

大容量タービンプラント用熱交換器

Heat Exchangers for Large Steam Turbine Plants

小 島 晨 敬*
Akihiro Ojima

Following the phenomenal increase in unit capacity of turbines in thermal and nuclear power plants and aggravation of resultant environmental situations, several problems have emerged in the design, manufacturing and operation of heat exchangers including condensers and feed water heaters. This article deals with such problems as well as some of the new trends and ideas to cope with them.

1. 緒 言

わが国における発電用タービンプラントの単機容量は火力、原子力ともすでに1,000MW、1,100MWクラスになりつつあり、復水器、給水加熱器などプラントの熱交換器類もまた単機容量の大形化に伴ってほぼ比例的に大容量化している。また近年環境問題が深刻となり、復水器に使用する循環水水質の汚染されたものが増え、材料の耐食性があらためて見直されている。一方、復水器自体も排出する水温をできるだけ低くして、自然環境に与える影響を最小とするような計画を迫られている。日立製作所ではすでに単機容量1,000MWおよびそれ以上のプラント用熱交換器の製作および計画に着手しており、本稿ではこれらの経験を基に最近の話題を述べ関係各位の参考に供するしだいである。

2. 大形化の傾向

図1はわが国における昭和32年から49年までのその年に完成した火力および原子力発電プラントの最大単機容量を示すものである(47年以降は予想)。単機容量が急速に増大していく傾向が明らかであり、火力において18年間に8倍にも達している。また図2はプラントの単機容量と復水器の大きさ(伝熱面積)の相関を示したものである。本図に見るように復水器の大きさはプラント容量とほとんど直線的関係にあるとはいえ、大容量化に伴うスケールメリットは表われない。これは表面接触式熱交換器類一般についてほぼ共通して言うことであり、伝熱機構の本質に基因するものであっていし方ない。なお原子力プラントは同出力の火力プラントに比べて1.3~1.5倍程度の規模の熱交換器を必要とする。ちなみに現在、われわれが計画中の1,100MW原子力発電プラント用復水器は、伝熱面積約77,000m²で管の総延長は860kmに達する。このような熱交換器類のスケールアップに伴って設計、製作上いくつかの新技术が必要とされており、また機器の信頼性に対する要求もはかり知れないものがある。

3. 復 水 器

復水器はタービンプラント中最大の熱交換器であり、また自然水を熱媒体とするため環境条件に関連した問題が多い。

3.1 材 料

わが国の火力および原子力発電プラントはほとんどが海岸に設置され海水を冷却水として使用するため復水器の冷却管、管板には耐海水性が要求される。このため従来はほとんどの復水器にア

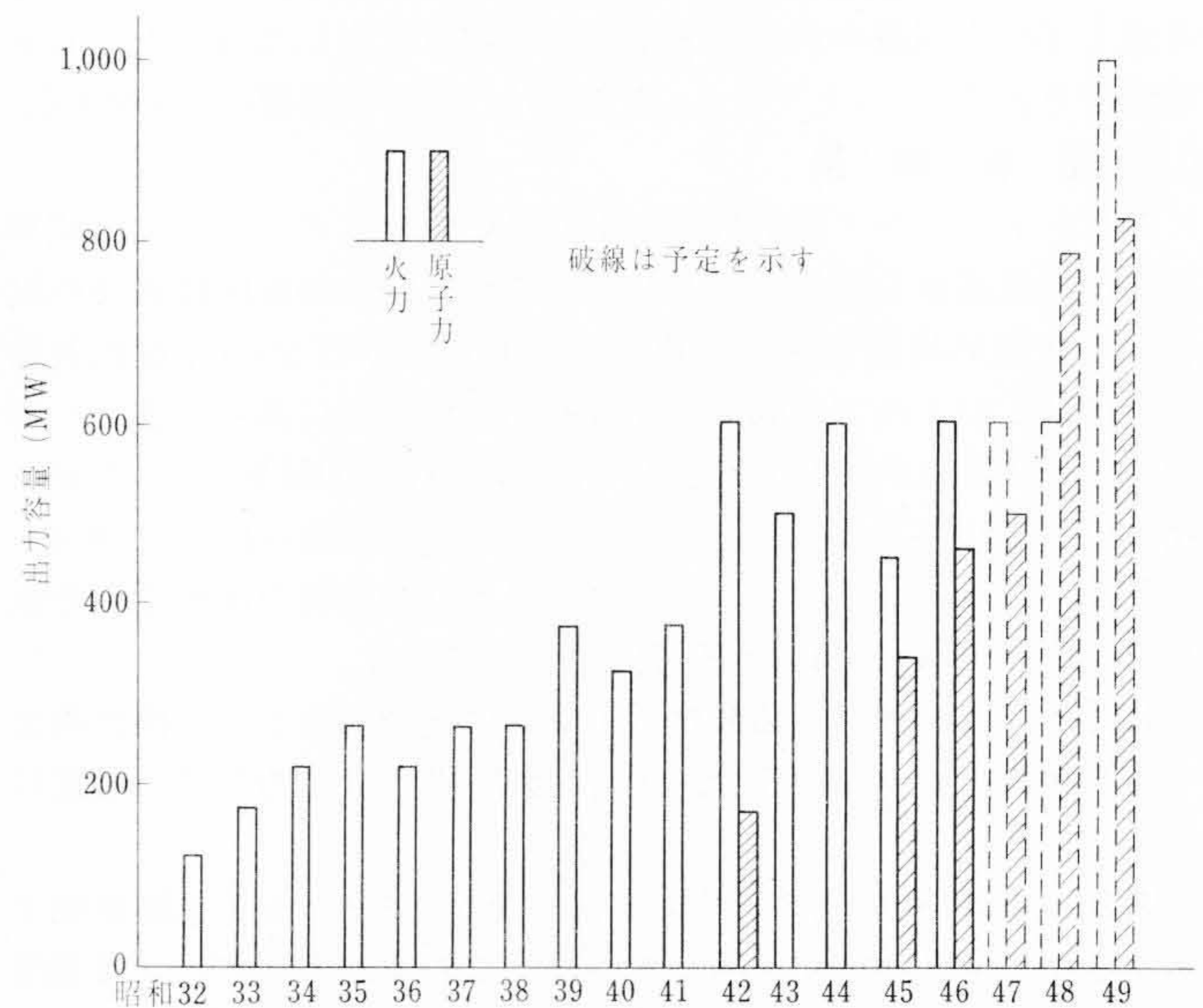


図1 各年に完成した最大単機容量 (国内)

