

微粉炭焚きボイラにおける最新の低NO_x燃焼技術

Latest Low NO_x Combustion Technology for Pulverized Coal Fired Boilers

木山 研滋 Kenji Kiyama

吉廻 秀久 Hidehisa Yoshizako

岡崎 洋文 Hirofumi Okazaki

谷口 正行 Masayuki Taniguchi



(a) バーナの火炎



(b) 欧州600 MW級発電所 (左側の発電所)

図1 新型二段燃焼用空気供給装置を適用した欧州600 MW級発電所

NO_xを低減するとCOが上昇するという従来の二律背反の関係を克服できる新型二段燃焼用空気供給装置を開発し、欧州の600 MW級発電所において、その優れた性能を実証した。

日立グループは世界的な環境保全ニーズの高まりに応えて、ボイラの低NO_x(窒素酸化物)燃焼に対する、たゆまぬ技術開発に注力している。微粉炭燃焼については、世界で初めて、「火炎内脱硝」という概念を導入した「HT-NRバーナシリーズ」を実用化し、国内外の多数のボイラにおける環境負荷低減に貢献している。

今回、実機ボイラの特性を高精度に評価可能な大型燃焼試験設備と、独自開発の数値解析技術を駆使して、火炎内脱硝技術に加え、二段燃焼用空気供給装置の配置・構造・運用を改良し、さらに大幅にNO_xを低減する技術の開発に成功した。この技術の適用により、CO(一酸化炭素)同一の条件下で、NO_xの排出量を従来比で40%以上低減できる。

この最新技術を適用して国内外の環境保全に貢献するため、発電所個々のニーズと条件に合わせ、数値解析も活用して最適な設備の提供を進めている。

1. はじめに

エネルギーの安定供給の観点から、世界的に、石炭焚き火力発電所が見直されている。石炭焚き火力発電所から排出される環境負荷物質であるNO_x(窒素酸化物)、SO_x(硫黄酸化物)、CO₂(二酸化炭素)などの排出濃度は、ほかの燃料を使用する火力発電所に比べ、同一発熱量基準では高く、これらを低減する技術が特に要求される。日立グループは、環境負荷物質の削減技術の高度化に注力しており、各種技術を実用化している(図1参照)。

環境負荷物質のうち、NO_xは燃焼方法の改良(低NO_x燃焼技術)によって削減可能であり、バーナや炉内の燃焼方式の開発によって低NO_x化を進めてきた。

ここでは、微粉炭焚きボイラにおける最新の低NO_x燃焼技術について述べる。

2. 低NO_x燃焼技術の開発手順

低NO_x微粉炭焼き燃焼技術の開発手順の概要を図2に示す。基本原理は火炎内脱硝技術¹⁾と二段燃焼である。要素研究、バーナおよび空気供給口の性能と構造のスクリーニング、大型燃焼試験設備での検証、実機実証試験の流れで開発を進めている。

要素研究段階では、各種計測技術や数値解析を用いて、反応と流動の両面から検討を行う。数値解析の精度向上のため、NO_xやCO(一酸化炭素)の評価モデルの構築²⁾、および着火メカニズムの解明³⁾を行っている。

バーナの開発においては、石炭使用量500 kg/hの燃焼試験設備を用いて、バーナ構造のスクリーニング試験を行い、最適構造を決定する。その後、実機大バーナの流動が評価可能な流動試験設備を用いて相似則の検討を行い、最終的には、石炭使用量約3 t/hの大型燃焼試験設備で、単体バーナの燃焼性能を検証する。流動試験設備では、二段燃焼空気供給口の流動の検討も実施している。

