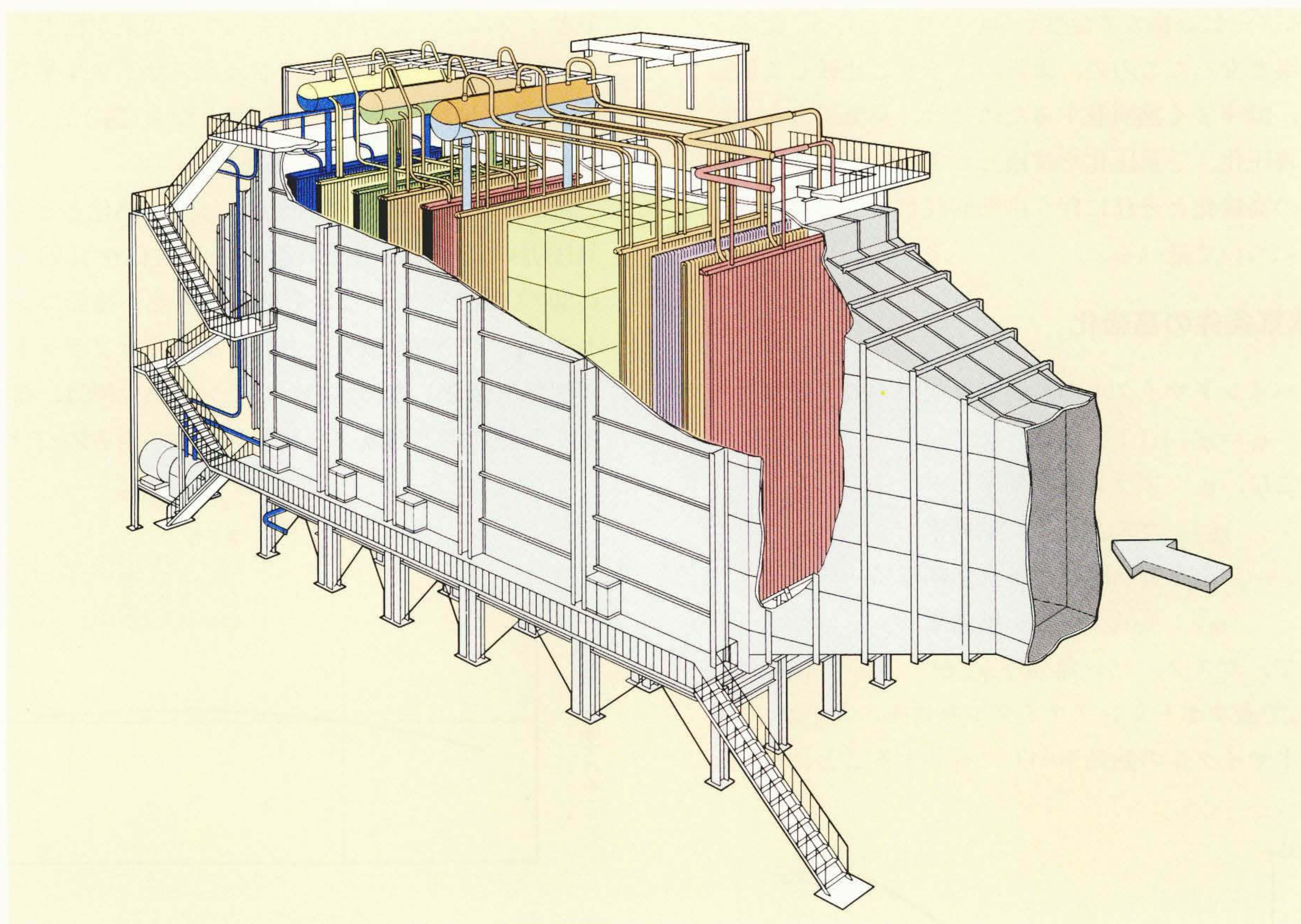


コンバインドプラントにおける蒸気サイクルの高効率化と 排熱回収ボイラの対応

Improvement of Bottoming Cycle and Heat Recovery
Steam Generators for Combined Plants

高鷹生男* Ikuo Kôtaka
重中利則** Toshinori Shigenaka
古林 肇** Hajime Kobayashi
保泉真一*** Shin'ichi Hoizumi



再熱・三重圧排熱回収ボイラ 効率的熱回収のために、多種類の管群を用いている。

コンバインドプラントでのガスタービンの高効率化に伴う排ガス量の増大、排ガス温度の上昇は、排熱回収ボイラの大容量化、蒸気条件の高級化およびシステムの再熱・三重圧化による高効率蒸気サイクルを可能とした。

高効率蒸気サイクル用排熱回収ボイラは、効果的熱回収のために多種類の管群から構成された複雑な

伝熱面配置を必要とし、実績に裏づけられた技術を基に、高性能伝熱管、管群つり下げ構造などの新技術を応用し、信頼性の高いボイラを完成した。

今後、プラント熱効率50%を目指し、1,500℃級ガスタービンの開発に歩調を合わせて、ボトムングサイクルのいっそうの改善を図っている。

* バブコック日立株式会社 呉工場 技術士(機械部門) ** バブコック日立株式会社 呉工場 *** 日立製作所 日立工場

1 はじめに

コンバインドサイクルでの高効率化は、トッピングサイクルでガスタービンの燃焼温度を高くし、熱落差を大きくすることである。燃焼温度の高温化は、排熱回収ボイラの入口排ガス温度の上昇を伴い、ボトムリングサイクルでの高効率化を可能とする。

蒸気サイクルの高効率化は、従来のボイラでの手法と同じく蒸気の高温・高圧化、再熱化によってもたらされる。ガスタービン排ガス温度が600℃程度という、従来よりは高温となったものの、通常のボイラと比較して低温のため、効率よく熱回収するためには、蒸気圧力を多段とする複圧化、三重圧化を採用してきた。ここでは、蒸気条件の高級化とそれに伴う排熱回収ボイラの対応技術の概要について述べる。

2 蒸気条件の高級化

コンバインドサイクルの熱効率を次の(1)式で表す。

$$\eta_p = \eta_{GT} + (1 - \eta_{GT}) \times \eta_B \times \eta_{ST} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 η_p ：プラント熱効率

η_{GT} ：ガスタービン熱効率

η_B ：排熱回収ボイラ熱効率

η_{ST} ：蒸気タービン熱効率

ここで、ガスタービン熱効率 η_{GT} が一定の場合には、 $\eta_B \times \eta_{ST}$ で表すボトムリングサイクル熱効率の向上が、コンバインドサイクルの熱効率向上に寄与することになる。

