

# 垂直管形超臨界圧変圧運転ボイラ - 単純構造・高信頼性 -

Supercritical Sliding Pressure Operation Vertical Water Wall Boiler

丸 田 得 志      山 本 健 次 郎      菅 沼      博  
坂 本 康 一      金 巻 裕 一

構造が簡素であり、高性能・高信頼性・高メンテナンス性を有する垂直管火炉方式の超臨界圧変圧運転ボイラは世界中のメーカーが指向しつつも唯一当社のみ実用化している独自開発技術である。本報では、その開発経緯から、特徴及び運転実績まで全体を紹介する。

## 1. はじめに

石炭は、他の燃料と比べ埋蔵量が莫大であり、今後も発電エネルギー源の大きな部分を占めていくものと予想される。石炭を燃料とする火力発電プラントで用いられるコンベンショナルボイラは、電源系統の容量増加に伴う単機容量の増大とともに超臨界圧プラントが採用されるようになり、運用性改善、タービンの寿命延長及び部分負荷での効率向上のために超臨界圧変圧運転ボイラが選択される。

超臨界圧ボイラでは最近ではほぼ全ユニットが垂直管火炉方式であり、超臨界圧変圧運転ボイラも垂直管火炉であるが、超臨界圧変圧運転ボイラには昔はスパイラル火炉方式が採用されていた。

これに対し、当社は独自の研究開発によって運用性、性能、信頼性が高い垂直管火炉方式を世界に先駆けて実用化し、これらのボイラ 10 缶の納入実績を有し、50 万時間以上の累積運転を達成している。14 年間にわたって何の問題も無く運転を継続しており、その優れた特長を発揮している。

本形式のボイラでは、火炉壁管に内面溝月伝熱促進管であるライフル管を用いることにより、従来の平滑管（スムーズ管）に比べ少ない重量速度で伝熱劣化による過大な管壁温度の上昇を抑制することができ、垂直管形火炉を採用することが可能となった。

また、垂直管火炉方式の優位性は世界中で着目され開発に着手する試みが始まる中で、当社のみが実績を有しており、本報では超臨界圧変圧運転垂直管ボイラの思想を開発背景から特徴及び運転実績まで含めて概説する。

## 2. 垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転貫流ボイラ開発の沿革

当社においては、1961 年に超臨界圧ボイラに関し管内強制対流伝熱の研究を開始したものが現在まで続く超臨界圧ボイラ伝熱研究の端緒である（図 1）。当社長崎研究所及び高砂研究所に超臨界圧テストボイラを建設し、長崎研究所には高圧伝熱ループを併設し（図 2 (a)）、超臨界圧のみならず亜臨界圧領域も含め各種流動伝熱試験を実施してきた。

その後、1971 年より、伝熱性能に優れるライフル管（図

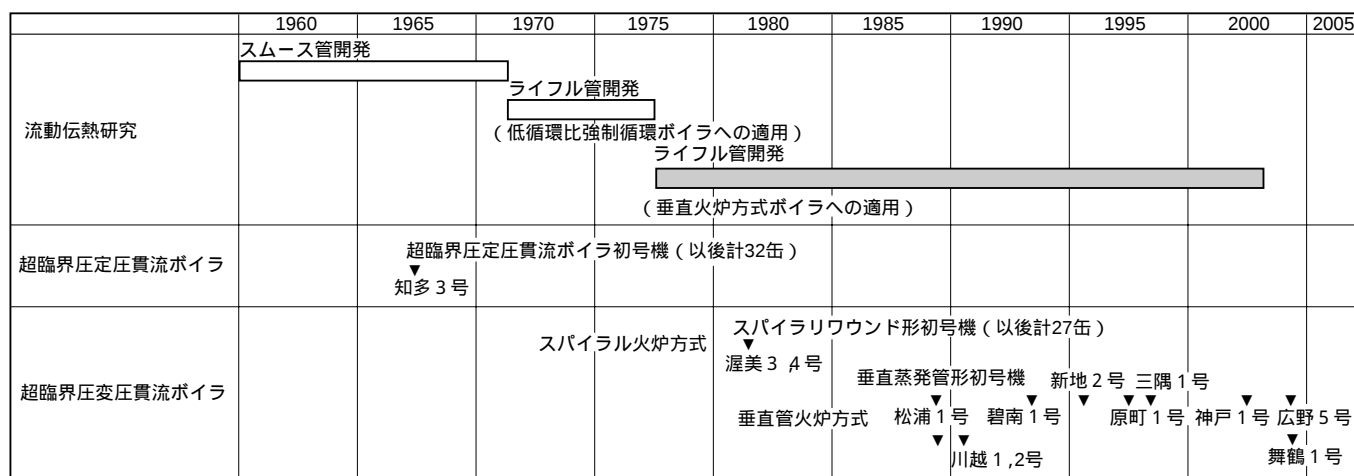
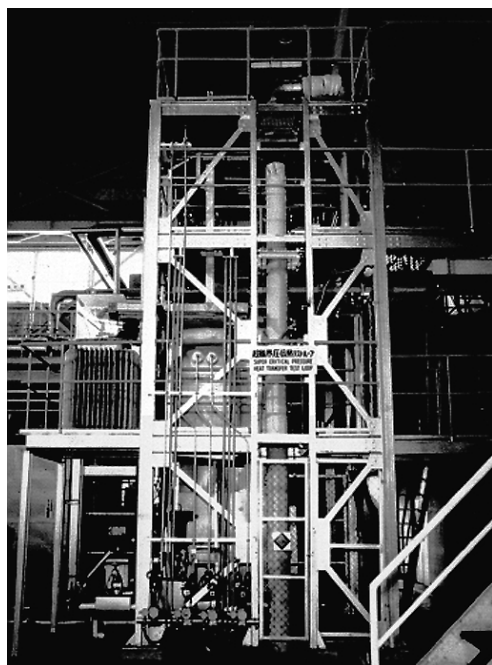
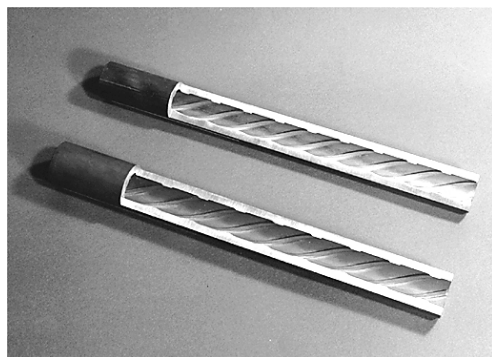