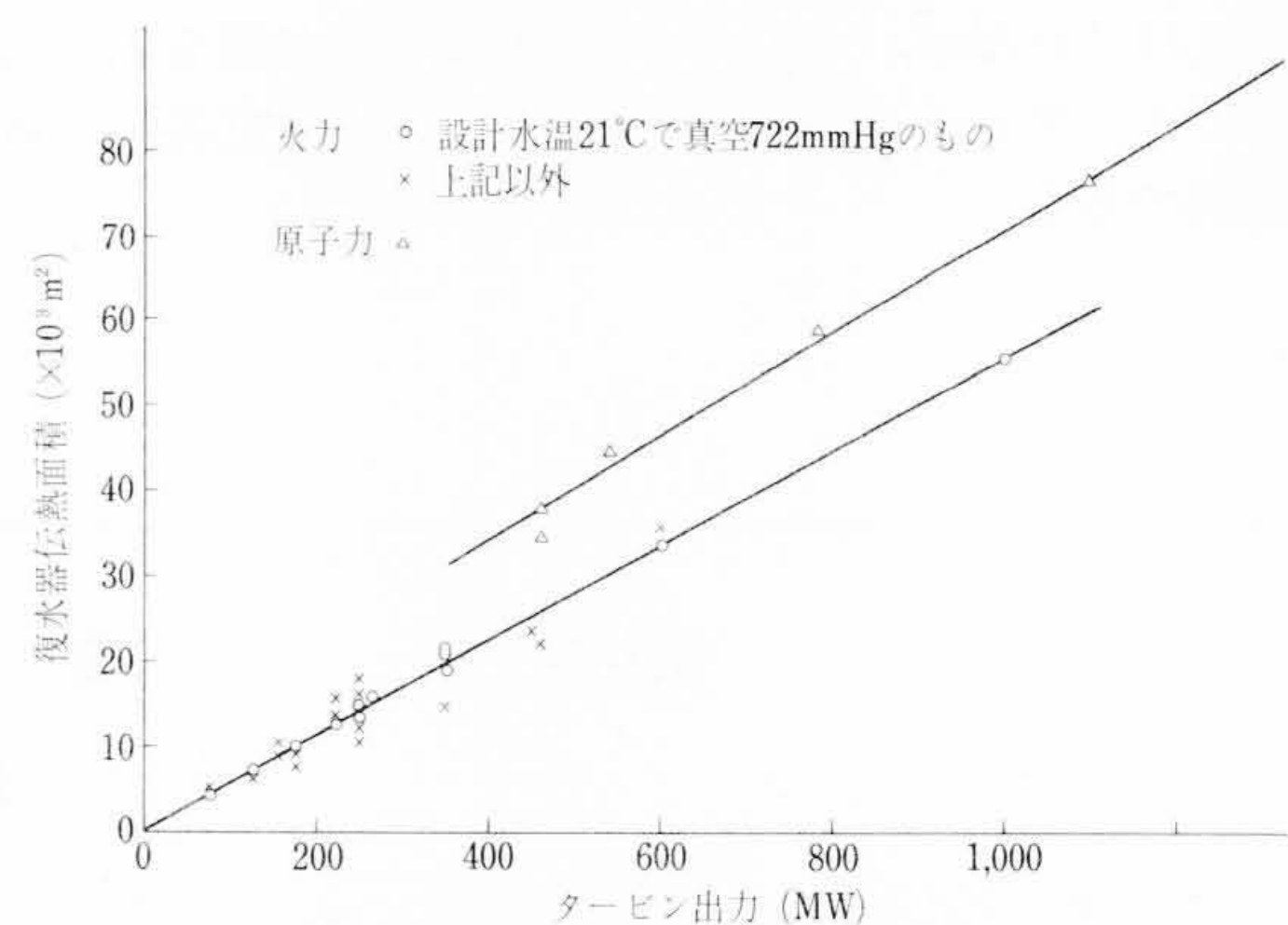


図2 タービン出力と復水器伝熱面積

ルミニウム黄銅管が用いられてきた。アルミニウム黄銅は海水が清浄である限りすぐれた耐食性を示し、好条件下では20年もの使用に耐える。しかし、後述するように給水加熱器用管材質として鋼管を広く採用するに至って、鋼管の保護として給水のpH値を9.2~9.4程度に保つことになってから、復水器の空気冷却部にアンモニアの濃縮が生じアルミニウム黄銅は耐アンモニアの面から必ずしも適当でないことが明らかとなった⁽¹⁾。このため空気冷却部には海水、アンモニア双方に対して耐食性のある70/30キュープロ

* 日立製作所日立工場

表1 チタン管復水器の仕様

		空気冷却部チタンその他アルミニウム黄銅 ケース1	全 管 チ タ ン			
			ケース1	ケース3	ケース4	ケース5
冷 却 面 積	(m^2)	36,000	36,200	35,200	28,900	25,400
冷 却 水 量	(T/h)	69,900	79,700	77,300	83,600	88,200
冷却水温度上昇	(degC)	8.30	7.27	7.50	6.94	6.58
管 清 浄 度	(%)	85	85	90	90	90
管 内 流 速	(m/s)	1.9	1.9	1.9	2.5	3.0
管 本 数	(本)	24,764	24,880	24,200	19,880	17,470
圧 力 損 失	(mAq)	3.9	3.7	3.7	5.5	7.4
CWP吐出量	($\text{m}^3/\text{h} \times \text{台数}$)	$36,300 \times 2$	$41,200 \times 2$	$40,000 \times 2$	$43,100 \times 2$	$45,400 \times 2$
価 格 順 位 (安いほうより)	復 水 器	1	5	4	3	2
	CWP	"	3	2	4	5
	復水器+CWP	1	5	4	3	2

注：共通仕様 (1)復水器形式：単胴軸平行配置1パス
(2)交換熱量： $5.8 \times 10^8 \text{ kcal/h}$
(3) 管：25.4mm O.D. $\times$ 18,218mm L $\times$ 1.24mmt (アルミニウム黄銅)
25.4mm O.D. $\times$ 18,218mm L $\times$ 0.5mmt (チタン)

