

# 多段圧力復水器の開発

—液体シール方式による隔壁板気密法—

## Development of Multi-Pressure Condenser —Noncontact Liquid Film Seal for Isolated Plate—

火力発電，原子力発電プラントの大形化に伴い復水器も大容量化し，性能及び信頼性向上のため幾多の新技术が開発，使用されている。多段圧力復水器もその一つで，プラントの熱効率向上などに利点があることから，国内でもその実用化が計画された。日立製作所は，我が国初の本格的な多段圧力復水器を製作，納入しており，現在既に数機が稼動している。本稿では，これを設計製作するうえで最大の技術的焦点である蒸気室隔壁板部の蒸気漏れ防止に関し，日立製作所が開発した液体シール方式多管隔壁板気密法を中心に，実機復水器の運転実績及び本気密法の他への応用について述べる。

高橋 燦吉\* *Sankichi Takahashi*  
江原 勝也\*\* *Katsuya Ebara*  
六串 俊己\*\* *Toshimi Mukushi*  
富田 彰\*\*\* *Akira Tomita*  
佐々木 卓也\*\*\* *Takuya Sasaki*

### 1 緒 言

近年，大容量タービンでは低圧排気室が2～3車室で構成され，これに見合って復水器の蒸気室を2～3個に区切り，各室をそれぞれ異なる真空度で作動するようにした多段圧力復水器が用いられ，国内でも既に数機が稼動している。

この多段圧力復水器は，従来の単段圧力方式と比較して伝熱面積，冷却水量が同一であれば平均真空度が上昇し，プラントの効率が向上する。また，タービン出力が同一であれば，伝熱面積，冷却水量も減少することができ，更に，低圧室内の復水を高圧室内に導き，蒸気と直接接触させ復水を予熱し，低圧給水加熱器の加熱蒸気量を減少することも可能である。

この復水器の蒸気室内を高・低二圧力室に区分する隔壁板の間を冷却管が貫通する穴部の蒸気漏れを防止する方法がこの多段圧力復水器の設計技術上の重要な点の一つである。筆者らは，この点に関し，実機規模のモデル復水器を用いて，構造簡単で気密効果の高い液体シール方式多管隔壁板気密法を開発した。この技術により製作された四国電力株式会社坂出火力発電所納め3号機450MW発電設備用及び阿南発電所納め3号機450MW発電設備用多段圧力復水器は，現在所定の性能を発揮し順調に運転中である。

本稿では，液体シール方式多管隔壁板気密法を用いた多段圧力復水器の運転実績及び本気密法の応用面について述べる。

### 2 多段圧力復水器

多段圧力復水器は蒸気タービンが二つ以上の排気室をもつ場合，**図1**に示すように復水器の蒸気室を冷却水の流れ方向に順に隔壁板によって同数の蒸気室に分割し，それぞれの蒸気室を異なる真空度で運転するものである。

この方法は，単段圧力復水器に比べ，(1)プラントの効率向上，(2)冷却水量の低減，(3)伝熱面積の低減など，多くの効果が生ずる。また，設計の重点を何に置くかにより上記効果の一つ，または二つ以上を生かすこともできる。

**図2**に二段圧力復水器と単段圧力復水器の冷却水の流りに沿った温度変化を示す。ここで破線は従来の単段圧力復水器の温度変化である。二段復水器の蒸気室は中央で左右二つの

蒸気室に仕切られ異なった圧力となっている。温度 $t_1$ で流入した冷却水は低圧力側で $t_m$ まで上昇し，この間に低圧力室内内は $t_{s1}$ に相当する飽和圧力になる。更に，高圧力室側で冷却水は $t_m$ から $t_2$ に上昇し，高圧力室内は $t_{s2}$ に相当する飽和圧力となる。

ここで，単段圧力復水器と多段圧力復水器の交換熱量が等しく，且つ多段圧力復水器では高・低二圧力室で等量の熱交換が行なわれるとすれば，多段圧力復水器で得られる平均真空度は単段圧力復水器のそれより常に高く，プラントの効率が向上する。また，平均真空度を単段圧力復水器の真空度と同一にすれば，伝熱面積又は冷却水量を低減することができる。

### 3 液体シール方式多管隔壁板気密法

多段圧力復水器では，蒸気室を仕切る隔壁板の外周は復水器蒸気室内壁に固定され気密が保たれるが，隔壁板を貫通する多数の冷却管と貫通穴との間隙部の気密が問題となる。高・低二圧力室間の圧力差は，定格運転時7～10mmHgであるが，この差圧により冷却管貫通部のすきまから蒸気が漏れると復水器の圧力レベルが変動する。すなわち，多段圧力復水器開発の焦点は隔壁板での蒸気漏れ防止技術の開発である。特に大容量復水器では，冷却管総数は一万数千本にも達するから，隔壁板の蒸気漏れ防止法は構造簡単，製作容易で気密効果の高いものであると同時に，腐食による冷却管の損傷などのための，冷却管の交換が可能なものでなければならない。このように多数の冷却管を対象にそれらの貫通穴部の気密を確保し，且つ製作，保守などの面で作業性の高い蒸気漏れ防止法として以下に述べる液体シール方式多管隔壁板気密法が開発された。

まず隔壁板の冷却管貫通穴と冷却管のすきまからの蒸気漏れ状況の観察のために，**図3**に示すように隔壁板の冷却管貫通部を単純化した単管隔壁板透明モデルを製作し，隔壁板の厚さ，すきまを種々に変えた場合の冷却管1本当たりの蒸気漏れ量とその状況を検討した。復水室は隔壁板を模擬したテストピースで仕切り，隔壁の両側の室はそれぞれ真空ポンプ