バーナ構造および空気供給口の構造も含めた燃焼方式を

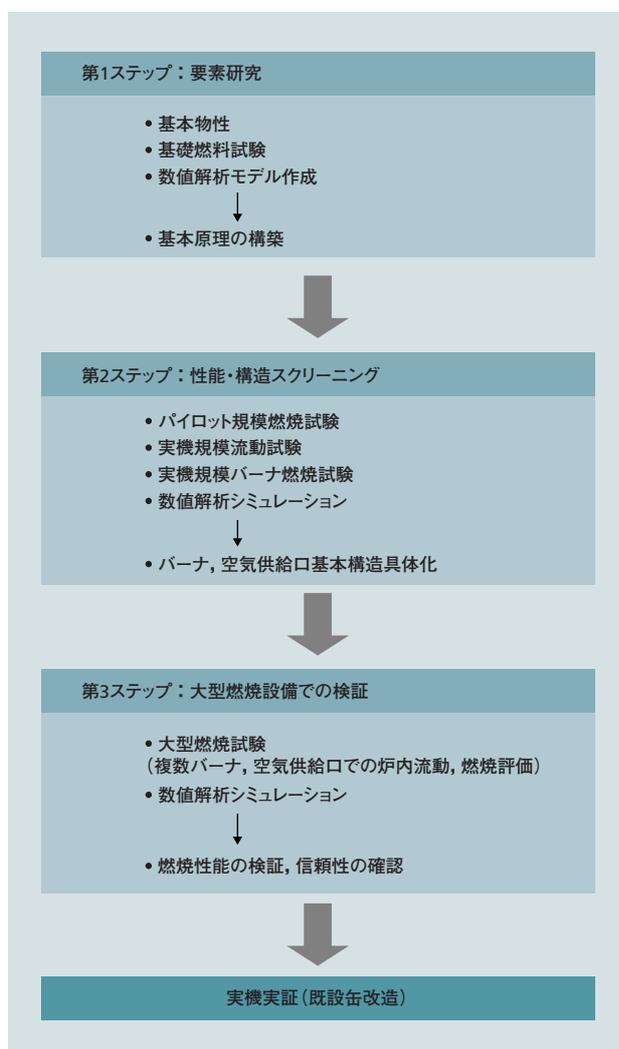


図2 低NO_x燃焼技術開発の手順

要素研究から実機実証の手順で開発し、信頼性を確保している。

最終決定した後、大型燃焼試験設備を用い、複数バーナと空気供給口を有する実機を模擬した火炉で、性能の最終評価を行う。実機に近い条件で、火炉内の流動やバーナと空気供給口からの噴流の相互作用を評価することで、燃焼性能を正確に把握することができる。

大型燃焼試験設備から実機へのスケールアップは、数値解析によって容量差を評価し、その妥当性を検証している。

3. 大型燃焼試験設備の概要

大型燃焼試験設備は、1時間に約3 tの石炭を燃焼させることが可能であり、同種の設備としては世界最大級である。設備の概要を表1および図3に示す。

実機規模の燃焼を模擬できるように、以下の要点を考慮しながら設備の大規模な改造を実施した。

(1) 高精度の微粉炭燃料流量計測

試験に使用する石炭は、微粉碎機で必要な粒度に粉碎してバーナから炉内に供給する。微粉炭バーナごとの微粉炭燃料流量を高精度に計測することにより、実機ボイラで想定される燃料分布を設定することができる。

表1 大型燃焼試験設備の概要

熱出力、石炭燃焼量、主要機器の概要を示す。

項目	内容
熱出力	約20 MW
石炭燃焼量	約3.0 t/h
主要機器	微粉碎機、火炉、微粉炭バーナ、空気供給口、伝熱管群、AQCS(排ガス処理設備)

注:略語説明 AQCS(Air Quality Control System)