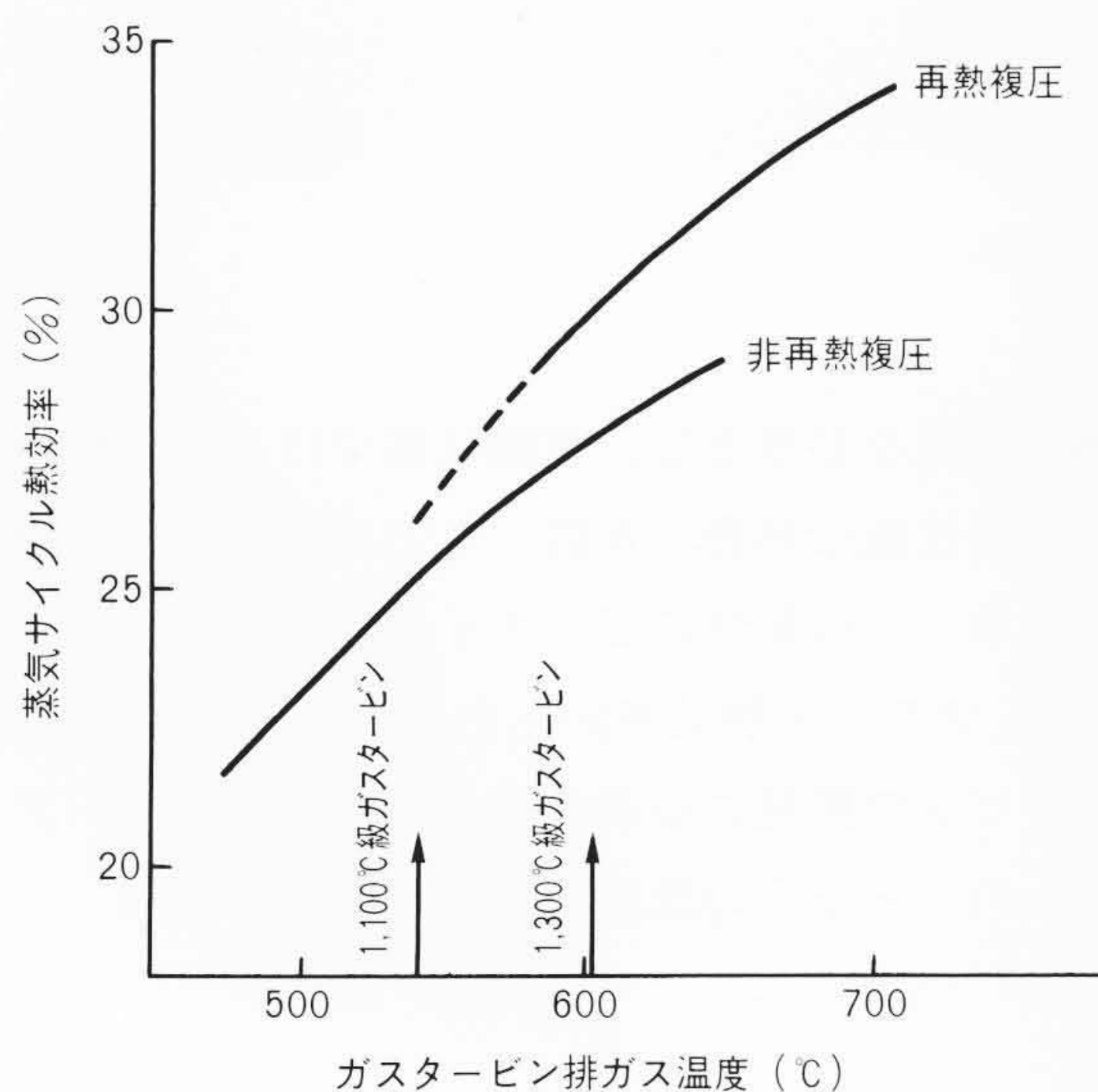


図1 ガスタービン排ガス温度と蒸気サイクル熱効率
再熱化は複圧(二重圧)で約2%(絶対値)の蒸気サイクル熱効率向上が可能である。

ボトムリングサイクルの熱効率向上には蒸気サイクルの高級化が最も有効であり、その具体策として次に述べる主な方策が考えられる。

2.1 再熱サイクルの採用

現在、国内で実用化されているコンバインドサイクルは燃焼温度1,100℃級のガスタービンが主流であり、蒸気サイクルとしては非再熱形が採用されている。近年1,300℃級ガスタービンの実用化に伴い、その排ガス温度も現在の約540℃から600℃以上まで上昇するため、蒸気サイクルとして再熱形を採用する効果が拡大し、複圧(二重圧)システムでの比較では蒸気サイクル熱効率で約2%(絶対値)の高効率化が可能となる(図1)。

2.2 主蒸気条件の高温・高圧化

蒸気サイクル熱効率の向上には、再熱化とともに主蒸気圧力の高圧化、主蒸気温度の高温化が有効である。1,300℃級ガスタービンを用いた再熱一軸形コンバインドプラントでの主蒸気圧力および温度とプラント熱効率の関係を図2、3に示す。プラント熱効率は、排熱回収ボイラ熱効率と蒸気タービン熱効率の両者のバランスに

