

超高温・高圧二段再熱ボイラの計画

Design of Ultra-High Temperature and Pressure Double Reheat Boilers

近年の燃料費高騰に伴い、発電プラントの高効率化を目指して蒸気条件を向上した超高温・高圧二段再熱プラントのニーズが高まっている。更に、原子力発電所増設とともに超高温・高圧プラントといえども中間負荷運用に適した運転特性と信頼性が要求される。

これらの要求を実現するために信頼性が実証されている現行技術を改善するとともに、ガス流動モデル試験による再熱蒸気温度特性の向上、起動、停止及び負荷変化特性のシミュレーション解析を行ない運転特性を改善し、材料と補機の確証試験を実施して機器の信頼性確認を行なった。ここに、316atg、538、552、566℃及び566、566、566℃を蒸気条件とする変圧運転ボイラの設計、製作技術を確立したのでその要点を報告する。

坂口安英*
Yasuhide Sakaguchi

程塚国男*
Kunio Hodozuka

三村哲雄**
Tetsuo Mimura

1 緒 言

二度にわたるオイルショック以来原油価格が異常高騰し、エネルギーの多様化と省エネルギー化への対応が急務となっている。これを契機として、Philo、Eddystoneなどで採用された超高温・高圧二段再熱プラントが再びクローズアップされてきた。

米国では効率改善策として、プラントの高温・高圧化に関する研究開発プロジェクトを推進し^{1),2)}、効率向上と建設費増加のバランス及びR&D(Research and Development)の程度などから、蒸気条件が316atg、538、552、566℃³⁾あるいは316atg、593、566、566℃⁴⁾のプラントを提案している。前者は、現行技術の延長で対応できる範囲にあり、後者は、R&Dを必要とするも次期プラントとして期待できるとしている。

表1 検討項目 高効率で中間負荷運用に適した超高温・高圧二段再熱ボイラを実用化するためには、高温、高圧、二段再熱に対し信頼性を確保する技術検討が必要である。

要 因	課 題	検 討 項 目
圧力の上昇	肉 厚 増 加	高強度材料使用 強度信頼性
温度の上昇	時 定 数 増 加	運 転 特 性 改 善
二 段 再 熱	伝 熱 面 適 正 配 置 再熱器スプレー不使用	蒸気温度特性改善

図1に蒸気条件とプラント効率の関係⁵⁾を示すが、主蒸気温度649℃では相対値で7%強のプラント効率向上となり、燃料を輸入に頼る我が国では積極的に取り組むべき課題であるといえる。同図に新技術適用の度合いを併せて記すが、蒸気条件の上昇に伴って新技術の適用度は増加する。プラントの信頼性を考え合わせると実証されている現行技術を基盤として、新技術を蓄積しながら蒸気条件を向上するという観点から、316atg、538、552、566℃及び316atg、566、566、566℃は、早期実現性が高い蒸気条件であると言える。その意味で、これら蒸気条件のボイラの実用化を具体的に検討した。

2 検討項目

プラント効率及び稼働率など総合的にみて高効率であるプラントを実現するには、蒸気条件の改善とともに信頼性の確保が重要であるため、中間負荷運用に適し、その信頼性が実証されているベンソンボイラの技術を基盤とし、新しい付加要因である高温、高圧及び二段再熱について、現行技術の改善と応用によって対応する。

したがって、実用化に当たり、信頼性確保の観点から新たに検討すべき項目は、表1に示す3点である。

UPボイラ及びベンソンボイラの設計、製作で蓄積した技術に加えて、各種解析、確証試験を実施し、機器の信頼性を確認することによって設計製作技術の確立を図った。以下にその概要を報告する。

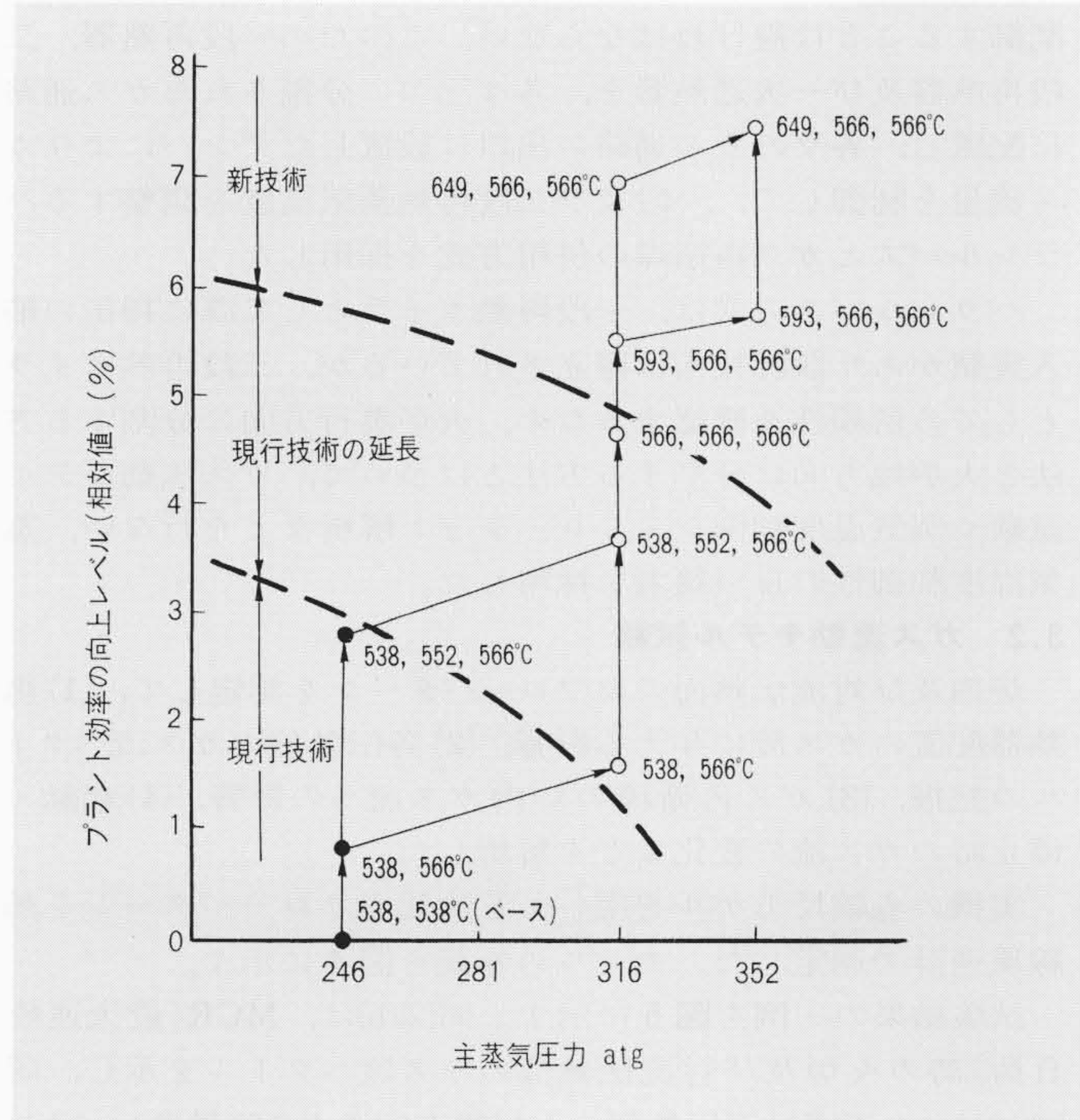


図1 蒸気条件の改善によるプラント効率の向上 蒸気条件の改善によりプラント効率は大幅に向上し、649℃では7%強の効率向上が期待できる。一方、蒸気条件の改善とともに新しい技術の適用度も増加する。

* バブコック日立株式会社呉工場 ** バブコック日立株式会社

3 伝熱面配置と蒸気温度制御性の向上

プラント効率向上及び信頼性向上のため、伝熱面配置についても構造の簡素化、蒸気温度制御性の改善などの考慮が必要である。

LNG(液化天然ガス)燃焼1,000MW用ボイラの設計を通じ、超高温・高圧二段再熱ボイラの最適伝熱面配置について、ガス流動モデル試験及びシミュレーション解析を用いて検討した。検討の対象としたボイラの主要仕様を表2に、その側面図を図2に示す。

表2 超高温・高圧二段再熱ボイラの仕様 LNG燃焼1,000MW, 316atg 538, 552, 566℃, 316atg 566, 566, 566℃ボイラを設計した。

項 目	単位	仕 様		
発電機出力	MW	1,000		
主蒸気圧力	atg	246	316	316
主蒸気・再熱蒸気温度	℃	538, 566	538, 552, 566	566, 566, 566
ボイラ蒸気量	t/h	3,070	3,180	3,090
蒸気圧力 過熱器出口	atg	255	327	327
一段再熱器出口	"	44.3	115.6	116.3
二段再熱器出口	"	—	37.7	37.4
蒸気温度 過熱器出口	℃	542	542	570
一段再熱器入口	"	302.7	388.0	412.4
一段再熱器出口	"	568	554	568
二段再熱器入口	"	—	393.9	402.8
二段再熱器出口	"	—	568	568
給水温度	℃	282.7	322.1	322.0
AH出口ガス温度 (補正後:MCR)	"	100	100	100
燃 料	—	LNG	LNG	LNG

注：略語説明 AH(空気予熱器), MCR(最大連続負荷), LNG(液化天然ガス)

