

熱交換器の予防保全技術

Preventive Maintenance Technology for Heat Exchangers

火力発電プラント設備用主要熱交換器である復水器や給水加熱器は、経年劣化現象などによって種々不適合事例が発生している。これらについては、おの予防保全を中心とした対策を実施しているが、今後発電プラント設備の経年劣化の進行も考え、定期的な健全性評価・診断に基づき、補修・取り替えを長期的に計画することが必要と考えられる。

住谷吉男* *Yoshio Sumiya*山根 保* *Tamotsu Yamane*

1 緒 言

火力発電プラント設備には種々の熱交換器が用いられているが、主要熱交換器である復水器や給水加熱器などで、経年劣化現象にかかわる不適合項目として、復水器冷却管のアンモニアアタックおよび給水加熱器用モネル管の応力腐食割れのように古くから知られているものも多い。近年、火力発電プラント設備でWSS(Weekly Start and Stop)またはDSS(Daily Start and Stop)運用が増大する傾向に伴い、これらの運用に関連した比較的新しい不適合事例も発生しているため、主な熱交換器について、今後の信頼性向上策としての新技術を含めた改善施策について述べる。

復水器、給水加熱器および脱気器の経年劣化現象などによって発生する主な不適合項目の概要を、取りまとめて表1に示すとともに、その中の代表的な事例について、発生原因と対策を以下に述べる。

2 復水器の予防保全技術と耐力向上対策

2.1 冷却管の腐食

熱伝導率が高く、海水中での防食効果を持つAl黄銅管は、古くから復水器用冷却管として使用されてきているが、環境あるいは運用条件によってはインレットアタック、デポジットアタック、アンモニアアタックといった管内・外面からの腐食・浸食を受けることがある。特に、管内側の海水による腐食に対する耐食性については、使用環境によっては注意する必要がある、管内表面に付着した海棲(せい)生物の後流に発生するデポジットアタック(局部壊食)などは、短時間で管壁に貫通孔を生じさせ、海水漏れを発生させることがある。

海水側の防食のため、硫酸第一鉄の注入、電気防食、塩素注入、ボール洗浄、逆洗運転などの対策が従来実施されてきているが、いずれの対策でも、日常のきめ細かい管理運用が

冷却管の保護にとって必要不可欠である。

Al黄銅管復水器の海水漏れに対する予防保全策としては、定期的なET(渦流探傷検査)の実施が効果的であるが、数万本にも及ぶ冷却管に対して、定期検査ごとにETを実施・管理していく負担は大きなものとなるため、現在、ETのデータ整理、残肉厚管理などを自動管理する方策が試作、開発されつつある。

長年の運転使用によって、施栓率が高くなってきたAl黄銅管復水器の根本的な改善策を加えるには、冷却管の一部または全数をチタン管にリプレースするのが最も完全な保全策となる。チタン管は耐食性が抜群で、管内・外面からの腐食の心配がまったくなく、復水器冷却管への採用によって海水漏れの危険性が大幅に低下し、プラント設備の安定運用が図られる。また、チタン化により、定期検査時のETの必要性や日常の冷却管保護の保守管理も、Al黄銅管復水器に比べ非常に軽減されるほか、チタンストリップの量産化体制による造管コストの低減と信頼性向上面への考慮から、多くの復水器のチタン管が採用される傾向にある。一方、チタンは伝熱性能がAl黄銅よりも若干低いため、薄肉のチタン管を使用する必要がある、振動防止対策の実施が不可欠である。このため、冷却管支え間隔を小さくする方法が一般的に採用されている。

表2は、最近実施した250 MW火力発電プラント設備用復水器のチタン化後の当初設計に対する仕様比較を示したものである。チタン化後の性能試験結果、ボール洗浄の併用によって、復水器の実測真空度がAl黄銅管復水器に比べ改善され、プラントの効率向上に有効であったことが確認されている。

2.2 冷却管取り付け部の漏れ

冷却管取り付け部(拡管部)の漏れは運転に支障をもたらすので、気密性の確認を定期的実施することが必要である。

* 日立製作所 日立工場

表1 プラント機器の経年劣化現象要約表 主要熱交換器である復水器，給水加熱器および脱気器に発生する経年劣化現象の概要と，その対応策をまとめて示す。

機器名	経年劣化現象		管理，対応策
	項目	内容	
復水器	性能劣化	冷却管の伝熱性能低下	復水器性能の定期管理(冷却管の抜管調査)
		漏入空気量の増加	空気量実測の定期管理(ラバーベルト継手の点検，ほか)
		循環水量の低下	循環水ポンプの定期検査，循環水システムの定期管理
		空気抽出能力の低下	空気抽出器の単独性能試験の実施
		計測器類の劣化	真空測定管路の点検 計器の定期校正
		構造，機能劣化	製造メーカーとの共同管理
	材料劣化	冷却管損傷劣化	冷却管点検の定期管理，(渦流探傷検査，目視検査) 冷却管のチタン化
		胴体内部部材の劣化	点検による定期管理(目視検査，寸法検査)
		水室内面の劣化	点検による定期管理(目視検査，ライニング面検査，コーティング面検査，材料検査)
		管板の劣化	点検による定期管理
		高温流入座の劣化	点検による定期管理(浸透探傷検査)
		ラバーベルトの劣化	約10年で新製
給水加熱器	性能劣化	加熱管伝熱性能の低下	給水加熱器性能試験の実施(設備更新，化学洗浄，ジェット洗浄)
		構造，機能劣化	製造メーカーとの共同調査
	材料劣化	加熱管損傷劣化	点検による定期管理(渦流探傷検査，目視検査)
		加熱管取り付け部分の劣化	水圧または空圧などによる漏れ試験を実施(浸透探傷検査)
		胴体および内部部材の劣化	状況により肉厚測定，内部調査を実施(UTによる厚さ検査など)
		水室内筒と管板の隅部の劣化	点検による定期管理(磁粉探傷または浸透探傷，硬度測定，目視検査) (ヘアクラックのスキンカット)
		円筒形水室のダイアフラムの劣化	使用経歴の確実な把握(ダイアフラムの新製) (磁粉探傷，浸透探傷などの実施)
		水室内部部材の劣化	仕切材取り付け部の疲労割れ
脱気器	性能劣化	加熱管伝熱性能の低下	脱気性能の定期管理(トレーの水平，スプレーバルブの点検を定期管理)
		構造，機能劣化	製造メーカーとの共同調査
	材料劣化	加熱管損傷劣化	点検による定期管理(渦流探傷検査，目視検査)
		加熱管取り付け部分の劣化	水圧または空圧などによる漏れ試験を実施(浸透探傷検査)