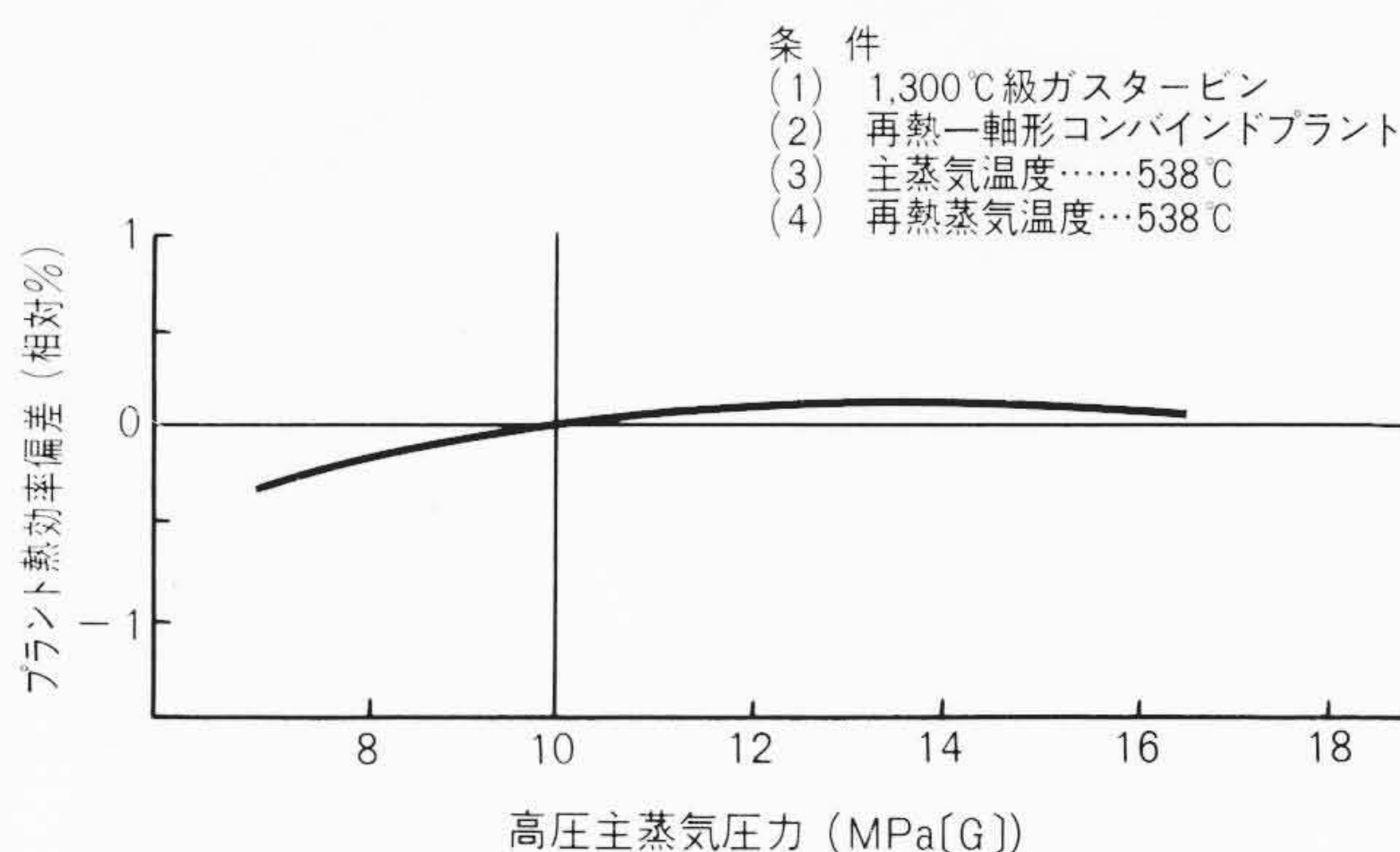


図2 高圧主蒸気圧力とプラント熱効率
高圧主蒸気圧力が10 MPa(G)を超えるとプラント熱効率の上昇は小さくなる。

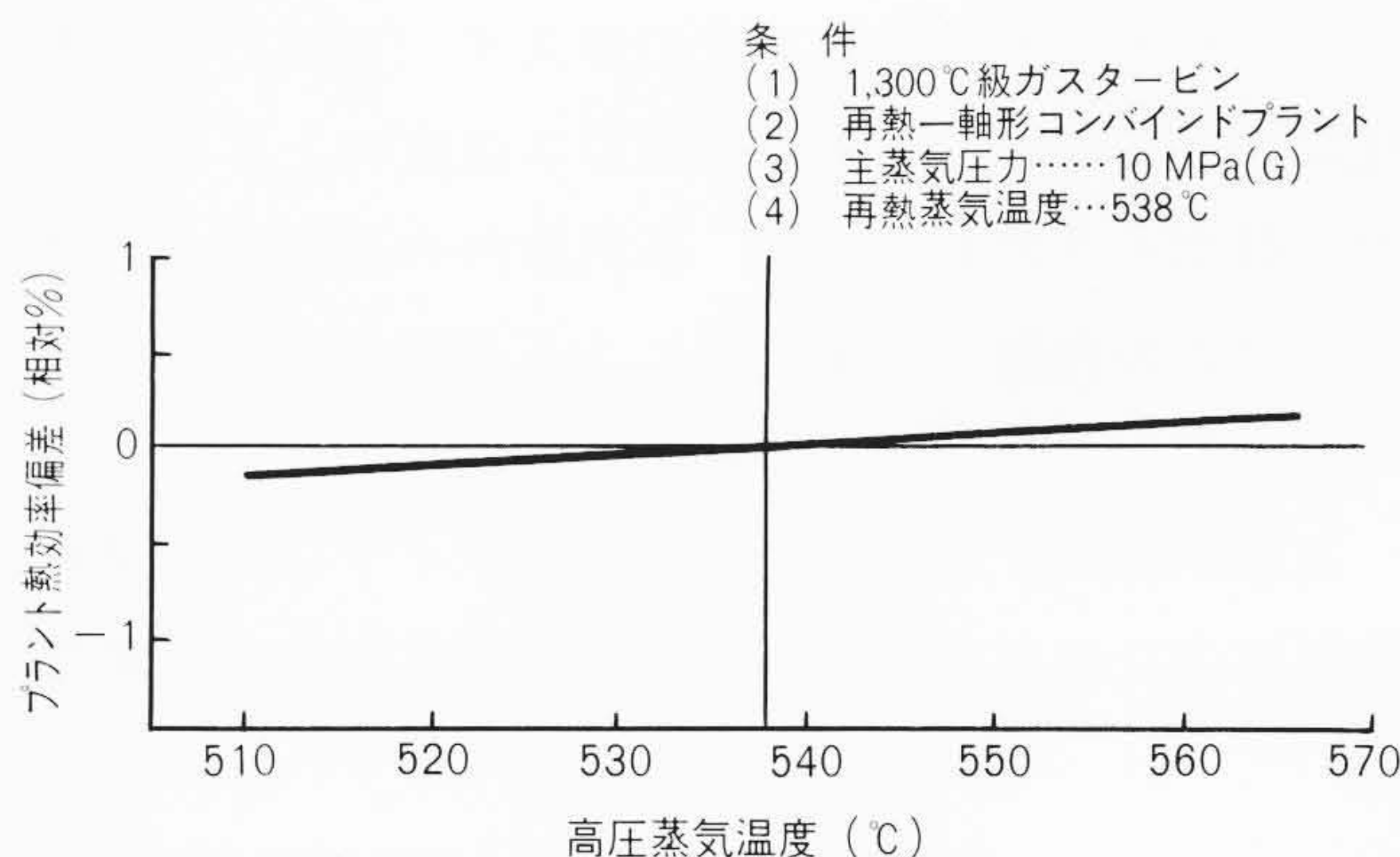


図3 高圧主蒸気温度とプラント熱効率
高圧主蒸気温度とともにプラント熱効率が上がることがわかる。

よって決定されることになる。そのため、従来形火力プラントのような主蒸気条件の高級化がそのまま大きな効率向上に結びつく特性とは異なり、特に主蒸気圧力については約13~14 MPa[G]近傍に最高効率点が存在する。現在、バブコック日立株式会社が国内の電力会社向けに計画中の再熱一軸形コンバインドプラントでは、上記検討事項をベースに従来の火力プラントでの主蒸気条件の選定実績などを総合的に勘案し、10 MPa[G]/538℃を選定としている。

3 再熱・三重圧排熱回収ボイラ

3.1 排ガスおよび流体温度

高効率化を追求した再熱・三重圧システム用排熱回収ボイラは、10種類以上の伝熱管群を有効に配置し、ガスタービン排ガスからの排熱を最も少ない伝熱面積で回収するように設計している。

高圧・中圧・低圧の各節炭器、蒸発器、過熱器および再熱器はその伝熱効率が最大となる最適な位置に、ガス流れに対して直列あるいは並列に配置している。また、再熱器および高圧過熱器は、蒸気タービン入口蒸気温度を一定に保つために減温器を組み込んでいる。管群構成の一例を図4に示す。

3.2 排ガス出口温度

熱効率向上の観点からは、可能な限り低温まで熱回収することが望まれているので、単圧システムの初号機では排熱ボイラ出口排ガス温度を220℃、複圧初号機では110℃、最新の設計では100℃以下まで熱回収することを計画している。