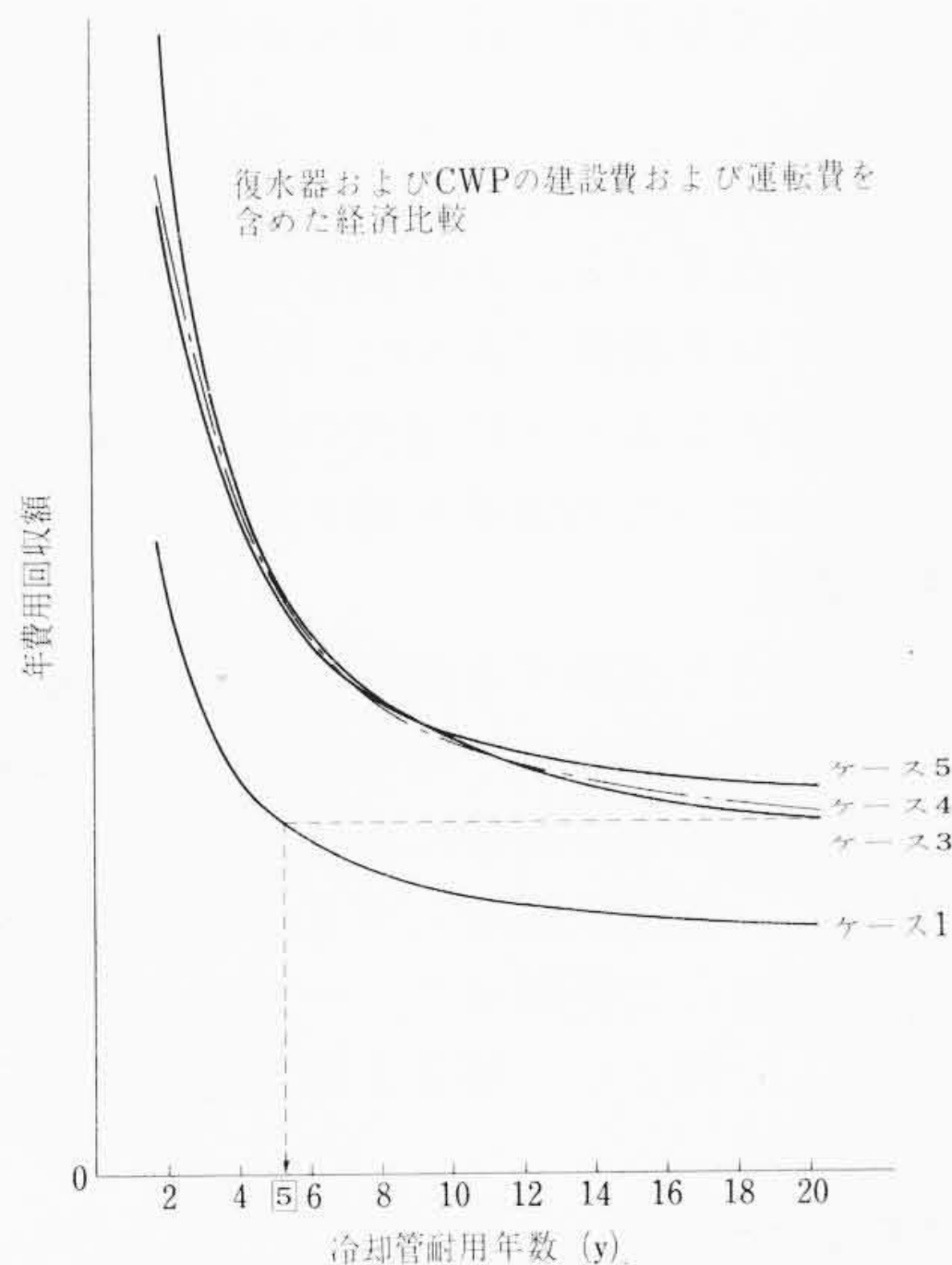


図3 チタン管復水器の経済比較

ニッケル管またはチタン管などを用いるのが普通となってきた。また近年、耐海水性のすぐれた二相ステンレス鋼が開発され⁽²⁾、空気冷却部用としてこの種の材料も用いられていくことが予想される。

発電所建設地点の川、海水の汚染は近年とみに著しくアンモニ

ア、硫化水素、イオウなどが含有され、pH値が正常海水より低く(6.8～7.5)溶存酸素も少なくなっている。このような海水に対しては、上記アルミニウム黄銅または70/30キュプロニッケルは主として孔食状の激しい腐食を受けて⁽³⁾耐用年数が著しく低下する。このため汚染海水に対して耐食性がすぐれたもの、特にアルミニウム黄銅のように局部腐食を受けにくい合金—たとえば特殊青銅系—などを用いる例もある⁽⁴⁾。ただしこの程度の材料でも半永久的な寿命を有するわけではないため、水の汚染状況と耐用年限、イニシャルコスト、管取換費などを勘案して最適な材料を選定しなければならない。

チタンは上記のように耐アンモニア性にすぐれているだけでなく、汚染海水に対しても非常に安定しているため空気冷却部のみでなく、復水器の全管を対象として用いることも構造的には可能である。チタンを用いると汚染海水に対する耐食性向上のみにとどまらず管内流速を大きくしうるため、後述の温排水対策の面からも好都合である。ちなみに600MW火力を例にとりチタン管復水器の仕様を試算すると表1のようになる。ケース1は空気冷却部にチタンその他にアルミニウム黄銅を用いた現在普通に用いられている組合せ、ケース2～5は全管をチタンとした場合で、ケース2は管清浄度および管内流速を比較のためケース1と同じとしたもの、ケース3～5は管清浄度を90%としたものである。また管内流速もケース4、5ではそれぞれ2.5m/s、3.0m/sとしている。一般にチタン管の場合は管清浄度はアルミニウム黄銅に比べて高い値をとるうるといわれており、管内流速も大きくしてさしつかえない。これらを大きくとることにより復水器の設備費は表中に示した順のように低減させることができる。次に表1のデータを用いて復水器と循環水ポンプ(CWP)の年費用回収額を比較すると図3のようになる。注目すべき点は表1において管内流速を増すことにより復水器を小さくし得たものであるが、CWPが大形となり設備費および運転費が増加し、年費用回収額は管耐用年数が大きい場合には管内流速が増すことによりかえって不利になる点である。すなわち図3においてチタンの耐用年数を20年とみるならば回収額はケース3がケース4、5より少なく済む。またチタン管の20年耐用に相当するアルミニウム黄銅の耐用年数は約5年となり、汚染の度合いが激しく、アルミニウム黄銅の耐用年数が5年以下となる場合にのみ全管チタンが有利となる。