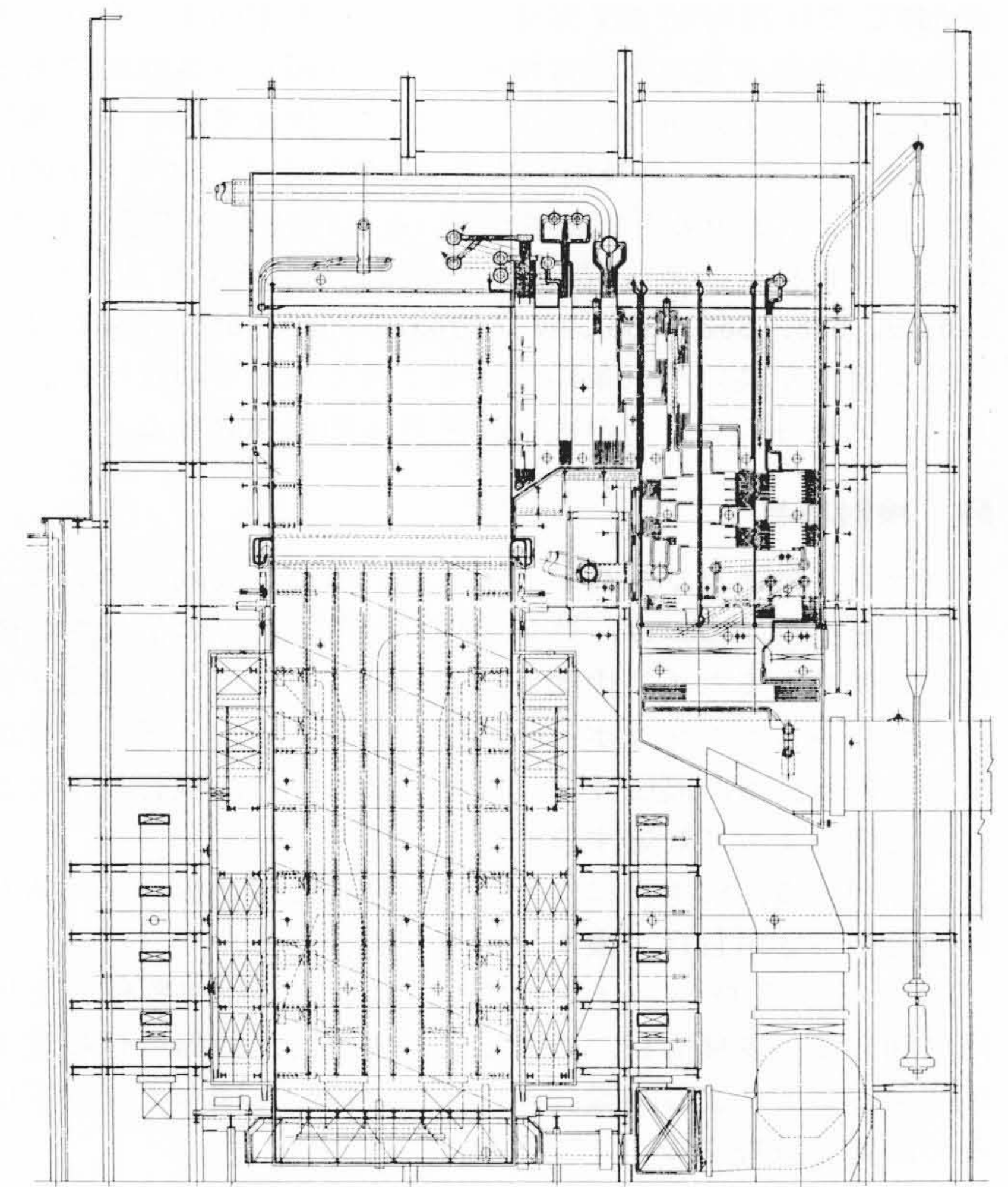


図2 超高温・高圧二段再熱ボイラ構造図 高温高圧、高効率に対する信頼性向上のために、過熱器出口管寄せの2本化、一次過熱器と再熱器の平行配置など構造の改善を行なっている。

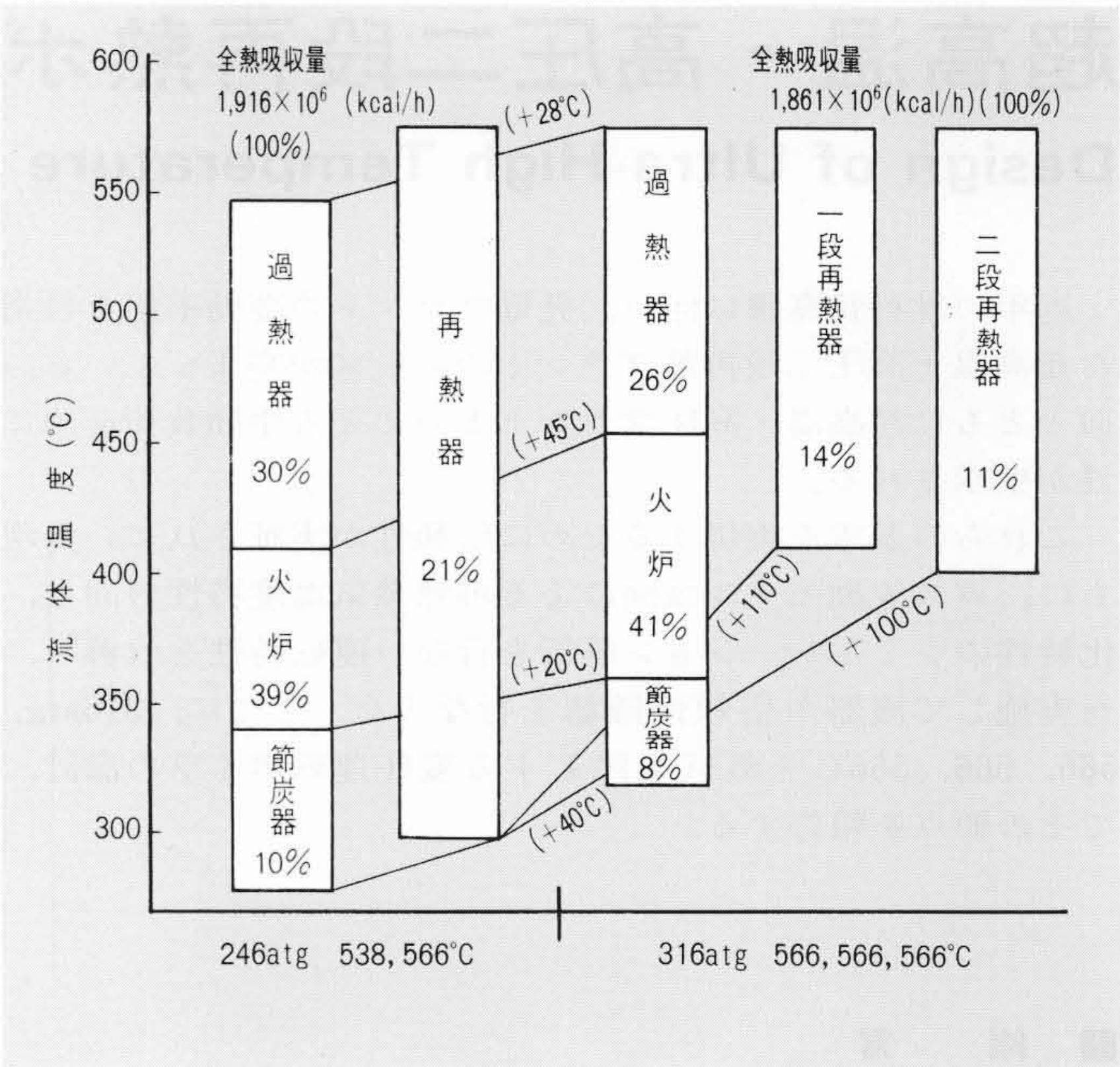


図3 蒸気条件と各部熱吸収量割合 超高温・高圧ボイラでは、再熱器(一段と二段)合計熱吸収量が多く、ボイラ各部流体温度が高い。

3.1 伝熱面配置上の考慮事項

各部熱吸収量割合を、従来の超臨界圧一段再熱ボイラと比較して図3に示す。超高温・高圧二段再熱ボイラでは、再熱器系の熱吸収量割合が大きく、かつ再熱器入口蒸気温度が高くなっており、高温ガスゾーンに配置することが必要となる。一方、過熱器熱吸収量割合は小さくなるが、出口蒸気温度が高いことを配慮すべきである。

高効率を目的とする超高温・高圧二段再熱ボイラでは、従来形二段再熱ボイラのように再熱蒸気温度をスプレー水により制御することは避けねばならない。このため一段再熱器、二段再熱器及び一次過熱器を、各々三つに分割されたガス通路に配置し、各々のガス通路の出口に設置したダンパによりガス流量を制御して、一段及び二段再熱蒸気温度を調整するパラレルパスとガス再循環の併用方式を採用した。

パラレルパス方式は、一段再熱ボイラとして既に19缶の納入実績があり設計技術は確立されているが、二段再熱ボイラとしての信頼性を確認するため、火炉奥行方向に分割する方法と火炉幅方向に分割する方法とについて、ガス流動モデル試験や蒸気温度制御シミュレーション解析などを行ない、蒸気温度制御性の良い後者を採用した。

3.2 ガス流動モデル試験

炉内及び対流伝熱面でのフローパターンを測定して、(1)再熱器配置のガス流に与える影響、(2)各伝熱部のガス流ベクトルの把握、(3)ガス再循環の炉内ガス流への影響、(4)起動・停止時のガス流の変化などを解析した。

実機の1/10縮尺モデルを用い、三次元のフローパターンを熱線風速計で測定した。モデルの外観を図4に示す。

試験結果の一例を図5に示す。同図(b)は、MCR(最大連続負荷)時の火炉及び対流伝熱部のガス流ベクトルを示し、同図(c)はつり下げ対流伝熱部の火炉幅方向のガス流量アンバランスを示すが、つり下げ再熱器部では横置再熱器下部のガス調整ダンパによる流量制御の影響は十分小さいことが確認できた。