注：略語説明 UT(Ultrasonic Test：超音波探傷検査)

表2 当初設計とチタン化後の仕様比較 復水器で，Al黄銅管をチタン管化した場合の仕様比較と性能試験結果を示したもので，チタン管化によって復水器の性能が向上した。

納入先：シンガポール セノコ火力発電所 ユニット出力：5号機 250 MW発電設備用復水器 当初設計とチタン化後の仕様比較：(☐ 印個所は変更個所を示す。)					
項目	当初設計	チタン化後	項目	当初設計	チタン化後
冷却面積	15,750 m ²	15,750 m ²	冷却管材質	アルミニウムプラス	☐ チタン
計画真空	7.5 kPa{ 703.5 mmHg}	☐ 7.8 kPa{ 701.5 mmHg}	管端シール方法	拡管	拡管
冷却水温度	29.5℃	29.5℃	管板材質	ネーバルプラス	☐ チタン
清浄度	85%	☐ 90%	管支持板枚数	11枚	☐ 23枚
冷却水質	海水	海水	設計圧力(胴体)	大気圧および真空	大気圧および真空
管内流速	2.2 m/s	☐ 2.0 m/s	設計圧力(水室)	294 kPa	294 kPa
冷却管外径肉厚	25.4 mm×1.07 mm	☐ 25.4 mm×0.5 mm	設計規格	HEI	HEI
冷却管有効長	10,040 mm	10,040 mm	実測真空	—	☐ 7.2 kPa{ 706.3 mmHg}
冷却管本数	19,660 mm	19,660 mm			

注：略語説明 HEI(Heat Exchange Institute)

この部分の気密性を簡便に確認する方法として、真空発泡装置などがある。

2.3 ラバーベルト形伸縮継手の経年劣化

復水器で材料の劣化が直接的に性能に影響するものの一つとして、タービンと復水器の熱変位を吸収するためのラバーベルト形伸縮継手がある。このラバーベルト伸縮継手に発生したき裂が進展し、この部分から空気が漏入して復水器性能を低下させた事例もあるため、定期的に復水器内部側のラバーベルト面の硬度測定と表面状態の観察によって、材料の経年劣化状況の把握・管理を行う必要がある。

ラバーベルト表面の硬度を測定し、実測硬度が $H_s:80$ 以上に硬化した場合は一般的に交換寿命と言われている。しかし、取り付け位置の関係から、硬度測定作業が容易ではないため、ラバーベルトの損傷未然防止策として、一般的な寿命10年を目標に新しく替えることが望ましい。

2.4 高温管台のき裂

復水器は真空条件下で運転されるため、器内温度は約 33°C 程度と比較的低い状態にある。一方、復水器には種々の流体が流入しており、主蒸気ドレンなど 400°C を超えるものもある。高温流体流入管台部では、配管部分と胴体の間に大きな温度差が生じるため、過大な熱応力が発生することがある。DSS運用などで加熱・冷却を繰り返すことによって、配管と胴体の接続溶接部に熱疲労によるき裂を生じさせる事例が増加している。

配管部分と胴体の間に緩衝部材としてサーマルスリーブを設け、流体は胴体部材から離れた個所で胴体内に流出させることにより、配管部から胴体部に至る間の温度こう配の緩和が図られ、き裂発生を防止することができる。

