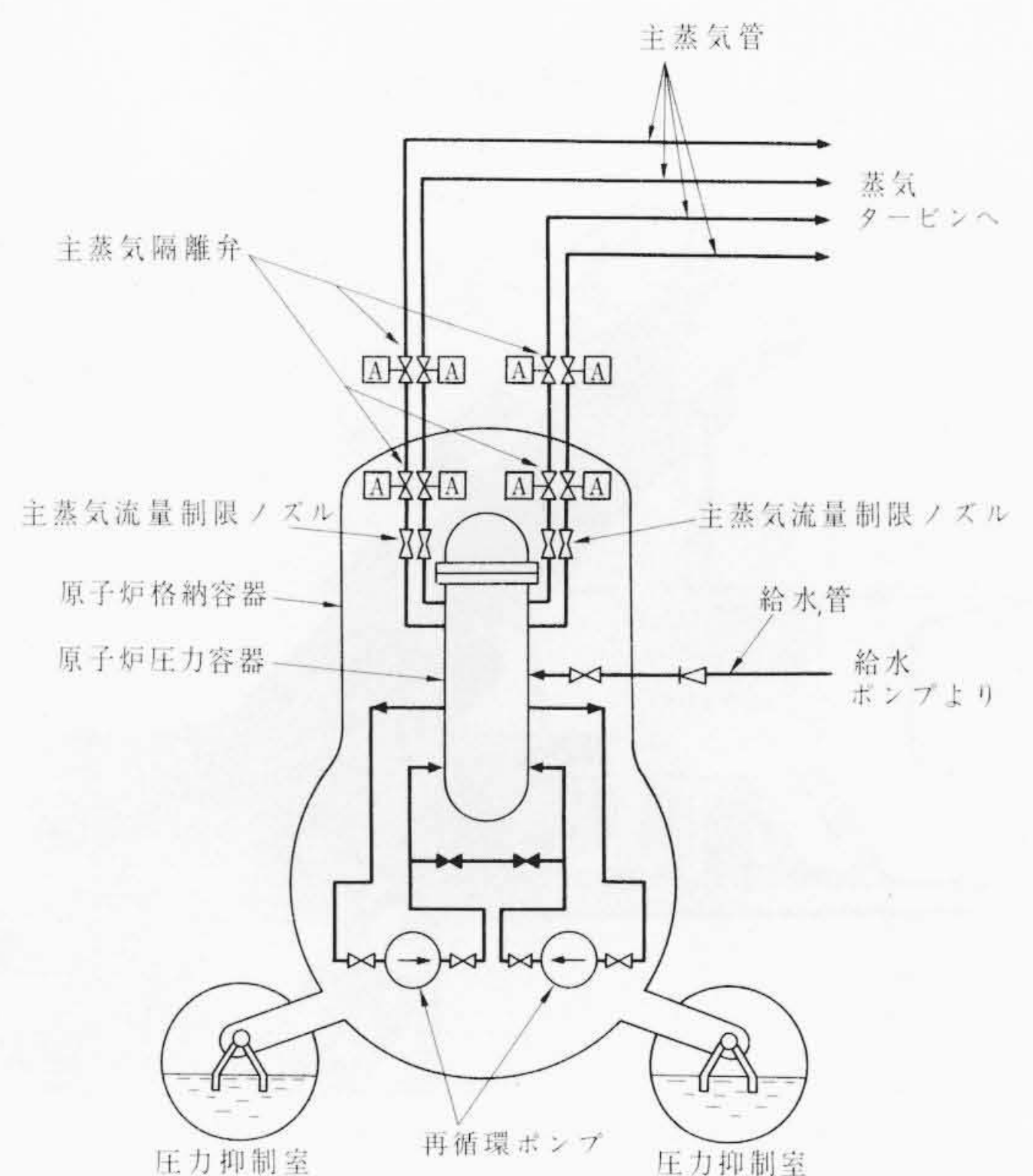


図1 BWR発電プラント原子炉まわり系統概要図

- (1) 弁座部およびグランドパッキング部の漏えい量を測定し、許容漏えい量以下であることを確認すること。
- (2) 試験条件の違いによる弁の漏えい量の変化を把握(はあく)すること。
- (3) 実際のプラント運転状態に近い蒸気圧下での繰返し作動試験による漏えい量の変化および弁の耐久性を確認すること。
- (4) 弁の漏えい試験方法の妥当性の検討を行なうこと。

#### 2.2 主蒸気隔離弁の仕様

試験を行なった主蒸気隔離弁のおもな仕様は下記のとおりである。

|       |                                           |
|-------|-------------------------------------------|
| 形 式   | Y形玉形弁                                     |
| 称 呼 径 | 口径16in, ステム径1 3/4in                       |
| 設計圧力  | 87.9kg/cm <sup>2</sup> g                  |
| 設計温度  | 302°C                                     |
| 弁箱材質  | ASTM-A216(WCB)                            |
| 弁作動源  | 空気圧または窒素圧6.3kg/cm <sup>2</sup> g, およびスプリン |