3.3 伝熱面配置

ガス流動モデル試験及び後述する制御性確認シミュレーションの結果を検討して、ボイラ伝熱面配置及び蒸気温度制御

法を次のように決定した。

- (1) 再熱蒸気温度制御範囲を広く確保するためには、一段、二段再熱器を平行伝熱面とし、火炉幅方向に分割する。
- (2) 負荷変化時の再熱蒸気温度制御は、ガス再循環とガス調整ダンパの併用方式とする。

4 運転特性

超高温・高圧二段再熱ボイラの水蒸気系統を図6に示す。水冷壁出口に設けた汽水分離器のドレンは、熱効率の良いBCP(ボイラ再循環ポンプ)方式により回収している。同図中で破線で示す部分は起動バイパス系統である。

運転特性の向上は制御装置の性能改善を図るだけでは限度があり、系統・容量・伝熱面配置などで制御性を十分に考慮したボイラ計画が不可欠である。この検討にはシミュレーションが中心手法となり、解析結果は運転制御面の考慮だけでなく、厚肉部の寿命評価などの本体構造設計データとしても用いられる。

バブコック日立株式会社のシミュレーション解析モデルは、実機データによる検証を通じて高精度化を進めてきたもので⁶⁾、現在20プラント以上の設計計画業務、試運転調整指針立案に適用した実績をもっている。

運転特性上特に留意すべき点は、起動及び負荷変化時での蒸気温度制御性であり、超高温・高圧ボイラでは次に述べるような考慮を払っている。

高圧化による伝熱管の厚肉化に伴い、燃焼ガス・蒸気間の伝熱遅れが増大し、蒸気温度制御の応答性が低下する。このため従来から採用されているオーバ・アンダファイリング(過渡的な燃料量の増加・減少)制御だけでは不十分であって、過熱器・再熱器伝熱動特性を考慮したガス量動的制御などの適応制御技術採用が必要である。過熱器、一段再熱器及び二段再熱器通過ガス量を個別に調節するパラレルパス方式は、

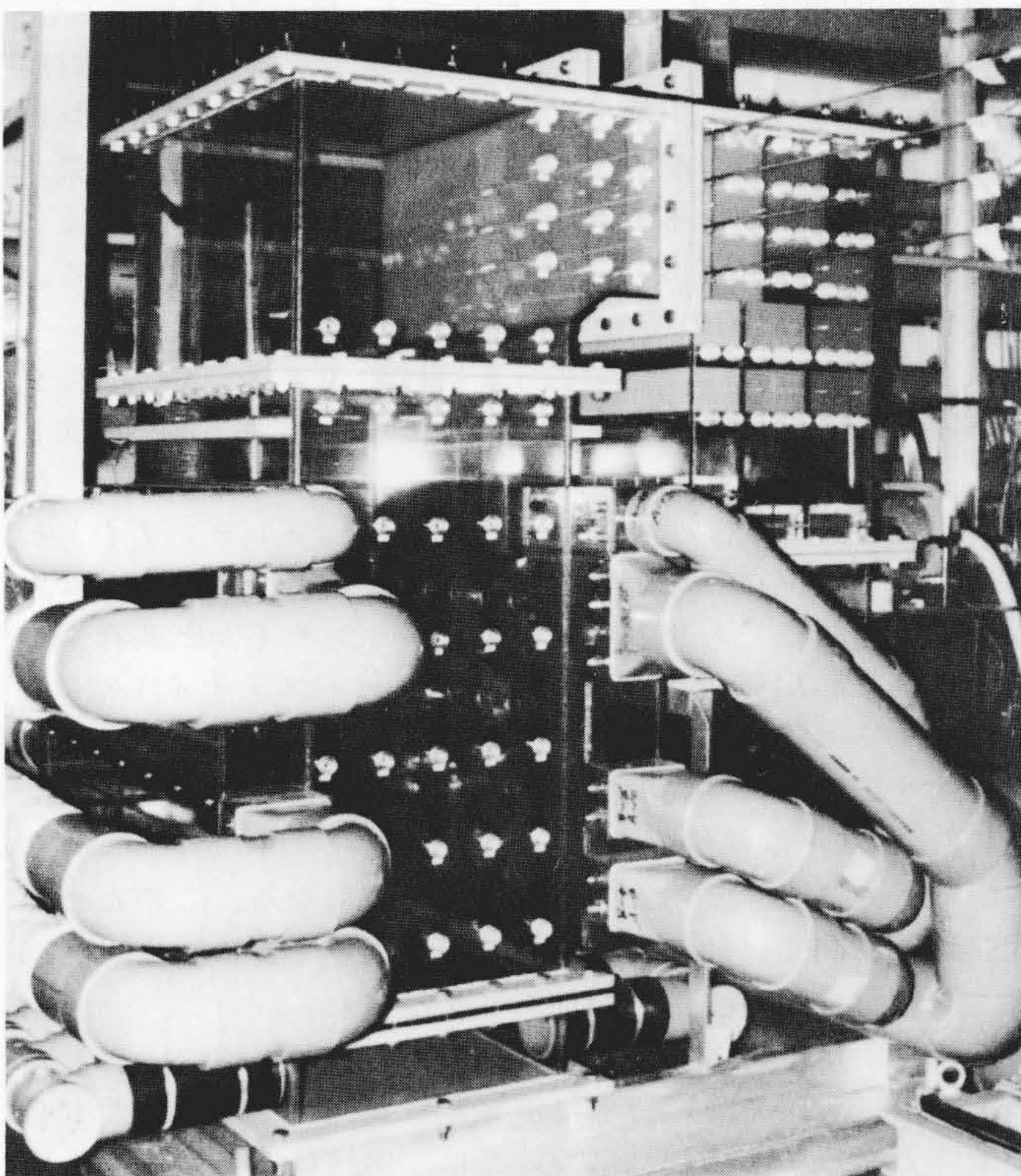
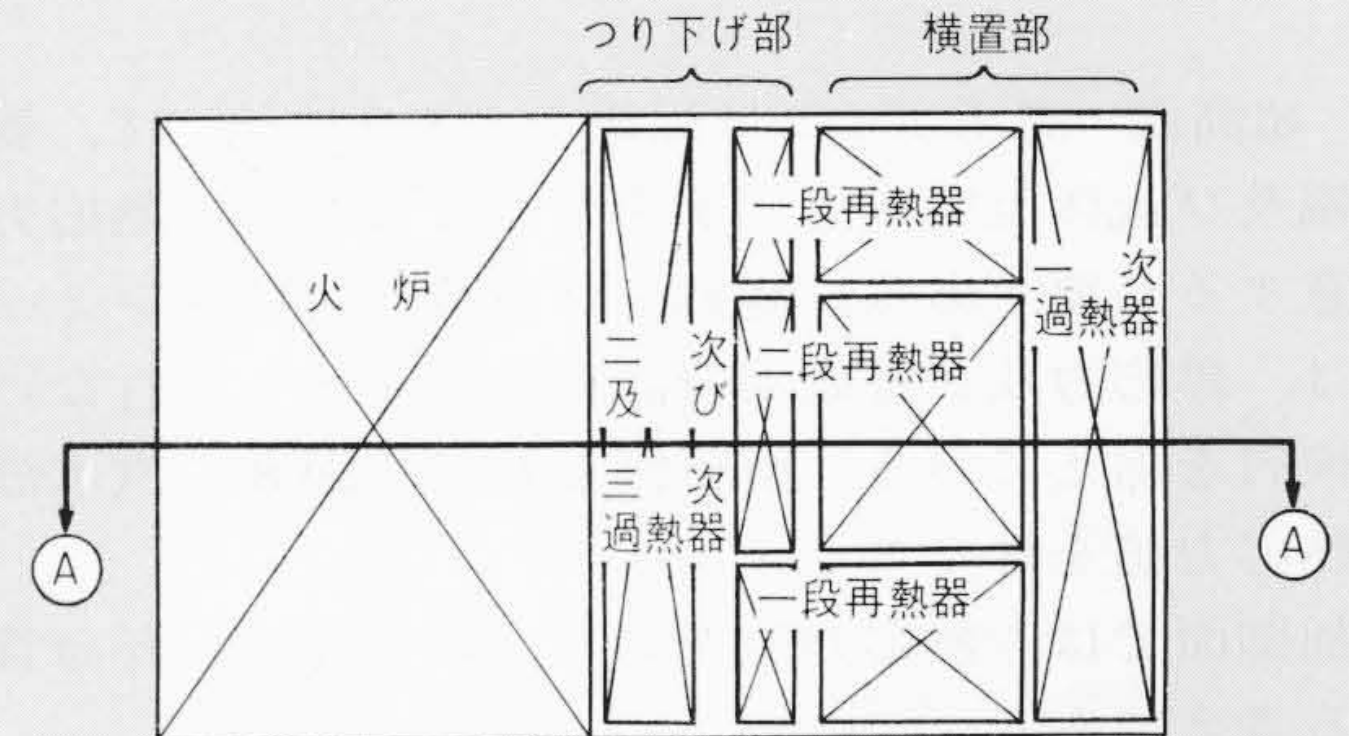
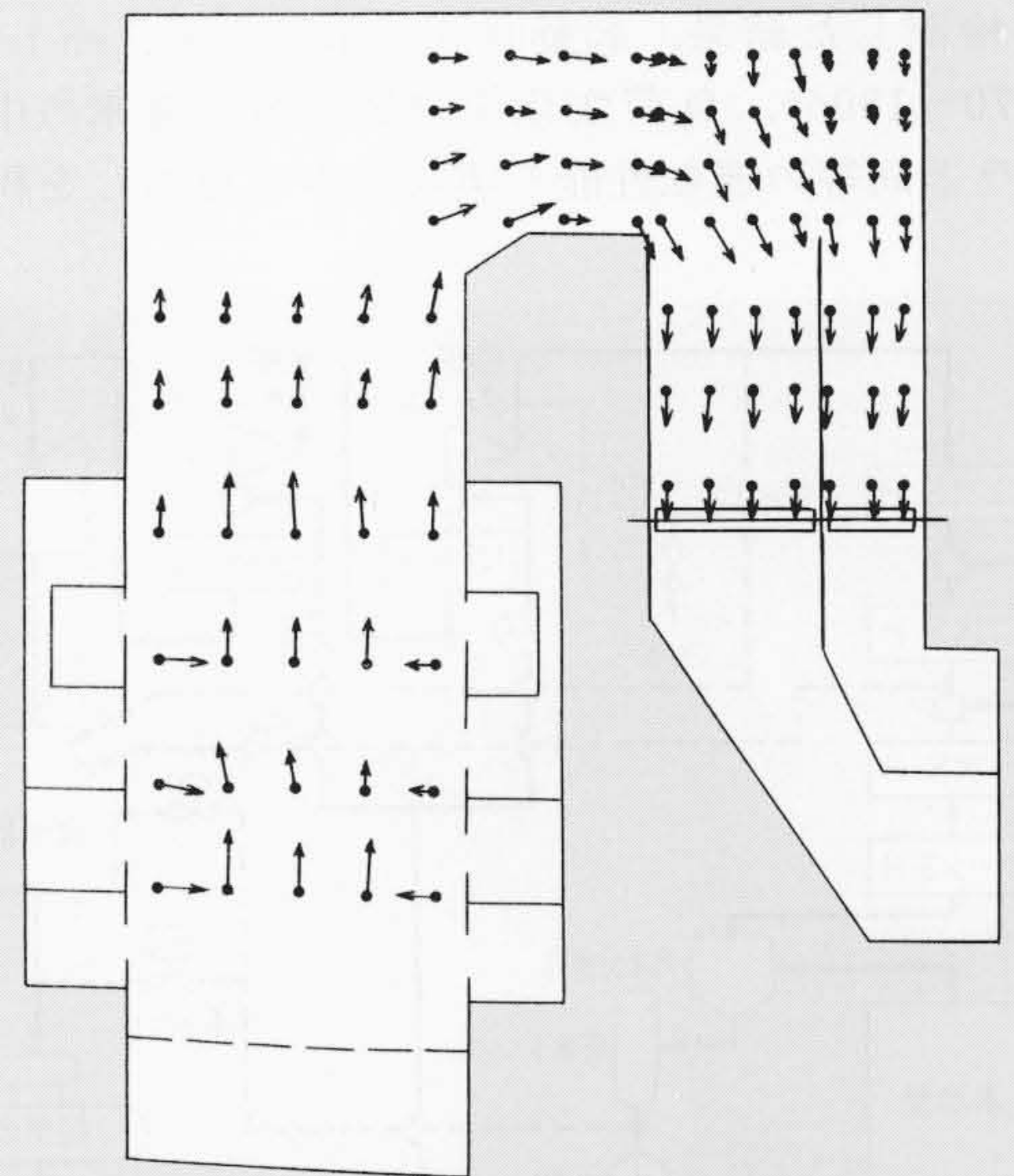