高温管台構造の改善実施例を図1に示す。

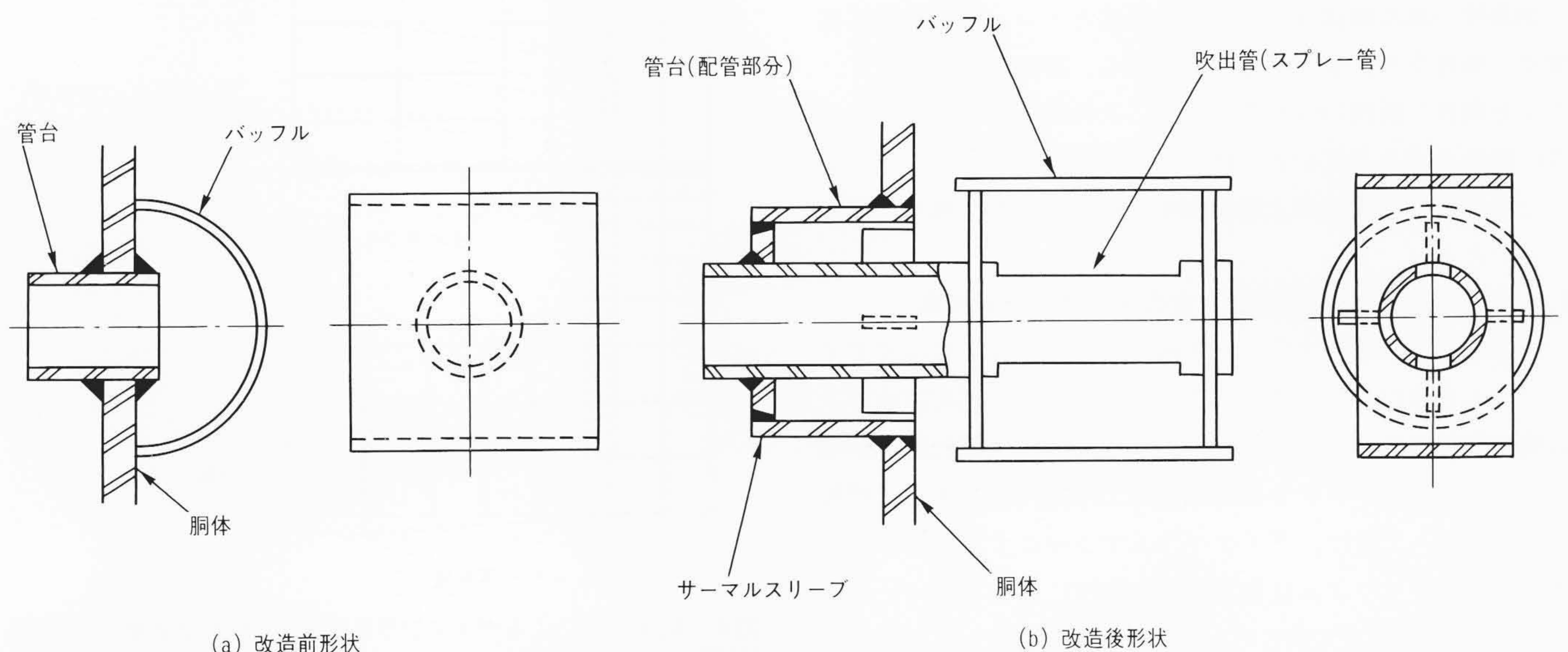


図1 復水器高温管台改造例 復水器の高温流体流入管台の構造改善事例を示したものである。

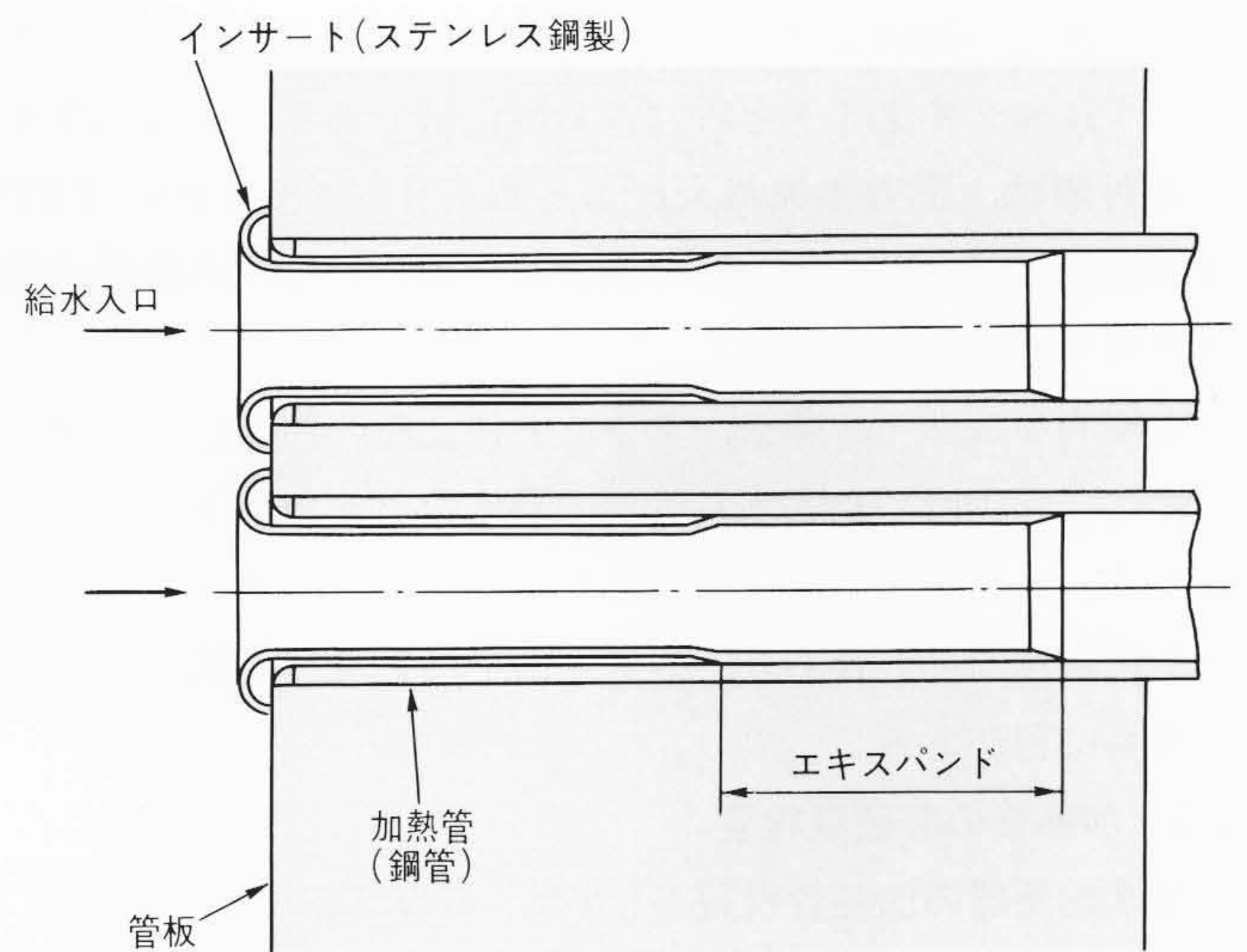


図2 給水加熱器の鋼管管端保護用インサート 鋼管チューブのインレットアタック防護策として、管端部に耐食性に優れたインサート管を装着した。

3 給水加熱器の予防保全技術と耐力向上対策

3.1 鋼管チューブのインレットアタック

インレットアタックは、管入口部内面の保護皮膜が水流によって破壊され浸食されていく現象で、主に給水温度が $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ の高圧給水加熱器に多く見られる現象である。この原因は、渦流・過流速のほか、給水のpHや温度などの影響による浸食、腐食である。

図2に示す管端部に、耐食性に優れたステンレス鋼製のインサート管の装着などが有効である。

3.2 鋼管チューブのスケール付着

鋼管チューブを採用した高圧給水加熱器では、加熱管内面

などに黒色の強固なスケールが付着することがある。このスケールはマグネタイトと呼ばれる酸化鉄である。過度のスケール付着は、圧力損失増大による水室仕切板の損傷、BFP (Boiler Feedwater Pump) の過負荷、あるいは伝熱性能の低下を招くおそれがある。

定期的なスケール除去、プラント停止時の防錆(せい)保管の強化、起動時の給水水質管理の徹底などが対策としてあげられる。スケールの除去方法としては、ウォータジェット洗浄や化学洗浄などがあり、コスト面では前者に、除去性能では後者に利がある。