\* 日立製作所日立研究所 工学博士 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所日立工場

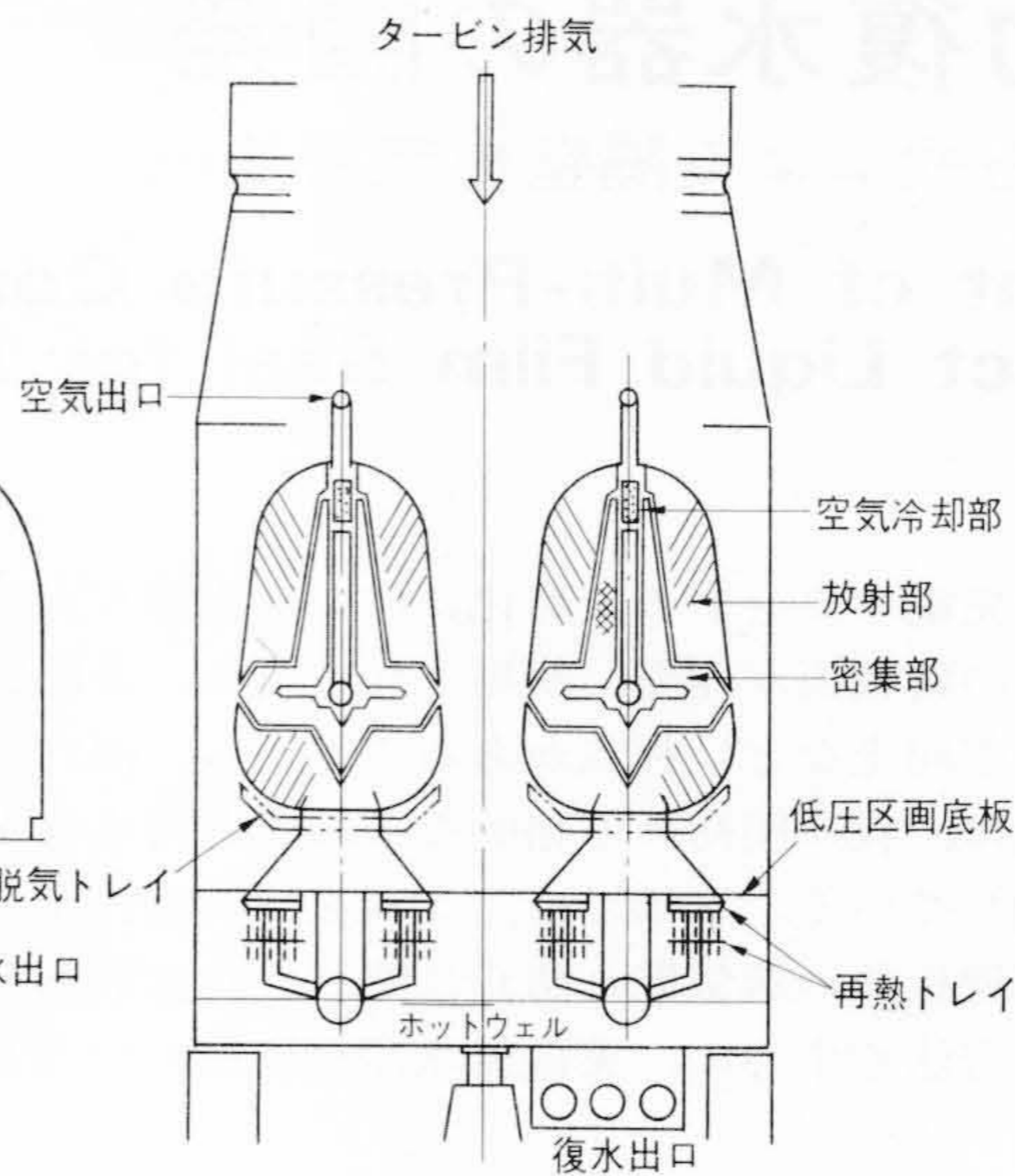
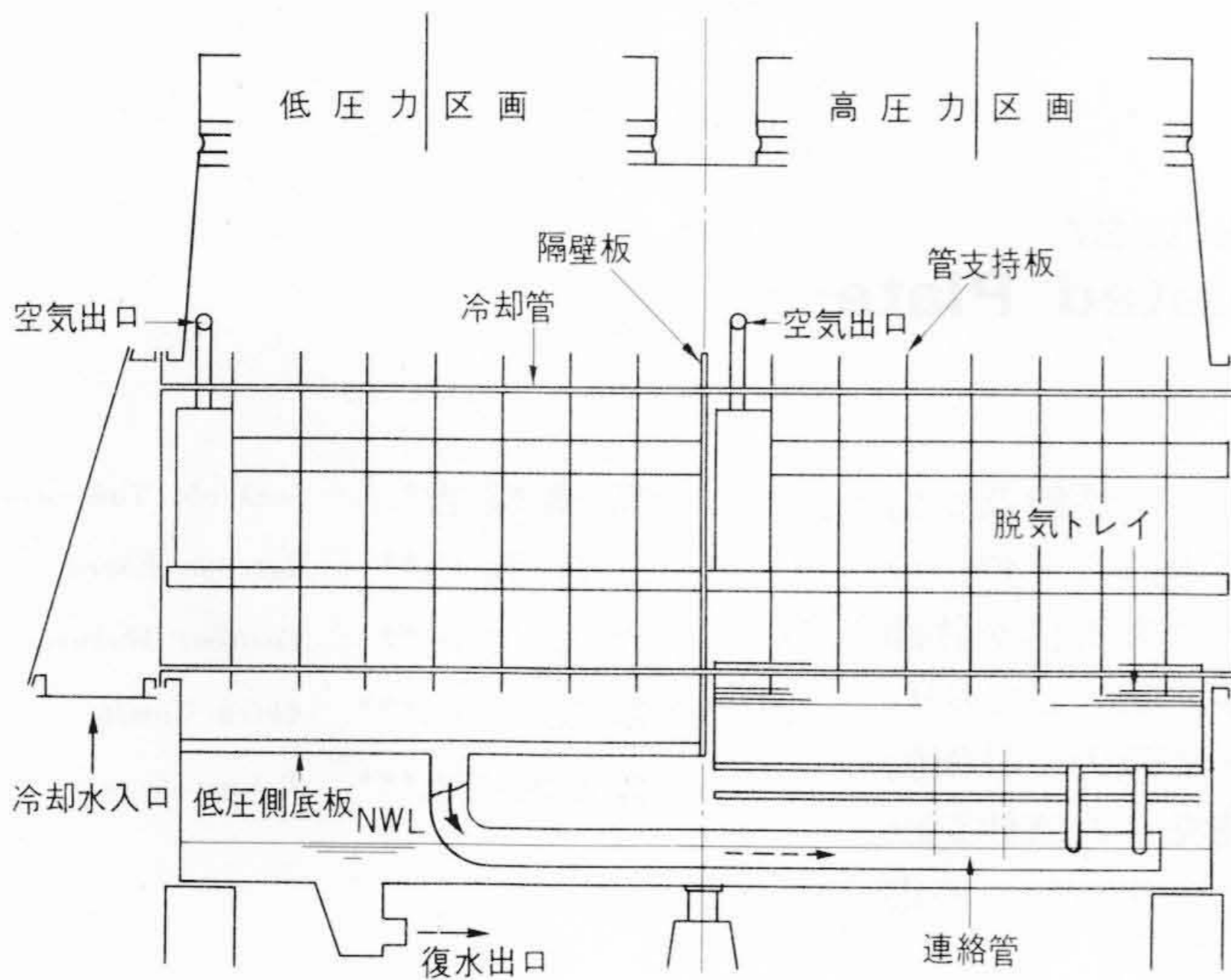