3.2 構造

図4は1,000MW級復水器の断面図である。

(1) 管 配 列

復水器管配列は性能に大きな影響を及ぼすため(a)蒸気の圧力損失低減、(b)復水の過冷却防止、(c)空気冷却部への蒸気の

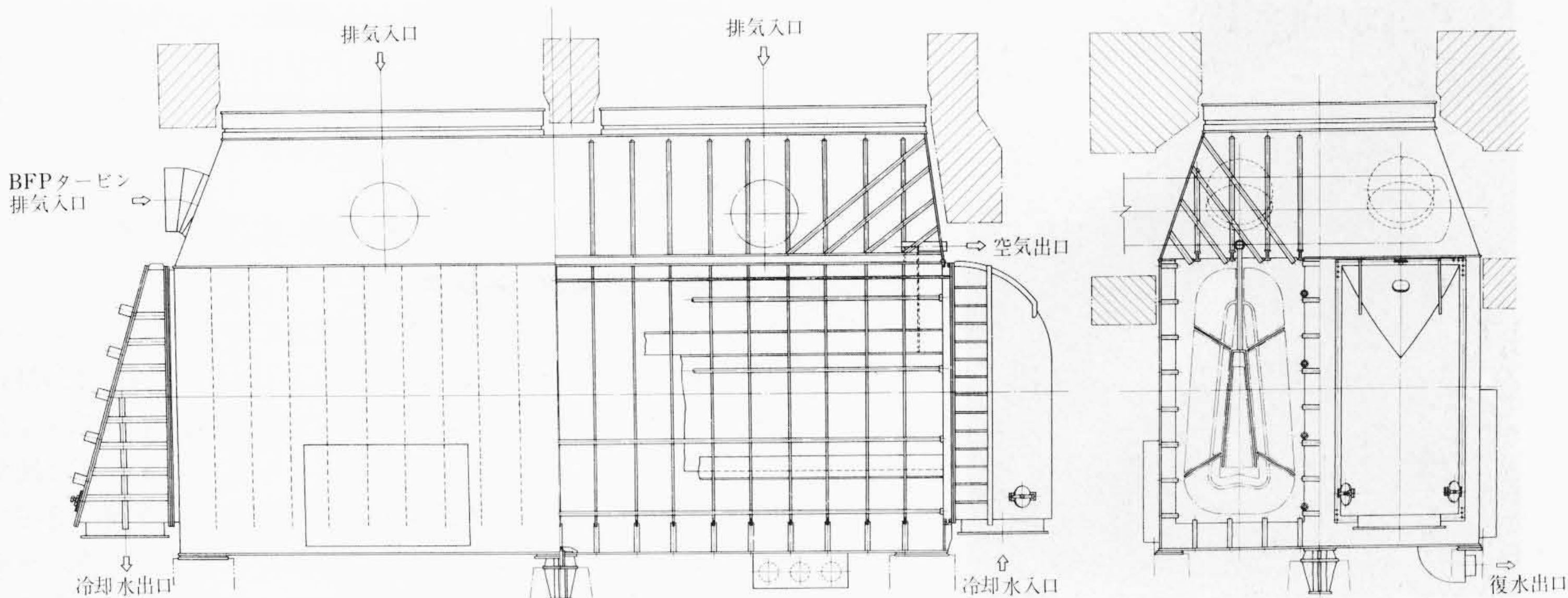


図4 復水器断面図

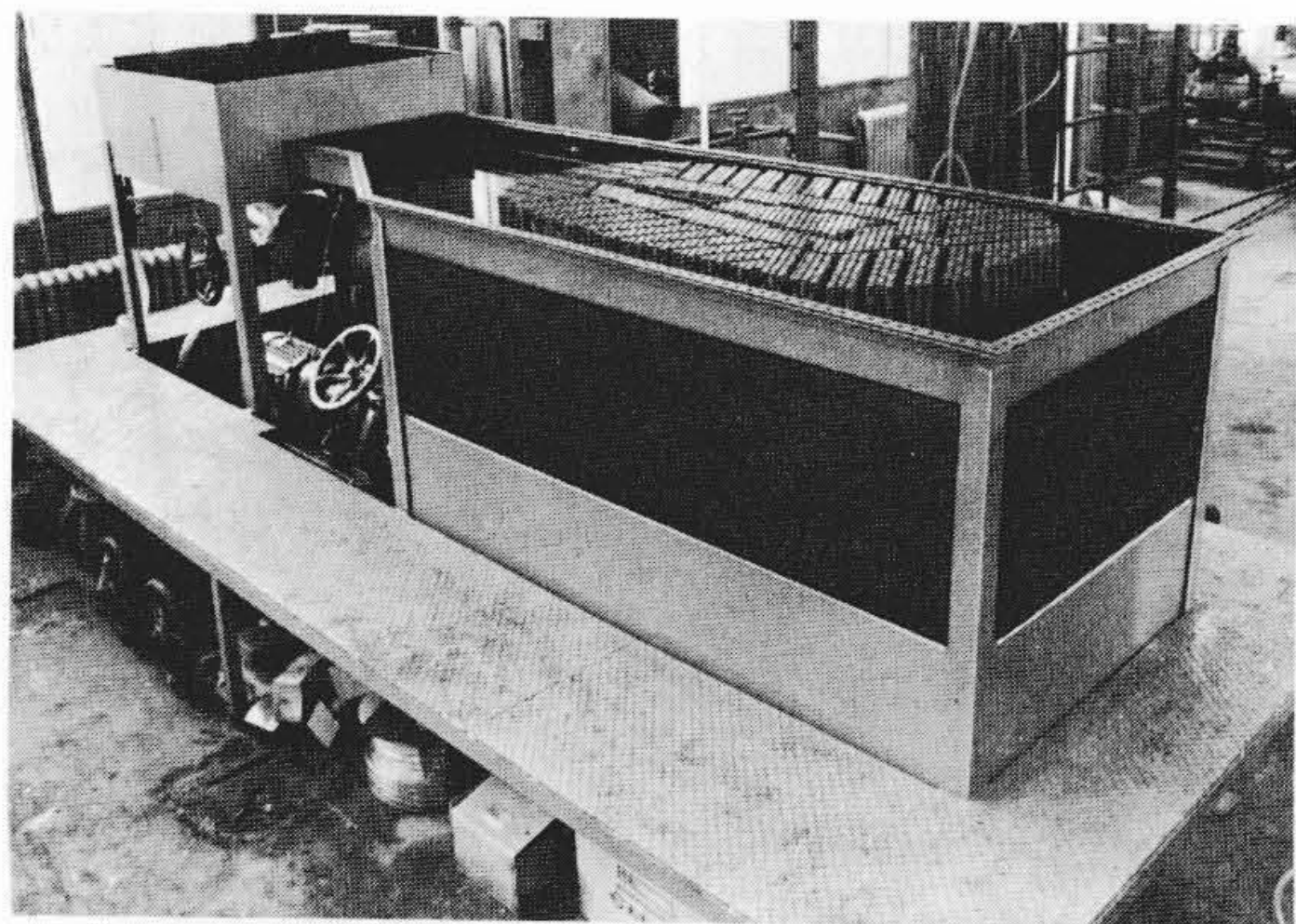


図5 復水器管配列実験装置

バイパス流入の防止、(d)管外面のアンモニアアタック防止、(e)復水による管外面の濡れによる熱伝達率低下の低減などに関し全体の配列、各部蒸気流速の配分、じゃま板のそう入など実績ならびにモデル実験によって決定される。図5は実験用モデルの例を示したものである。

(2) ダンプ蒸気配管

貫流ボイラプラント用および原子力プラント用復水器にはタービンをバイパスして復水器へ蒸気を流す系統が設けられ、起動ないし負荷変動の場合に通常のタービン排気よりもはるかに圧力、温度条件の高い蒸気が直接流入する。このため大口径管に多数の穴を設け、さらに衝撃板を取り付けて蒸気およびドレンの噴射エネルギーを減殺するよう設計されたダンプ蒸気配管が多数設置される。

(3) 復水器脱気

復水器出口の復水中の溶存酸素は通常0.03cc/l以下として設計されるが、原子力プラントで脱気器を設けない場合などにはさらに条件がきびしく0.005cc/lとする。このため前述の管配列に対する考慮の際、復水の再熱脱気を図るほか溶存酸素の多いドレン、補給水は十分加熱するようにした管渠下部に脱気トレイを設置する。

(4) 水室

復水器が大形となり冷却管本数が増加するに従い、各管に冷却水を均等に流すことも性能維持、防食の面で重要となっている。このため水室の形状を水量が均等となるようにする必要があり、図6に示すようなモデル実験が行なわれている。