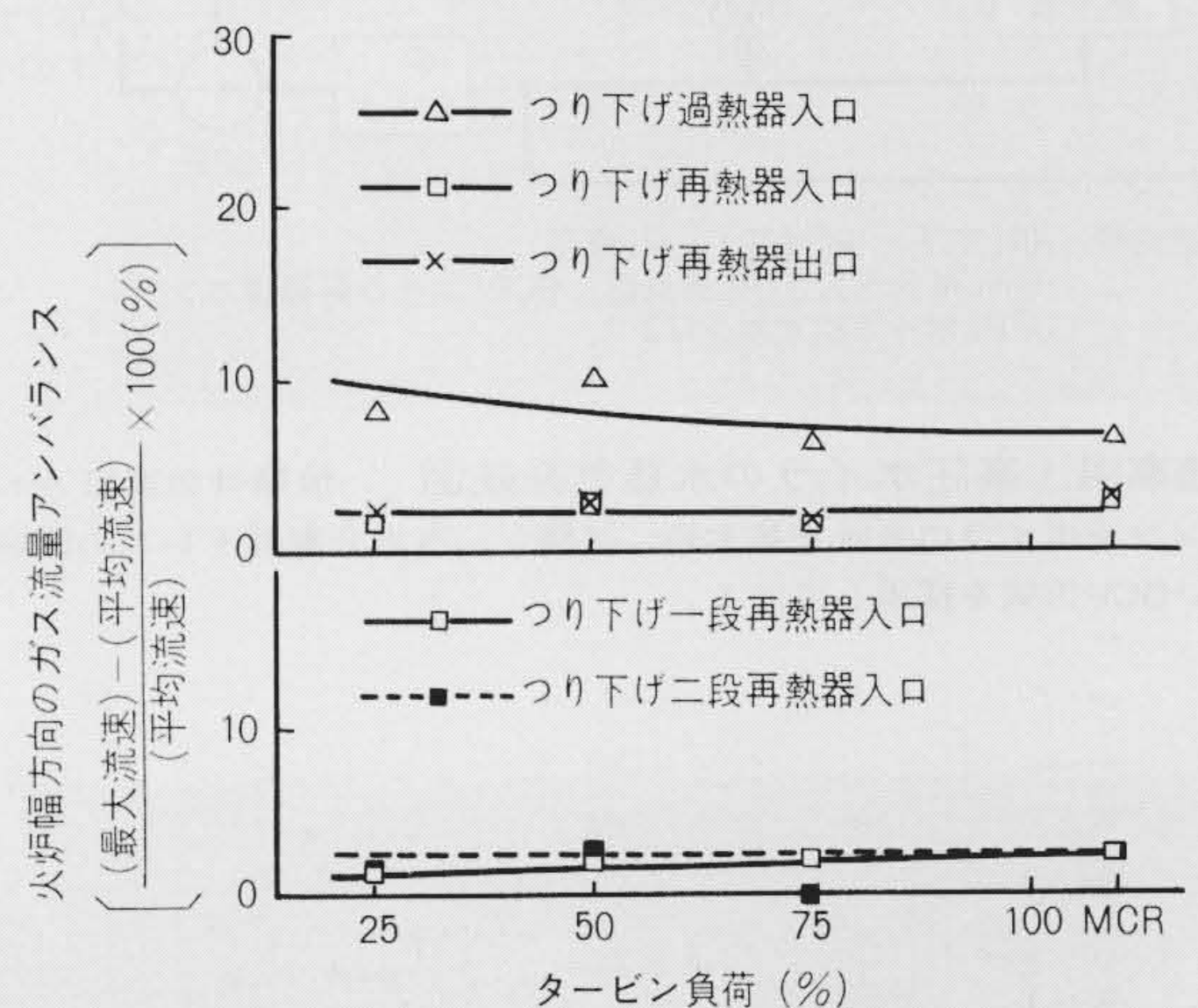
図4 ガス流動モデル試験装置 25縮尺モデルを用いて、火炉及び対流伝熱部でのガス流動を確認した。



(a) 伝熱面配置



(b) (A)部ガス流ベクトル



(c) ガス流量アンバランス

図5 ガス流動モデル試験結果 つり下げ再熱器部では、横置再熱器出口ガス調整ダンパによるガス量調整の影響はみられず、ガス流動アンバランスも数パーセントと十分小さい。

燃料多様化による伝熱面熱吸収変化の調整を可能とするばかりでなく、蒸気温度制御応答性改善にも有効である。負荷変化幅及び変化率に応じてガスパスダンパとガス再循環ダンパに、適応制御からの補正信号を加えることにより、蒸気温度特性を大幅に向上する動的先行制御が実施できる。

図7に負荷変化率5%/分(負荷100%→50%)とした場合の負荷変化特性、図8にホットスタート(8時間停止、点火～全負荷到達170分の設定)の起動特性シミュレーション結果を示す。運転特性を考慮した本体設計、動的先行制御の採用

により、良好な蒸気圧力・温度特性を得られることが確認できる。

また、超高温・高压ボイラは従来のボイラに比べて、蒸気圧力変化幅及び流体温度変化幅が大きくなるため、熱応力の増加に留意する必要がある。起動及び負荷変化特性シミュレーションは、熱応力及び寿命消費計算も一元化して行ない、総合的な検討を加えている。解析例として、図8に汽水分離器の発生熱応力値を併せて示す。

運転制御面では、熱応力監視システムを導入し寿命管理を実施する考えである。

以上述べた事項を中心に、超高温・高压ボイラの運転特性を総合的に検討した結果、起動時間はホットスタート(8時間停止)で170~180分、負荷変化率は5%/分と従来の中間負荷運用ボイラと同等の運転性能が実現できる見通しを得た。