しかし、低温域での熱回収はエクセルギーの小さい低

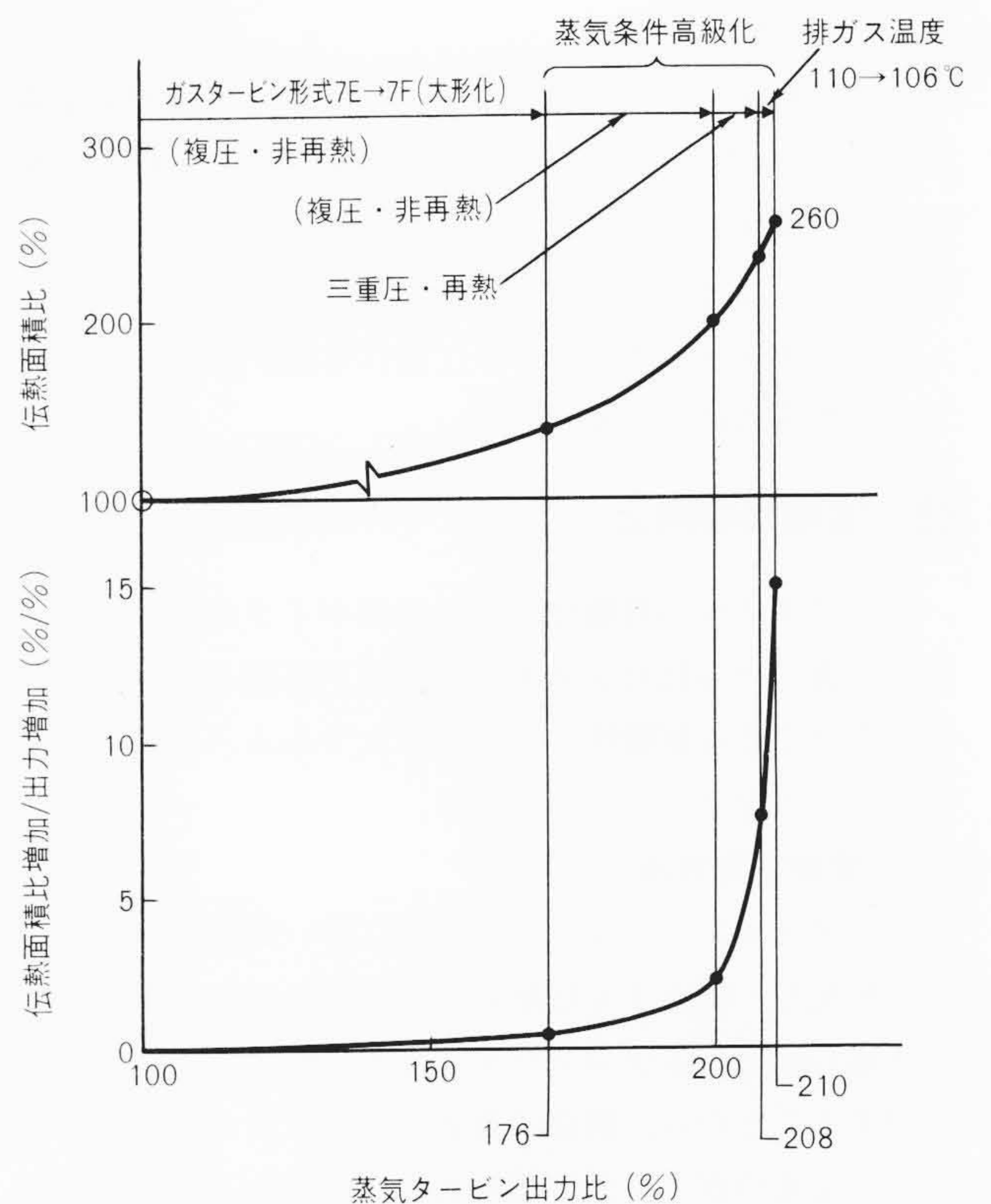


図5 出力と伝熱面積の関係 低温までの熱回収は、多くの伝熱面積を必要とする。蒸気タービン出力比100%は、ガスタービン形式が7E、蒸気サイクルが複圧・非再熱の場合を示す。

圧の蒸気であり、得られる蒸気量の割には出力増加は小さい。他方、そのための必要な伝熱面積は急激に増加する特性を持つ。この関係を図5に示す。

このため、排ガス温度選定に対しては効率向上によるCO₂削減という地球環境保全対策と合わせて、経済性も含めた総合的な観点から評価することが必要と考える。

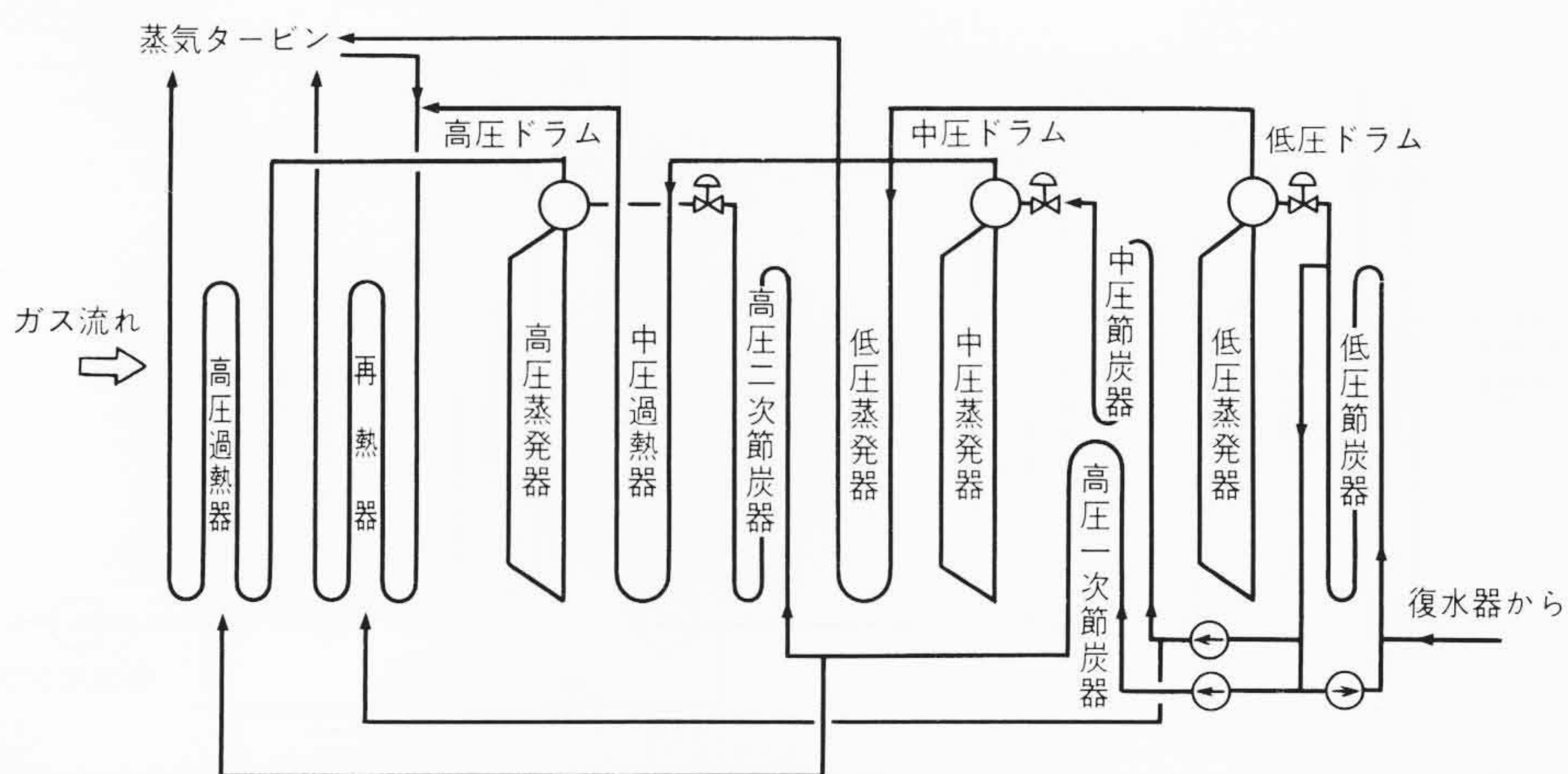


図4 管群構成 多種類の管群を複雑に組み合わせて、効率向上を図った。

3.3 ボイラ形式

ボイラ形式には伝熱管を水平に配置して、排ガスを垂直に流す縦(たて)形と、伝熱管を垂直にして、排ガスを水平に流す横形がある。後者は自然循環が可能であり、循環ポンプなどの削減による設備費、所内率低減に寄与し、かつ後述するモジュール工法にも適するため、国内では多数を占めている。

4 信頼性の向上

蒸気サイクルの複雑化、排熱回収ボイラの大形化は、実績に裏づけられたシステム、構造を基礎とした技術の積み上げによる信頼性向上が不可欠である。ここではそのシステムなどについて述べる。

4.1 管群支持方法

ガスタービンの高温、大容量化に伴い排熱回収ボイラも大形化し、構成する伝熱管も長尺となる。さらに、伝熱性能の向上およびコンパクト化を目的に小径伝熱管を採用することから、構造の簡素化、信頼性の向上を目指して、従来のボイラで実績のある管群つり下げ方式を採用している(図6)。

4.2 節炭器スチーミング対策

低負荷でも排ガス量の減少が小さく、温度だけ低下するコンバインドサイクルでは、変圧システムとも関連して、節炭器でスチーミングが生じやすい。この対策として、給水調整弁を節炭器出口に設置し、ポンプの特性を利用することにより、節炭器出口までの圧力を常に高く保持し、スチーミングを防ぐ方策を採用している。調整