図1 多段圧力復水器の構造 多段圧力復水器の構造を示す。これにより冷却管長さ方向と、それに直角方向断面における内部構造が理解される。

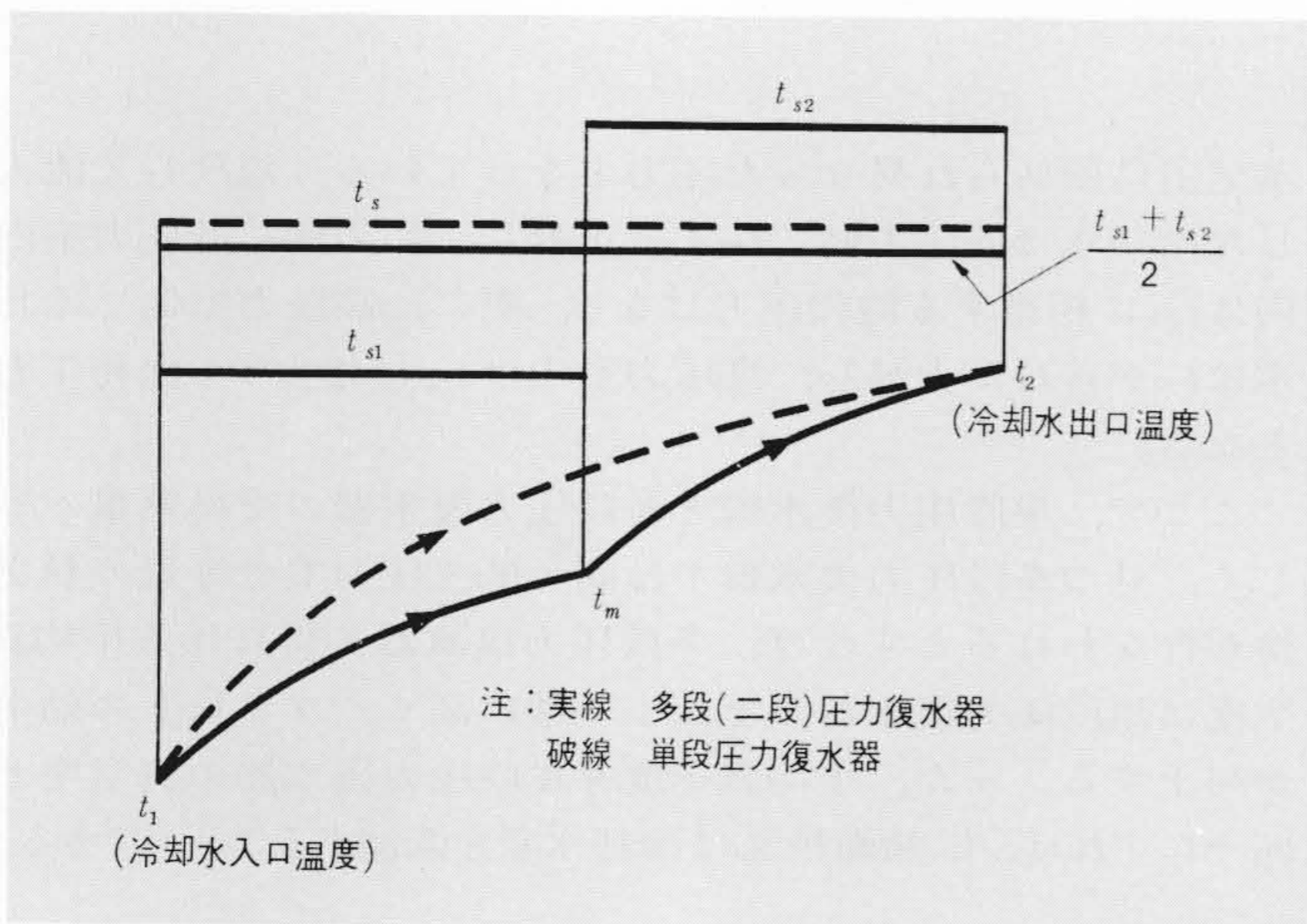


図2 作動線図 多段圧力復水器と単段圧力復水器との作動状態の差を圧力と冷却水温度の変化から示した。これにより、多段圧力復水器内の平均圧力が単段圧力復水器より低いことが分かる。

によって所定の真空度に保持し、そこに蒸気発生器よりの蒸気を送入した。実機多段圧力復水器では、高・低二圧力室間の圧力差は定格運転時7~10mmHgであるが、変動を想定し最大差圧30mmHgを目標とした。

### 3.1 隔壁板蒸気気密メカニズム

単管隔壁モデルによって観察された隔壁板貫通穴部の流体の流動状況は、図4に示すように蒸気は冷却管上で凝縮し、水滴となった復水がごく低速で冷却管外面を高圧室側から低圧室側へ向かって移動する。隔壁板貫通穴部に達した復水は、貫通穴と冷却管とのすきまを満たすので、復水自体が蒸気をシールする一種の液体シール効果を発揮する。蒸気は高圧室から低圧室内へ漏れることはなく、すきまに入っている復水が二圧力室間の差圧により高圧室から低圧室に流れる。従って、二圧力室間の気密を高めるには、隔壁板貫通穴部の復水の流動に対する抵抗を大きくするのが良策である。このように、復水の漏込制御により蒸気気密を得ることで気体である蒸気を直接漏込防止することにより隔壁板の気密保持の信頼性と性能及びその安定性を著しく向上させる。