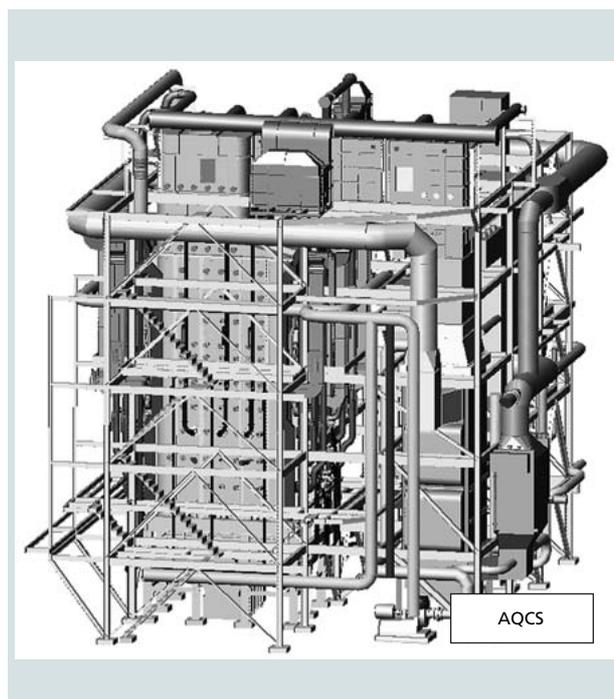


図3 大型燃焼試験設備の外観イメージ

実機規模の燃焼を模擬できる試験設備である。

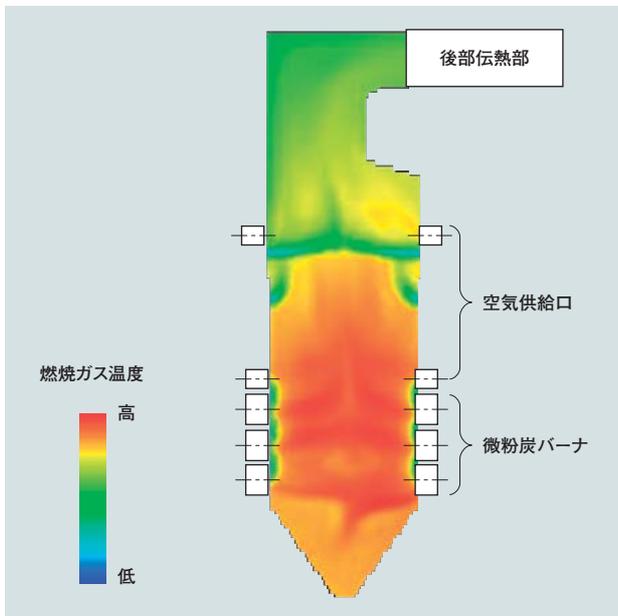


図4 火炉中央断面の温度分布(数値解析)
 実機の炉内温度を再現できることを確認した。

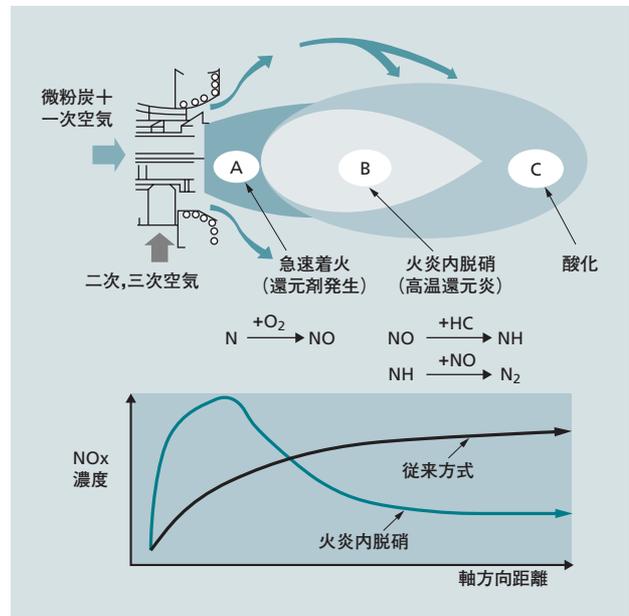


図5 火炎内脱硝の原理
 着火直後の高温かつ燃料過剰な条件でNOxは還元される。

(2) 燃焼温度の高温化

実機ボイラに比べて規模が小さい燃焼試験設備では、火炉壁への放熱が大きく、燃焼温度を高くできないという課題がある。この燃焼設備では、数値解析を用いて炉内温度分布を評価し、断熱材の使用範囲を適正化した(図4参照)。その結果、実機ボイラと同等の最高温度1,850℃までの燃焼温度を達成した。火炉出口までの実機温度履歴を模擬することで、温度に依存する微粉炭燃焼速度やNOxの生成量を実機と同等としている。

(3) バーナと空気供給口の正確な相似評価

微粉炭バーナとその下流の二段燃焼用空気供給口との間隔および側壁との位置関係をフレキシブルに設定可能な構造とし、実機との相似性を高めた。燃焼にかかわる反応時間をさまざまな実機ボイラと同等に模擬することができるため、反応生成物の空間分布を正確に評価することができる。