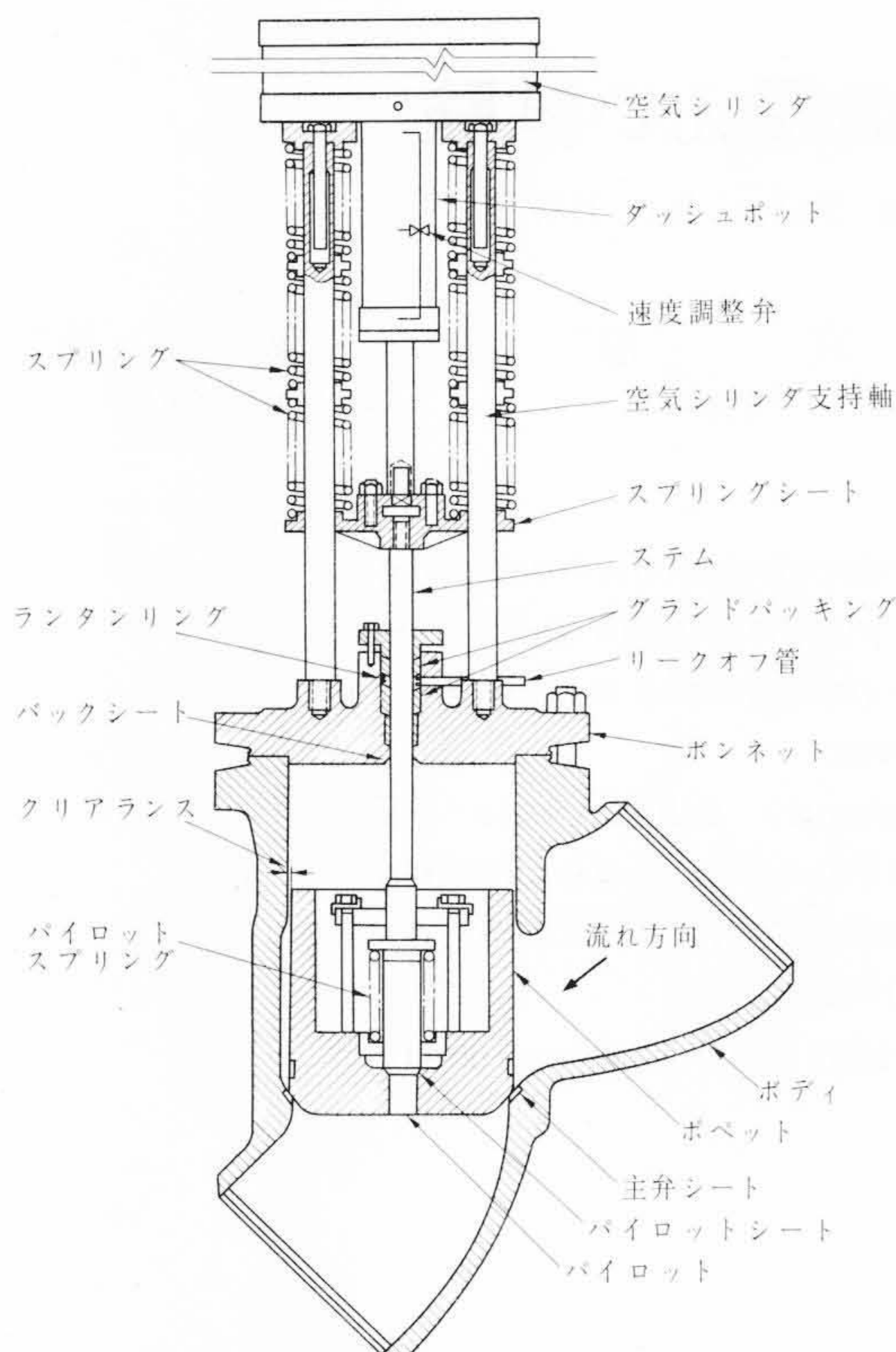


図2 主蒸気隔離弁構造図

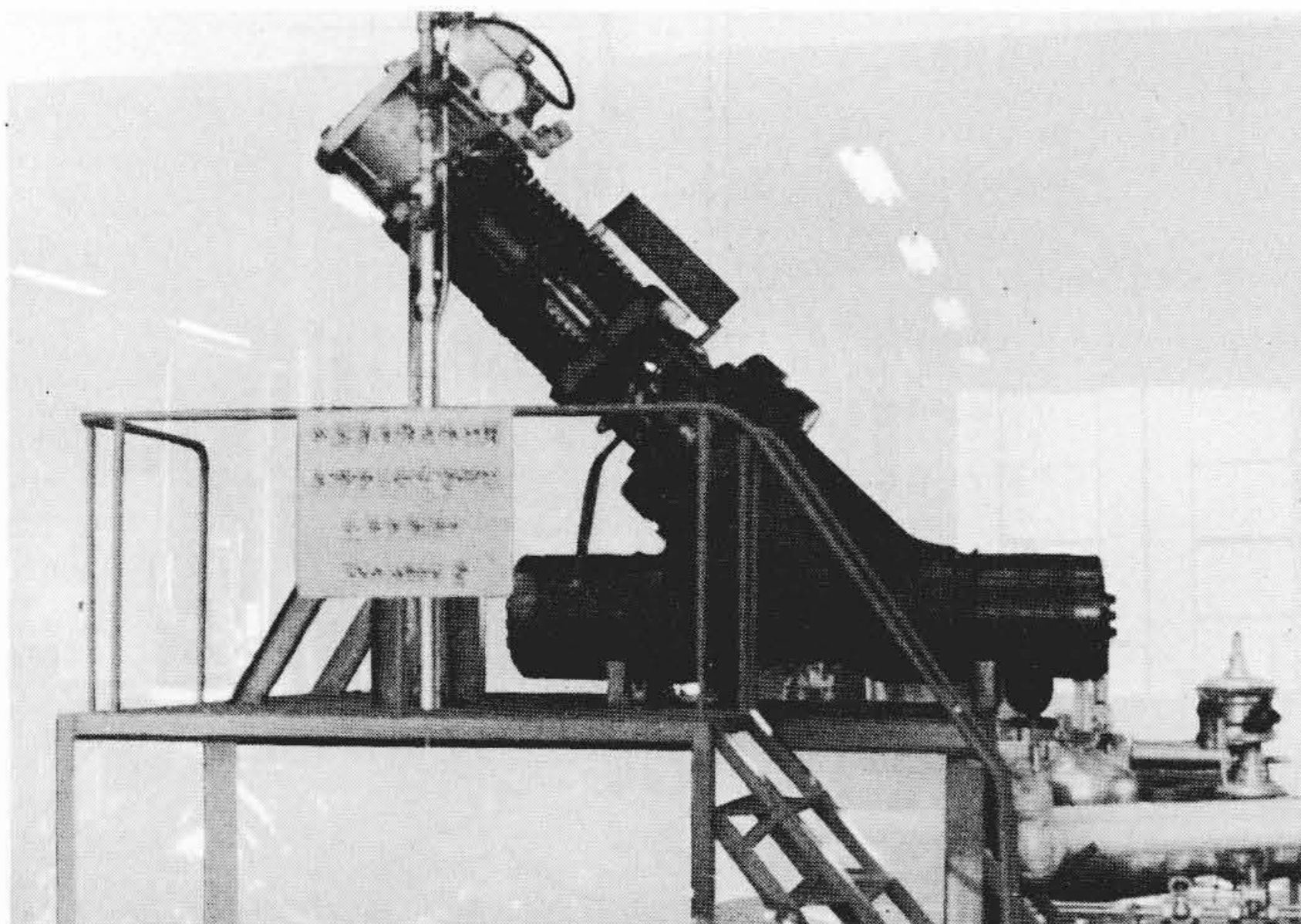


図3 試験装置に取り付けられた主蒸気隔離弁

グ力（ただし、スプリング力は閉作動側のみ）

製作者 日本シールオール CO. LTD  
(ATWOOD & MORRILL CO.)

図2および図3は、それぞれ主蒸気隔離弁の構造および試験装置に取り付けられた主蒸気隔離弁を示したものである。主蒸気隔離弁のおもな特徴および構造は下記のとおりである。

- (1) 弁形式はY形玉形弁で、主弁のポベットの流れ方向に対し、45度の角度で動作し、蒸気流は弁を閉鎖させる方向に流れるようになっている。
- (2) ステム先端はポベットのパイロット穴を閉鎖するようになっており、このパイロット穴を開き弁入口側と出口側を均圧した後、ポベットの構造になっている。
- (3) グランドパッキングは交換可能な二組の山形のパッキングをランタンリングの上下に各一組入れ、ランタンリングの部分にはリークオフ管を設けている。
- (4) 弁全開時のグランドパッキングからの漏えい防止にはバック

