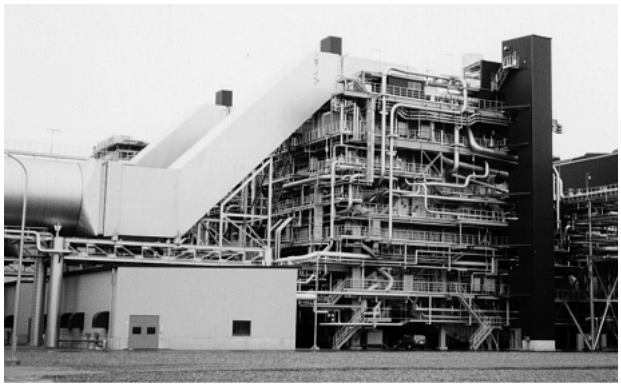
特 集 論 文

# コンバインドサイクル向け竪型自然循環排ガスボイラ －省スペース・容易なメンテナンスの実現－



Vertical Gas Flow HRSG with Natural Circulation Evaporator

丸 田 得 志　　山 本 健 次 郎　　竹 井 康 裕
月 野　　隆　　藤 田　　真

当社の大容量コンバインドサイクル向けの竪型自然循環HRSGは，10年以上の運転実績を有し，性能，信頼性，メンテナンス性，省スペース性に優れコンバインドプラント全体の性能と信頼性の向上に貢献している．

## 1. は じ め に

ガスタービン（以下GT）複合発電プラント（以下コンバインドプラント）は近年数多く建設されているが，当社はGT排ガスから熱回収により蒸気タービンを駆動する蒸気を発生する排ガスボイラ（HRSG）に，以下に紹介する竪型自然循環HRSGを主に採用している．

## 2. 排ガスボイラの型式の変遷

当社が1963年に納入した初号機は複圧竪型強制循環HRSGであり，蒸発量は30 ton/hと小容量であったため，自立構造を採用していた．

1970年代までは，欧州を中心に採用されていた竪型強制循環式が主流であったが，その後GTが大型化するに伴いHRSGも大容量・大型化し，熱伸び量の増加に対応するため，自立構造からつり下げ構造へと移行した．自然循環式（循環ポンプ不要）への移行にあたっては，竪型よりも系統が複雑化するものの，設計指針確立に必要な多くの技術的知見があった垂直配置の蒸発管を用いる横型形式をまず採用した．この形式は，1981年にバハマ電力ブルーヒル発電所で初号機が運転を開始し，1984年には東北電力(株) 東新潟火力発電所３号系列において運転が開始された．さらに1995年には三重圧再熱システムを採用した大容量横型自然循環HRSGが関西電力(株) 姫路第一発電所５号系列にて運転を開始した．

## 3. 竪型自然循環排ガスボイラの実用化

コンバインドプラントの納入実績が増加するにつれ，竪型，横型HRSG両者の製作経験を積み重ねた結果から，伝熱管を水平ループで構成する竪型HRSGの以下の優れた特徴が再認識できた．

(1) 横型HRSGに比べ占有敷地面積が小さく，既設発電所のリプレースを始め省スペースが要求されるプラントに適している（約70 %まで低減可能）．

(2) 管寄・管台数を1/3まで低減でき，また管寄せへのアクセスが容易であることから，メンテナンス性が向上している．

(3) 起動／停止時に発生する熱伸び／熱応力に対して，汽力ボイラと同様の架構からのつり下げ構造であり，伝熱管の上下方向の拘束が少なく，また，伝熱管の軸方向の伸びが吸収できる構造であるため，DSS運用に有利である．

(4) HRSG内部にガスが滞留する領域がなく，自然通風力によるガスパージが容易にできることから，起動／停止時ガスパージを短時間かつ安全に実施可能である．

(5) 管寄数の低減によるドレン系統の簡素化やドレン排出に必要な揚程確保が容易であり，起動初期において系内に滞留するドレンのパージが容易である．

以上の特徴を有し，起動／停止時に発生する熱応力に対する信頼性が高いという竪型HRSGを，さらに自然循環形式として循環ポンプを不設置とすることにより，信頼性向上と性能向上（補機動力低減）を図ることを目指した．