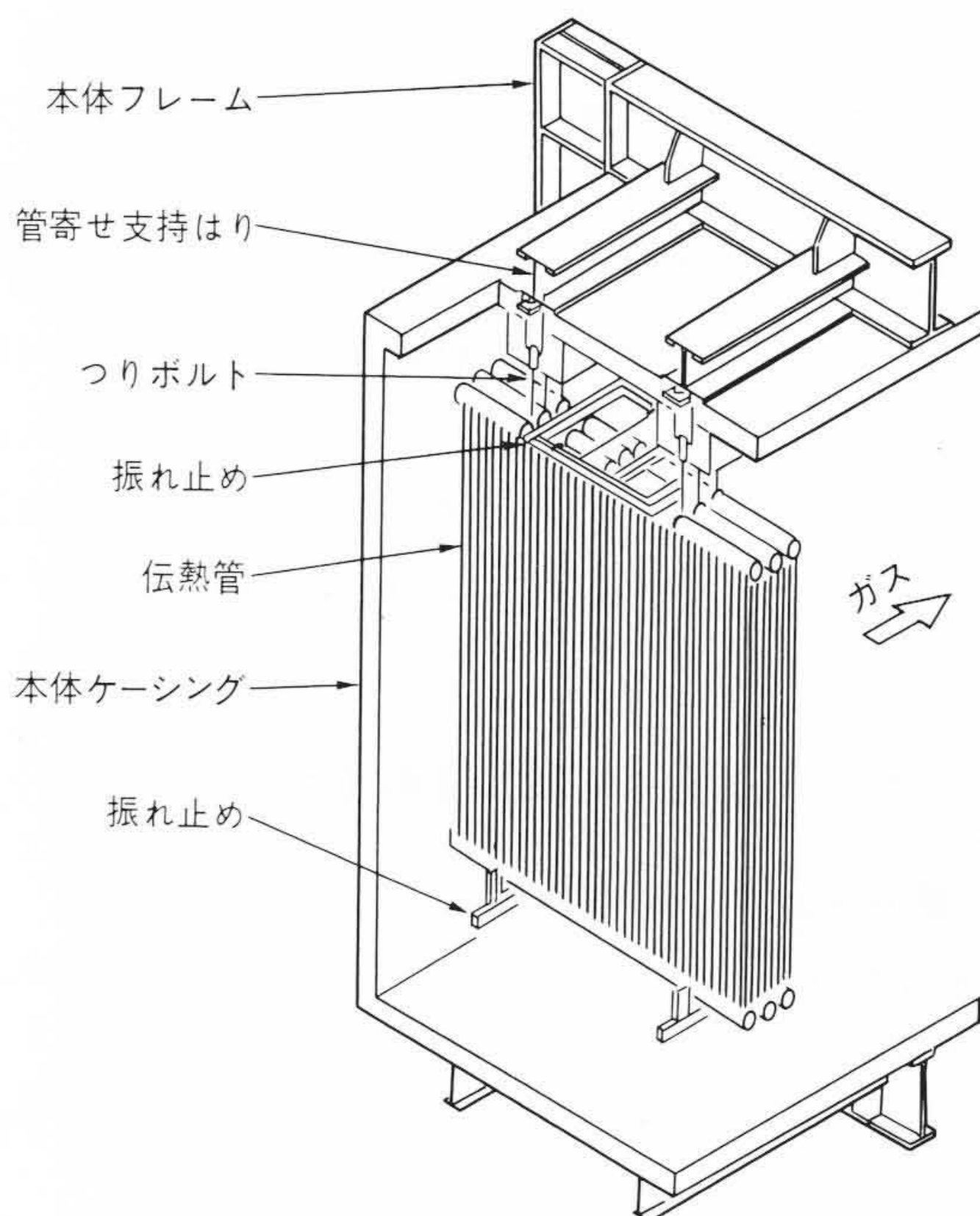


図6 管群つり下げ構造 管長13～15mの管群が天井はりからつり下げられる。

弁周りの系統例を図7に示す。

しかし、給水調整弁の下流では、フラッシングが生じる場合もあり、以下のような種々の対策を構じている。

- (1) 調整弁内弁への多段減圧方式の採用
- (2) 内弁の材質向上
- (3) エコノマイザサイクロンの採用

このシステムは2年以上の実機運転によって信頼性を実証している。

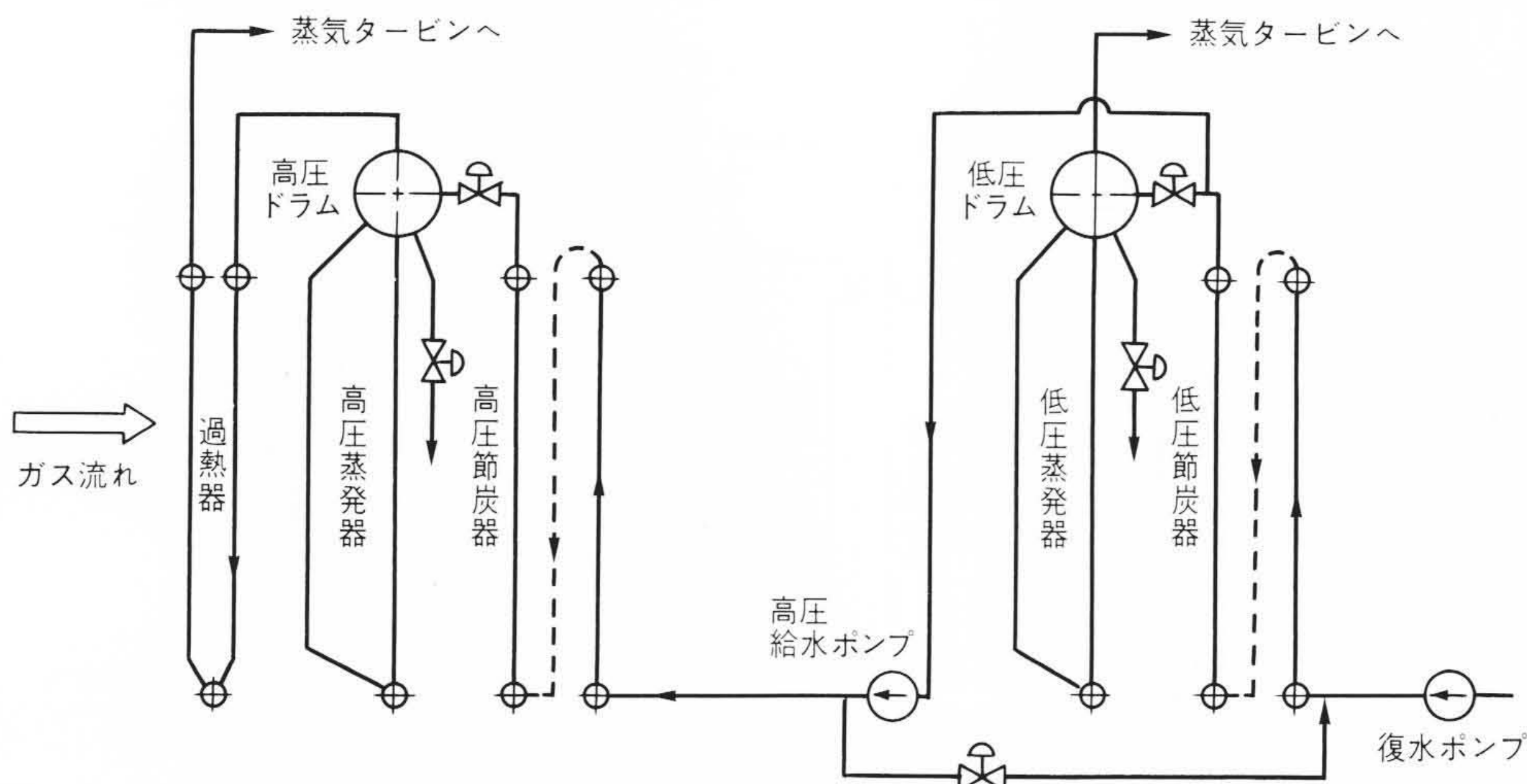


図7 節炭器スチーミング対策 低負荷でもガス量の多い、ガスタービン排ガスに特有の技術である。

4.3 ドラムレベル制御

中間負荷運用が主となるコンバインドプラントでは、急速負荷変化対応はもちろんのこと、起動時および負荷遮断時などのドラムレベル制御の安定化が重要であるため、以下の考慮を払っている。