図 1 三菱重工におけるボイラ蒸発管伝熱流動研究及びボイラ循環形式開発の沿革



(a) 超臨界圧テストループ



(b) ライフル管形状

図2 超臨界圧テストループとライフル管形状

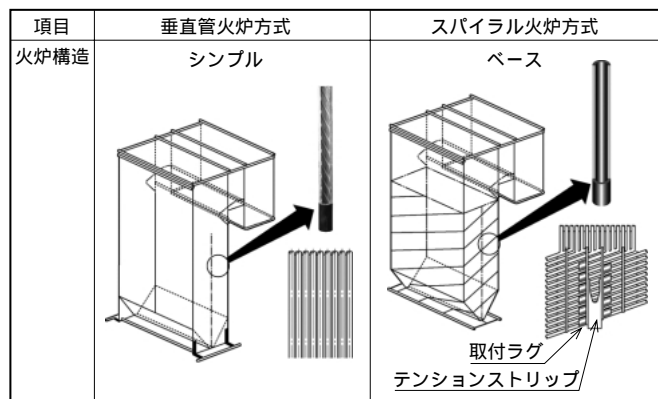
2(b)の伝熱流動特性の研究を開始した。広範な運転条件の変化に対するDNB (Departure from Nucleate Boiling: 亜臨界圧域において核沸騰から膜沸騰へ移行し、管内面熱伝達率が著しく劣化する現象)等の伝熱劣化現象発生条件の系統的な把握のみならず、アルカリ腐食試験、スケール付着試験についても総合的に研究を実施し、さらには、1974～1977年には和歌山共同火力(株)3号ボイラでの3年にわたる実缶試験を実施し成功を収め、実機において必要なすべての知見を獲得した。

1977年には、亜臨界圧ボイラに対して垂直管火炉にライフル管を採用する低循環比強制循環ボイラを実用化した。

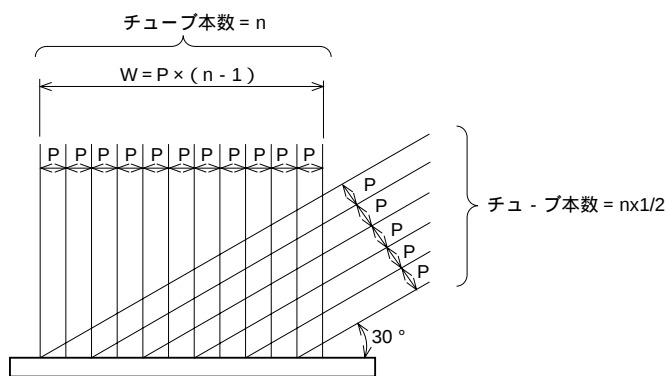
一方超臨界圧ボイラについては、1968年の国産初号機である中部電力(株)知多3号の運転以来、製作・運転された超臨界圧定圧運転ボイラは、亜臨界ボイラと同様の垂直管火炉をスムーズ管で構成する方式としていた。