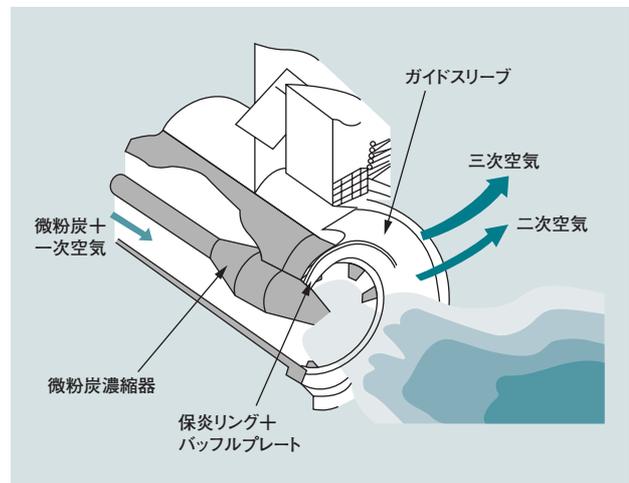


図6 HT-NR3バーナの構造
 火炎内脱硝反応を最大限に引き出す最新式バーナである。

4. NOx, CO低減手法

4.1 バーナによるNOx低減

「HT-NR (Hitachi-NOx Reduction) バーナシリーズ」は、火炎内でNOxを還元する独自の燃焼機構(火炎内脱硝)を有する。火炎内脱硝は、微粉炭着火直後の初期燃焼領域を高温かつ燃料過剰にすれば、NOxが効率よく分解する反応を適用した技術である。火炎内脱硝の原理を図5に、HT-NRバーナシリーズの最新式である「HT-NR3バーナ」の構造を図6にそれぞれ示す。

超低NOxを実現するための特徴は以下のとおりである。

(1) 保炎器後流の再循環領域の拡大

火炎内脱硝反応を促進するためには、微粉炭を燃料ノズ

ル出口で安定に着火させ、火炎を保持することが重要である。火炎を早期に形成させることで、酸素の消費が進み、酸素不足の還元域を拡大できる。

HT-NR3バーナでは、燃料ノズルの出口に設けた保炎リング(保炎器)にバップルプレートを設置することにより、燃料の外周を流れる二次空気の噴出方向を外向きにして、燃料ノズル出口に形成される再循環領域を拡大している。この再循環領域には高温の既燃焼ガスが滞留するため、微粉炭の着火が促進され、火炎が安定に保持される。

(2) 微粉炭濃縮

微粉炭の着火には微粉炭濃度が重要なファクターとなる。微粉炭の濃度が高いほど微粉炭粒子間の距離が小さくなり、火炎伝播(ば)しやすくなるため、急速着火および安定火炎形成に有利となる。HT-NR3バーナでは砲弾状の微粉炭濃縮

器を燃料ノズル内に設けて、微粉炭と一次空気の混合気をいったん燃料ノズル内壁近傍に近づけ、燃料ノズル出口部では、微粉炭と空気の慣性の差を利用して、一次空気のみをバーナ中心部に戻し、保炎リング近傍の微粉炭濃度を高めている。

(3) 外周空気の最適投入

三次空気を燃料ノズル近傍で外側に広げ、火炎中心部に酸素不足の還元域を形成させてNO_xを低減し、還元反応が進んだ後に火炎に混合させて燃焼反応を促進する。HT-NR3バーナでは、ガイドスリーブという簡単な構造の分離器で三次空気を効果的に分離している。

HT-NRバーナシリーズの開発で、NO_xレベルは革新的に低減された(図7参照)。

4.2 二段燃焼空気供給口の改良によるNO_x低減

バーナによるNO_x低減に加え、二段燃焼法を用いることで、NO_xをさらに低減することができる。二段燃焼法では、微粉炭バーナと空気供給口との間の空間で空気不足の燃焼反応を促進し、空気供給口から火炉出口までの空間で燃焼反応を完結させる。