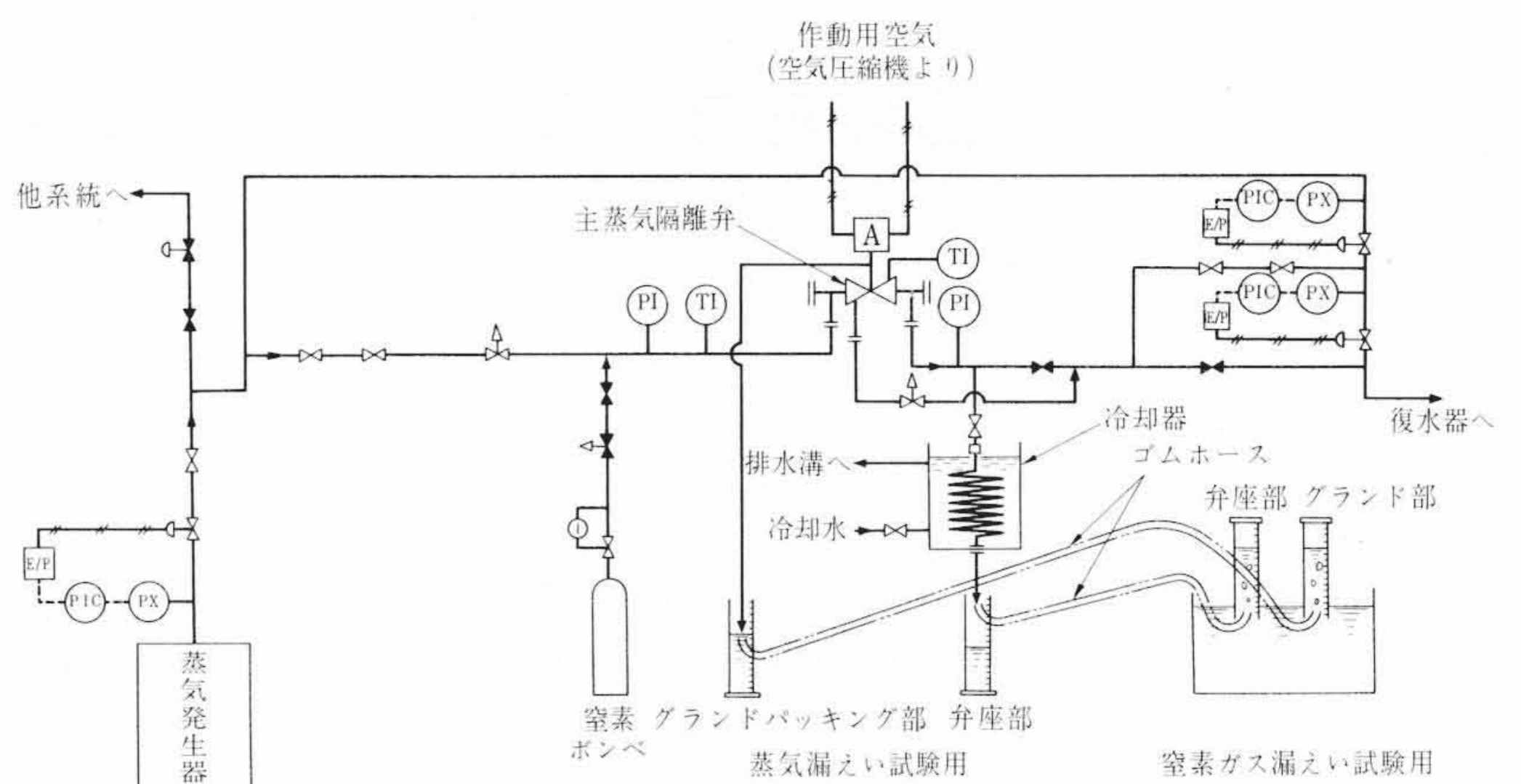


図4 主蒸気隔離弁漏えい試験装置系統図

シートを採用している。

- (5) ボンネットは取りはずし可能なように弁本体にボルトで取り付けられ、必要に応じてシール溶接も可能な形状である。
- (6) ステムの上部は空気シリンダとダッシュポットに接続されている。ダッシュポットは弁の速度調整に用いられ、弁閉鎖時間を3～10秒の間で調整できるようになっている。空気シリンダはボンネットにねじ込んだ支持軸で支持され、この支持軸は空気圧喪失時に弁を閉鎖するためのスプリングの案内軸にもなっている。

## 2.3 試験装置

本試験に用いた試験装置の系統図は図4に示すとおりである。本装置において蒸気配管には保温を施し、できるだけ実際のプラント運転状態に近い蒸気条件にする。装置の概略仕様は下記のとおりである。

### (1) 蒸気発生装置

|    |                           |
|----|---------------------------|
| 圧力 | 最高350kg/cm <sup>2</sup> g |
| 温度 | 最高650℃                    |
| 容量 | 2 t/h                     |

### (2) 空気圧縮機

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| 形式     | 立形オイルレス圧縮機                |
| 圧力     | 7 kg/cm <sup>2</sup> g    |
| 容量     | 最高4.2Nm <sup>3</sup> /min |
| 空気そう容量 | 0.43m <sup>3</sup>        |

### (3) 窒素ガス供給装置

|    |                           |
|----|---------------------------|
| 形式 | 窒素ガスボンベ                   |
| 圧力 | 最高150kg/cm <sup>2</sup> g |
| 容量 | 7 Nm <sup>3</sup> /本      |

## 2.4 試験要領

### 2.4.1 窒素圧下（常温）の漏えい試験

閉鎖した弁の上流側より窒素ガス圧力を加え、弁座およびグランドパッキングからの漏えい窒素ガスをそれぞれ別の水そうに導きメスシリンダにより捕獲し漏えい量を測定する。測定時間は漏えいの度合いにより変わるが、1～5分としている。

### 2.4.2 蒸気圧下の漏えい試験

#### (1) 弁座部

弁を全開にしておき、蒸気を通して弁を含む蒸気配管を暖気し、弁各部の壁温が安定したことを確認して弁を閉鎖する。その後、弁下流の止め弁を閉鎖し、内部蒸気を冷却器にて冷却復水しながら大気に放出し弁下流の圧力を大気圧にする。内部蒸気が完全に除去され復水量が一定になるまで約30分を要し、その後、復水をメスシリンダに受けて漏えい量を測定する。測定時間は10分としているが、漏えい量が少ない場合は30分に延長

している。

(2) グランドパッキング部

あらかじめ水を入れたメスシリンダ中にグランドパッキングのリークオフ管より導いた漏えい蒸気を入れて復水し、メスシリンダ中の水量の増加分を測定する。測定時間は漏えいの度合いにより変わるが3～10分としている。

2.4.3 窒素圧下（高温）の漏えい試験

蒸気圧下の漏えい試験が終わった後、弁の壁温が高温状態のうちに窒素を弁の上流に封入し、2.4.1と同じ方法で弁座およびグランドパッキングからの漏えい量を測定する。

2.4.4 蒸気圧下500回繰返し作動試験

2.4.2と同じ方法で弁を暖気し弁各部の壁温が安定したならば、蒸気を通した状態で弁が正常に開閉できることを確認後、弁閉鎖速度を5秒に調整し500回繰返し作動試験を行なう。

作動回数100回ごとに、弁座およびグランドパッキングからの漏えい量を測定する。また、試験途中でも必要に応じてグランドパッキングの増し締めあるいは、交換を行ない、それを記録する。

2.5 許容漏えい量

2.5.1 基準許容漏えい量

弁組立完成後の基準許容漏えい量としては弁製作仕様値である下記の値とする。

|        |                                                              |
|--------|--------------------------------------------------------------|
| 試験圧力   | 4.4kg/cm <sup>2</sup> g (原子炉格納容器の最高圧力)                       |
| 試験温度   | 常温 (20℃)                                                     |
| 試験流体   | 窒素ガス                                                         |
| 許容漏えい量 | 1.1×10 <sup>-3</sup> Nm <sup>3</sup> /h/cm 以下 <sup>(1)</sup> |