3.3 加熱管の非破壊検査

給水加熱器の加熱管材質としては、炭素鋼、ステンレス鋼、Al黄銅、モネルなどが使用されるが、その材質によって検査の必要頻度、検査方法などが異なる。炭素鋼や黄銅系管の場合、加熱管の腐食・浸食による漏れ防止のための非破壊検査の必要性は高いが、耐食性に優れたステンレス鋼管ではその必要性も低い。

一方、検査技術面では、検査の必要性とは裏腹に、一般に炭素鋼のような強磁性体材料については、ETによる管の損傷確認が困難であり、逆に検査の必要性の低いオーステナイト系ステンレス鋼は、非磁性のためETが可能である。

現在開発中の炭素鋼管に対するETの技術例としては、次のようなものがある。

(1) 磁気飽和渦流探傷法

探傷部分の加熱管を部分的に磁気飽和させることで磁性の影響を除去し、検出能の向上を図る方法である。プローブの搬送性に若干難がある。

(2) 漏れ磁束磁粉探傷法

プローブに取り付けられた永久磁石によって管を磁化させ、欠陥部から漏れる磁束をコイルで検出する方法である。プローブの搬送性などに難が残る。

加熱管の漏れ確認は、ドレン弁開度とドレン水位、給水温度差、異音などによっても可能である。損傷の程度により、水室を開放し漏洩(えい)管および二次的損傷を受けた周辺の管に施栓をする方法がとられている。施栓率が10%以上となった場合は、信頼性向上策の面から給水加熱器全体の更新が有効である。

3.4 高圧給水加熱器円筒形水室のダイアフラム損傷

高圧給水加熱器の水室シール構造として、図3に示すダイアフラムを採用した構造がある。最近のDSS化運用プラント設備の増加に伴い、ダイアフラムの損傷・給水漏れ事例が増大している。ダイアフラム形水室は、水室内の高圧力を厚板の水室カバーで受け、ダイアフラムでシールする構造となっている。ダイアフラムは給水圧力の作用によって図4に示すように変形(誇張して示してある。)し、変形部位に高応力が生じる。また、ダイアフラムには給水の温度変化による熱応力