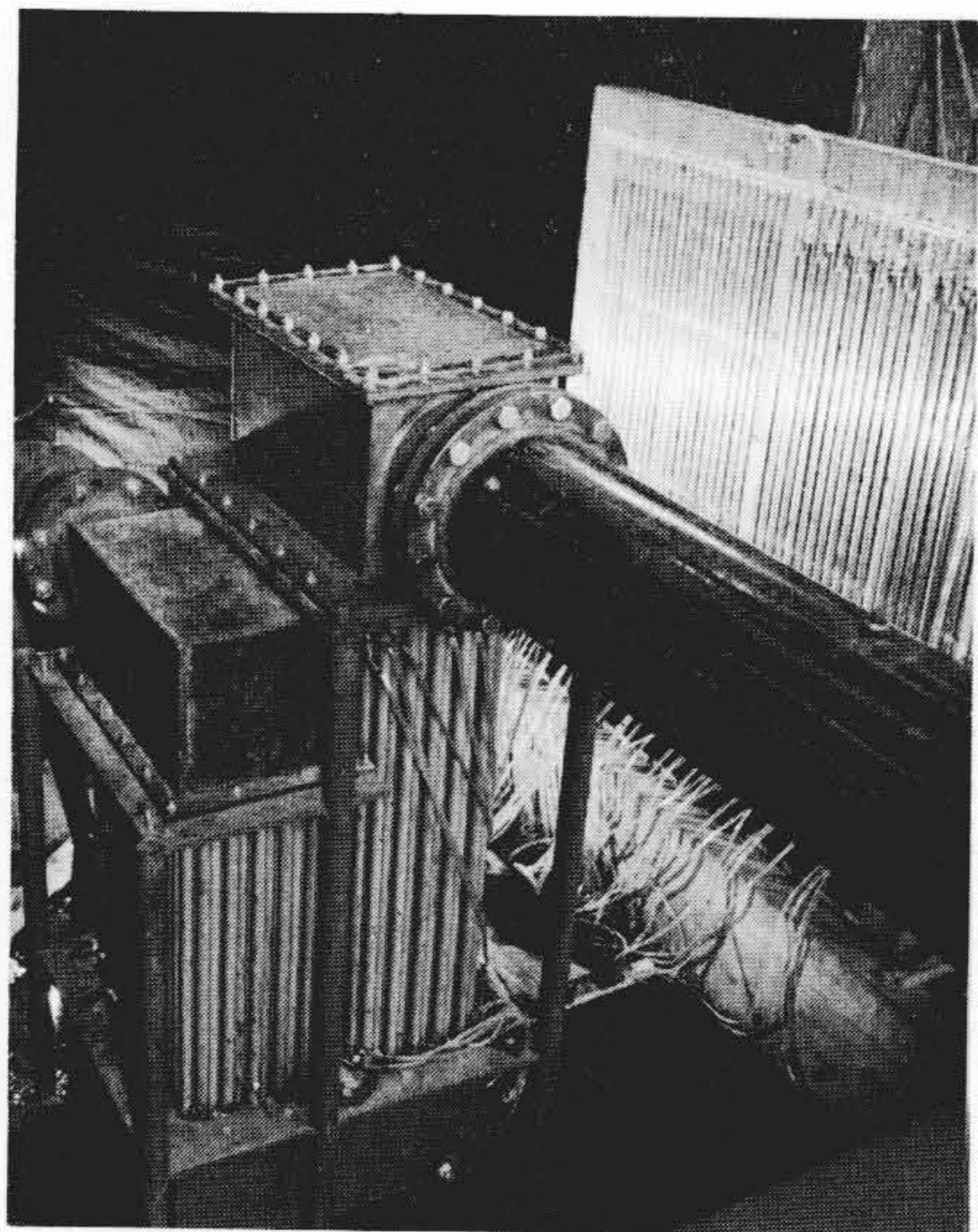


図6 水室内流量分布実験装置

3.3 多段圧力復水器⁽⁵⁾

多段圧力復水器(multi-pressure condenser)はタービンの排気室が2個以上のプラントにおいて復水器の蒸気側をそれぞれの排気室に連結した2個以上の区画に分割し、それぞれを互いに異なった真空レベルで運転するもので、その利点とするところは単一圧力の復水器に比較してプラントの熱効率向上、復水器冷却水量の低減、伝熱面積の低減などであるが、昨今は後述のように温排水対策の面から水量をむしろ多くしていく傾向にあるため熱効率アップをねらうものとなろう。

3.4 温排水対策

復水器において循環水は熱交換により10degC前後温度上昇する。ある種の海生生物にとっては温度上昇が繁殖上好結果を生むが、また他の生物には不都合となる。このため水温上昇をできるだけ少なくする設計が要求され、多量の水を用いて管内流速も大きくとることが多い。前述のチタン管の採用もその一環として考えられる。また復水器自体の設計は変えず復水器をバイパスして循環水を流し暖まった水を希釈する方法もある。さらに温排水を積極的に利用する方法としてアワビ、ハマチ、車エビなどを養殖する実験も行なわれており⁽⁶⁾、近い将来企業化されるものと思われる。

諸外国においては川、海水を用いず冷水塔によって大気中に放熱する方式も用いられている。わが国では地熱発電プラントなどで一部実用化されている程度であるが、将来の検討課題となろう。冷水塔は非常に大形となるうえに湿式の場合は霧の発生が新たな環境問題になりかねないため慎重を期さねばならない。

3.5 復水器洗浄装置

復水器運転中に管内を洗浄する装置として逆洗弁、スポンジボールによる洗浄装置などがある。特に後者は洗浄効果が著しく、かつ腐食の原因となる異物の除去にも有効であるため、広く利用されている。ただし、極端に使用しすぎると管内面の耐食性保護被膜を弱めるので連続して使用せず、一日のうちある時間だけ用いるのが望ましい。一例として毎日1回1時間程度運転するのは好ましい方法である。

3.6 海水に対する処理

アルミニウム黄銅が海水中においてすぐれた耐食性を有するのは第一鉄イオンが共存する場合であるため、海水中に硫酸第一鉄を投入することが広く行なわれている。そして硫酸第一鉄が投入されている限り管内流速をかなり大きい値(2.7m/s程度)にしても管の浸食が促進されないことが判明した⁽⁷⁾。また海水中にマンガンが含まれている場合は、硫酸第一鉄投入が特に必要であることが明らかとなった⁽⁸⁾。

3.7 その他

復水器の大形化に伴い輸送制限ならびに製品の精度上の要請から工場における製作と発電所における据付けとの作業区分に変化が生じ、工場においては板状の段階まで製作し、発電所にて組立てを行なうパネル工法が採用されるようになった⁽⁹⁾。

4. 給水加熱器

4.1 段落数と系列数

給水加熱器の段落数と系列数について最近の大形火力プラントにつきその例を示すと表2のようになる。出力220MW以上の火力プラントは8段抽気で内1段が脱気器、他の7段が高低圧給水加熱器で占められる。原子力プラントでは5～6段抽気を用いられている。給水加熱器の系列数を決定する要因は低圧ではタービン排気流の数であり、ほかに加熱器自体の信頼性、製作能力、経済性などがある。このうち信頼性は加熱器事故発生時の補修のコストと補修期間中のプラント負荷制限との両者に影響する。一般に