ここに、漏えい量は弁座部に対しては弁称呼径1cmあたり、グランドパッキング部に対してはステム径1cmあたりの値である。

2.5.2 高温高压時の許容漏えい量

窒素ガス高温高压時および蒸気圧力下の漏えい量については、高温高压時における弁体の変形の度合および窒素ガスと蒸気の漏えい量の相関関係など現時点では明確になっていないため、下記の方法により求めた値を高温高压時の漏えい量の許容値とする。

(1) 計算方法

計算モデルにはオリフィスモデルを使用する。このモデルは、現在、原子炉格納容器外の主蒸気管破断事故時の被ばく線量評価において主蒸気隔離弁の漏えい量算出に用いられているモデルである。オリフィスモデルの計算式は(1)式に示すとおりである。

表1 各試験条件における許容漏えい量

| 試験条件 |    | 試験圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g) | 試験温度 (℃) | 許容漏えい量 (弁座部, グランドパッキング部)                    |              |                     |
|------|----|-----------------------------|----------|---------------------------------------------|--------------|---------------------|
|      |    |                             |          | 弁称呼径, ステム径 1cmあたり                           | 弁1個あたり (弁座部) | 弁1個あたり (グランドパッキング部) |
| 窒素圧下 | 常温 | 4.4                         | 20       | *1.1×10 <sup>-3</sup> Nm <sup>3</sup> /h/cm | *44 NI/h     | *4.8 NI/h           |
|      |    | 25                          | 20       | 12.7×10 <sup>-3</sup> "                     | 510 "        | 56 "                |
|      |    | 70                          | 20       | 58×10 <sup>-3</sup> Nm <sup>3</sup> /h/cm   | 2,360 NI/h   | 250 NI/h            |
|      | 高温 | 3.95                        | **200    | 0.76×10 <sup>-3</sup> Nm <sup>3</sup> /h/cm | 31 NI/h      | 3.4 NI/h            |
|      |    | 25                          | **       | 10×10 <sup>-3</sup> "                       | 410 "        | 45 "                |
|      |    | 70                          | **200    | 46×10 <sup>-3</sup> Nm <sup>3</sup> /h/cm   | 1,870 NI/h   | 200 NI/h            |
| 蒸気圧下 |    | 10                          | ***183   | 2.9 cc/h/cm                                 | 120 cc/h     | 13 cc/h             |
|      |    | 25                          | ***225   | 11 "                                        | 440 "        | 48 "                |
|      |    | 55                          | ***270   | 37 "                                        | 1,500 "      | 160 "               |
|      |    | 70                          | ***285   | 55 cc/h/cm                                  | 2,240 cc/h   | 240 cc/h            |

\* 基準許容漏えい量。

\*\* 本試験は70kg/cm<sup>2</sup>g蒸気圧下漏えい試験の直後に行なうが、窒素ガス注入後、温度が下がるため、その落ち着いたところの温度を200℃と仮定した。

\*\*\* 各試験圧力における飽和温度。

$$L_a = L_s \left( \frac{P_a \cdot R_a \cdot T_a}{P_s \cdot R_s \cdot T_s} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $P$ ：圧力 (kg/cm<sup>2</sup>g)  
 $R$ ：ガス定数 (kg・m/kg・°K)  
 $T$ ：温度 (°K)  
 $L$ ：各圧力、温度における漏えい量 (m<sup>3</sup>/h)  
添字  $s$ ：基準試験状態  
 $a$ ：任意試験状態

高温高压時の許容漏えい量としては、基準試験状態において、2.5.1に示した各値を用い、(1)式より算出する。各試験条件下における許容漏えい量の算出結果は表1に示すとおりである。

2.6 試験結果および結果の検討

2.6.1 窒素圧下の弁座漏えい試験（常温）

窒素圧下（常温）における500回繰返し作動試験前後の弁座漏えい量は図5に示すとおりである。

実測漏えい量は最大23NI/hで、弁製作仕様値4.4kg/cm<sup>2</sup>gでは最大11NI/hと弁製作仕様値44NI/h（表1参照）の1/4に収まっている。大気圧の状態を弁を閉鎖して徐々に試験圧力を昇、降圧させた場合は同一試験圧力でも降圧時のほうが漏えい量は低い値を示しているが、これは圧力によって弁体が弁座にかなり食い込んでいるためと考えられる。また、500回繰返し作動試験前の昇圧方向での漏えい量が中間圧力で増大しているのは、初期の試験であったために弁体が完全になじんでおらず、弁座のあたりがなめらかでなかったためと考えられる。500回繰返し作動試験後、各試験圧力ごとに弁を1回開閉した後の漏えい量は、大気圧の状態を弁を閉鎖して徐々に昇、降圧させた場合に比べて同一試験圧力においても大きくなっているが、これは弁を開閉することにより、弁体の弁座部への食い込みが除かれるためと考えられる。

2.6.2 窒素圧下のグランドパッキング漏えい試験（常温）

500回繰返し作動試験中に二度のグランド増し締めを行なったが、500回繰返し作動試験前には試験圧力70kg/cm<sup>2</sup>gにおいて、漏えい量1NI/h以下であったのが、500回繰返し作動試験後では同じ試験圧力において130NI/hと130倍以上の漏えい量を示した。

2.6.3 窒素圧下の弁座漏えい試験（高温）

窒素圧下（高温）における500回繰返し作動試験前後の弁座漏えい量は図6に示すとおりである。

500回繰返し作動試験後の漏えい量が試験前に比べ著しく減少しているが、このことは作動試験により弁座のあたりがなめらかになったものと考えられる。ただし常温の窒素ガスを弁上流側に