二段燃焼法では、バーナと空気供給口との間の距離を長くするとNO_xが低減できることが知られているが、その反面、空気供給口から火炉出口までの距離が短くなるため、COや未燃焼分が増加して燃焼効率が低下する。NO_xとCO・未燃焼分が二律背反の関係になり、両者の同時低減が課題となる。

この課題を克服するため、新燃焼方式の多段空気供給口を開発し、二段燃焼用空気と未燃焼ガスの混合を促進させ

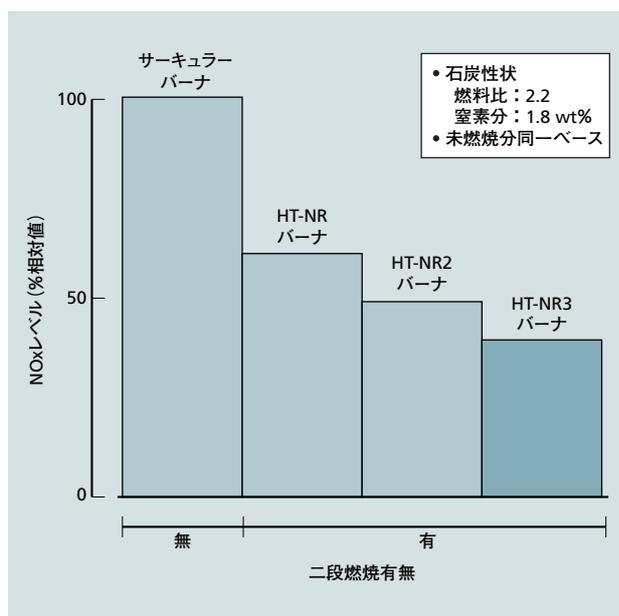


図7 HT-NRバーナシリーズのNO_x性能

バーナ開発で大幅なNO_x低減を達成してきた。

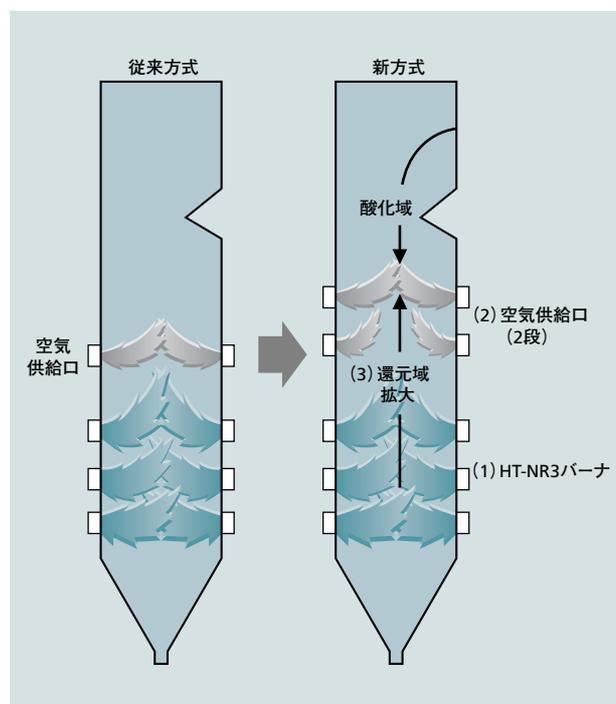


図8 新旧燃焼方式の概念

新型空気供給口でNO_xとCOの同時低減を可能とした。

ることに成功した。短い距離でCOを低減することが可能で、還元域を拡大してNO_xを低減させた場合でも、COの増加を抑制できる。この新燃焼方式の開発により、NO_xとCOの同時低減を可能とした。新旧燃焼方式の概念を図8に示す。

この燃焼方式で採用した多段空気供給口は、火炉の燃焼ガス流れ方向に対して2段の空気供給口を設ける。各空気供給口ごとに、対応する火炉内空間を分担し、未燃ガスの分布に応じて空気を適正に供給することで未燃ガスの燃焼を促進する。