表2 給水加熱系の段落数と系列数

出力 (MW)	高圧給水加熱器 (段×系列)	脱気器 (基)	低圧給水加熱器 (段×系列)	抽気段数合計 (段)
75	2×1	1	2×1	5
125	3×1	"	2×1	6
156	"	"	3×1	7
175	"	"	3×1	7
220	3×1	"	4×1	8
250	3×2	"	2×1+2×2	"
250	3×1	"	2×1+2×2	"
265	4×2	"	3×2	"
350*	4×2	"	3×2	"
350	3×2	"	2×1+2×2	"
450	4×2	"	2×1+1×2	"
500	"	"	1×1+2×2	"
600	4×2	"	3×2	"
600	3×2	"	2×1+2×2	"
1,000	4×2	1	3×2	8

信頼性、製作能力が年とともに強化されていく結果、従来2系列としていた規模のプラントでも1系列とすることが可能となるように暫時系列数を減じた方式に移行していく。ちなみに250MWクラスでも従来の2系列が近年は1系列となっており、350MWでも1系列が採用されようとしている。

4.2 材 質

給水加熱器用加熱管材質としてはアルミニウム黄銅、モネルメタル(70Ni30Cu)、70-30銅ニッケル、炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼などがあり、古くは非鉄金属が多く用いられていたがわが国でも昭和38年ごろより炭素鋼が採用されるようになり、近年は高圧給水加熱器にはほとんど炭素鋼が用いられている。炭素鋼管採用当初は管端のインレットアタックが大きな問題であったが、給水のpH値調整、適当な設計管内流速の選定、管入口端形状に対する考察など多くの研究⁽¹⁰⁾の結果この問題は完全に過去のものとなっている。特に超臨界圧プラントでは低圧給水加熱器にも鉄系の管材質を使用することが可能となったため、給水加熱系から完全に銅合金を締め出すことになり銅の溶出防止上好ましい結果となっている。今後プラントの大形化と超臨界圧化に伴い高抗張力炭素鋼管の使用範囲が広がるものと予想される。原子力プラント用給水加熱器においては、給水中への金属の溶出を特にきびしく制限する必要上、加熱管材料としてステンレス鋼管が用いられる。

管板は高圧給水加熱器の場合鍛鋼(SF材)が用いられるが、非常に厚肉(約600mmに達する)で、かつ大形であるため均一な材料組成を得るため慎重な製造工程が必要となる。構造部材の厚肉化は熱応力の増大を招くため高抗張力鋼(たとえばJIS G 3115 压力容器用鋼板)を用いることが検討されており、将来は採用されよう。

4.3 熱 応 力

高圧給水加熱器の水室は非常に厚肉かつ大形であり、運転時の熱応力が大きな値となる。熱応力はプラントの起動、停止、負荷変動による給水温度の変化をそれぞれのパターンとして定め、それぞれに対する水室各部の温度分布を電算機によって求め、これを用いて各部の損傷度を求めることによって評価される。従来、タービンプラント用熱交換器の強度計算は通産省の発電用火力設備に関する技術基準によって実施されてきたが、熱応力計算にはこれに加えてASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII Pressure Vessel Div.2の考え方を取り入れて疲労解析を含めた計算を行なうことになる。

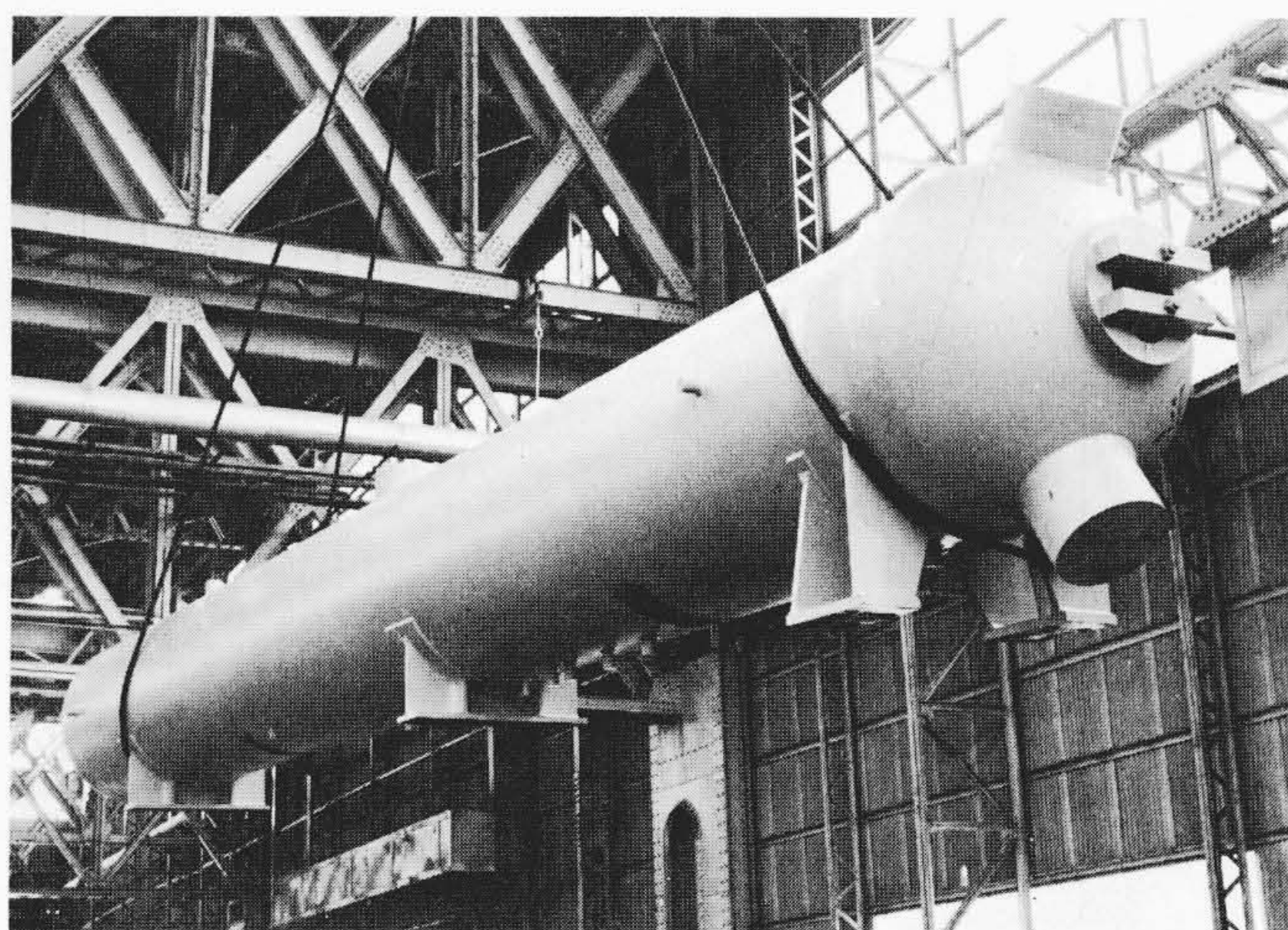


図7 高圧給水加熱器

4.4 構 造

図7は半球形水室を用いた高圧給水加熱器の外観写真である。水室を半球形とすることにより発生応力の均一化を図ることができるため、大形の高圧給水加熱器には標準的に採用されているものである。ただし小形のものに対しては、この形式ではマンホールよりはいることが困難となるため円筒形の水室が用いられる。胴体側は全溶接式としフランジを用いないため、高圧に対して有利な構造となっている。