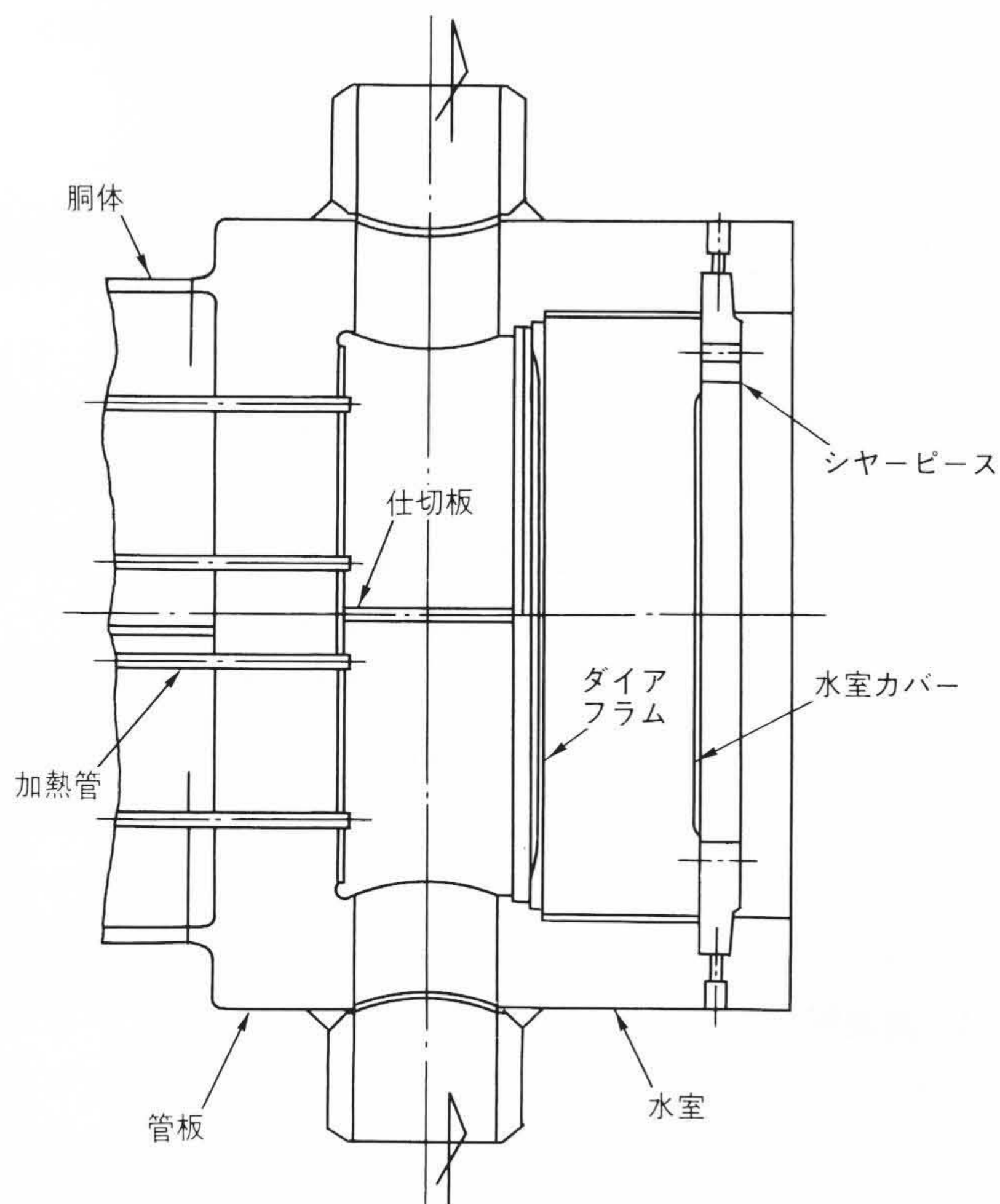
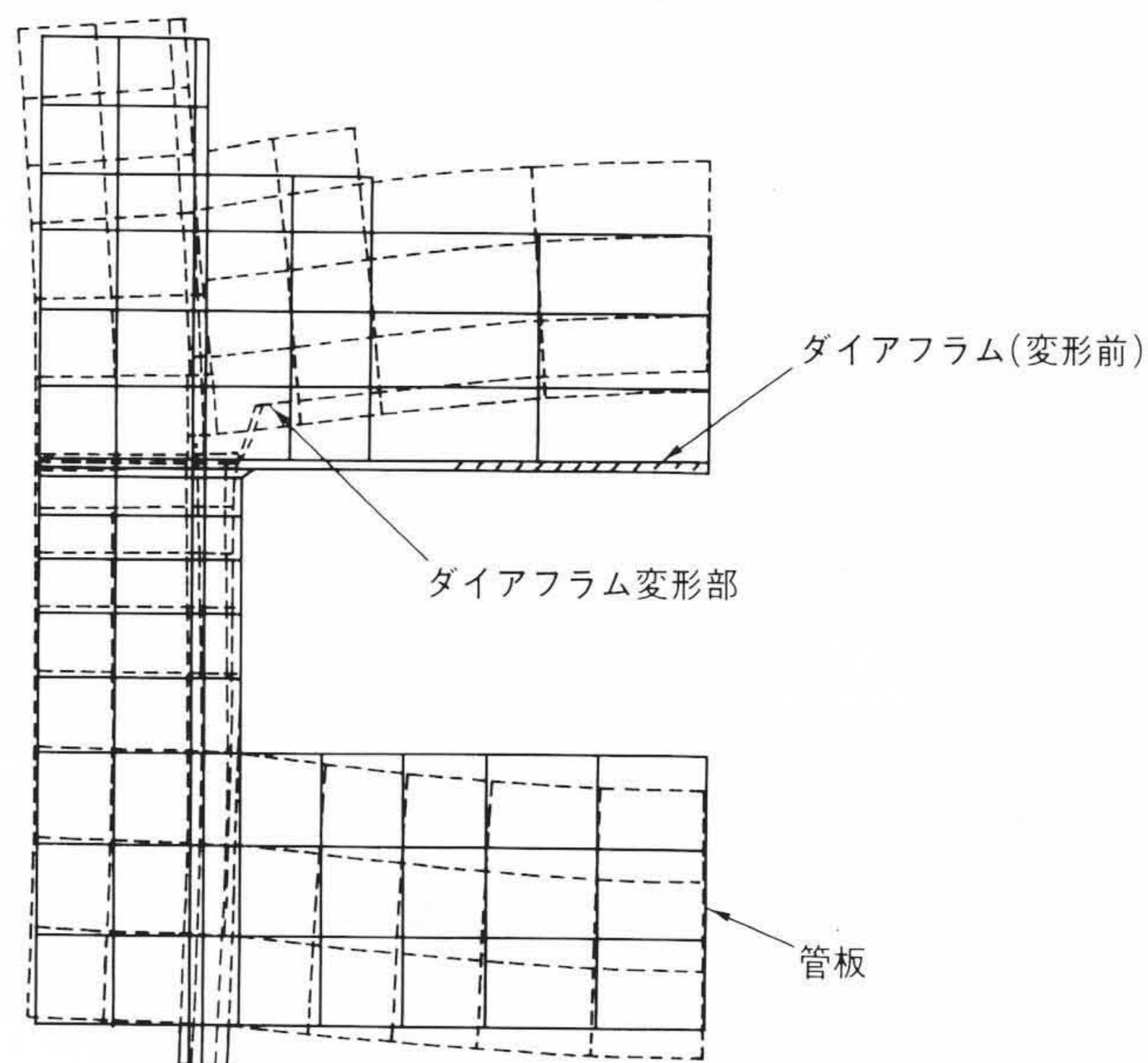
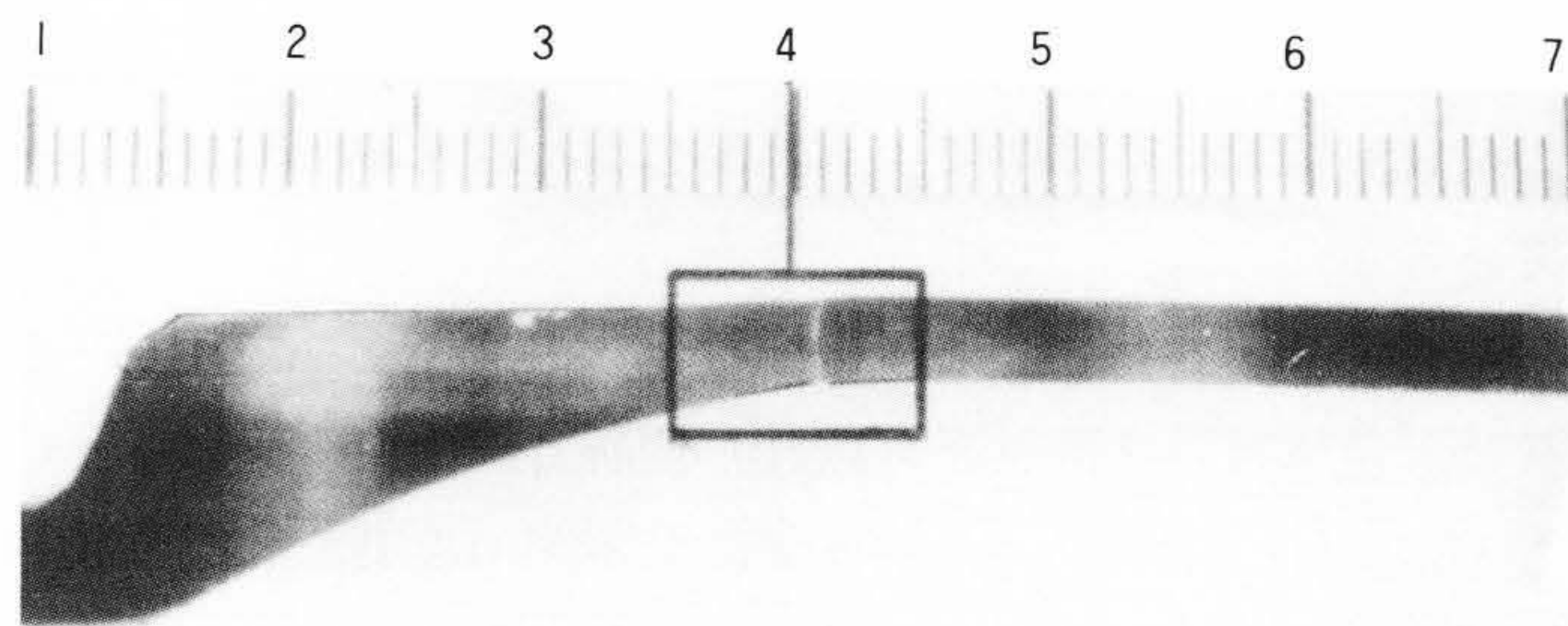