図5に隔壁板貫通部すきまの復水の流動抵抗係数を示す。ここで、抵抗係数 $\lambda$ 、レイノルズ数 $Re$ はそれぞれ次式で与え

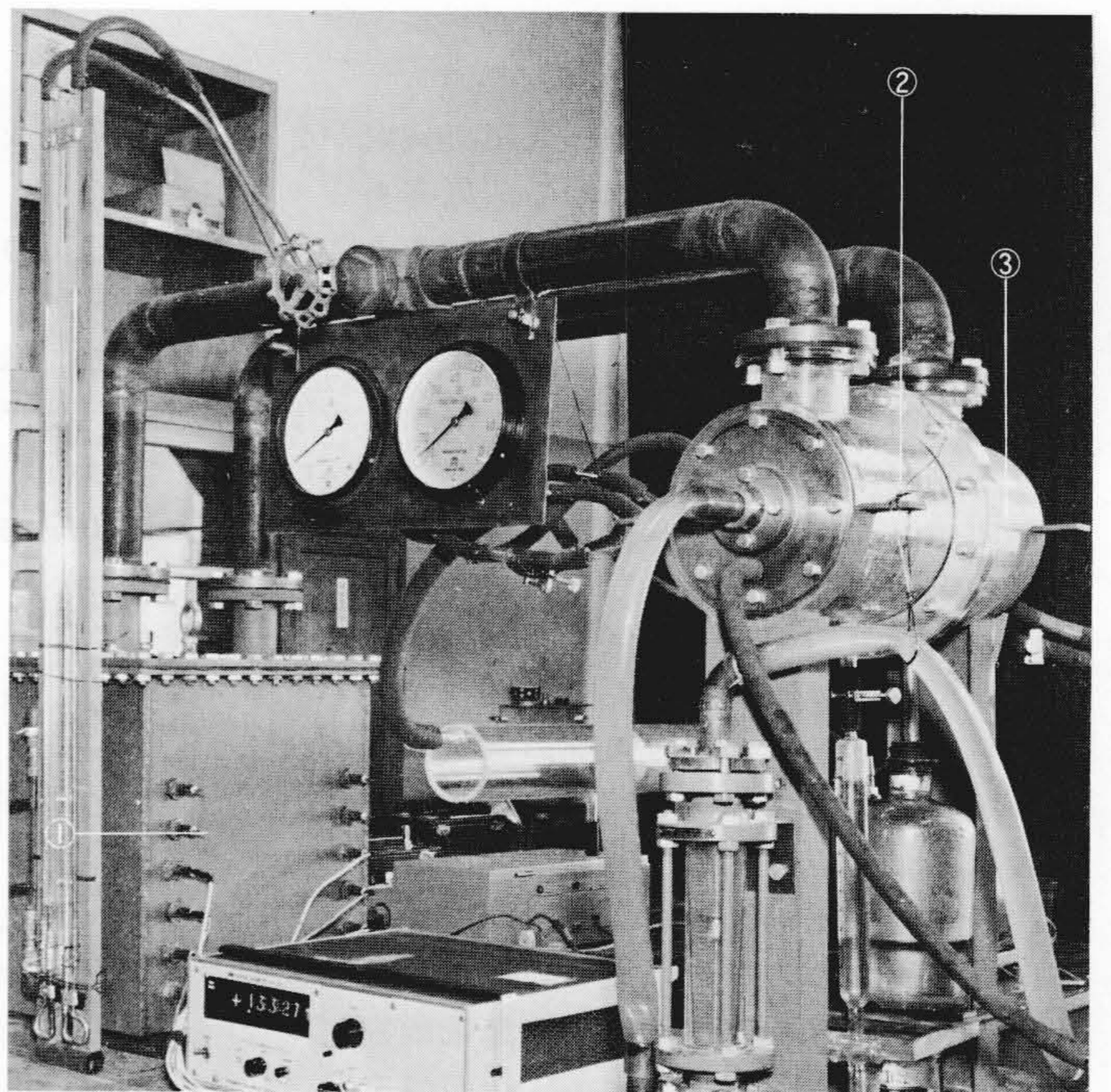


図3 単管隔壁板モデル 隔壁板気密法の単管試験装置で、①は蒸気発生器を、②は低圧蒸気室を、③は高圧蒸気室を示す。

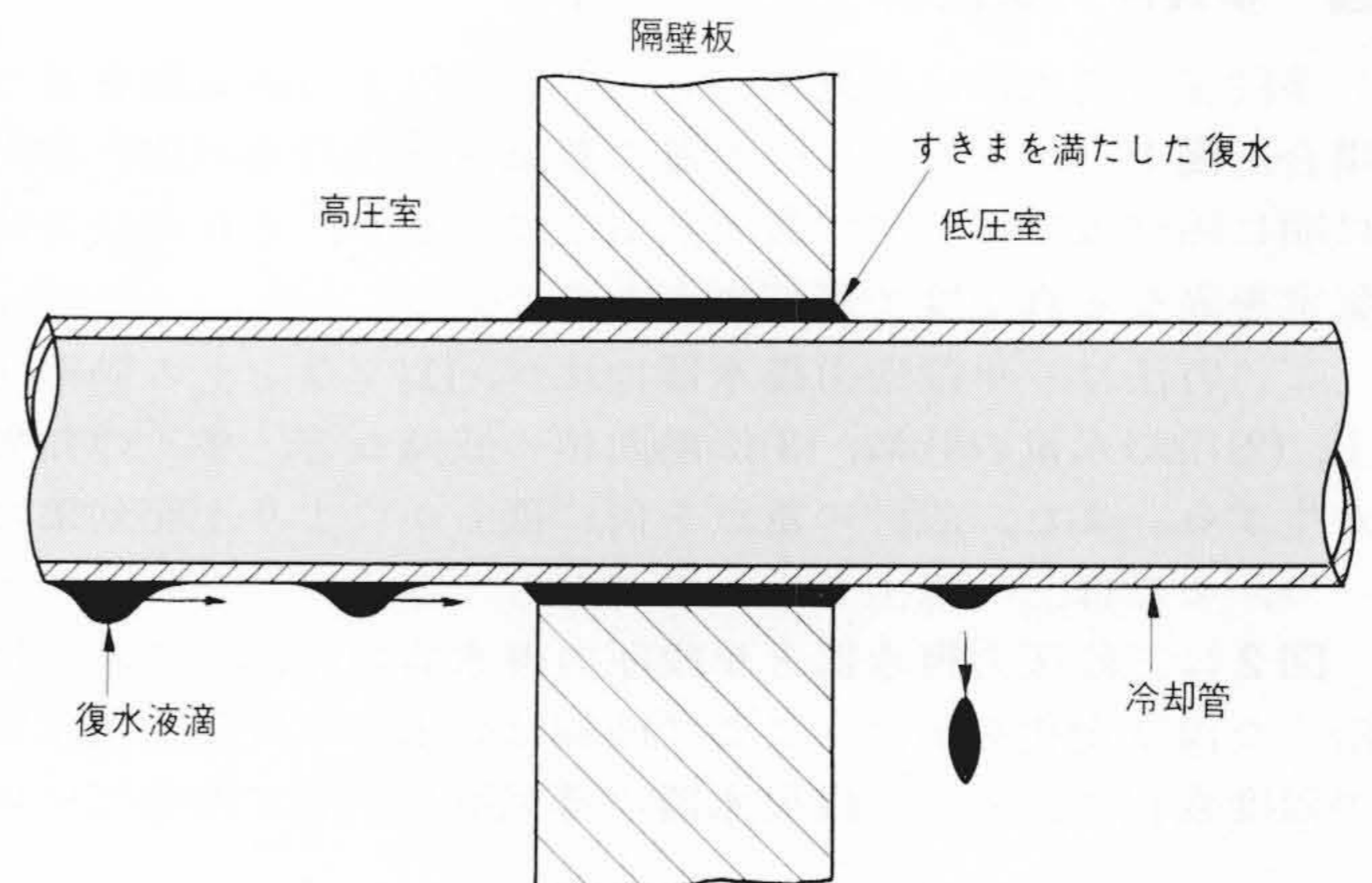


図4 復水の流動状態 隔壁貫通穴部の冷却管上の復水流動状況を示し、貫通穴間隙部は復水で充満され、液体シールが達成されることが分かる。

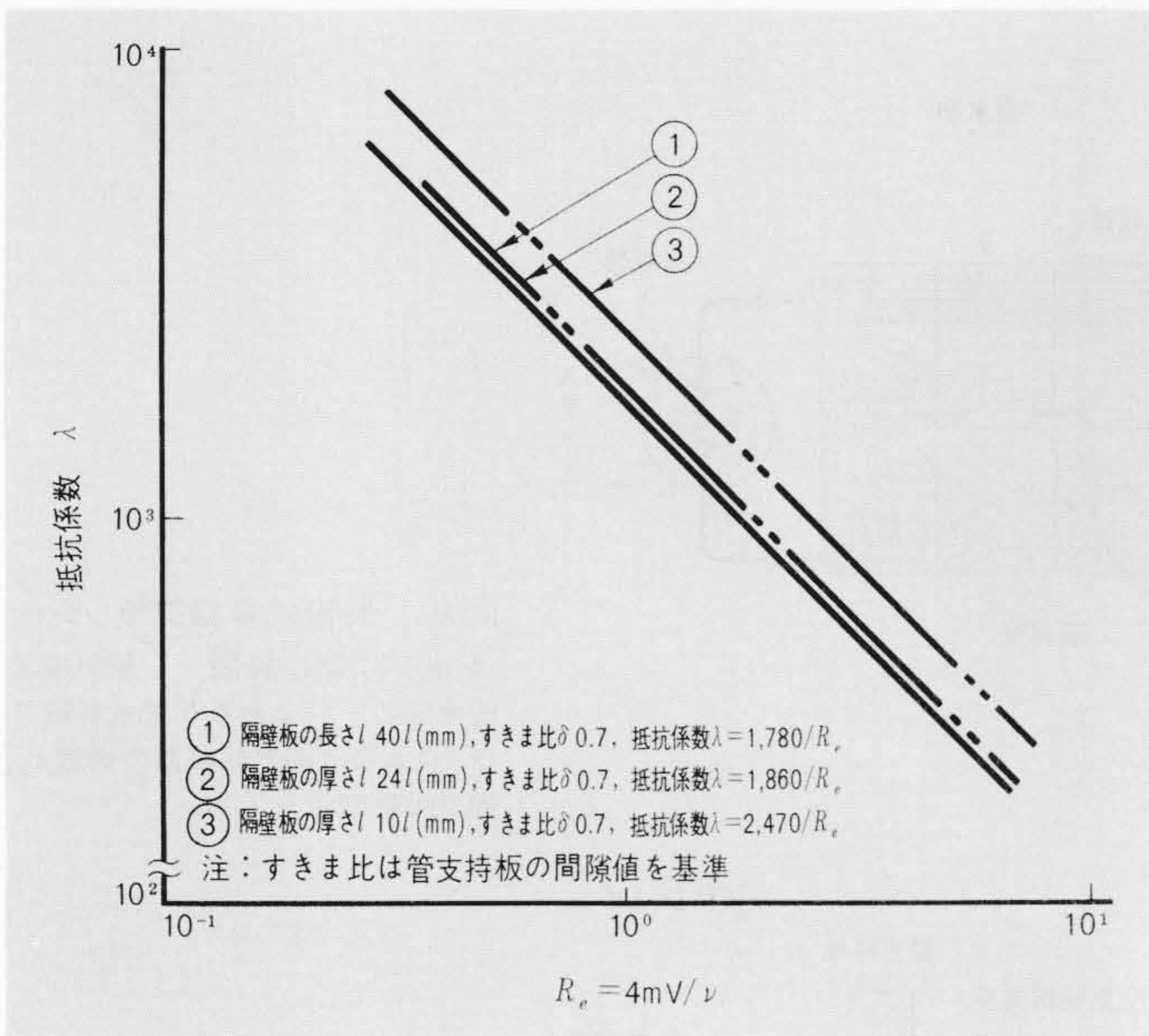