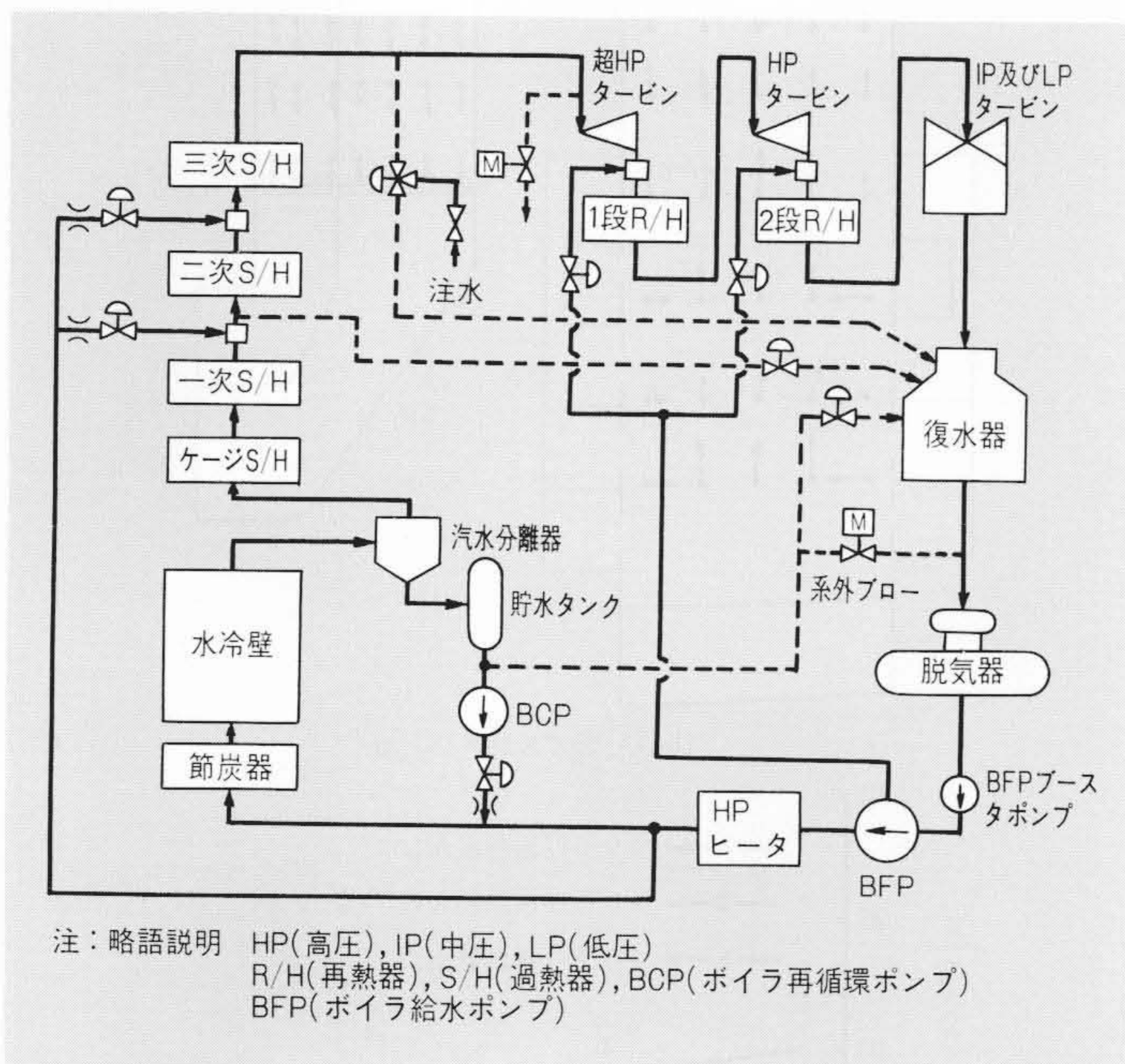


図6 超高温・高压ボイラの水蒸気系統図 信頼性の実証された超臨界圧ベンソンボイラの系統を基本的に踏襲し、汽水分離器ドレンの回収は熱効率の良いBCP方式を採用している。