竪型自然循環HRSGを実用化するにあたっては，まず最初に水平配置の上昇管内流動特性に着目し蒸発管内で安定した

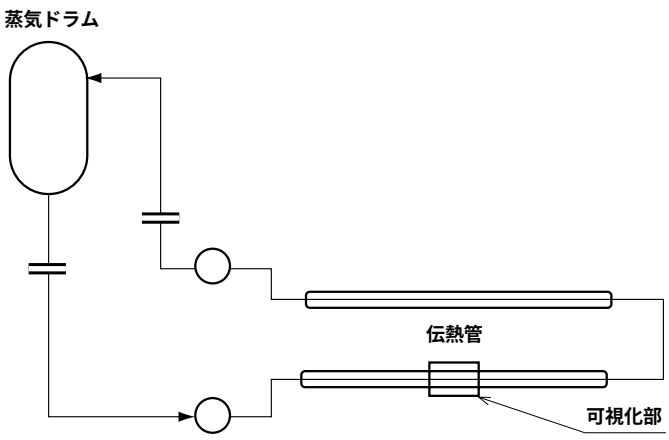



図１　テストループ系統

流動が確保できる条件を確認した．当社長崎研究所において，実規模の蒸発器伝熱管仕様と構造，そして起動～停止までの実機運転状態を模擬した流動伝熱試験を実施した．テストループの系統と試験装置外観を**図１**，**図２**に示す．管外表面のヒータにより実機運転に相当する熱負荷となるよう制御して検証試験を行った．伝熱管の一部にサイトグラスを装備して伝熱管内流動・蒸発状態の目視確認も行った．

冷態起動や熱態起動を含む起動から定格負荷状態にいたるまでの，いずれの状態においても伝熱管内の流動は常に安定し，メタル温度も安定して局所的な上昇が発生しないことを確認した．また，弁により循環量を大幅に低減した条件では伝熱管上／下面に温度差を生じることが分かった．さらに流量を低減して水／蒸気の二相分離（**図３**）が目視により確認される状態まで試験を行い，安定した循環系統の確立に必要とされる諸条件を見いだした．本試験結果から，高圧力域まで適用可能な水平蒸発器の設計指針を確立した．

フィン付伝熱管の仕様については，良好な伝熱効率を得るため，同じく長崎研究所に実規模伝熱特性検証設備（**図４**）を建設し，伝熱管外径（13.6～63.5 mm），フィンピッチ（最大12山／インチ）及び伝熱管配置，等による影響を検証した．フィンは管軸方向に傾くと伝熱特性が劣化するのでHRSG製造にあたっても各種配慮を払っている．特に高い伝熱特性を有することが確認された高密度フィンを製作・適用しHRSGの敷地面積だけでなく，高さの低減も実現した．

## 4．竪型自然循環排ガスボイラの実用化

本形式の初号機である出光興産(株）北海道精油所向けユニットは1994年に運開した．試運転時には蒸発器系統の各部温度分布を計測し，計画どおりの良好な循環特性が確認された．この後本形式のHRSGは幅広く適用されるようになり，Fクラスの大容量GT向けにも，タイEGAT／Wang Noi，韓国電力公社ULSANほかへと次々と採用され，順調に稼動中である．