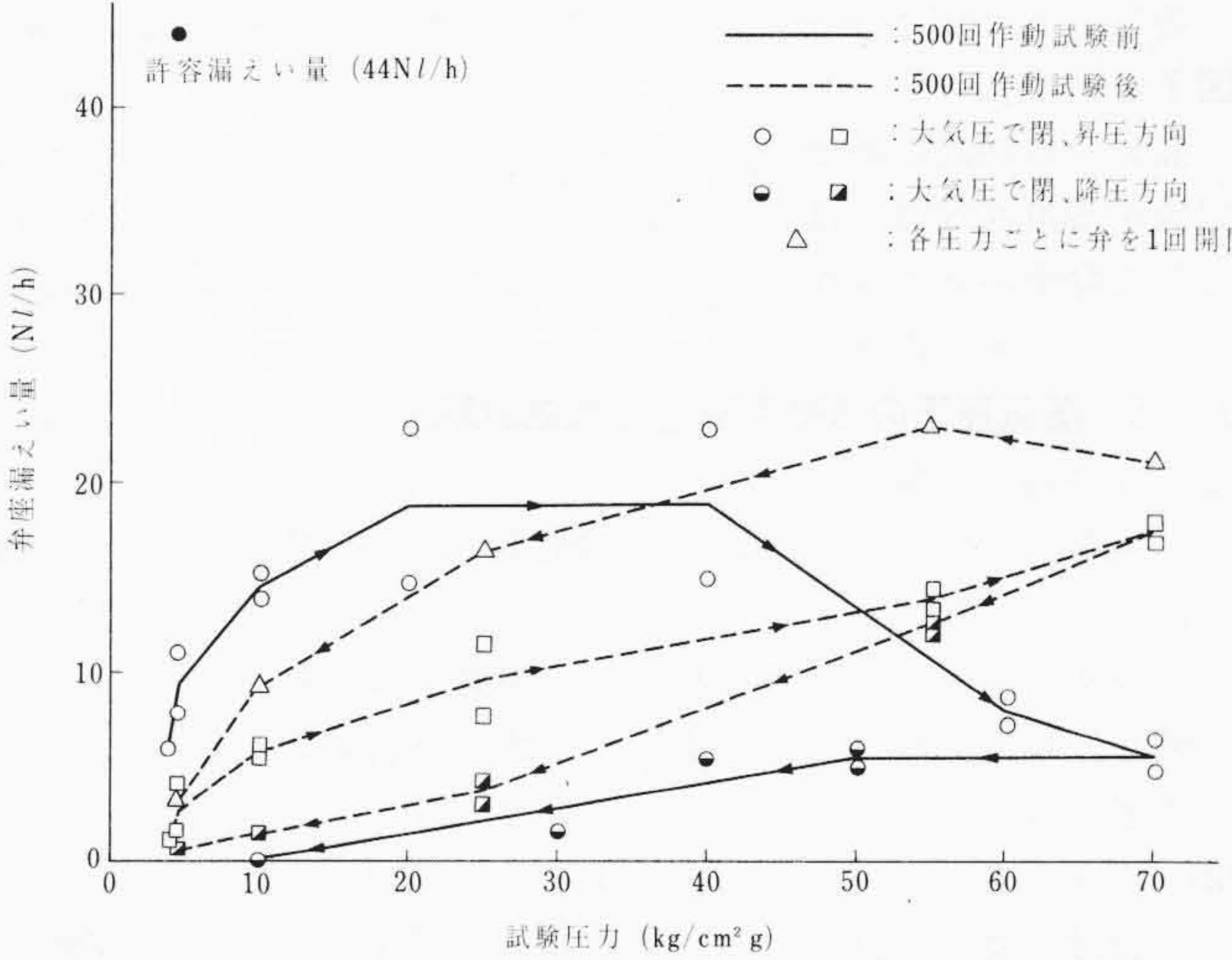


図5 窒素圧下弁座漏えい試験結果（常温）

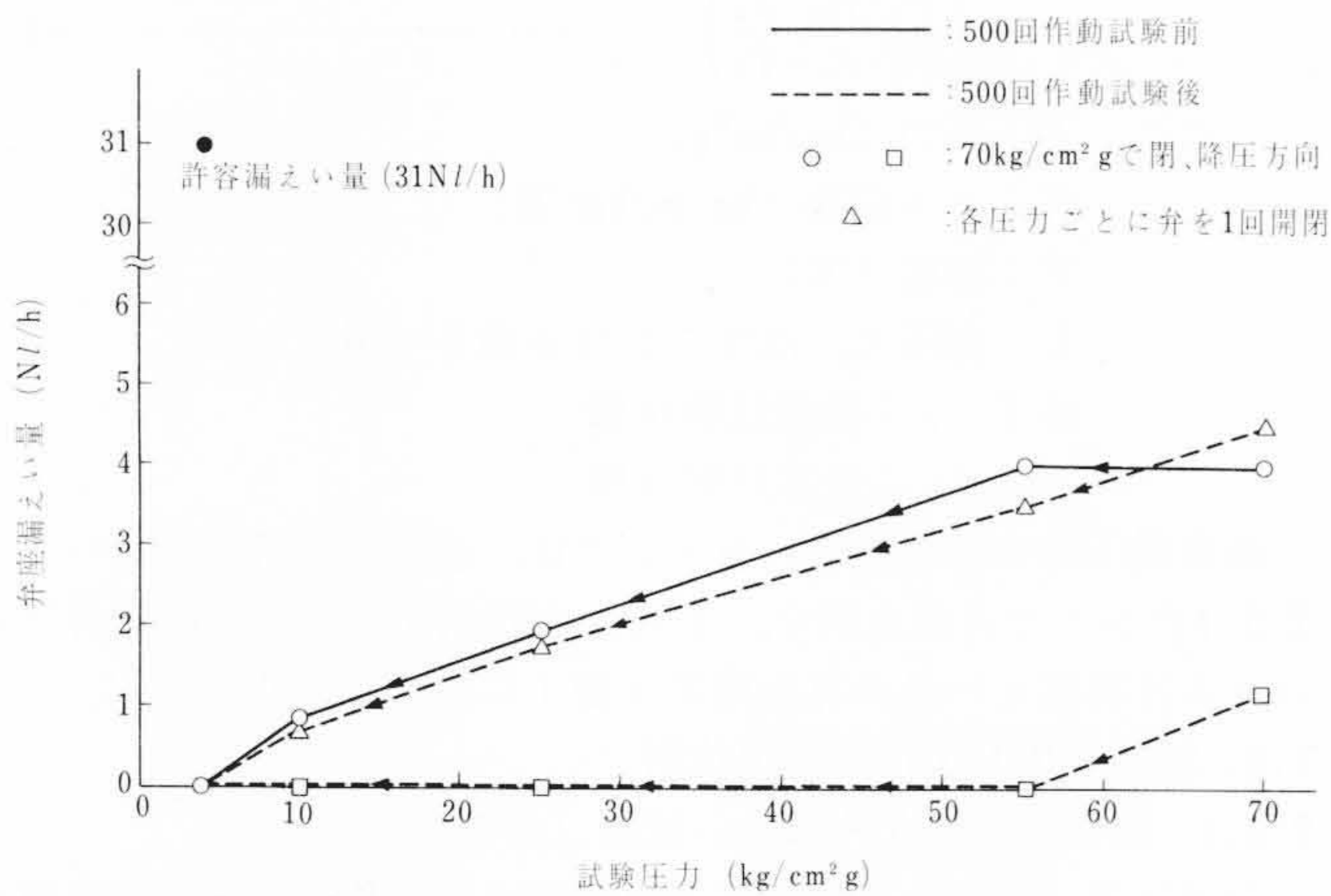


図6 窒素圧下弁座漏えい試験結果(高温)