バーナと空気供給口との間の距離を拡大することにより、還元域の拡大によるNO_x低減効果のほか、二段燃焼用空気の供給により、高温の燃焼場で生成するサーマルNO_xの低減にも寄与する。サーマルNO_xは空気中の窒素が高温雰囲気において酸化反応されることによって生じる窒素酸化物の総称である。火炉内の燃焼ガスは炉壁などの伝熱面への放熱で冷却され、火炉出口に近づくほど温度が低下する。バーナと空気供給口との間の距離を適正に設定することにより、空気供給口部での炉内温度をサーマルNO_xが増加する温度以下に抑えることができる。

5. 環境負荷物質の低減結果

HT-NR3バーナおよび新型空気供給口を適用して、北米産の亜瀝(れき)青炭[PRB(Powder River Basin)炭]を使用して大型燃焼試験設備で燃焼試験を実施した結果を図9に示す。

従来の燃焼方法に比べて、火炉出口のCOは同等のまま、

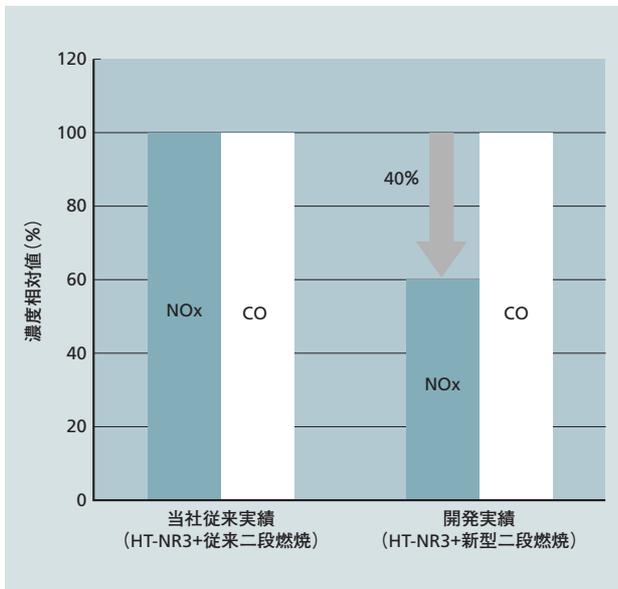


図9 燃焼試験結果
最新の燃焼方式を適用することにより、COを増加させることなくNOxを低減することに成功した。

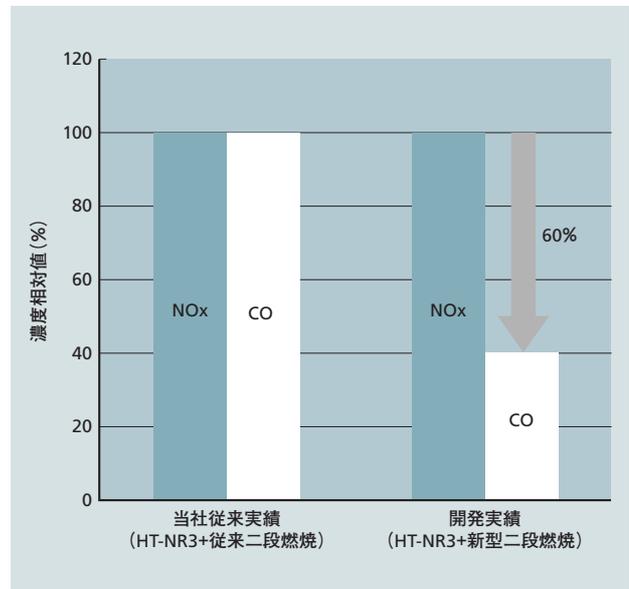


図10 600 MW級実証試験の数値解析結果の評価
最新の燃焼方式を適用することにより、NOx同等条件下でCOを半以下にできることを確認した。

NOxを40%低減した(当社比)。また、燃焼炉の内部を詳細に測定し、数値解析結果と比較したところ、多段空気供給口の効果も含め、予測どおりであることを確認した。

さらに、この燃焼技術を既設の発電用ボイラ(出力600 MW級)に適用した。この検討では、最新の燃焼技術の適用によるCOの低減に主眼を置いた。適用検討時の数値解析結果の例として、数値解析による評価結果を図10に、火炉の縦断面におけるガス成分分布(酸素、CO、NOx)を図11に、それぞれ示す。