図5 抵抗係数 貫通穴すきまにおける復水の流動抵抗係数を示し、隔壁板の板厚よりも、流入端の形状が大きく影響することが分かる。

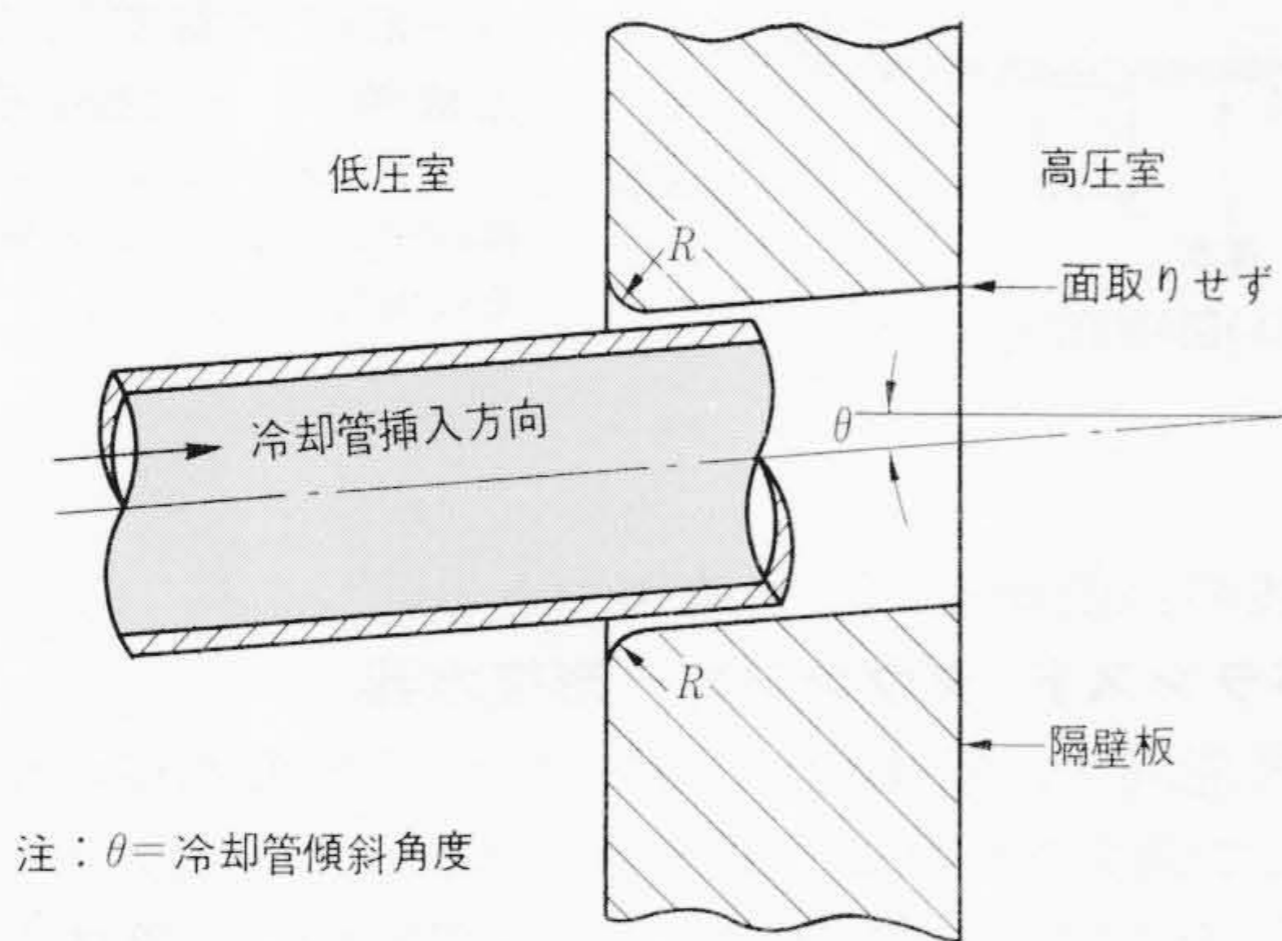


図6 隔壁冷却管貫通穴形状と管挿入 隔壁貫通穴の端面形状と挿管作業の作業性との関係が示されている。

られる。

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\left(\frac{l}{4m} \cdot \frac{\gamma}{2g} V^2\right)}, \quad Re = \frac{4mV}{\nu}$$

ここに、 $\Delta P$ は高・低二圧力室間の真空度差、 $m$ は水力平均深さ、 $l$ は隔壁板の厚さ、 $V$ は復水流速、 $\gamma$ は復水の密度及び $\nu$ は復水の動粘性係数を表わす。

この結果、同一すきまの場合、抵抗係数は隔壁板厚さが小さいほうが大きい。これは、とりもなおさず、すきま部の抵抗の大部分は高圧力室側の隔壁板すきまへの流入端の入口損失であり、入口端における遷移流動状態が鎮静した後は、復水の流れは層流となり、抵抗がほとんど生じなくなる。従って、隔壁板の厚さを増すことは漏れ防止上賢明でなく、入口損失を増大させる方策を取るべきである。すきまの気密保持に必要な水量は、両蒸気空間の差圧により当然異なるが定格運転で両蒸気空間の差圧が7 mmHg程度では総復水量の0.2%である。隔壁の冷却管貫通穴の穴加工として高圧力側の流入