図3 ダイアフラム形水室構造図 溶接形ダイアフラムを採用した水室構造を示す。



注：—— 変形前，----- 変形後

図4 給水圧力によるダイアフラム変形状況(有限要素法解析例) 円筒形水室で、給水圧力によるダイアフラムの変形状態を示したものである。

が生じ給水圧による応力と相乗して高レベルの応力となり、DSS運用による疲労損傷に至る。

DSS運用を考慮した場合、ダイヤフラムは2年に1回は新しく替える必要があり、また水室開放などで切断開放した場合には、旧品を使用せず新しく替える必要がある。

3.5 高圧給水加熱器の給水漏れ事例の分析

国内火力発電プラント設備用高圧給水加熱器の納入稼働台数と、漏れ不具合発生件数(全部品の件数)を分析した結果を図5に示す。昭和30年代から納入稼働した給水加熱器は現在までに400台近くになっているが、この間加熱管の造管技術や給水加熱器の製作、検査技術などの進歩・向上によって、同図にみるように主に昭和48年以降に運開(新製器を含む。)された給水加熱器の漏れ発生件数は低率を示しており、品質および信頼性の向上が認められる。

したがって、今後のプラント設備の信頼性強化策の一環として、加熱管の施栓率および給水漏れ発生頻度が上昇傾向を

示す給水加熱器に対しては、新しく製作を図っていくことが有効と判断される。

3.6 低圧給水加熱器の胴体内部浸食

近年、低圧給水加熱器で胴体の減肉現象が多発している。調査の結果、これらの減肉個所は器内で比較的蒸気流速の高い個所あるいはドレンの流動などがあって、浸食を誘発しやすい個所であることが判明しており、特定温度域での腐食・浸食現象である。

鉄鋼材料の腐食速度は環境温度によって強い影響を受け、特定温度域(120℃近傍)で腐食速度が増大する傾向にある。低圧給水加熱器で前記特定温度域の近傍にあるもので、胴体内表部が浸食減肉する例が増加している。

応急対策として、減肉個所の胴板を局部切断して新しく交換している。その後、胴体径の増大、胴体の耐食性材への改善などの方策がとられている。

4 脱気器の予防保全技術と耐力向上対策

4.1 高温管台のき裂

高温の蒸気流入部などで大きな温度こう配がある場合あるいは温度変化がある場合(流体の温度そのものが変動する場合と、高温部にドレンが混入することによるサーマルショック的なきわめて急激な温度差が発生する場合などがある。)には、構成部材に高い熱応力が発生する。熱応力は部材の不連続個所に集中応力として発生し、DSS運用などで繰返し熱応力を伴う場合、疲労損傷を生じることがある。

配管上流側からのドレン混入など(例：ドレントラップ機能低下に伴うドレンの排出不良)がないかを調査し、あれば混入源を処置する。管台構造は完全開先溶接形として、応力集中を避ける。

4.2 脱気器のスプレートレイタイプ化

既設火力発電プラント設備で昭和39年以前に製作された脱気器はトレー形脱気器と呼ばれるタイプであり、脱気をトレーだけで行っている。脱気室内に流入した給水はスプレー拡散されることなく直接拡散トレー上に流下するため、脱気室内の温度と給水温度間に大きな温度差を生じさせ、内部構造部材(特にステンレス鋼部材)の変形、損傷などを多発させている。これらの損傷事例の改善策として、脱気器脱気室内の内部構造物をすべて新製取り替えし、スプレートレイタイプ脱気器に改造することにより、脱気室内の温度差を少なくすることが可能となり、内部構造物の変形、損傷などの発生を防止することができる。