4.5 製 作

超臨界圧火力プラント用高圧給水加熱器は水室側設計圧力が約320kg/cm²Gにも達し、水室の寸法も内径2mを越えるものが出現している。このため各素材の製造、機械加工、溶接、組立て、検査などの各工程にはきわめて高度の技術が要求される。たとえば素材には低温脆性(ぜいせい)に対する制限、製作工程を考慮し所定の熱処理履歴を加味した強度の設定が行なわれる。一方、このため材料の炭素当量が増す傾向にあるため溶接技術も高度のものが必要である。機械加工の面においては管板に対する管穴の穿孔(せんこう)がその大部分を占めるが専用のNC深穴あけ機による作業が行なわれる。加熱管の管板への取付けに際してはティグ溶接法により2層盛を行ない、さらに溶接後拡管して欠陥の絶無を期している。

検査も品質保証の点からきびしく行なわれ、超音波探傷、磁粉探傷、放射線探傷、液体浸透探傷など各種非破壊検査が採用されている。完成品の水压試験時には脆性破壊の危険を避けるため、試験水温の管理を材料のNDT温度との関連において十分検討して決定する。

4.6 原子力プラント用給水加熱器

原子力プラント用給水加熱器は設計圧力は比較的低いが、火力に比べて給水流量が多いため同一出力プラントでは一般に大形の加熱器となり伝熱面積にしておよそ1.4~1.5倍となる。また加熱管材質としてステンレス鋼を使用するため、材料費が高価になるほか応力腐食を防ぐためハロゲン系物質の使用をきびしく制限したり、品質管理面においても火力にも増して厳重な処置がとられる。また原子力用低圧給水加熱器の特徴としてドレン量が多いため、ドレン冷却部が大形となりこの部分での圧力損失もふえる傾向があるため、管配列に特殊な配慮が必要である。

5. その他の熱交換器

5.1 脱 気 器

脱気器の脱気容量はボイラの最大蒸発量によって決まるため、火力プラントの出力に比例して大形化していくが、貯水タンクの

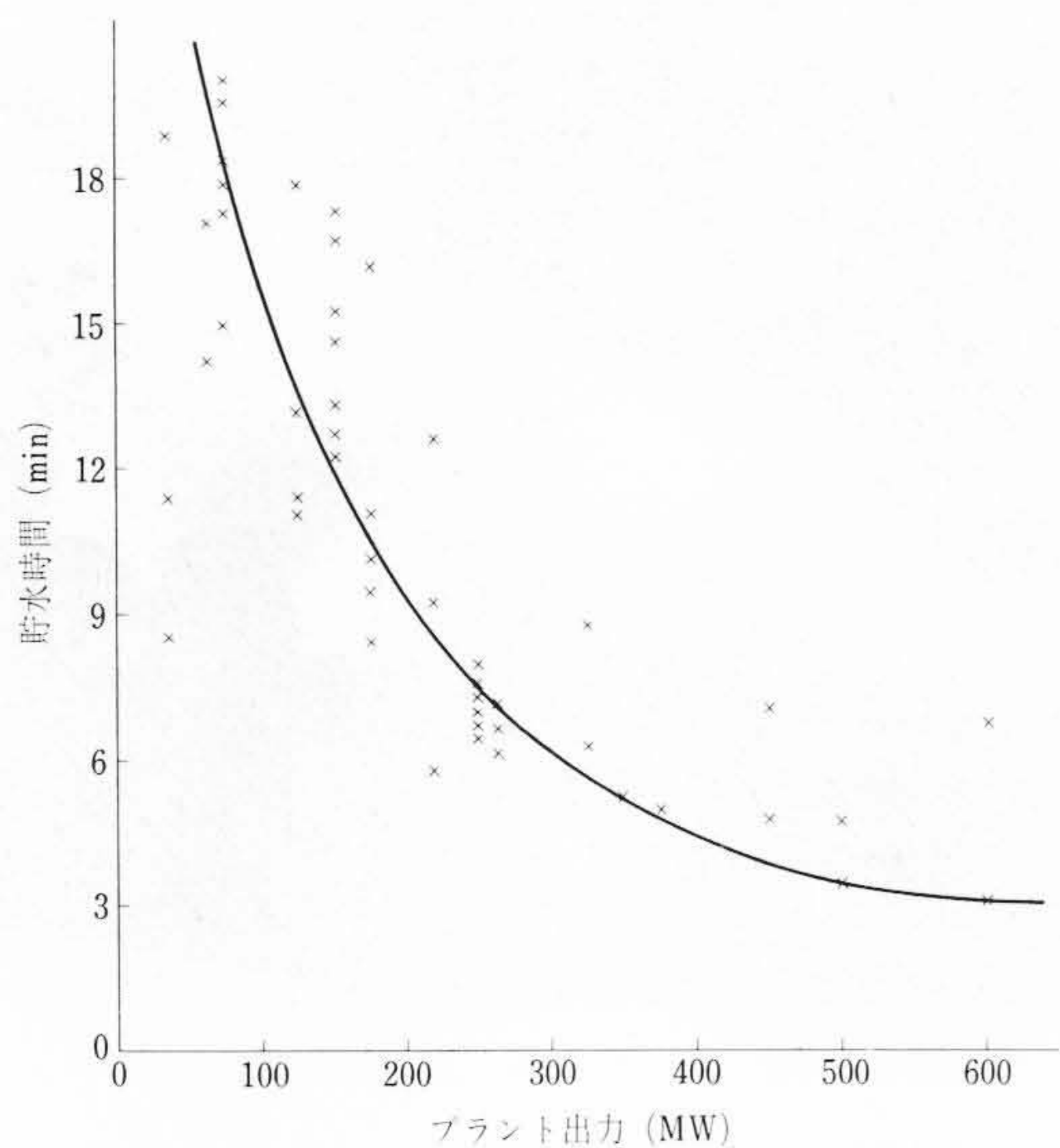


図8 脱気器貯水タンクの容量

貯水容量は出力に比例しては増大せずこの点が大容量脱気器の傾向といえよう。図8は貯水容量をボイラの最大蒸発量の何分間の量に相当するかを示したものである。本図のように最近建設される大形プラントほど貯水時間を短くし得るのは制御方式の進歩によりタービン起動、停止時および負荷変動時の給水流量の変動に対して安定して応答できるようになったためである。