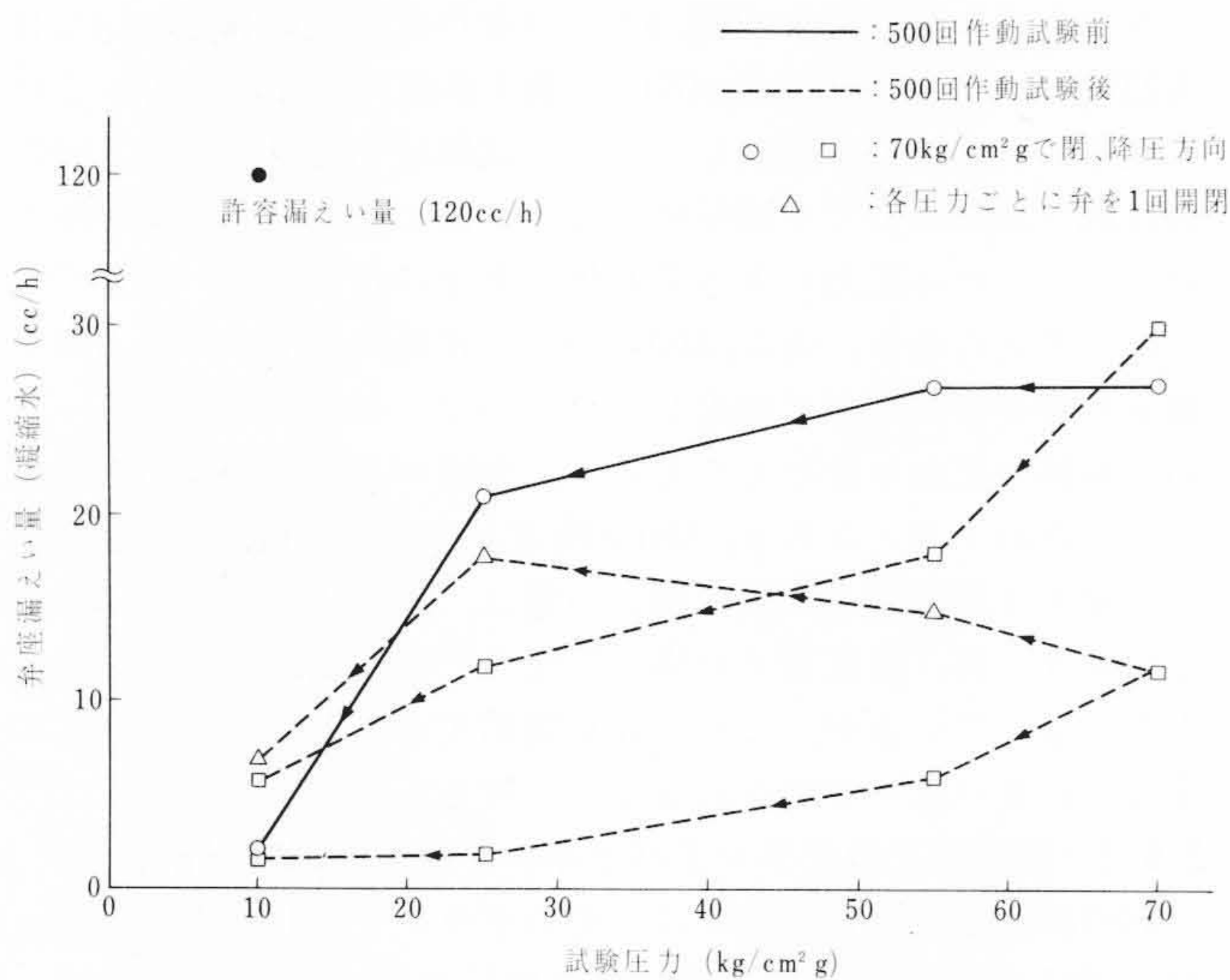


図7 蒸気圧下弁座漏えい試験結果

送り込んだ際に弁体が多少冷却されるため、残留蒸気が凝縮されて復水が弁座部を水シールしていること、ならびに残留蒸気が漏えいしても水そう中に復水として逃げて、メスシリンダでは捕えられなかったことも考えられ、測定値は漏えい量を過小評価している可能性もあろう。

500回繰返し作動試験後、各試験圧力ごとに弁を1回開閉した場合は500回繰返し作動試験前とほぼ同じ漏えい量を示している。

#### 2.6.4 蒸気圧下の弁座漏えい試験

蒸気圧下における500回繰返し作動試験前後の弁座漏えい量は図7に示すとおりである。

漏えいの傾向は前項までの試験結果とほぼ一致しており、作動回数が500回程度では漏えい量は増加することはないと判断され、むしろ弁座のあたりがなめらかになるために漏えい量は逆に減少したものと考えられる。