その後、電力需給形態の変化に伴い、負荷調整機能が火力発電所に要求され、部分負荷まで高い効率となる超臨界圧変圧運転形式が採用されるようになり、今日に至っている。

この形式のボイラでは、プラントの運用柔軟性を獲得する



(a) 火炉支持構造比較



(b) 火炉管本数比較

図3 火炉支持構造比較と火炉壁管本数比較

ために火炉壁管の構造をこれまでとは変えるに至った。すなわち、火炉壁管をスパイラル火炉構造とすることで火炉壁を構成する管本数を1/3～1/2に削減し、管内流体重量速度を垂直管火炉方式の2倍以上に確保することで、部分負荷におけるスムーズ管での伝熱劣化現象を回避するために必要な流体重量速度を確保している(図3)。

この結果として、高い流体重量速度と長い蒸発管長により蒸発管圧力損失が大きくなり、給水・蒸発器系統の設計圧力が上がるとともに給水ポンプ容量・消費動力が増大すること、及び火炉壁管構造が複雑となる点は避けられない。本形式のボイラは、1981年に中部電力(株)渥美3、4号ボイラの運転開始以降、合計27缶納入されている。

上述のスパイラル火炉方式の問題点を解消するため、先に実用化を完了したライフル管の優れた伝熱流動特性に当社では着目し、火炉構造が亜臨界圧ボイラと同じ垂直蒸発管形で簡素な構造を採用し、高性能・高信頼性が達成される垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラを世界で初めて実現した。1988年に初号機である九州電力(株)松浦火力発電所1号機(700 MW)が運転した。

本垂直管形式は、現在建設中の2缶を含め全10缶の実績を有しており、いずれのユニットもスパイラル火炉方式に比べ簡単な据付けが実現でき、高い性能・信頼性及び高いメンテナンス性が確認されている。

なお、この形式は他のどの機関・メーカーとも独立して当社独自で開発した技術である。初号機である松浦1号ボイラへ

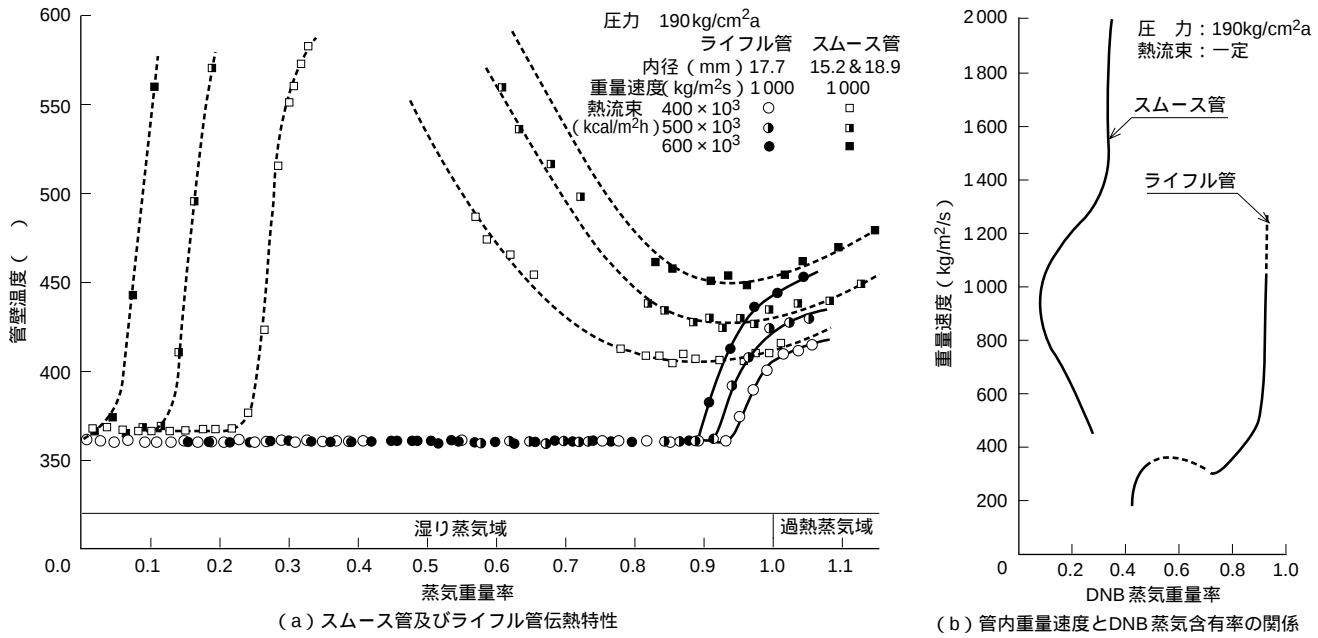


図4 スムース管及びライフル管伝熱特性と管内重量速度とDNB蒸気含有率の関係

採用するに当たっては、九州大学・九州電力(株)・当社共同にて検証を行っており、本形式は欧米の技術から完全に脱却し、発案・開発・実用化まで完全に純国産の技術である。また、これまでこの形式についてはどの機関・メーカにも技術供与は行っていない。