5.2 空気抽出器

復水器内の真空を維持するための空気抽出器には蒸気式エゼクタと回転式真空ポンプがあるが、通常は信頼性のすぐれた二段式蒸気ジェットエゼクタが多く用いられる。原子力プラントにおいては空気抽出器で吸引しなければならないガス量が火力用に比べて大幅に多く、空気抽出器形状も非常に大形となる。

5.3 タービン用油冷却器

タービン用油冷却器はタービンの潤滑および制御用油を冷却水で冷却する熱交換器で、油側の熱伝達率が水側のそれに比較して約 $\frac{1}{3}$ と低いいため油側(冷却管外面)にフィンをつけて機器のコンパクト化を図っており、すでに多年の実績を有している。フィンチューブは図9にその一例を示すように転造したローフィン式でU字曲げも容易に行なうことができる。

5.4 冷却水冷却器

冷却水冷却器はプラントの所内冷却水を海水(または川水)で冷却する熱交換器で、海水を管内に流して管内に付着するよごれを掃除によって容易に除去しうるようにしている。プラントの大形化に伴って所内冷却水水量が増加するため、管支持板間隔を広くしてスペースを確保する必要が生じ管の固有振動数が低下して振動しやすくなるので設計的に十分考慮する必要がある。また運転の面においても、通常冷却水冷却器は1プラントに2台または3

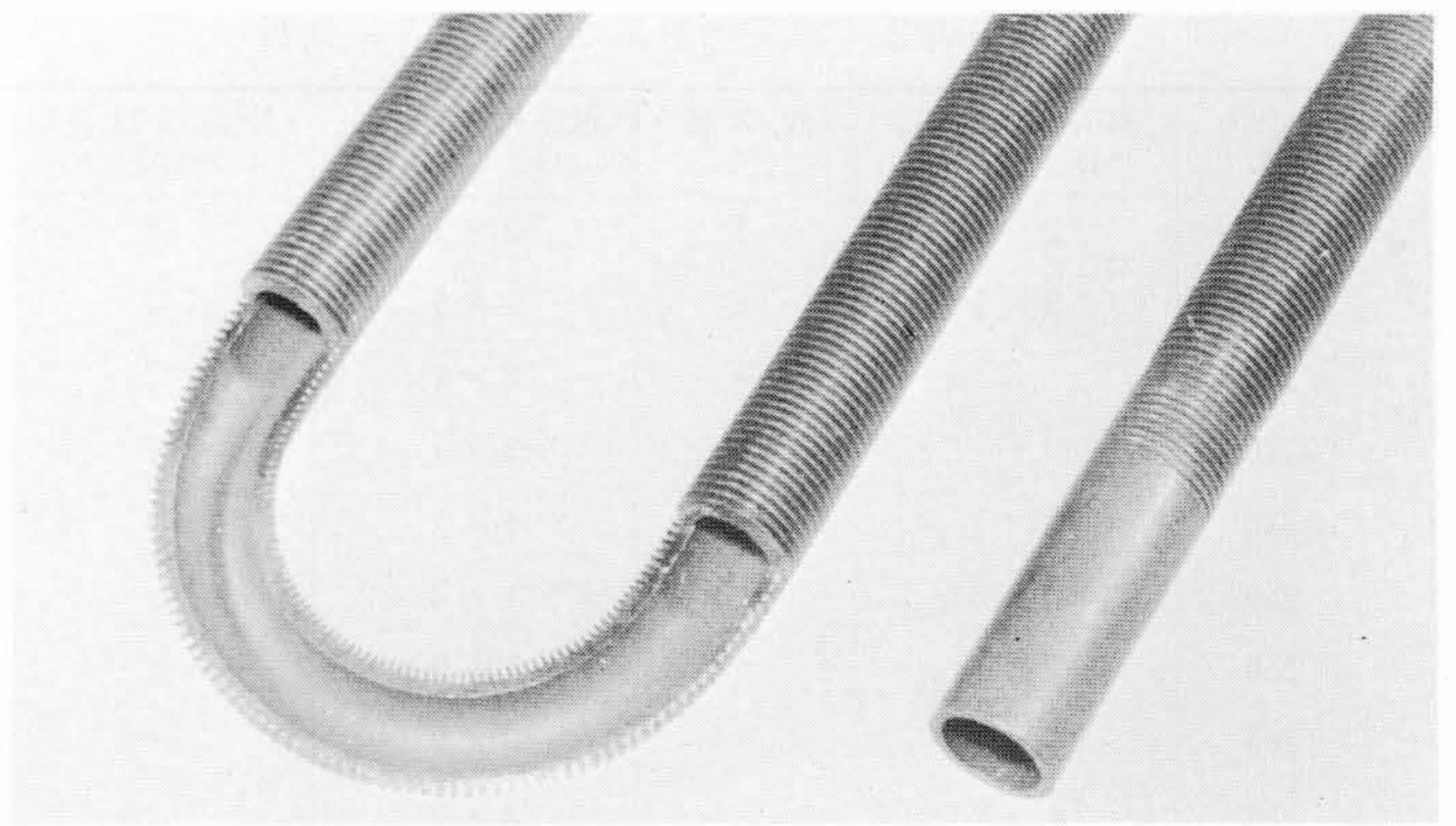


図9 油冷却器用フィンチューブ

台設置されるが、海水温度が低下して使用台数を減らしうる状態になったときは所内冷却水量も減らして(一部バイパスなど)管外流体の流速が過大にならぬよう配慮しなければならない。さもないと管の振動を誘発することがある。

冷却水冷却器の予備機の設置の可否は台数と管清浄度との関連において決められ、予備機を設置する場合は清浄度を高くとりうるが、設置しない場合は低くしなければならない。

冷却水として海水を用いる場合、管板材として鋼板にネーパル黄銅をクラッドした合せ材が広く用いられている。

5.5 グランド蒸気エバポレータ

原子力タービンプラントにおいてタービンのグランドシール用として供給する蒸気の放射能を皆無にするため、専用のエバポレータを設置する方式が現われており今後広く採用されるものと思われる。

6. 結 言

大容量タービンプラント用熱交換器の問題点について概説した。今後とも熱交換器の大形化が進むものと予想されるので技術開発ならびに設計・製造・検査の技術および設備の拡充と改善にいつその努力を傾注していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 田中：住友軽金属技報5, 4(1964-10)
- (2) 水野：火力発電21, 3(1970-3)
- (3) 佐藤：住友軽金属技報6, 1(1965-1)
- (4) 平松ほか：神戸製鋼技報19, 4(1969-10)
- (5) 小島：火力発電21, 10(1970-10)
- (6) 戸部：火力発電21, 1(1970-1)
- (7) 野世溪ほか：住友軽金属技報12, 2(1971-4)
- (8) 佐藤ほか：住友軽金属技報11, 4(1970-10)
- (9) 久富ほか：火力発電21, 11(1970-11)
- (10) Takahashi et al.: ASME 69-WA/PWR-6 (1969)