このボイラでは、従来から空気供給口を2段有している。改

造範囲を最小限にとどめるため、既設の空気供給口を利用することにより、微粉炭バーナから空気供給口までの距離は適用前と変わらず、NOx値には変化がない。一方、この燃焼技術の適用により、火炉出口におけるCO濃度は半以下となった。これは、図11のCO濃度分布に示すように、火炉前後壁近傍のCO濃度が高い部分(赤色着色部)が減少したことによる。この燃焼方式では、空気供給口ごとに対応する火炉内空間を分担させ、空気を適正に分散させる。このため、二段燃焼空気と未燃ガスとの混合が均一化されCOが低減したものである。

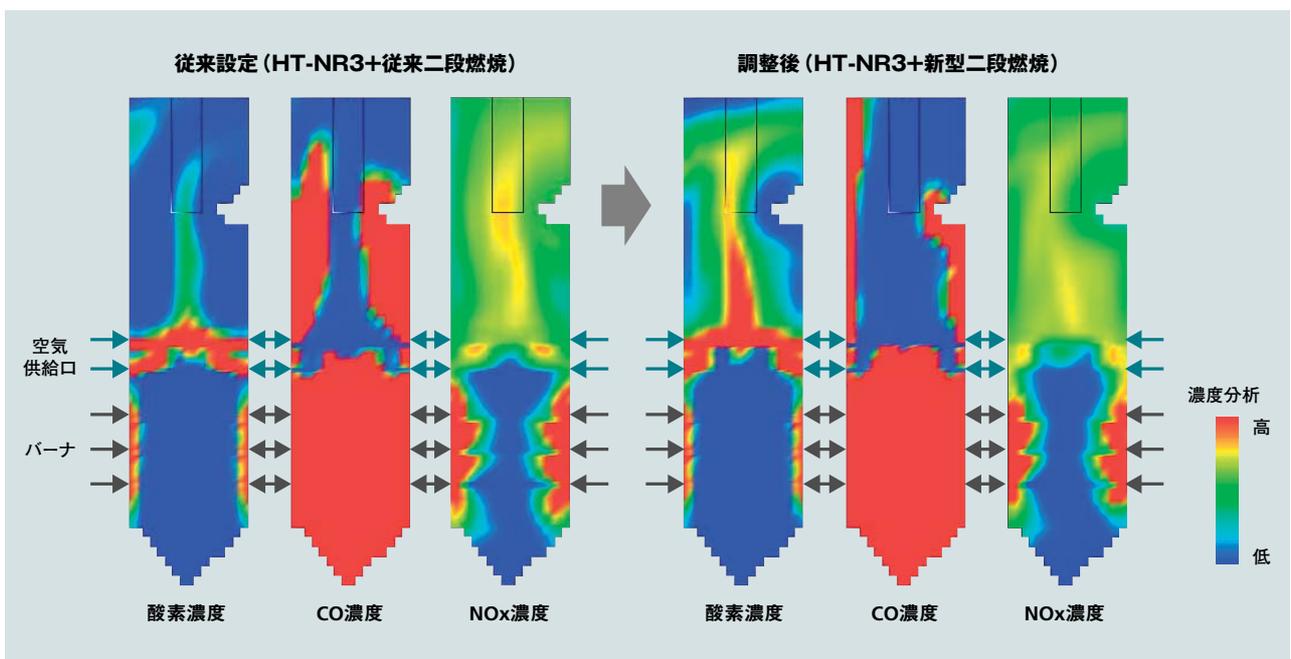


図11 600 MW級実証試験の数値解析結果例
最新の多段空気供給口を適用することにより、NOx同等条件下で炉壁近傍のCOを大幅に低減できることを確認した。

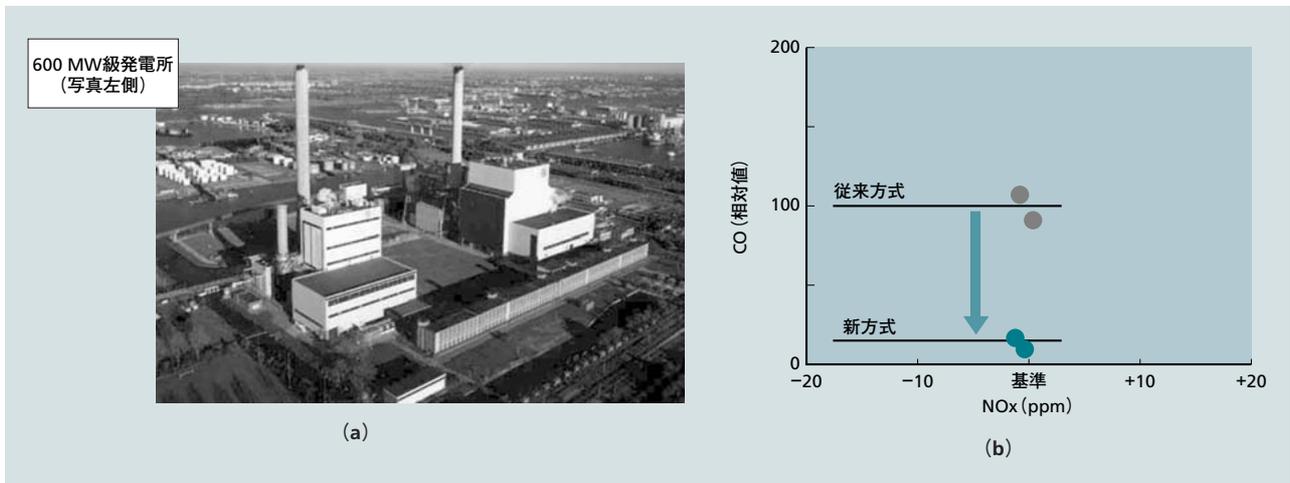


図12 600 MW級実証試験結果

数値解析で確認されたCO低減効果が実機でも実証された。実証した発電所を(a)に、その結果を(b)にそれぞれ示す。

数値解析による検討後、実際に実機ボイラに新燃焼方式を適用し、実証試験を実施した(図12参照)。数値解析での評価結果を上回るCO低減効果が実証された。

6. おわりに

ここでは、微粉炭焚きボイラにおける最新の低NO_x燃焼技術について述べた。

環境保全と経済的設備供給のニーズを背景に、高効率・低NO_x燃焼技術の高度化がますます期待される。また、エネルギーの安定供給のために、使用される石炭の多様化が進んでいる。大型燃焼試験設備における検討結果と数値解析技術を組み合わせることにより、多様な石炭に対応した燃焼

特性の評価と製品設計への展開を、高い信頼性の下で実施することが可能となる。