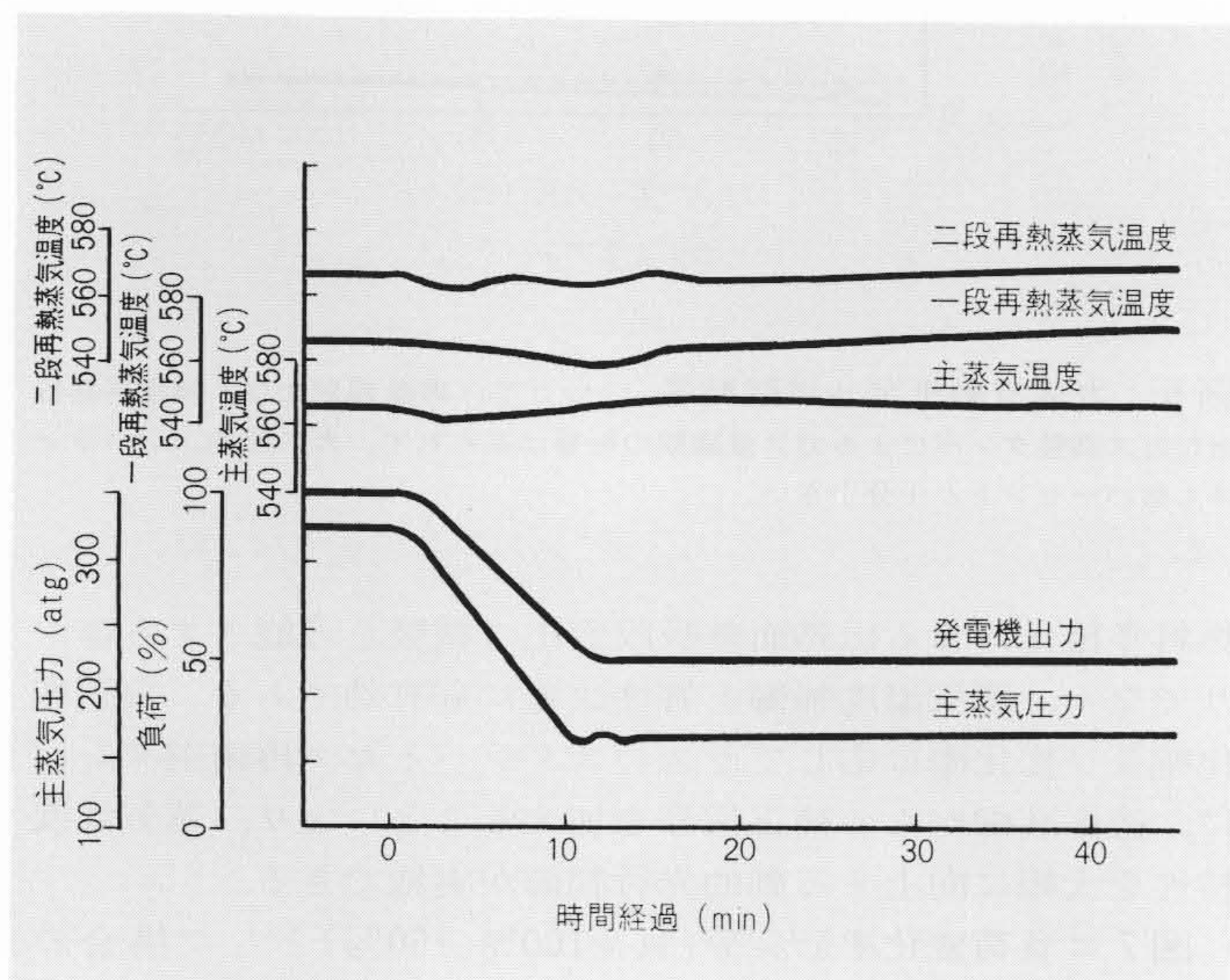


図7 負荷変化特性のシミュレーション結果 負荷変化率5%/分で100%→50%の負荷変化に対する応答例を示すが、良好な負荷追従、蒸気温度特性が確認できる。

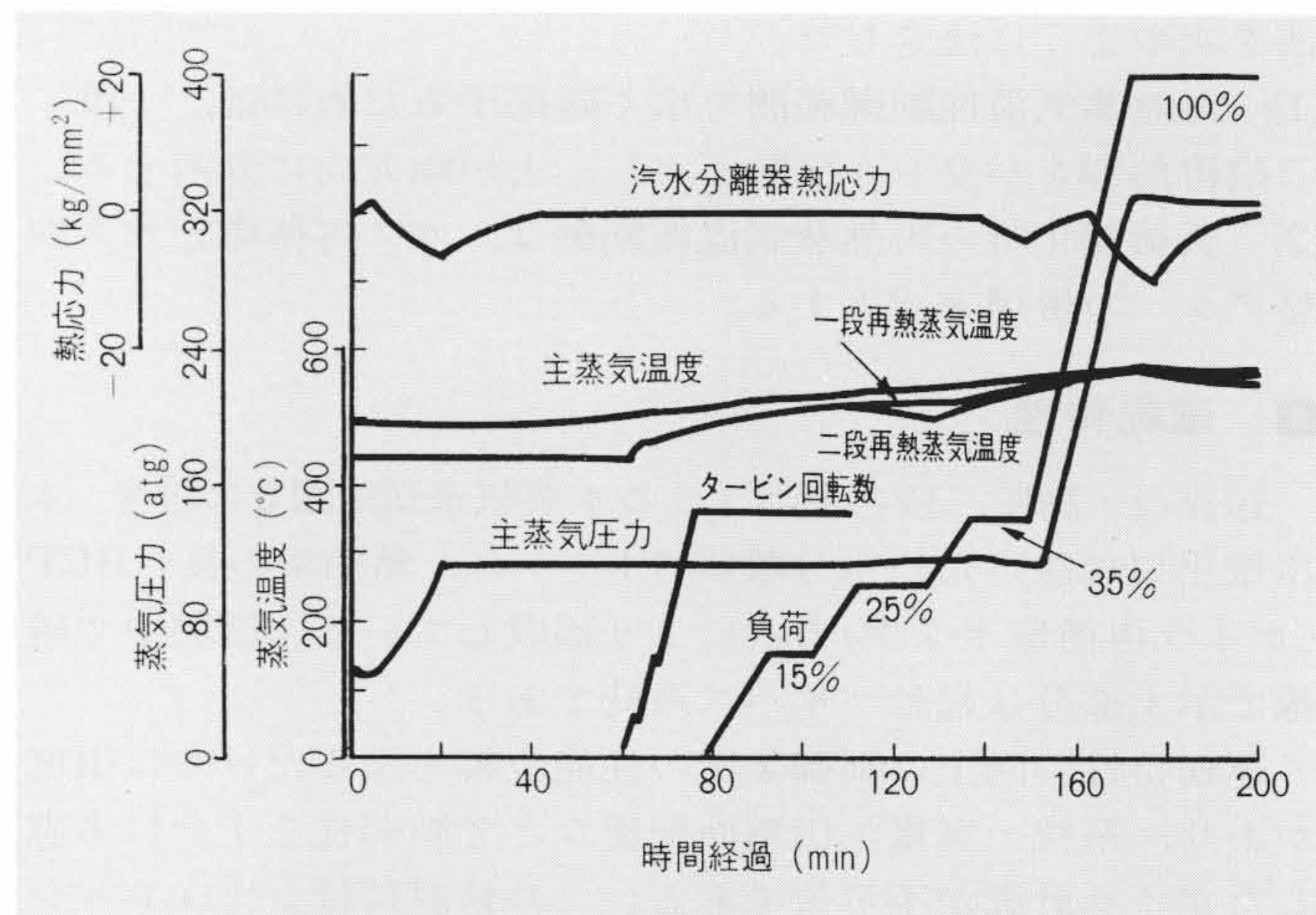


図8 起動特性シミュレーション結果 点火～全負荷間170分のホットスタートの例を示す。円滑に蒸気温度が上昇していることが分かる。運転特性のシミュレーションと同時に、厚肉管熱応力解析、寿命評価を行なうシステムとなっている。

5 機器の信頼性

高効率プラントの実現には構成機器の信頼性を確保することが重要である。本章では、耐熱材料、耐圧部及び補機の信頼性について述べる。

5.1 耐熱材料

ボイラ用鋼管としては既にMo鋼、Cr-Mo鋼及びオーステナイト系ステンレス鋼が規格化されている。しかし、これら既存材(従来から使用されている材料)で蒸気条件の高压、高温化に対応するためには、設計条件が厳しくなる過熱器高温部、過熱器出口管寄せ及び主蒸気管の厚さは管製作限界に近くなり、316atg、566°Cの蒸気条件に対しては新しい耐熱鋼の採用が必要である。

316atg、566°Cの蒸気条件に対しては、既に開発が完了し、材料データがそろっている改良9%Crフェライト鋼(2鋼種)と改良オーステナイト鋼を選定し、加工・溶接性、高温強度特性、耐食性などの観点から信頼性を検討した。その結果、これら改良耐熱鋼はボイラ用鋼管として十分実用に耐えることが分かった。以下に、信頼性試験結果の一部を報告する。

5.1.1 改良耐熱鋼の特徴

表3に改良耐熱鋼の化学成分と機械的性質を示す。改良9Cr鋼はC量を低目にし、Mo量を増加あるいはNbとVを添加したものである。このため、フェライトの生成が促進され、焼ならし焼もどし熱処理によって焼もどしマルテンサイトとフェライトが混在した金属組織となる。このフェライトは高温で安定な組織であり、焼もどしマルテンサイトと共存することにより高温強度が向上する。改良オーステナイト鋼はC量に対する適正比率のNbとTiを添加することにより、微細な炭化物を形成させて高温強度の向上を図っている。

5.1.2 加工・溶接性

伝熱管を構成するには曲げ加工が必要になる。このため熱間曲げと冷間曲げ加工性を調査したが、いずれの改良耐熱鋼とも既存材と同等の良好な加工性を示した。

溶接継手は母材と同等以上の強度をもっていることはもちろん、溶接金属や熱影響部に溶接割れが発生しないことも必要条件となる。溶接割れについては、溶接による変形を拘束した拘束溶接割れ試験と溶接中に強制変形させるバレストレイン溶接割れ試験で評価し、既存材であるSTBA26(9Cr-1Mo)

表3 改良耐熱鋼の化学成分と機械的性質 改良9Cr鋼はC量の減少、Mo量の増加あるいはNb、Vの添加、改良オーステナイト鋼はNb、Tiの複合添加によって高温強度を向上させている。

	鋼材	化 学 成 分 (wt%)									機 械 的 性 質		
		C	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Ti	$\frac{Ti+Nb}{2C}$		耐 力 (kg/mm ²)	引張り強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
9Cr鋼	改良鋼	9Cr-2Mo	≤0.08	8.0~10.0	1.8~2.2	—	—	—	—	—	≥30	≥52	≥25
		9Cr-1MoNbV	0.04~0.08	8.0~9.5	0.9~1.10	—	0.2~0.6	0.15~0.45	—	—	≥30	≥52	≥20
	STBA26		≤0.15	8.0~10.0	0.9~1.10	—	—	—	—	—	≥21	≥42	≥30
オーステナイト鋼	改 良 鋼		0.06~0.20	17.0~20.0	—	9.0~13.0	≤0.6	—	≤0.3	0.6~2.5	≥21	≥52	≥35
	SUS321HTB		0.04~0.10	17.0~20.0	—	9.0~13.0	—	—	4×C%~0.60	—	≥21	≥53	≥35

やSUS321HTB(18Cr-8Ni,Ti)と同等以上の耐溶接割れ性をもっていることを確認した。

5.1.3 高温強度特性

溶接性試験結果から溶接施工法を決定し、溶接継手を製作してその高温強度特性を調査した。図9に高温での許容応力を決定するクリープ破断試験結果を示す。いずれも母材側で破断し、破断強度は母材のデータバンド内に入っていることから、溶接継手の高温強度特性は母材と同様に優れていることが確認できた。

5.1.4 耐食性

伝熱管の内面では、運転中に高温の水蒸気により酸化スケールが形成される。このスケールが成長すると、はく離して伝熱管の閉塞あるいはタービン翼の摩耗の原因となることがある。図10は各種鋼管の耐水蒸気酸化性を示しているが、改良9Cr鋼は現用のSTBA26と同等以上の耐酸化性を示すことが分かる。改良オーステナイト鋼は内面にショット加工をしており、安定な酸化皮膜を形成するためにオーステナイト鋼の中でも非常に良好な耐酸化性を示した。

ここではLNG燃焼ボイラを対象に検討しており、重油や石炭燃焼の場合のように燃焼灰による外面の高温腐食は問題とならないが、油灰による高温腐食についても試験し、改良耐熱鋼は既存材と同等の耐食性をもっていることを確認した。

更に、石炭灰による高温腐食対策として、高Cr合金を熱間圧着した二重管及びクロマイズ管についても検討を進めている。

5.1.5 管寄せのモデル試験

蒸気条件316atg、566℃の過熱器出口管寄せと主蒸気管には改良9Cr鋼の採用が必要であることから、外径558.8mm、厚さ130mmの鋼管を試作し、周溶接及びスタップ溶接のモデル試験を実施した。図11は狭開先ミグ溶接による周溶接の状況