メリットの詳細については、次章にて紹介する。

### 3. 垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラの特徴

#### 3.1 ライフル管の伝熱特性

図4(a)は圧力190 kg/cm²a、重量速度1000 kg/m²sにおけるライフル管の伝熱特性と、スムース管の伝熱特性と比較したもので、図4(b)は管内重量速度とDNB蒸気重量率の関係を示したものである。

図4(a)より、スムース管ではDNBが発生しメタル温度が600を超える程の伝熱劣化現象が見られるが、ライフル管はDNBが発生せず、低いメタル温度が維持されている。極端に少ない重量速度や高蒸気含有率の場合はライフル管でもDNBが発生するが、図4(b)のとおり、スムース管に対しDNB蒸気含有率は格段に高く、伝熱劣化に対してより安全な特性を有している。これは管内面の溝により気液二相流が常に激しく攪拌されることにより、比重の重い液相が伝熱管内面に接触し続けるので高い内面熱伝達率を確保し、大きい冷却効果が得られるためである。

図5は平滑管の臨界圧の近傍を含めた最低熱伝達率がどのように変化するかを示したものである。最低熱伝達率は熱流束の値にかかわらず臨界圧よりも僅かに低い212 bar付近で急激に低下しており、5 bar程度高い、あるいは低い蒸気圧力で高い熱伝達率レベルまで回復する。そして206 bar以下では圧力の減少とともに最低熱伝達率は再び低下の傾向を示す。この傾向を超臨界圧変圧運転ボイラの各負荷の運転条件で見ると、火炉蒸発管を過熱から保護する冷却能力がもっと

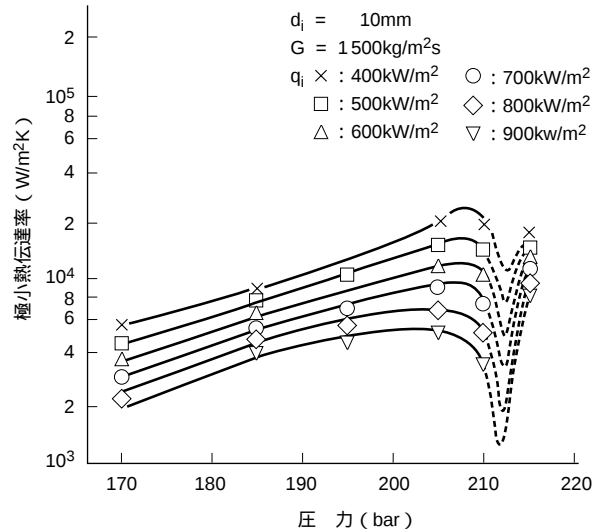


図5 スムース管の極小熱伝達率

も厳しくなるのは圧力とともに重量速度も減少する50%ないし25%負荷の領域である。したがって、この領域での熱伝達率を十分に高く保ち、管壁温度を許容温度以下に維持するためには、超臨界圧定圧運転ボイラよりも相当に高い重量速度を確保しなければならず、このことが上述のデメリットがあってもスパイラル火炉構造により高い重量速度を必要とする理由である。

一方、図6はライフル管とスムース管の極小熱伝達率と圧力の関係を示したものである。これから、ライフル管での極小熱伝達率は213 bar付近で最低となるものの、その値はスムース管の場合に比べて大幅に向上していることが分かる。したがって、ライフル管の採用により、スムース管よりもはるかに低い重量速度で臨界圧近傍の熱伝達劣化によるメタル温度の上昇を十分に抑制することが可能である。

また、低圧領域ではほぼ全蒸発領域にわたって核沸騰が維持できる。

図7は超臨界圧変圧運転ボイラにおける設計重量速度と限界重量速度の関係を示したものである。

火炉蒸発管にスムーズ管を使用したスパイラル火炉方式ボイラの場合には、蒸発管管壁温度を適切な水準に抑制するため蒸発管内重量速度を十分に大きく確保し、熱伝達率を増大させる必要があるのに対し、ライフル管を使用した垂直管火炉方式ボイラでは、スムーズ管よりも低い重量速度で管壁温度の上昇を抑制することが可能である。