#### 2.6.5 蒸気圧下の500回繰返し作動試験

##### (1) 弁座漏えい量

500回繰返し作動試験時の作動回数ごとの弁座漏えい量は図8に示すとおりである。

弁座の漏えい量は500回程度の作動では増加しないことが判明し、最大30cc/h(凝縮水)と予想(許容漏えい量)を大幅に下まわっている。

##### (2) グランドパッキング漏えい量

合計二度のグランド増し締めによって作動回数450～500回程度までは許容漏えい量以下に収まったが、それ以後は急激に漏

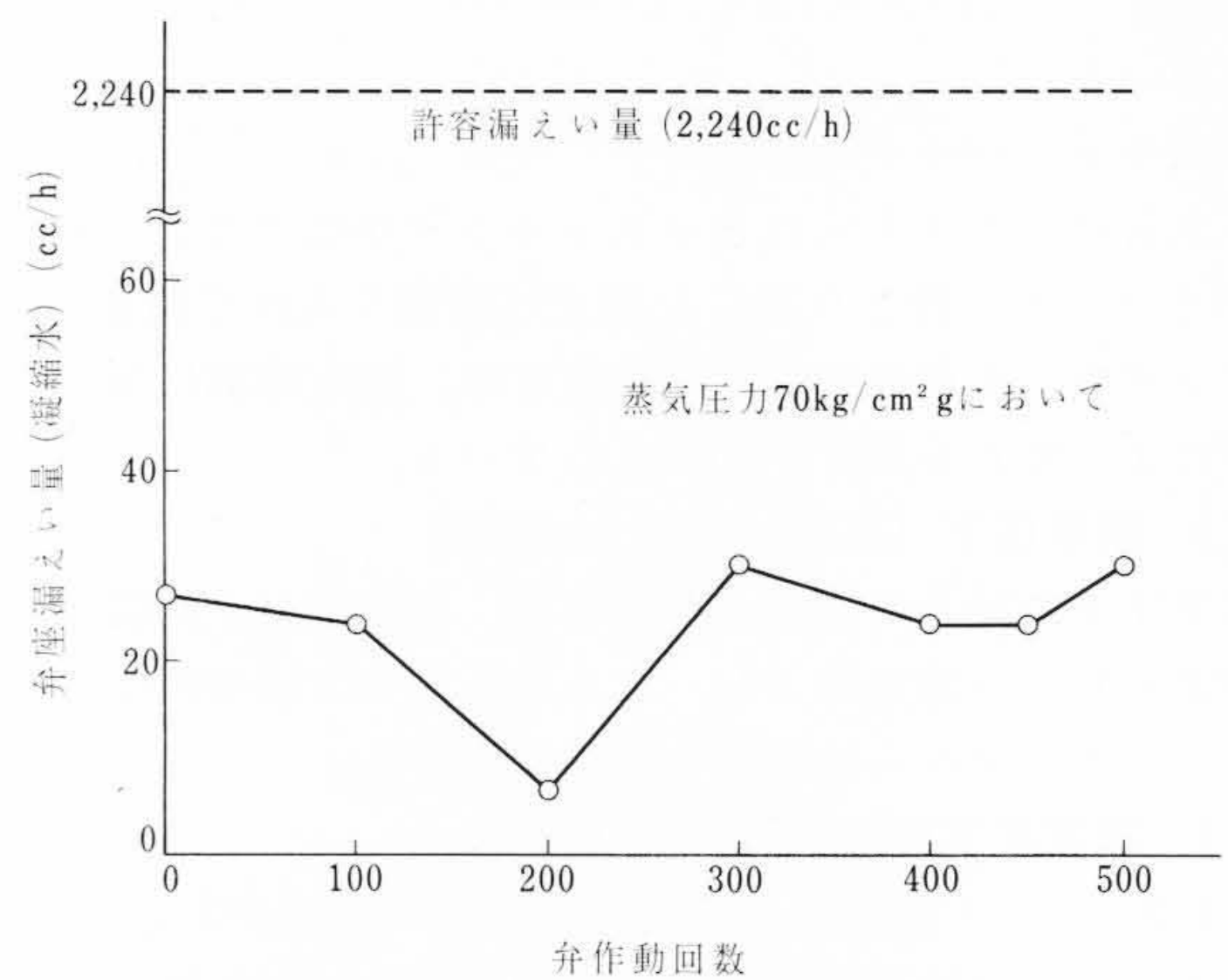


図8 蒸気圧下500回作動試験時弁座漏えい量

えい量が増大した。

この試験結果により原子炉運転状態に相当する蒸気圧下でのグランドパッキングの使用限界は作動回数400～450回程度と考えられる。

#### 2.7 試験方法、測定精度に関する考察

以上の試験に対する試験方法、測定精度などに対する考察をまとめると下記のとおりである。

- (1) 高温窒素圧下の漏えい試験では完全な暖気方法を得ることが困難であり、実測値はあまり精度の良いものではないと考えられる。残留蒸気の影響をなくし、測定精度を向上させるためには、適切な封入窒素ガスの加熱、窒素ガスによるブローイングなどの対策を今後は考慮する必要がある。
- (2) 蒸気圧下での漏えい試験においては、弁体各部の壁温が安定しないと正確な漏えい量が測定できない。したがって測定時間を長くして温度分布の安定化を図ることが、精度の良い実測値を得るために必要である。
- (3) 常温での窒素圧下の漏えい量よりほぼ蒸気圧下の漏えい量が想定でき、常温窒素圧下での測定の方が精度が高いことが判明したので、現地における漏えい試験は、従来より行なわれている常温の空気または窒素による方法が妥当であると考えられる。

### 3. 安全解析用漏えい量の検討

現在、原子炉格納容器外の主蒸気管破断事故時の被ばく線量評価においては、2.5.2で述べたオリフィスモデルを用いて、基準漏えい量から主蒸気管破断事故時の蒸気条件下の漏えい量を算出し、この値にある程度の余裕をみて被ばく線量の計算を行なっているが、試験結果からわかるようにオリフィスモデルを用いて算出した許容漏えい量は測定値よりも非常に大きな値となっている。そこでオリフィスモデルのほかに、臨界流モデル<sup>(2)</sup>を考えて測定値と比較してみた。

臨界流モデルの計算式は(2)式に示すとおりである。

$$L_a = L_s \left\{ \left( \frac{R_a T_a}{R_s T_s} \right) \left( \frac{\kappa_a}{\kappa_s} \right) \cdot \frac{(\kappa_s + 1)^{(\kappa_s + 1)/(\kappa_s - 1)}}{(\kappa_a + 1)^{(\kappa_a + 1)/(\kappa_a - 1)}} \right\}^{1/2} \cdot 2^{\frac{\kappa_s - \kappa_a}{(\kappa_a - 1)(\kappa_s - 1)}} \quad (2)$$

ここに、 $R$ ：ガス定数 ( $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{K}$ )

$T$ ：温度 ( $^\circ\text{K}$ )