4.3.1 起動時

スエリングによるレベル上昇を考慮して、起動時には低位に設定し、時間とともに設定値を変化させるレベル設定と、缶水位低減弁の制御によるドラムレベルの安定化およびブロー量の低減を図っている。

4.3.2 FCB, 負荷遮断時

蒸気流量の急変に伴うドラムの内圧変化はレベル制御の不安定化を招くことから、給水調整弁に目標開度を与えて圧力が安定したのち、通常の制御へ移行させるなどの制御上のくふうを加えている。この結果、既設複圧システムでのFCB(Fast Cut Back)時のレベル変動は小さく、緊急時でのシステムの信頼性向上に大きく寄与している。

再熱、三重圧システムはさらに複雑な特性になると考えられるが、これらの実績をベースに開発したシミュレーションによって信頼性の高い制御系を計画中である。

4.4 高性能フィン

低温までの熱回収は伝熱面積の大幅な増加を伴うため、伝熱性能の向上も大きな課題の一つとなる。フィンチューブの性能向上はフィン形状の改善であり、バブコック日立株式会社は独自の技術によるフィンのセレイテッド(のこぎり歯状)化技術を開発した。従来のソリッドフィンと新しいセレイテッドフィンの形状を図8に示す。セレイテッドフィンはその形状が示すように、流れ

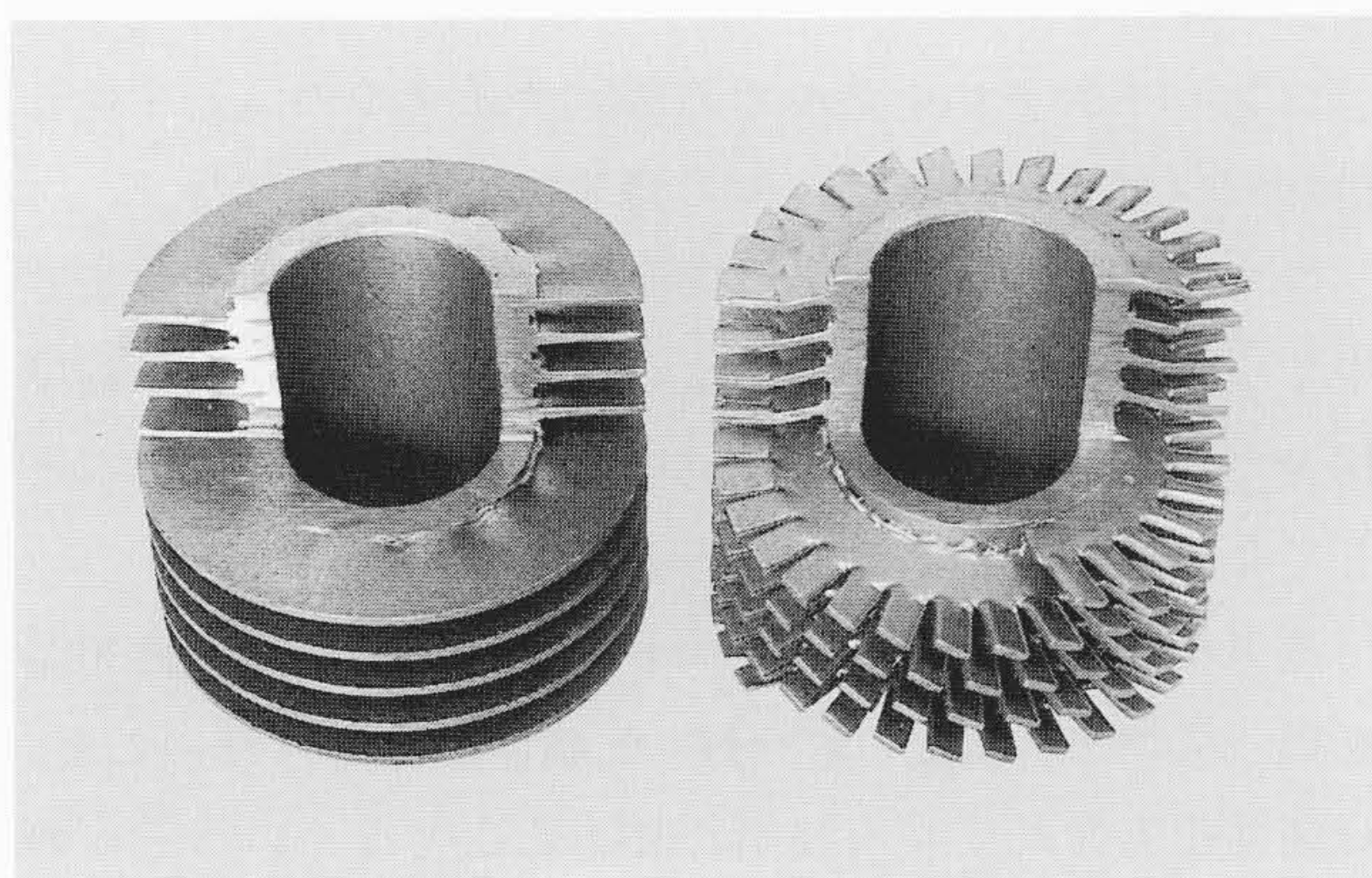
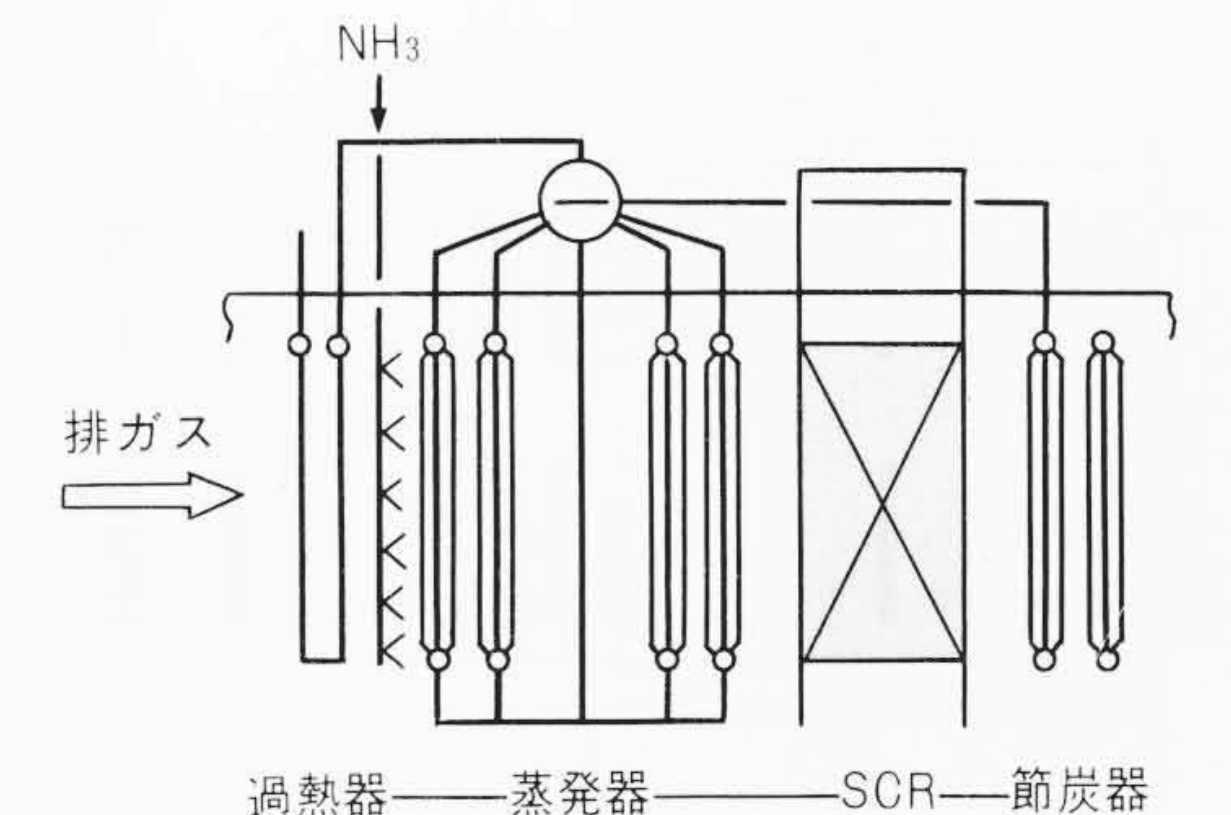