国内事業用向けとしても，東京電力(株）千葉１号系列，東北電力(株）東新潟４号系列に納入されている．東新潟４

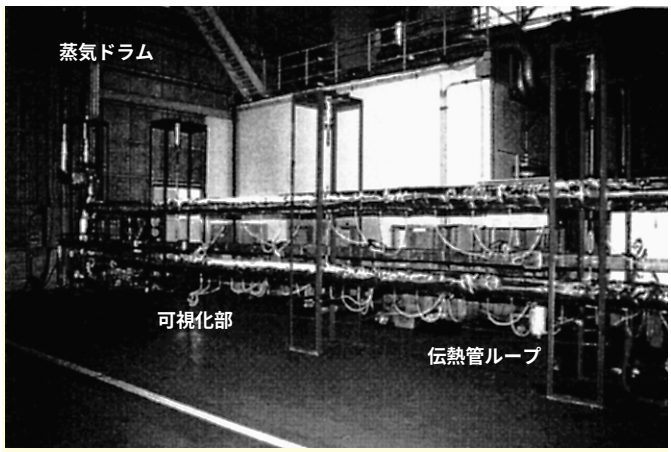



**図２　実験装置外観**

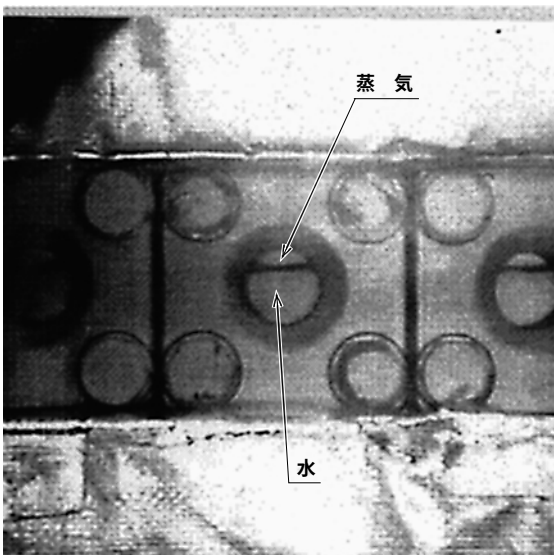



**図３　低循環流量下における水蒸気分離**

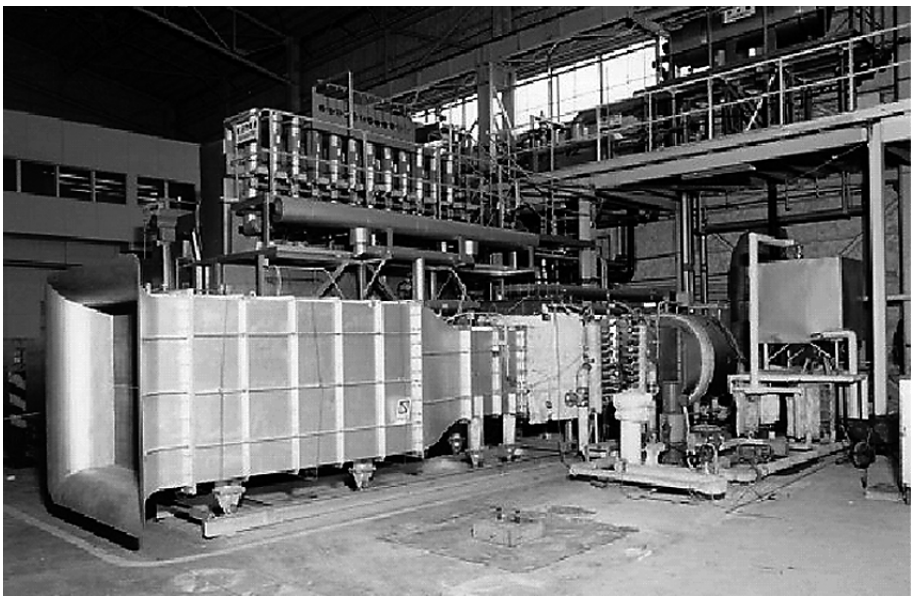


**図４　伝熱特性検証設備**

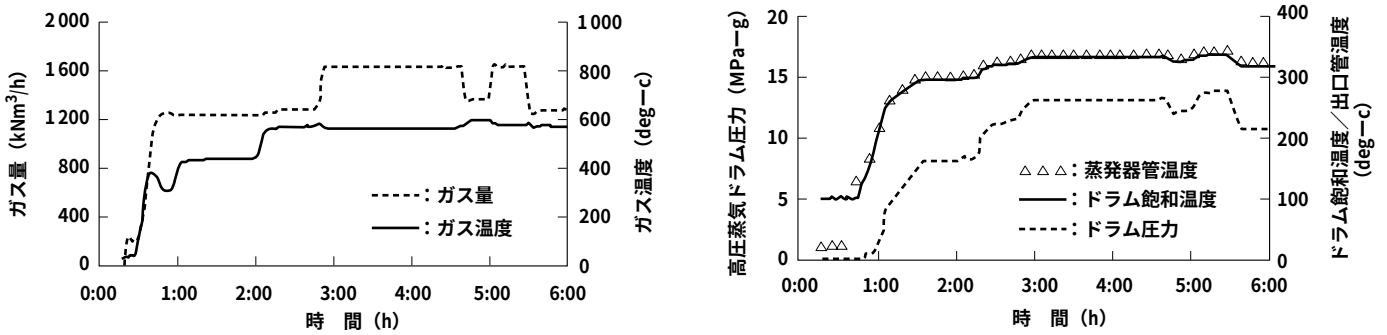



**図５　起動チャート**

海上輸送　　構内輸送　　据付完了

**図６　大型モジュールによる輸送・据付**

号系列では高性能GT（701G），高蒸気条件（高圧主蒸気圧力15 MPa級，主蒸気／再熱蒸気温度566/566℃）を採用し高効率化を図っている．高圧力域では水／蒸気の比重差が減少し自然循環力が低下しがちであるという難しい課題も克服して順調に運転を継続している．本ユニットの冷態起動チャートを**図５**に示すが，GTからの排ガス量・ガス温度の上昇とともに，蒸発管各部で計測される温度は停滞なく上昇しており，起動初期から自然循環特性に問題ないことを確認している．

HRSGの建設にあたってはHRSG全体がコンパクトな自然循環竪型HRSGである特徴をいかして，据付期間の短縮や高所作業低減のため，耐圧部／非耐圧部／脱硝モジュール／鉄骨までを一体化した大型モジュール工法を周辺条件が整う場合に採用している．**図６**に輸送据付状況を示す．建設現場の状況に応じたモジュール化を採用し，現地作業量の低減／据付期間の短縮／信頼性の向上を行う．

## 5．ま　と　め

昨今の$CO_2$排出量低減を初めとする環境保護の観点から，天然ガスを主燃料とするコンバインドプラントは継続して建設されており，高性能・高信頼性，さらに高い経済性を有するHRSGを今後も提供し，貢献してゆく所存である．

**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

**竹井康裕**
原動機事業本部
ボイラ技術部
ボイラ技術一課

**月野隆**
長崎造船所
火力プラント設計部
火力サービス課長

**藤田真**
長崎造船所
火力プラント設計部
陸用ボイラ設計課