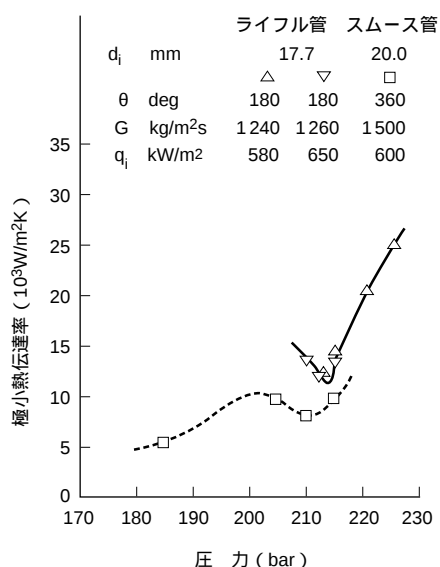


図6 ライフル管の極小熱伝達率

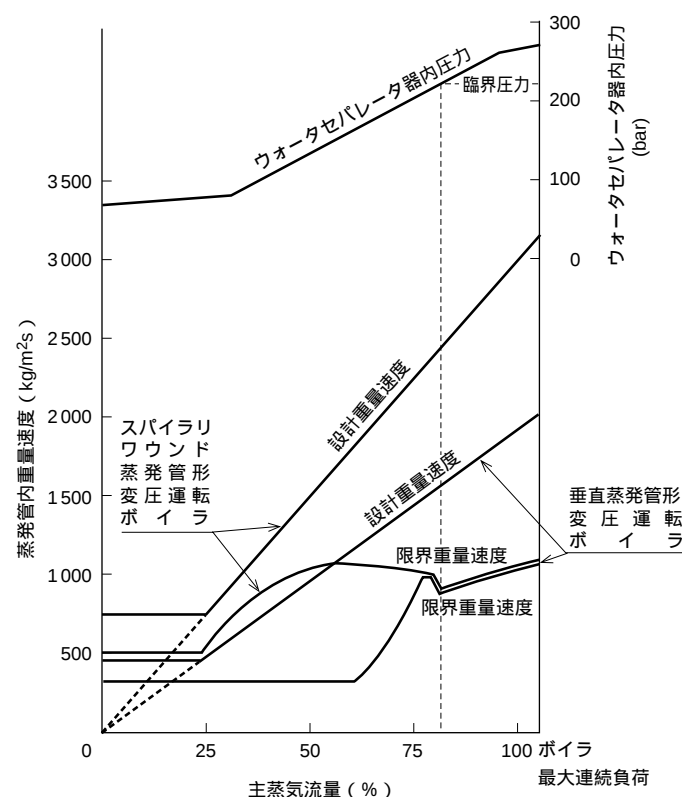


図7 火炉水冷壁蒸発管内重量速度比較

### 3.2 旋回燃焼方式の採用

垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラの場合、旋回燃焼方式と組み合わせることでより高い信頼性を確保することが可能となる。

超臨界圧変圧運転ボイラにスパイラル火炉構造が採用される理由として、火炉壁管の冷却対策以外にも、伝熱管ごとの熱吸収量差に伴う火炉出口流体温度アンバランスを解消することも目的としている。特に、火炉内熱負荷分布が大きくかつ使用バーナ段の選択で熱負荷分布が大きく変わる対向燃焼方式の場合、各蒸発管を熱流束の低い火炉コーナ部及び熱流束の極めて高い火炉中央部にも通過させることによって、各蒸発管出口蒸気温度を均等に維持することを意図しているが、実際の設計においては各管の熱吸収差を打ち消すほどにスパイラル状に火炉を巻くことは現実的にはできず、逆に摩擦抵抗の増加に伴って流動安定性を損なった結果、火炉出口流体温度差が発生しやすい状況となっている。

これに対し旋回燃焼方式では、火炉内に安定した旋回火炎を形成し、この旋回火炎全体を使って燃料を均一かつ高効率に燃焼すること、及び、各バーナ段を一つの構成単位として負荷ごとに点消火することから、火炉各周壁面とも負荷によらず常に均一な安定した熱負荷分布が保たれるという際立った特徴を有している。この特性をいかすことで、旋回燃焼方式の場合には垂直蒸発管形火炉壁の採用が可能となる。

図8は、100%及び50%負荷での火炉壁熱負荷分布（火炉高さ方向平均値）、火炉出口温度分布実績を示す。旋回燃焼の採用により、負荷によらず類似の熱負荷分布となるためオリフィスによる流量調整が可能となり、均一な火炉出口メタル温度分布が得られていることが分かる。