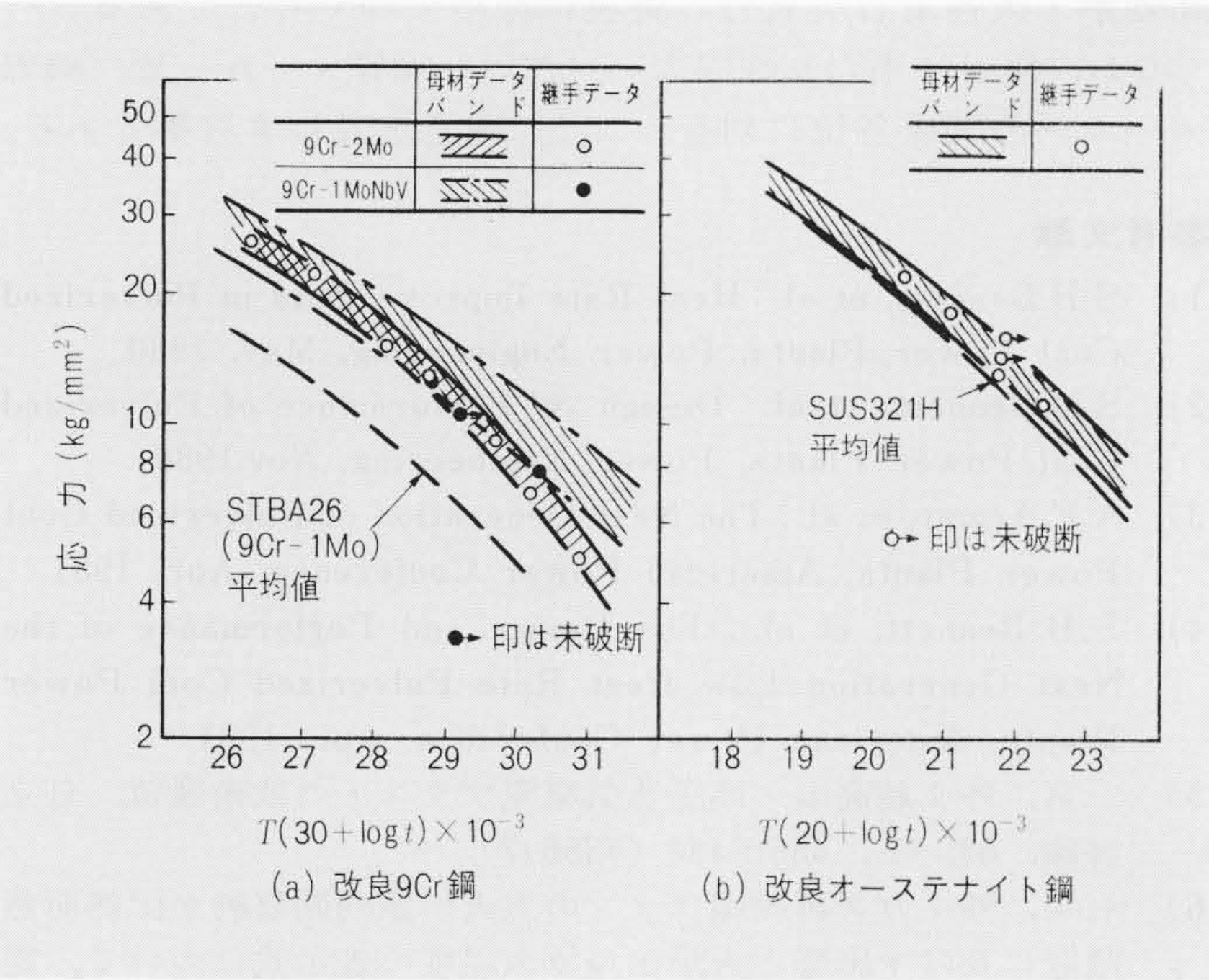


図9 改良耐熱鋼溶接継手のクリープ破断特性 いずれのデータとも母材データバンド内に入っており、溶接継手の高温強度特性は母材と同様に優れている。

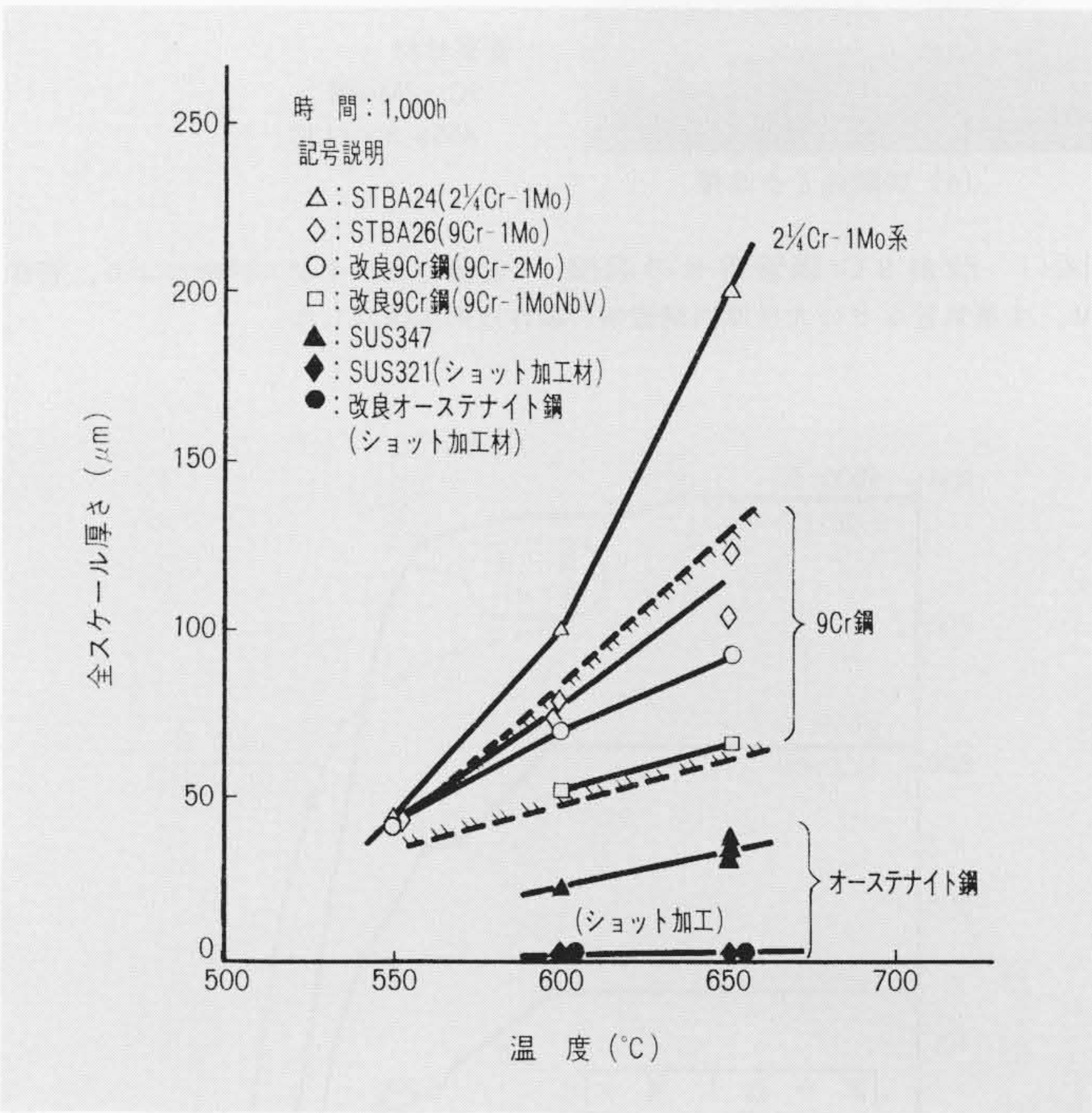


図10 各種鋼管の耐水蒸気酸化特性 改良9Cr鋼は現用のSTBA26(9Cr-1Mo)と同等以上、改良オーステナイト鋼はSUS347よりも優れた耐酸化性を示す。

とその断面マクロ組織を示すが、健全な溶接部であり、硬さ、高温強度などについても良好な結果が得られた。更に、被覆アーク溶接による管寄せへのスタップ溶接試験も実施し、大径厚肉構造物の製作技術を確立した。

5.2 耐圧部の構造強度

高温高圧化に伴い、耐圧部は厚肉となり起動、停止及び変圧負荷変化時に生じる熱応力が増加する。原子力発電所の増設により、火力発電所には夜間は停止もしくは15%程度の最低負荷運転、更に真昼には50%程度の低負荷運転をも要求される。耐圧部のうち、厚肉構造物として汽水分離器、同貯水タンク及び過熱器出口管寄せが挙げられるが、前二者は温度が450℃以下で疲労強度面で厳しく、後者は高温であるため、疲労のほかにクリープ強度面でも厳しい部分である。

起動時は、汽水分離器、貯水タンク及び過熱器出口管寄せとも圧力、温度の変化を受けるが、負荷変化時及び停止時には、前二者は圧力、温度両方が変動するのに対して、後者は圧力の変動だけで、しかも設計温度が高く許容応力が小さいので、内圧による発生応力を小さく設計するため応力変動が小さい。したがって、後者に比較して前二者が疲労強度的にいっそう厳しい。

(1) 汽水分離器及び貯水タンク

夜間は停止又は最低負荷運転、更に昼の低負荷運転を毎日行なう場合には、汽水分離器又は貯水タンクの寿命消費率がボイラ耐圧部の内で最も厳しくなるため、運用形態に応じた最適厚さと員数を選定する必要がある。