$\kappa$ ：ガスの断熱指数

$L$ ：各圧力、温度における漏えい量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

添字  $s$ ：基準試験状態

$a$ ：任意試験状態

図9は常温窒素圧下の、図10は蒸気圧下の、弁座漏えい量の測定値と各モデルを用いて算出した理論値との比較を示したもので

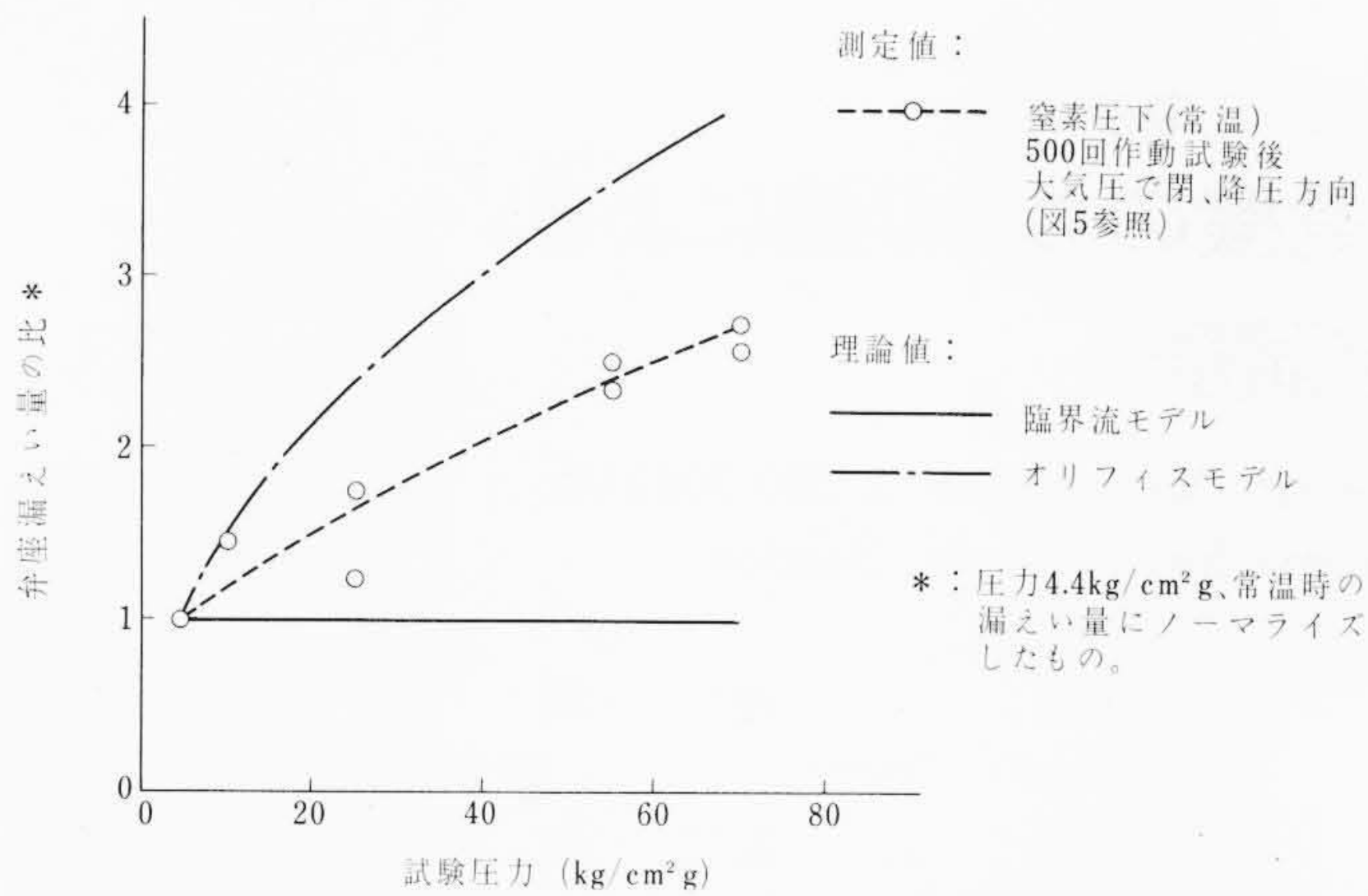


図9 窒素圧下(常温)弁座漏えい量の比較

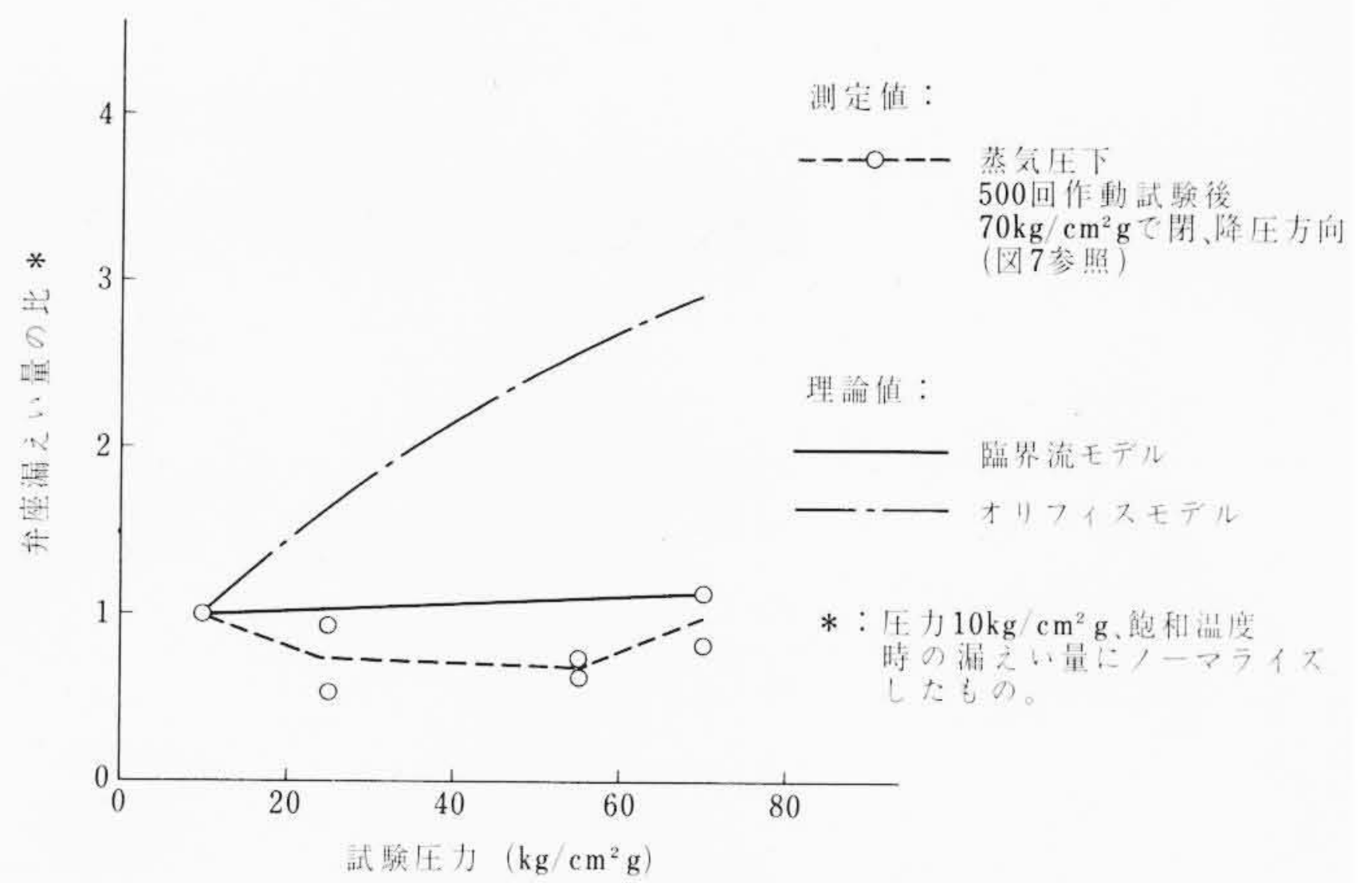


図10 蒸気圧下弁座漏えい量の比較

ある。測定値はそれぞれ図5および図7に示した常温室素圧下および蒸気圧下の弁座漏えい量の実測値を各試験圧力、温度条件における体積漏えい量に換算し、図9の場合は圧力4.4kg/cm²g、常温のときの、図10の場合は圧力10kg/cm²g、飽和温度のときの漏えい量を1とした比率で表わされている。各モデルによる理論値も測定値と同様に、比率で表わされている。

図9および図10より、常温室素圧下の弁座漏えい量はオリフィスモデルと臨界流モデルの中間的な傾向を示しており、蒸気圧下の弁座漏えい量は臨界流モデルと比較的よく一致している。

したがって本試験の結果からは、現在オリフィスモデルを用いて行なっている被ばく線量の評価はかなり安全側の仮定であると考えられる。

#### 4. 結 言

以上、本試験により得られた結論を下記にまとめる。

- (1) 弁の作動条件、圧力温度条件を変えても弁座漏えい量は予想(オリフィスモデルによる許容漏えい量)を上まわることなく、特に蒸気圧下における漏えい量はほとんど増加することがなかった。(図9、10参照)
- (2) 500回繰返し作動試験によっても弁座の漏えい量は増加することなく、耐久性も十分あり、信頼性のある隔離弁であると考えられる。

- (3) 原子炉格納容器外の主蒸気管破断事故時の被ばく線量評価において用いる計算モデルとしては、オリフィスモデルを使っているが、臨界流モデルのほうが測定値の傾向とよく一致しているといえる。この点については数少ないデータをもとに推論したものであり、今後の試験結果に期待したいと考える。

最後に、本試験を行なうにあたりご指導、ご協力いただいた監督官庁、中国電力株式会社および弁製作者の各位、さらに本試験を行なっていただいた日立製作所原子力検査課、日立研究所10部のかたがたに対し深く感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- (1) Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fittings industry: MSS SP61-1961, Hydrostatic Testing of Steel Valves, 4~5 (1961)
- (2) R.R.Maccary, A.B.Holt, etc: Technical Information Document, Leakage Characteristics of Steel Containment Vessels and the Analysis of Leakage Rate Determinations, TID-20583, 78 (1964 Division of Safety Standards, U.S.A.E.C. Washington, D.C.)

#### 第34巻

#### 目

#### 次

#### 第8号

・グラフ/花 咲 く 東 道  
 ・解説/都 市 土 木 の 新 工 法  
 霜つきですか？霜なしですか？  
 ・ルポ/新 鮮 さ を 送 る 新 拠 点  
 雪 氷 の 神 秘 を 追 う  
 “音楽の火”消えず

・インタビュー/陸 か ら 海 へ の 転 位  
 ・美術館めぐり/北 方 文 化 博 物 館 介  
 ・新 製 品 紹 介  
 ・ホー ム サ イ エ ン ス

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内一丁目5番1号

郵便番号 100

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

郵便番号 101

振替口座 東京 20018番