日立グループは、今後も、最新のバーナ、炉内燃焼システム、および制御の各技術を融合し、市場ニーズに適合した最適な製品の展開を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 幸田, 外:火災内脱硝による微粉炭焚き低NO_xバーナの開発, 季刊・環境研究, Vol.87(1992.9)
- 2) M. Taniguchi, et al.:A Reduced NO_x Reaction Model for Pulverized Coal Combustion under Fuel-Rich Conditions, Fuel, Vol.81(2002), pp.363-371(2002.1)
- 3) M. Taniguchi, et al.:Pyrolysis and Ignition Characteristics of Pulverized Coal Particle, J. of Energy Resources Technology, Vol.123, pp.32-38(2001)

執筆者紹介



木山 研滋

1980年バブコック日立株式会社入社, 呉事業所 火力技術本部 ボイラ設計部 所属
現在, 発電用ボイラ燃焼装置の開発・設計に従事
日本機械学会会員, 火力原子力発電技術協会会員



吉廻 秀久

1981年バブコック日立株式会社入社, 呉研究所 所属
現在, ボイラの流動・伝熱, 燃焼関連の開発に従事
工学博士
日本機械学会会員



岡崎 洋文

1992年日立製作所入社, 電力グループ エネルギー・環境システム研究所 石炭科学プロジェクト 所属
現在, 微粉炭燃焼技術の研究開発に従事
日本機械学会会員, 火力原子力発電技術協会会員



谷口 正行

1987年日立製作所入社, 電力グループ エネルギー・環境システム研究所 石炭科学プロジェクト 所属
現在, 微粉炭焚きボイラとボイラ解析プログラムの開発に従事
工学博士
日本機械学会会員