図8 高性能フィン のこぎり歯状に加工し(右), 流れの乱れによる伝熱性能の向上を図ったフィンを示す。

を乱すことによって熱伝達率を向上させる技術であり、適正なセレイテッド化によって約10~15%の伝熱性能の向上が期待できることを確認している。

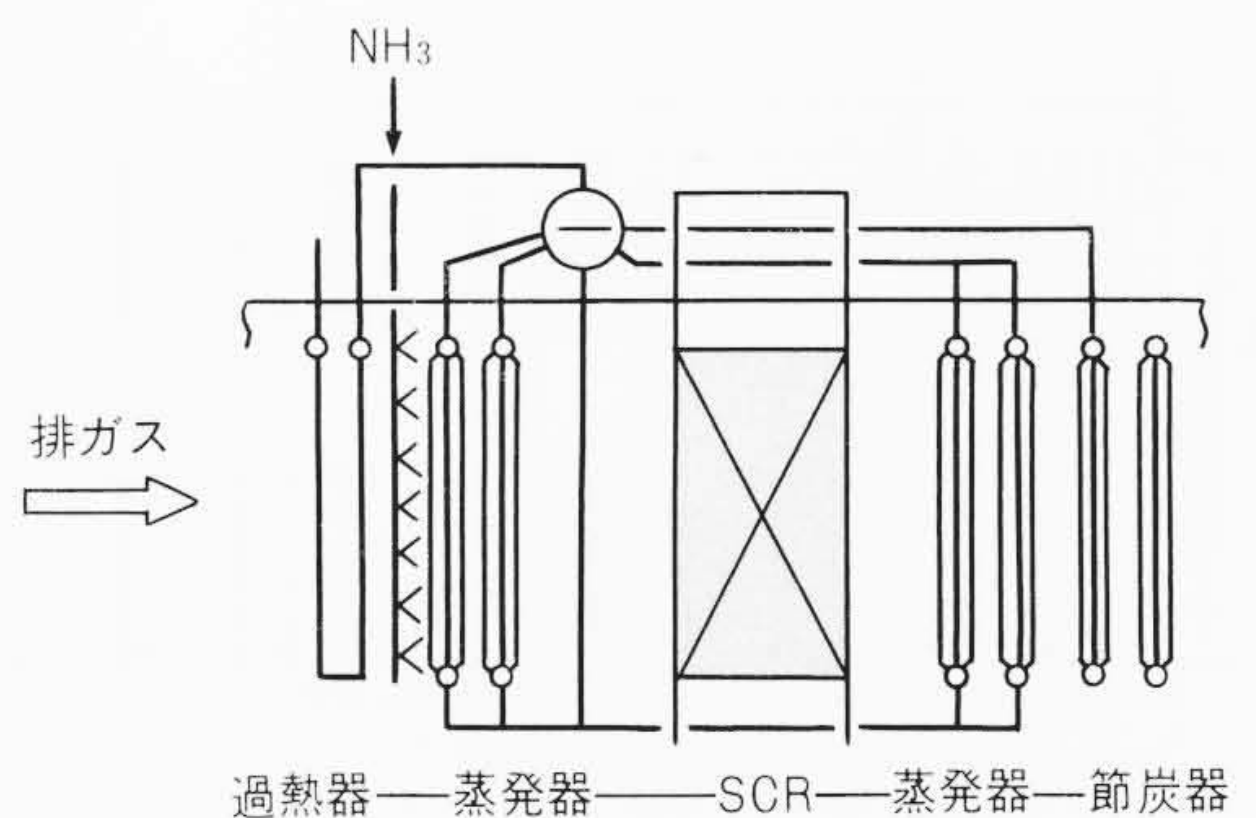
4.5 脱硝触媒内蔵

脱硝触媒は350℃前後に最適反応温度がある。そのため、排熱回収ボイラの最適温度域に脱硝触媒を設置することが必要である。図9(a)に示すように、蒸発器後流に配置した場合、構造的にシンプルとなるが、蒸気圧力との関連で排ガス温度は触媒の最適温度よりも低温となり、触媒量は増加する。さらに、冷缶起動時上流にある蒸発管群の持つ大きな熱容量によって、触媒活性温度までの到達時間が長くなるという特性がある。同図(b)の脱硝触媒内蔵形は、蒸発管群を分割して触媒を最適温度域に配置したものであり、触媒量の低減とともに、中間負荷運用に適した脱硝特性を得ることができる。



(公告No. 昭60-9201)
(特許No. 1663482)

(a) 蒸発器と節炭器間



(公告No. 昭60-17967)
(特許No. 1335599)

(b) 蒸発器分割

注: 略語説明 SCR(脱硝反応器)