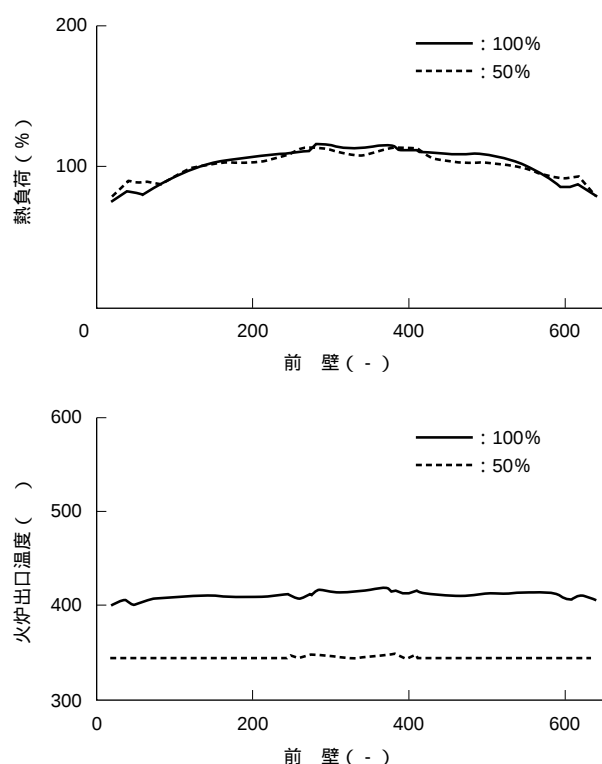


図8 火炉熱負荷分布・火炉出口メタル温度分布実績

また、オリフィスによる流量調整の効果が相対的に小さくなる最低負荷～50%負荷の負荷帯で、ライフル管の優れた伝熱性能により十分に冷却されるため、図7のとおり設計重量速度の限界重量速度に対する余裕は十分に確保される。

### 3.3 垂直蒸発管形ボイラのメリット

垂直蒸発管形ボイラは、スパイラル火炉ボイラと比べて以下の特長を有している。

#### (1) 構造が簡素

スパイラル火炉ボイラは火炉支持構造がテンションストリップ支持型であるのに対し、垂直蒸発管形ボイラではドラム型ボイラと同様、構造的に単純な蒸発管自己支持型である(図3(a))。また、垂直蒸発管形の場合蒸発管の突合せ継手数が少ないため、現地溶接箇所が少なく工数が低減できる。さらに蒸発管補修などの面で保守性が優れている。また、中間負荷運用が主体で、絶えず負荷変化の要求される超臨界圧変圧運転ボイラにおいては溶接点数が少ないことは、高い信頼性を確保する上で重要なポイントである。

#### (2) 火炉壁圧損の低減

上述のとおり、スパイラル火炉方式と比べ垂直蒸発管形火炉壁の場合、火炉壁管内重量速度が低く、かつ火炉壁管1本当たりの長さも短くできることから、火炉壁系統の蒸気側圧損を低く抑えることが可能となる。

この結果、給水ポンプの運転消費動力を低減することができ、かつ給水ポンプ出口から火炉壁出口までの設計圧力についても低減することが可能となる。

#### (3) 火炉壁付着スラグの脱落が容易

石炭焚きボイラの場合、スパイラル火炉壁では、火炉壁管が20～30°に傾斜していることからスラグの付着・堆積がより生じやすく(図9)、大量に堆積した固化スラグが炉底に脱落することによる炉底管の損傷・摩耗等が懸念される。これに対し垂直蒸発管形火炉壁の場合、火炉壁付着スラグの脱落が容易であることから火炉壁に堆積するスラグ量自体が少なく、高い信頼性を有している。

#### (4) 蒸発管流動安定性

前述のとおり垂直蒸発管形火炉壁の場合、蒸発管内重量速度が小さくかつ各蒸発管長さが短いことから、蒸発管の全圧力損失に占める加熱部摩擦損失の割合が小さくなる。

摩擦損失の増加は、火炉壁管ごとの熱吸収量差により生じる各火炉壁管出口蒸気温度のアンバランスを助長する方

向に働く(出口蒸気温度アンバランスが拡大する方向に各火炉壁管内流量が変化する)。

垂直蒸発管形火炉壁ではこの摩擦損失が相対的に小さく、かつ出口蒸気アンバランスを軽減する方向に作用する位置損失の割合が大きいため、灰の脱着が避けられない石炭焚きボイラにおいて、灰の脱着に伴う火炉熱吸収量変動時の各火炉壁管内流量変化が少なく流動が安定し、信頼性が高いという特長を有する(図10)。