脱気器脱気室内の構造改善実施例と改善効果を、図6に示す。

4.3 その他

溶接部(特に溶着金属部)のき裂発生の有無、脱気室底部などの腐食、スプレーノズルの劣化などが予防保全の対象となる。

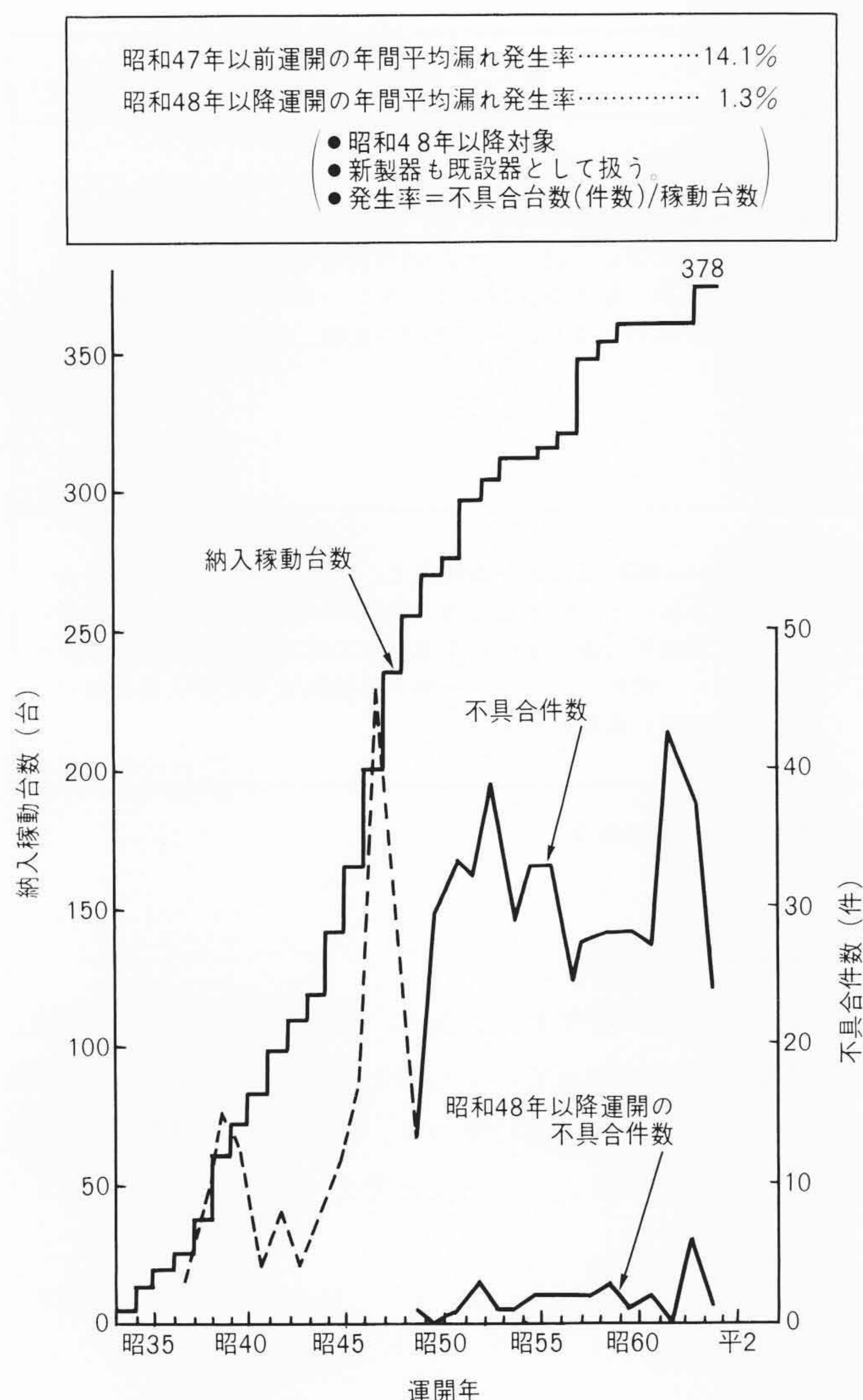
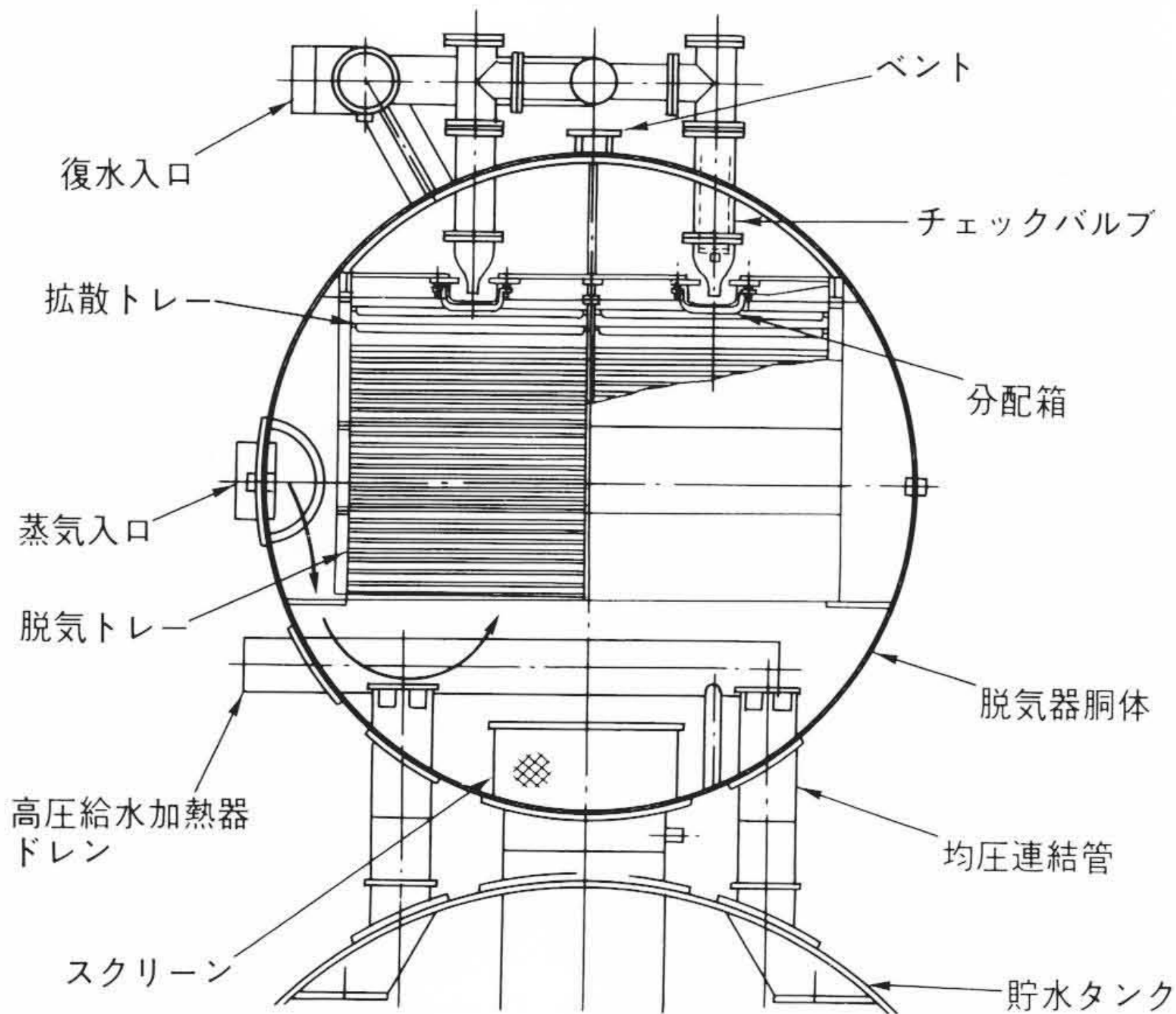