図9 脱硝装置内蔵ボイラ 起動特性なども考慮して、脱硝触媒を最適温度域に配置する。

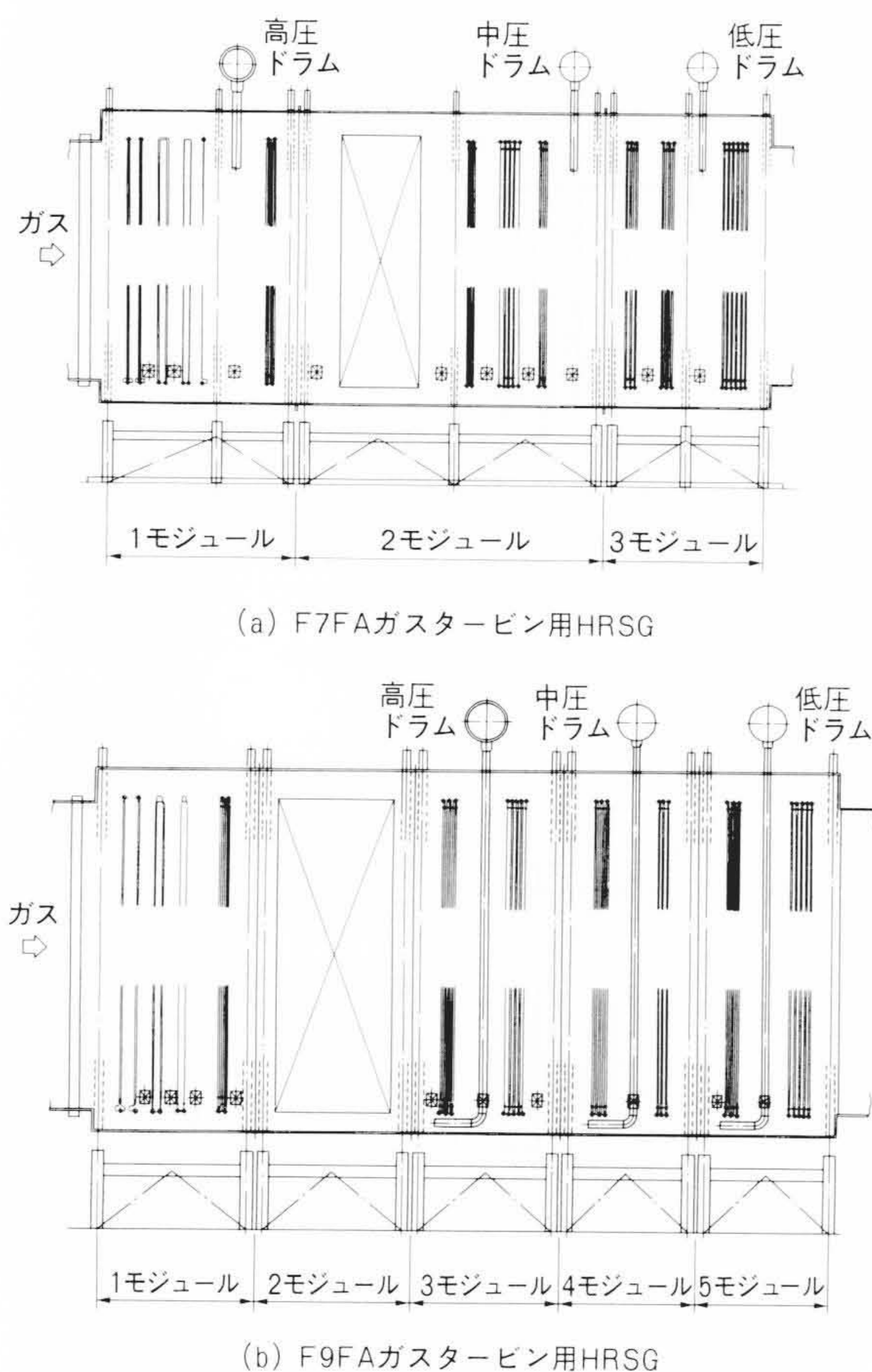
4.6 モジュール工法

工場での製品のモジュール化は信頼性向上、現地据付作業での管理の簡素化および工期の短縮に大きな効果を発揮する。特に、狭い敷地での製品のジャストイン化の要求は今後ますます強くなり、モジュール化工法は不可欠の技術となってきている。

排熱回収ボイラの大形化はモジュール質量の増大を伴うので、バージ船への積み込み、水切、現地構内道路の制約条件などとともに据付工程を踏まえたモジュール分割法についての考慮が必要である。

最大質量1,100 tを想定した最適なモジュール分割に配慮して、高压ドラムを適切な位置に配置した場合の一例を図10に示す。

ドーリ(多輪自走台車)による輸送状況を図11に示す。モジュール質量の増大に伴ってドーリ編成も大きくなり、移動軌跡が大きくなるため、輸送計画にも十分な考慮が必要となる。



注：略語説明 HRSG (Heat Recovery Steam Generator)

図10 モジュール分割 容量によってモジュール数も高压ドラム位置も変わる。

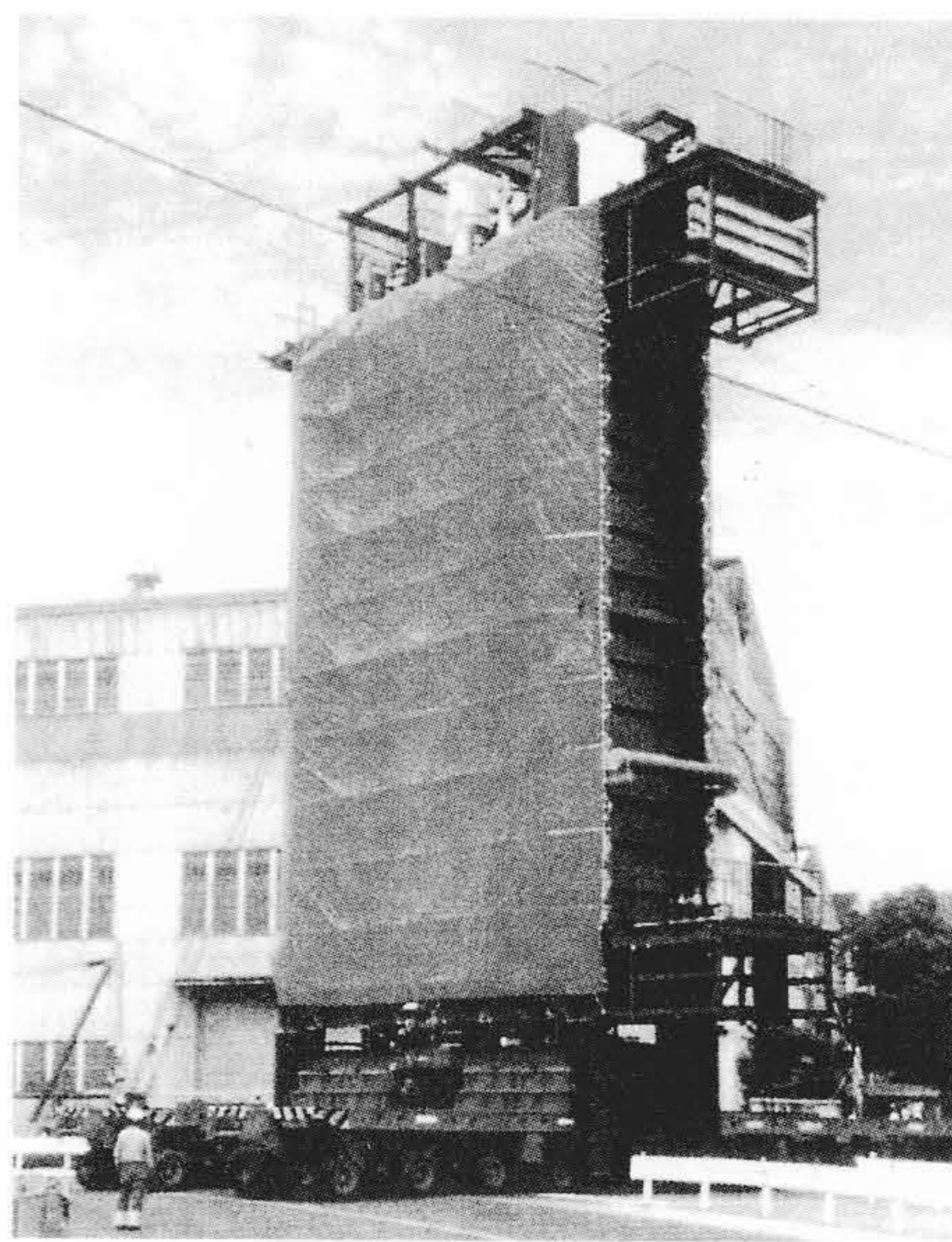


図11 モジュール輸送 大形化するとドーリも多連となるので、初期の輸送計画が重要となる。

5 今後への展望

中間負荷的運用の要求がますます強まるものと予想される今後の電力需給形態に適合するのが、コンバインドプラントと言える。

現在の発電効率48%台のコンバインドプラントは再熱・三重圧を基本としている。今後、50%以上のいっそうの高効率化を目指し、ガスタービン燃焼温度が1,300℃級から1,500℃級に上昇することも近未来のこととして予想されているが、現状の蒸気システムが大幅に変更されることは考えにくい。大容量、高温、高压化、高頻度起動・停止および負荷変化運用の要求に対しては、従来汽力で培われたボイラ技術で十分対応可能と確信している。

6 おわりに

コンバインドサイクルでの蒸気サイクルの高効率化と排熱回収ボイラの対応技術の概要について述べた。

コンバインドプラントは中間負荷運用の要求が強まる中で、クリーン燃料を用いた、CO₂排出の少ない地球環境保全という時代の趣(すう)勢に合致した発電システムとして今後ますます増大するものと考えられる。

蒸気システムもコンバインドプラントの出力の約30%を担っており、設備の健全性、信頼性はもちろんのこと、経済性をも含めて現有技術に甘えることなくいっそうの研究・開発に取り組んでいきたいと考えている。