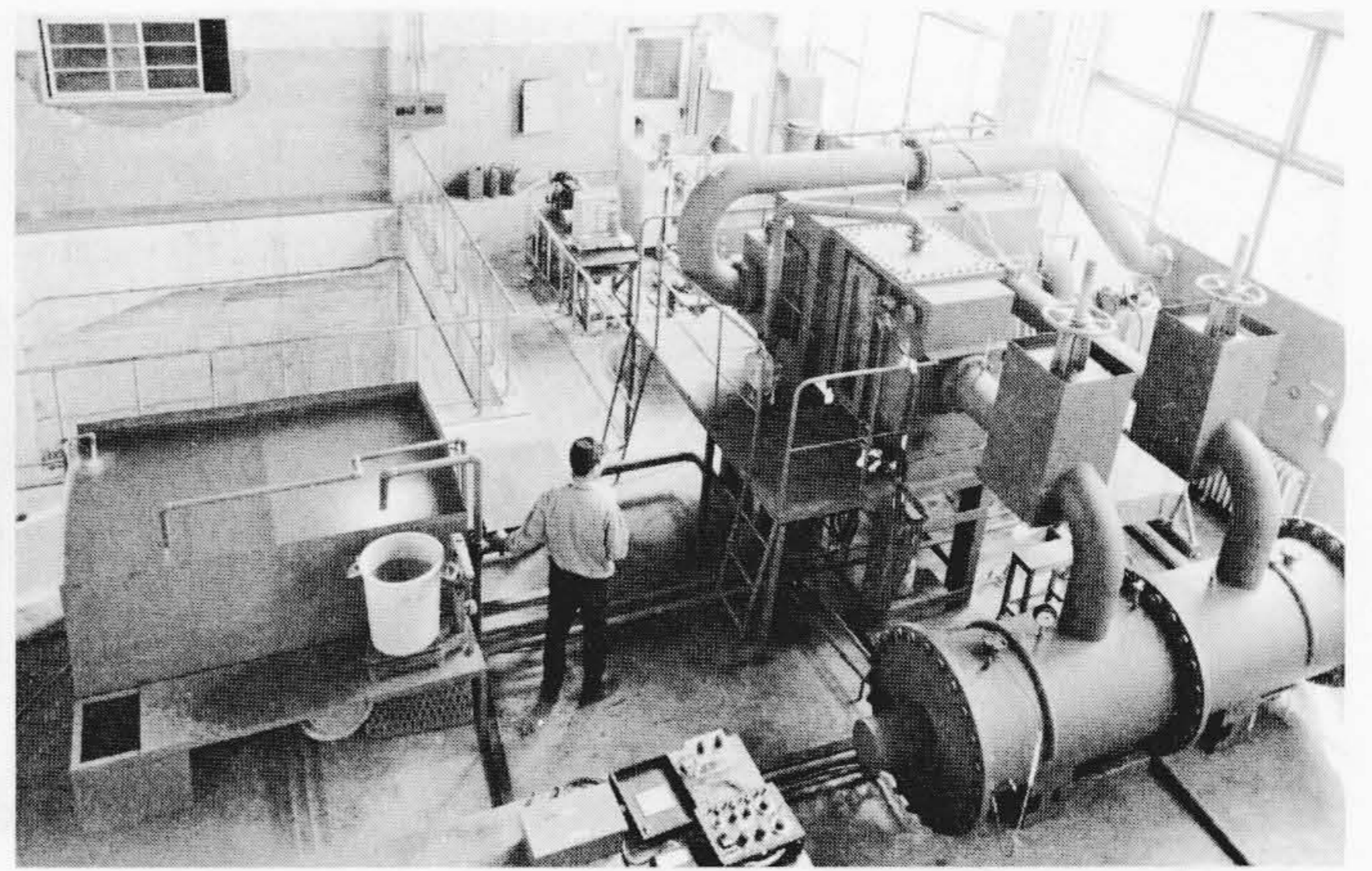


図7 多段圧力モデル復水器 実用適用に先立って、新開発の液体気密法を適用し、その性能を確認したモデル復水器を示し、研究の規模がよく理解できる。

端端面は面取り加工せず、低圧力側のみを面取りする。すきまは通常の管支持板と冷却管とのすきまと同じに設定する。このようにすれば必要な気密性は確保できるが、更に液体シール効果を積極的に高めるには、高圧力側を低圧力側より位置的に若干高くすることも有効で、冷却管の傾斜によって復水は速やかに高圧力室側の隔壁板端面に達し、すきまは常に復水で満たされ、蒸気漏れを完全に防止できる。なお、すきままでの復水は流入端の抵抗が大きいので漏れは少ない。図6に隔壁板の冷却管貫通穴の形状と冷却管の挿入法を示す。

この方法では、その製作は復水器の管支持板と全く同寸法、同精度の穴加工でよく、そのうえ、特別の密封材を必要としない。本気密法はアメリカ特許(U.S. PATENT. No.3817323)に登録済みで、現在国内でも出願中である。

### 3.2 適用と運転性能

図7に示す大形多段圧力モデル復水器により液体シール方式多管隔壁板気密法の性能確認を行なった。本モデル復水器は、25.4mmAl-Br管を総数170本装着している。この実験の結果、低圧力室内真空度730mmHgで二室内の圧力差は45mmHgを保持できた。実機の定格運転時における二室間の差圧は7~10mmHgであるから、上記の性能は十分余裕をもって実機に適用できることを示すものである。

以上の結果より、日立製作所は昭和48年、四国電力株式会社坂出火力発電所納め3号機450MW発電設備用及び昭和50年、同社阿南発電所納め3号機450MW発電設備用として納入した。多段圧力復水器の隔壁板冷却管貫通穴部の蒸気漏れ防止には、上述の気密法を採用した。

四国電力株式会社坂出火力発電所納め復水器は、昭和48年

表1 四国電力株式会社阿南発電所納め450MW発電設備用多段圧力復水器の仕様と実績 設計計画値と実機適用時の実測値との一致が極めて高く、新気密法の優秀性が分かる。

項目	計画値	予想値*	実測値**
復水器真空度 (mmHg)			
低压力室	727.1	732.4	732.61
高压力室	719.3	724.2	724.28
差圧 (mmHg)	7.8	8.2	8.33
冷却管		*予想値は、計画値を実測時の状態に換算した値	
総本数 (本)	17,360		
伝熱面積 (m <sup>2</sup> )	23,550		**昭和50年5月8日測定