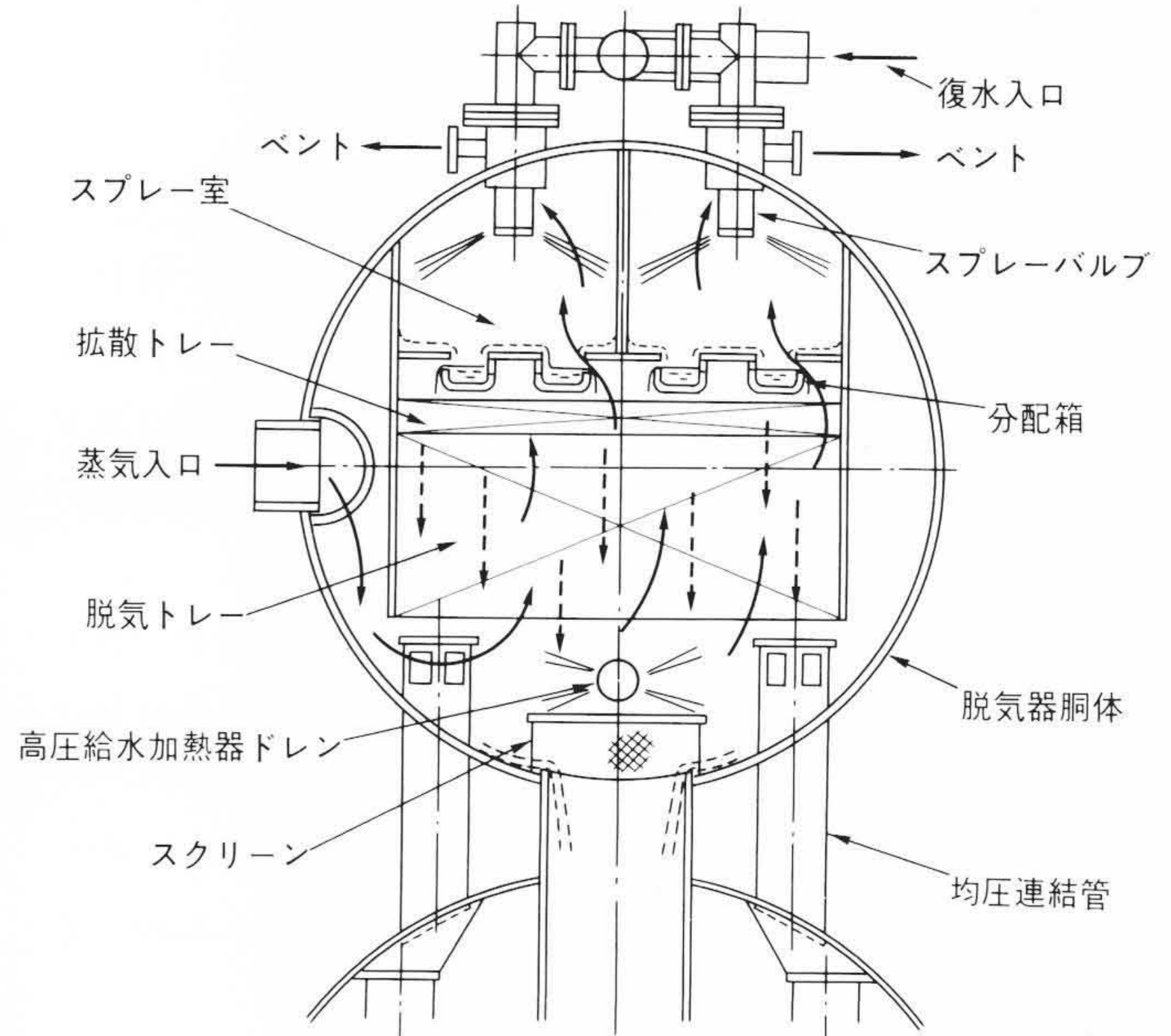
図5 納入稼働台数と漏れ不具合発生件数(国内75 MW以上の高圧給水加熱器) 高圧給水加熱器の納入台数に対する不具合発生件数を、年度別に取りまとめて示す。

新旧の構造

脱気器脱気室(トレー形、板葉トレー構造)



脱気器脱気室(スプレーバルブ、ブロックトレー構造)



新旧仕様の特徴

(a) 旧構造

(b) 新構造

新旧区分 項目	旧 構 造	新 構 造
給水温度上昇	給水は脱気室内に流入する際、分配箱に滞留した水の中にシール状態で導入され、分配箱からオーバーフローしてトレー部分に供給される構造となっているため、加熱蒸気との熱交換が十分に行われず冷水状態でトレー上に流下する。よって給水導入近傍部では、冷水と器内飽和温度の間に大きな温度差が生じている。 温度差による内部部材変形、損傷が発生している。	給水は脱気室内に流入する際、約78 kPa(8 mAq)のスプレー圧で噴射微粒化されるため、加熱蒸気との急激な熱交換を行い、スプレー部だけで約95%程度の昇温が完了する。このため、給水分配箱およびトレー個所では器内飽和温度に近いものとなり、内部部材の変形、損傷が防止できる。
脱気性能	トレー部分だけで脱気するため、給水入口側O ₂ 量が0.2 cc/l以下程度でないと性能確保が難しい。	スプレー噴射は給水を微粒化し、給水の表面積を膨大なものとする一方、給水を高速で熱気中に飛流させるため、急速な沸騰熱伝達を達成して高効率の脱気性能を発揮する。スプレー脱気に加えトレー部でも脱気するため、高性能の脱気効果が実現される。

図6 脱気器脱気室内の構造改善実施例 脱気器脱気室内の構造改善実施例を示したものである。

5 結 言

以上、発電プラント用機器として主要な熱交換器の経年劣化現象、その対策および新技術の概要について述べた。

従来熱交換器類は、予防保全を中心とした経年劣化対策を実施しているが、最近では余寿命診断技術の開発も進められ、

一部適用されつつある。

今後発電設備の経年劣化が進み、運用形態もさらに多様化、かつ過酷なものになっていくものと予想されることから、定期的な健全性評価・診断に基づき、取り替え、補修時期を長期的に計画立案することが必要と考えられる。