## 4. 実 績

以上の優れた特質を有する当社独自開発の垂直蒸発管形ボイラは、九州電力(株)松浦火力発電所1号機に世界で初めて採用され、本格的な多炭種焚き超臨界圧変圧運転DSSボイラとして1989年6月に営業運転を開始した後、14年近くにわたり順調に運転を続けている。

松浦1号ボイラでは、豪州、北米、インドネシア炭等の幅広い性状範囲の62炭種もの海外瀝青炭及び一部の垂瀝青炭を問題無く使用しており、この間蒸発管に関連する不適合は1件も発生しておらず、99.913%の稼働率(計画停止を除いた期間での暦日ベースの稼働率)を達成している。

また、DSS対応中間負荷運用ユニットとして保証レートの4%/分の高負荷変化率及び高速DSS起動(点火～定格到達まで120分)に対応している。

流量分配のオリフィス調整は、広い圧力範囲にてオリフィス圧損の効果がどの程度変化するのか積極的に検証しつつ、垂直管火炉方式初号機でもあることから、オリフィス交換による流量調整は7回に分けて慎重に都度九州電力(株)の承認を得て当社の責任で実施した。この経緯を基に、その後のユニットでは、基本的には1, 2回のオリフィス調整にて所定の流量分布が得られるようになっている。

図11に火炉出口流体温度分布実績を示す。各負荷で安定かつ均一な流体温度分布が得られている。

また、最新の神鋼神戸発電(株)神鋼神戸1号ボイラ(図12)ではガス再循環通風機を不設置とするとともに、関西電力(株)舞鶴1号ボイラ、東京電力(株)広野5号ボイラではさらに起動用ボイラ循環ポンプを不設置としており、垂直管火炉壁構造は多様な条件に対応可能である。