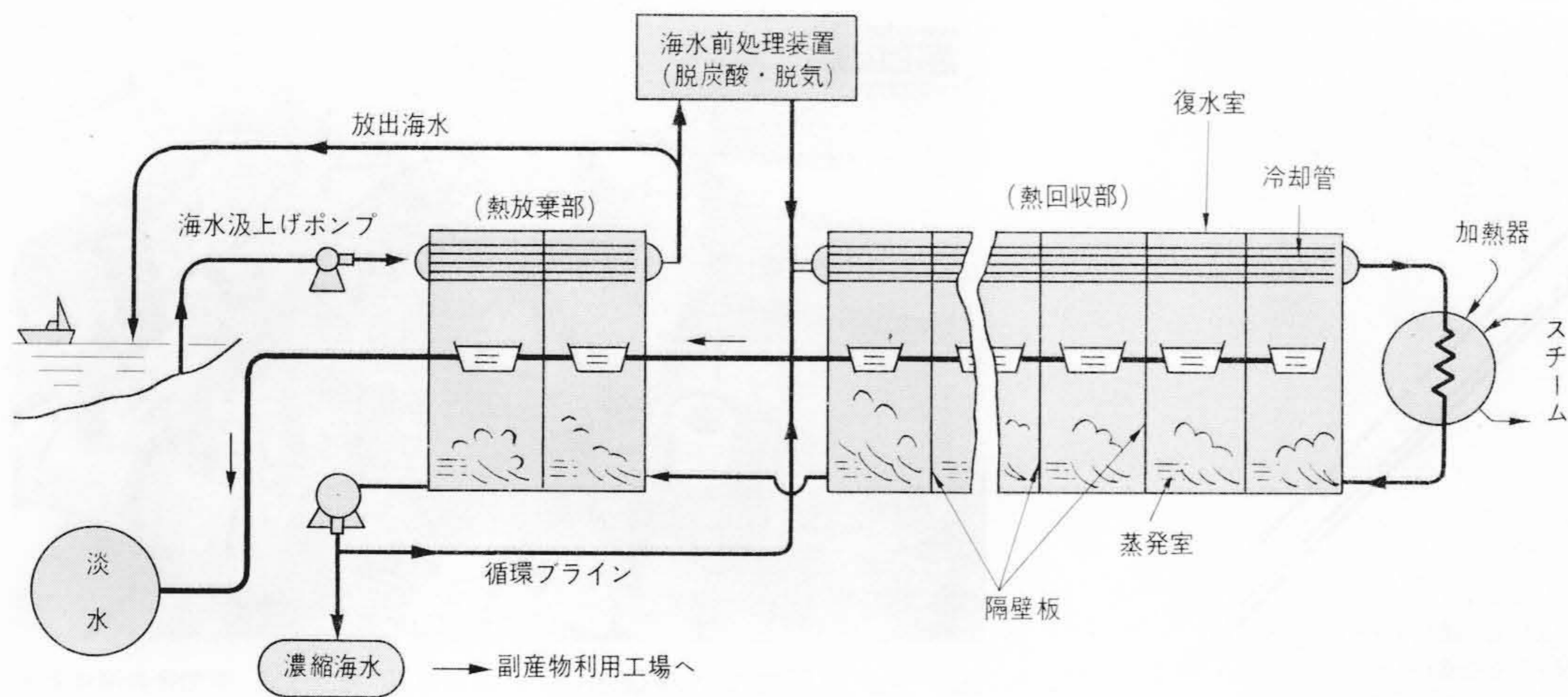


図8 長管式多段フラッシュ海水淡水化装置 新気密法応用例の一つである長管式多段フラッシュ海水淡水化装置の構造と、適用可能部位を示す。

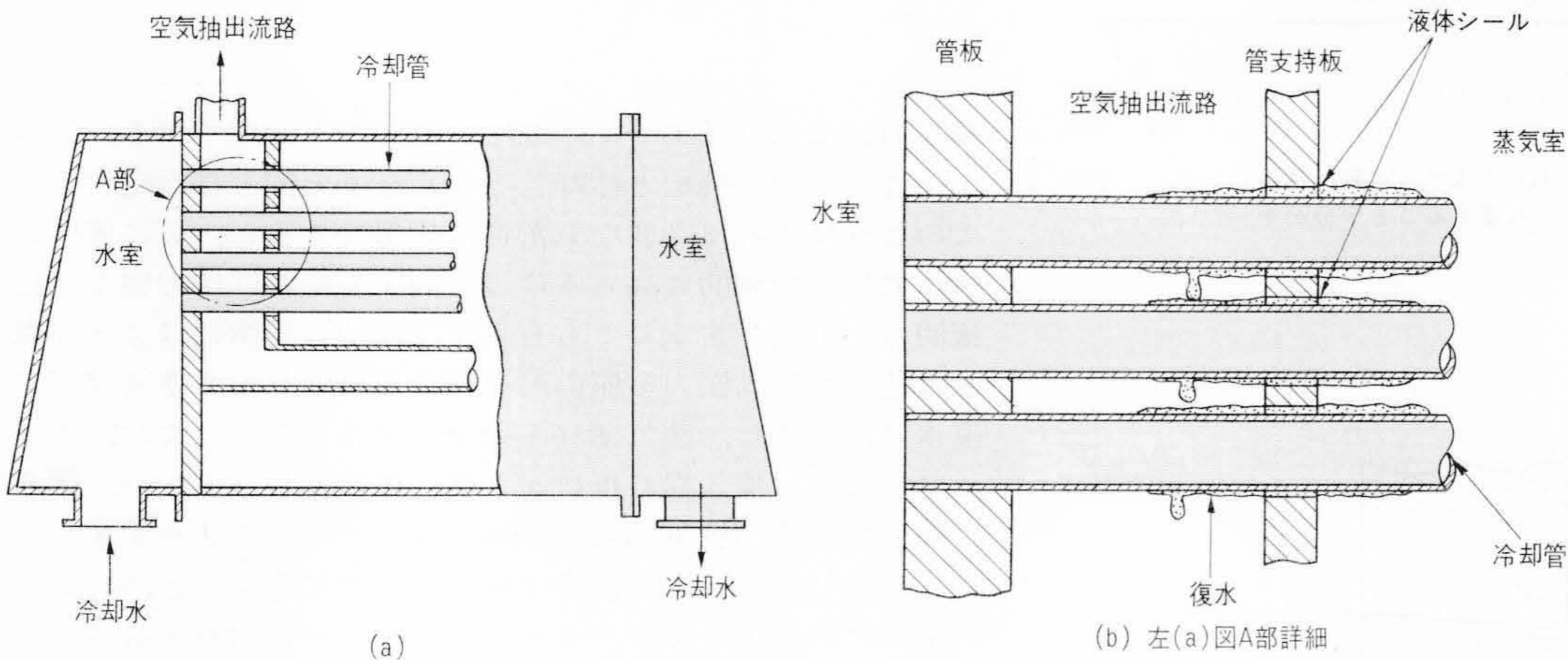


図9 バランスドダウンフロー形復水器空気冷却部気密機構 日立製作所の新開発のバランスドダウンフロー形復水器の空気冷却部への適用状況と、その構造を示す。

4月に運転に入り、現在、順調に稼動している。また、同社阿南発電所納め復水器も試験運転を終え、近く稼動に入る予定である。表1に阿南発電所納め多段圧力復水器の設計仕様と運転実績を示す。これより、高・低二圧力室の真空度は設計仕様どおりに保持され、隔壁板部の蒸気漏れが完全に防止されていることが分かる。ここに、新開発の液体シール方式多管隔壁板気密法は多段圧力復水器の蒸気漏れ防止に優れた性能をもつことが実証され、実用化を可能とした。

4 液体シール方式多管隔壁板気密法の応用

蒸気を複数個の部屋でそれぞれ異なる圧力で作動させ、且つ、各部屋を冷却管などが貫通して設けられる装置が多く使用されている。このような装置の隔壁板の気密保持には上述の気密法が応用できる。次に、その応用例について述べる。

4.1 海水淡水化装置

長管式多段フラッシュ海水淡水化装置は図8に示すように、蒸発室を数十段に仕切り、それぞれの部屋で海水を異なる圧力で蒸発させ、発生蒸気を復水室で凝縮させて淡水を得る装置である。各復水室には冷却管が貫通して配置される。従って、多段圧力復水器と同じく復水室間における蒸気漏れを防止する必要があり、しかも復水室は数十段と多数であるから、復水室隔壁板の冷却管貫通穴部の蒸気漏れ防止には構造が簡単で、且つ気密効果の高い方法が要求される。このような多段フラッシュ海水淡水化装置の復水室隔壁板部の気密保持にこの液体シール方式多管隔壁板気密法が応用できる。

長管式多段フラッシュ海水淡水化装置では各復水室間の圧力差は通常10~20mmHgで、多段圧力復水器の場合とほぼ等し

く、前述の技術がそのまま適用できる。

4.2 バランスドダウンフロー形復水器<sup>(2)</sup>

伝熱性能向上、管束内圧力損失低減及び復水器の小形化を目的として開発された日立式バランスドダウンフロー形復水器の空気冷却部と、他蒸気室との気密機構にも液体シール方式を適用している。

図9にその機構を示す。蒸気室で凝縮した復水は、冷却管を伝わり管支持板で蒸気室と空気冷却部とのシールをするとともに、空気冷却部にアンモニア成分の少ない復水を送り込むことにより、アンモニアアタック防止の役割にもなっている。

5 結 言

多段圧力復水器を製作するうえで必要な隔壁板冷却管貫通部の蒸気漏れ防止技術を中心に、日立式多段圧力復水器について述べた。幸い、ここに開発した液体シール方式多管隔壁板気密法を用いた四国電力株式会社坂出火力発電所納め及び阿南発電所納め450MW発電設備用多段圧力復水器は、現在順調に運転されており、本気密法の効果を実証している。応用例で二、三記述したように、本気密法は多段圧力復水器の隔壁板以外にも広く利用され得ると考えられる。関係各位の活用、御批判を望む次第である。

参考文献

- (1) 小島「多段圧力復水器の性能に関する一考察」日本電気協会第49回講演論文(昭45-4)
- (2) 堀部ほか「バランスドダウンフロー形復水器」火力原子力発電 Vol.25, No.6 P.14~21 ('74-6)