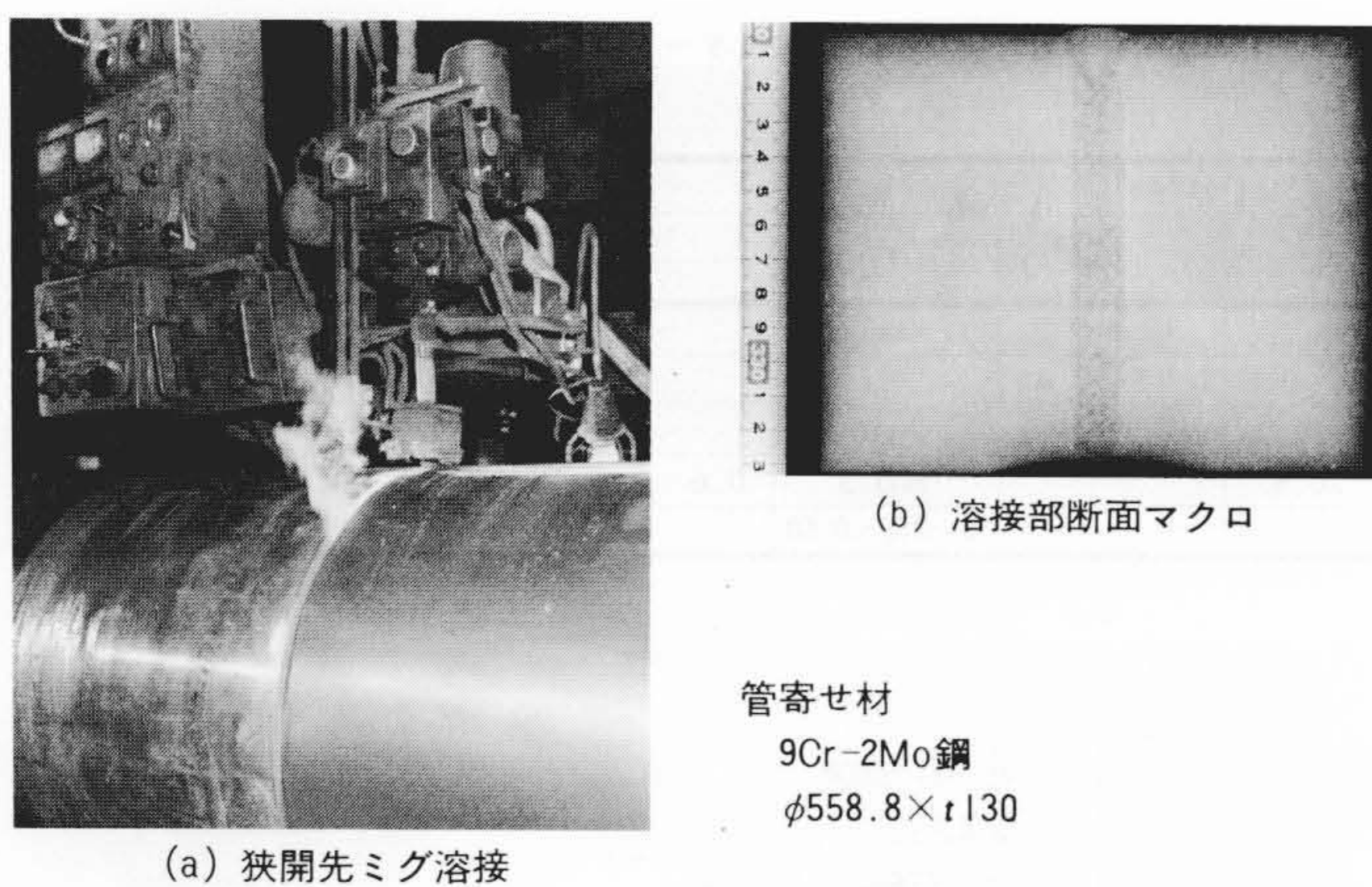


図11 改良9Cr鋼管寄せの溶接 実機寸法のモデル試験により、管寄せ、主蒸気管などの大径厚肉構造物の製作技術を確認した。

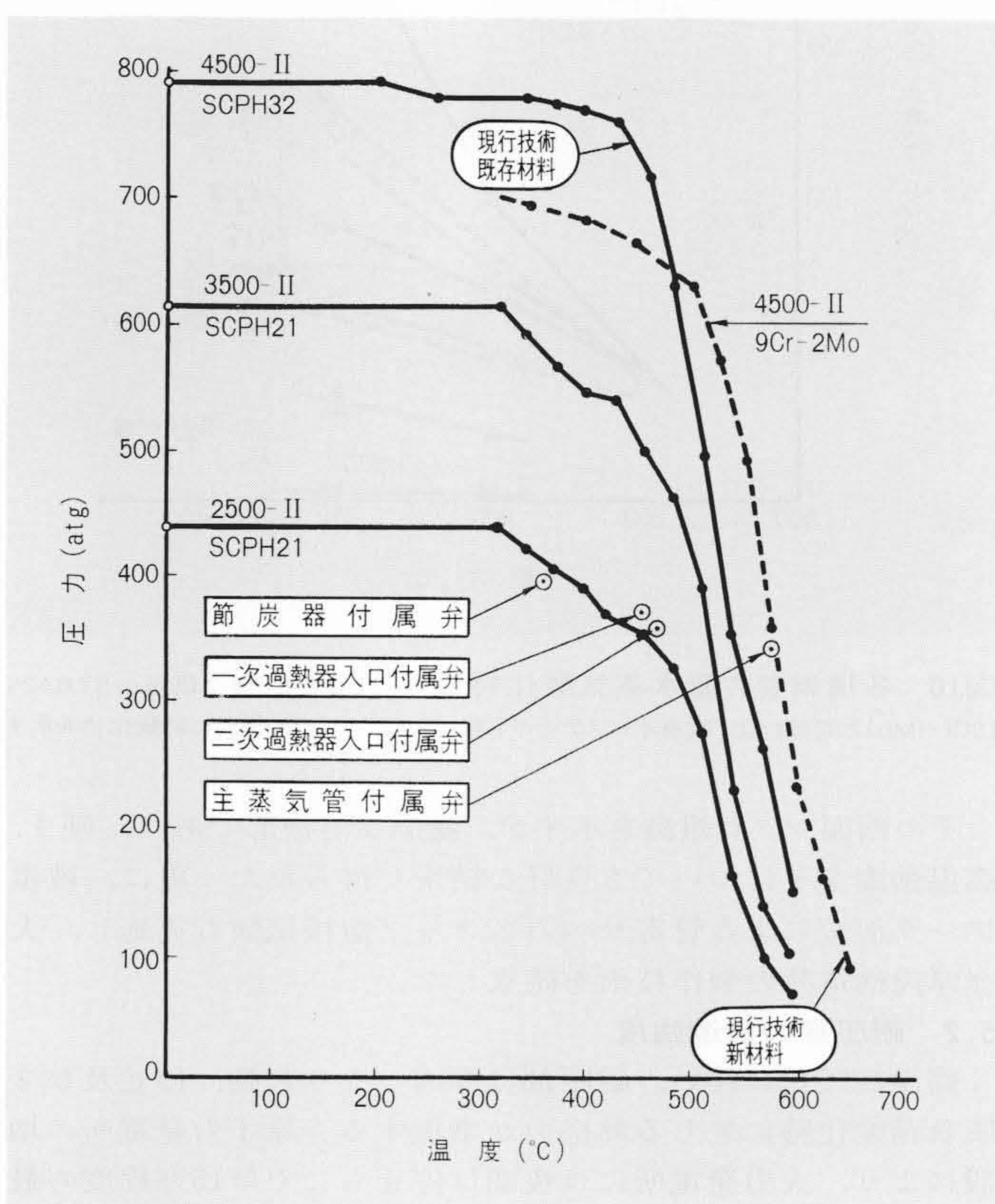


図12 主要弁と弁レーティング 主要弁の中で主蒸気系統の弁を除いては、既存材料の範囲である。主蒸気系統の弁も改良9Cr材の採用により、既存レーティング内となる。

バブコック日立株式会社では、超臨界圧ペンソンボイラ設計製作時に内圧応力の実測及び三次元解析を行ない、応力解析技術を確認⁷⁾している。更に、前述の運転特性シミュレーション解析と応力解析を一元化したシステムを用いて、プラントごとに最適設計を行なう。更に、このシステムを発電所のコンピュータに組み込むことにより、デイリーに寿命管理が可能である。

(2) 過熱器出口管寄せ

管寄せ本数を増加して小径、薄肉化を行ない、熱応力の低減を図った。その結果、主蒸気温度538°Cの場合は、既存材料(2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo)で設計が可能であり、566°Cの場合はクリープ強度が高い改良9Cr材を採用して更に薄肉化を図り、寿命消費率30~40%と信頼性の高い設計が可能である。

5.3 弁及びボイラ再循環ポンプ

超高温・高圧ボイラプラント用弁及び補機については、機器メーカーと協調をとった検討が必要であるが、その検討結果について以下に述べる。

(1) 弁

ボイラに設置される主要弁を、圧力・温度クラスレーティング線上に示すと図12のようになり、主蒸気系の弁(設計圧力343atg、設計温度574°C)を除いては既存材料で4500-II類の範囲にある。主蒸気系弁についても既に開発されている改良9Cr鋼を採用することによって、既存のレーティング範囲での設計が可能となる。

シール性の向上については、グラフオイル系パッキンの採用、ガスケットの材料・形状の改善を行ない確認実験が行われており、技術的問題はない。更に、これら現行技術の組合せで実機大の試作弁を作り、総合機能についても実証確認を行なっている。

今後の方向として、電力用バルブ規格(E-101)に認められている中間レーティングの採用が増加するため、統一性の観点から早期に規準化を図ることが必要と考えられる。

(2) ボイラ再循環ポンプ

ボイラ再循環ポンプの運転条件は、110atgの飽和水であるので、従来の超臨界圧ペンソンボイラ用と同程度でありポンプ、電動機の特性和構造は従来の技術(遠心ポンプ・浸水形電動機)がそのまま適用可能である。

一方、ボイラの貫流運転状態では、ポンプとしては停止状態となるが高圧水でウォーミングを行なっており、その耐圧強度、シール性は重要なポイントとなる。これについても、現行技術、規格の範囲内で対応可能であるが、実用化に当たりシール部について実物大の部分モデルによる実証確認を行なっている。

6 結 言

超高温・高圧二段再熱ボイラの計画に際し、性能、運転特性、材料及び補機について、解析、モデル試験、確認試験などを行なった。その結果、蒸気条件316atg、538、552、566°C及び566、566、566°Cに対しては、既存の技術に若干の改善を加えることにより対応が可能であることを確認した。

引き続き圧力・温度が更に高い蒸気条件に対する技術開発を推進しているが、今後とも各電力会社の指導を仰ぎながら、高効率・大容量石炭火力の実現に努めてゆく考えである。

なお、検討に当たり御協力いただいた鋼管メーカー及び機器メーカーの関係各位に対し、ここに謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) S.B.Bennett, et al.: Heat Rate Improvements in Pulverized Coal Power Plants, Power Engineering, May. 1980
- 2) S.B.Bennett, et al.: Design & Performance of Pulverized Coal Power Plants, Power Engineering, Nov.1980
- 3) A.F.Armor, et al.: The Next Generation of Pulverized Coal Power Plants, American Power Conference, Apr. 1981
- 4) S.B.Bennett, et al.: The Design and Performance of the Next Generation Low Heat Rate Pulverized Coal Power Plants, American Power Conference, Apr. 1981
- 5) 二宮, 外: 超高温・高圧蒸気発電プラントの技術展望, 日立評論, 63, 7, 455~460 (昭56-7)
- 6) 石川, 外: ガス再循環ファンの点火~並列間駆動が伝熱面熱吸収に及ぼす影響と火炉出口ガス温度の表示式について, 電力中央研究所報告, 72052 (昭47-10)
- 7) 高山, 外: 中間負荷運用石炭燃焼ペンソンボイラ, 日立評論, 62, 4, 247~252 (昭55-4)