当社では、超臨界圧変圧運転ボイラの標準構造として垂直

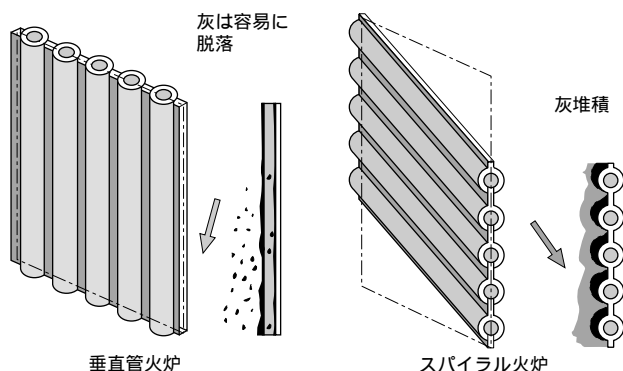


図9 火炉壁管への灰付着

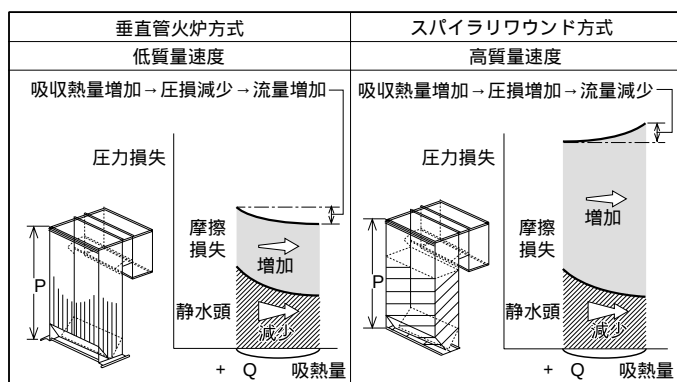


図10 蒸発管流動安定性

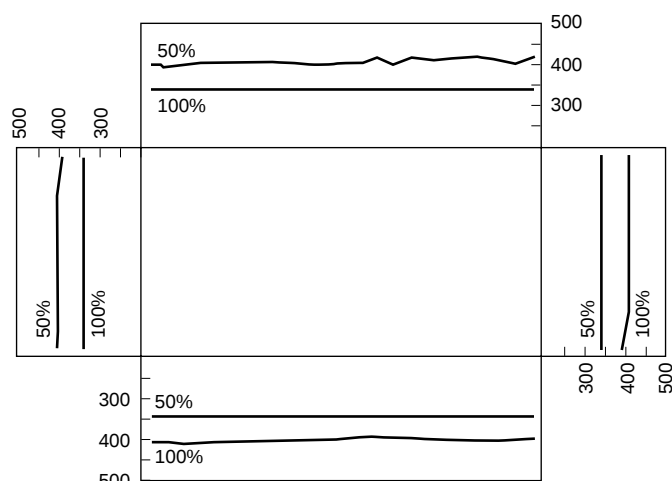


図11 火炉出口流体温度分布（1000MWボイラ）

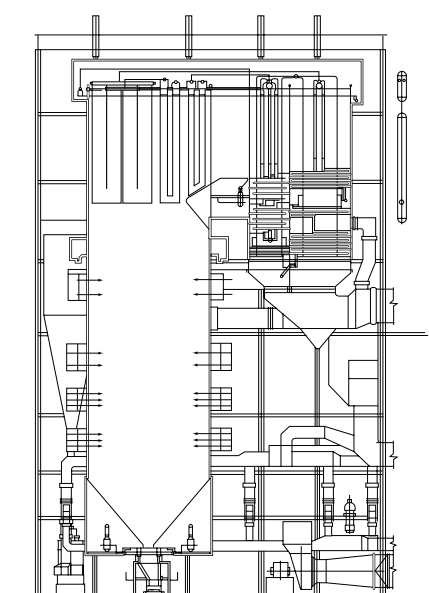


図12 (株)神戸製鋼所神鋼神戸1号ボイラ側面図

蒸発管火炉方式を多くの事業用ボイラに採用しており、現在建設中の2缶を含め現時点で10缶の実績となる（表1）。

## 5. ま と め

世界で唯一当社のみが技術及び実績を有する垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラの特長及び実証実績について、その概要を紹介した。

本技術は幅広い燃料の使用実績を有するボイラメーカーの長年の豊富な経験をベースとし、高度な技術の集約結果として実現可能な技術であり、当社が実用化した最新の技術である。

今後も当社は、これまでと同じく得られた貴重な経験を次世代の設計に反映して最新のボイラを市場に提供していくとともに、引き続きさらに一歩進んだ垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラを納入していくべく、一層の努力を続けていく所存である。

表1 超臨界圧変圧貫流垂直管火炉ボイラ実績

| プラント名           | 出力      | 燃料 | 運転年  |
|-----------------|---------|----|------|
| 九州電力(株)松浦1号     | 700 MW  | 石炭 | 1989 |
| 中部電力(株)川越1号     | 700 MW  | ガス | 1989 |
| 中部電力(株)川越2号     | 700 MW  | ガス | 1990 |
| 中部電力(株)碧南1号     | 700 MW  | 石炭 | 1991 |
| 相馬共火(株)新地2号     | 1000 MW | 石炭 | 1995 |
| 東北電力(株)原町1号     | 1000 MW | 石炭 | 1997 |
| 中国電力(株)三隅1号     | 1000 MW | 石炭 | 1998 |
| 神鋼神戸発電(株)神鋼神戸1号 | 700 MW  | 石炭 | 2002 |
| 東京電力(株)広野5号     | 600 MW  | 石炭 | 2004 |
| 関西電力(株)舞鶴1号     | 900 MW  | 石炭 | 2004 |

## 参 考 文 献

- (1) 国本武志ほか、垂直管形700 MW石炭だき超臨界圧変圧運転ボイラの運転実績、三菱重工技報 Vol.27 No.1 (1990)
- (2) 金子祥三ほか、垂直管火炉方式1000 MW石炭だきボイラの完成、三菱重工技報 Vol.33 No.1 (1996)
- (3) 金子祥三ほか、東北電力(株)原町1号1000 MW垂直管火炉型ボイラの特徴と運転実績、三菱重工技報 Vol.35 No.1 (1998)
- (4) 金子祥三ほか、中国電力(株)三隅1号1000 MWボイラの計画と運転実績、三菱重工技報 Vol.36 No.1 (1999)
- (5) T. Kunimoto et al., Operation Characteristics of 700 MW Coal Fired Boiler for Middle Load Use, Presented at ASME international Power Generation Conference, October (1991)
- (6) 河村友槌ほか、垂直蒸発管形大容量超臨界圧変圧貫流ボイラ、三菱重工技報 Vol.17 No.2 (1980)
- (7) T. Matsuo et al., Heat Transfer Correlation of Rifled Tubing for Boilers Under Sliding Pressure Operating Condition, ASME HEAT TRANSFER Japanese Research Vol.16(1987) No.5
- (8) K. Yamamoto et al., World's-first Super critical Sliding Pressure Operation Coal-Fired 700 MW Boiler with Vertical Water Wall and Its 14 Years Operation Experience, Presented at Coal-Gen 2003 in Columbus, USA (2003)



丸田得志  
原動機事業本部  
ボイラ技術部  
ボイラ技術一課長



山本健次郎  
原動機事業本部  
ボイラ技術部  
ボイラ技術一課主席



菅沼博  
原動機事業本部  
ボイラ技術部  
ボイラ技術一課



坂本康一  
長崎造船所  
火力プラント設計部  
陸用ボイラ設計課長



金巻裕一  
長崎研究所  
火力プラント研究推進室