

カーボンニュートラル社会に向けた石炭焚ボイラにおける アンモニア燃料転換技術の開発

Development of Ammonia Fuel Conversion Technology at Coal-fired Boilers
for the Decarbonized Society



山下 登敏*¹
Takatoshi Yamashita

甘利 猛*¹
Takeshi Amari

住田 忠*²
Tadashi Sumida

羽有 絵莉*³
Eri Haari

松尾 啓介*⁴
Keisuke Matsuo

高山 明正*⁵
Akimasa Takayama

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、日本政府のグリーン成長戦略では、燃料アンモニア産業の成長戦略“工程表”が示されている。その中で、石炭火力発電所におけるアンモニア燃料への転換が今後の取組みの一つとして位置付けられている。三菱重工業株式会社では、国内外の様々なお客様のニーズに応えるために、旋回燃焼と対向燃焼の両方式の石炭焚ボイラで、アンモニアへの燃料転換を可能とする技術開発を進めている。本報では、アンモニア専焼バーナの開発が完了し、実機適用への目途が立ったこと、更にアンモニア燃料転換時のボイラプラントの改造計画の概要について報告する。

1. はじめに

三菱重工業株式会社(以下、当社)は 2040 年にカーボンニュートラルを達成することを宣言(MISSION NET ZERO)し、既存インフラのカーボンニュートラル化を目指している。火力発電のカーボンニュートラル化には、石炭焚ボイラの CO₂ 排出量を削減することが重要である。そのため、燃焼しても CO₂ を排出しないアンモニアによる燃料転換が注目されている。

グリーンイノベーション基金事業では、燃料アンモニアの供給と需要が一体となった燃料アンモニアサプライチェーンの構築を目指し、2050 年に国内で 3000 万トン/年のアンモニアを導入するために必要な技術の一つとして、石炭火力発電所で 50%以上のアンモニア燃料転換を可能とする技術開発を進めている。

本報では、お客様の多様なアンモニア利用ニーズに応えるため、旋回燃焼と対向燃焼の各燃焼方式のボイラに対応する液焚きと気焚きアンモニア専焼バーナの開発を完了し、実機適用への目途を得たこと、また、開発したアンモニア専焼バーナを用いたボイラプラント改造を計画したので、その概要について報告する。

2. アンモニア燃料転換コンセプト

2.1 50%以上の燃料転換を可能とするアンモニア専焼バーナコンセプト

既報にて示した石炭・アンモニアを予混合させた二段電気炉試験では、アンモニア燃焼割合の増加とともに NO_x が増加し、燃焼割合 50%で極大となった。また、アンモニア燃焼時は空気比に対する NO_x 感度が増大した。一方、石炭・アンモニアをそれぞれ独立(専焼)のバーナで燃焼させれば、それぞれの燃料に応じて空気比の適正化が容易であり、アンモニア燃焼割合を高めた場合にも NO_x 抑制が可能であった⁽¹⁾。

*1 エナジードメイン スチームパワー事業部 技術部 主席技師 技術士(機械部門)

*2 エナジードメイン スチームパワー事業部 計画部 グループ長

*3 エナジードメイン スチームパワー事業部 計画部 主席技師

*4 総合研究所 燃焼研究部 主席チーム統括

*5 総合研究所 エナジー研究推進部

この結果を踏まえて、石炭バーナとは別にアンモニア専焼バーナを設置し、ボイラ火炉内で燃焼させる方法を採用することとした。ボイラでは、高さ方向にバーナが複数段設置されており、アンモニアバーナの設置段数を変化させることにより、例えば 20%といった低比率燃料転換から 50%以上の高比率燃料転換にも対応可能である。この方法は、各バーナの空気比制御も容易であるため、NO_x 抑制の点で石炭とアンモニアを同一のバーナで燃焼させる場合と比べて優れた結果が得られると考えた。

更に、アンモニア燃料の普及段階においては、バーナ改造後も石炭専焼運転での定格出力及び環境性能の維持が求められることを前提に考え、既設の石炭バーナや起動用油バーナをアンモニア専焼へと切替え可能とするバーナ構造を考案した。

2.2 各燃焼方式におけるアンモニア専焼バーナ

(1) 旋回燃焼方式

旋回燃焼ボイラでは、起動用油バーナにアンモニア専焼バーナの機能を付加した。液焚きでは、起動用油バーナ部へ液体アンモニア噴霧ノズルを配置し、気焚きでは、当社ガス焚きバーナにて豊富な採用実績のあるフラットヘッドノズルを配置した(図 1(a))。アンモニアバーナは石炭バーナに挟み込まれた配置であり、隣接するバーナで石炭とアンモニアを燃焼する場合は、石炭火炎とアンモニア火炎が近接した状態となる。このため、相互の火炎が着火及び NO_x 特性に影響を及ぼすことを考慮し、燃焼試験では石炭とアンモニア両バーナを燃焼させた状態で性能評価を行った。

(2) 対向燃焼方式

対向燃焼ボイラでは、石炭バーナにアンモニア専焼バーナの機能を付加した。アンモニアは常温常圧では気体であり、ボイラ火炉内では、ノズルから噴射された液体アンモニアは直ちに気化する。そこで、液焚きでは、既存のガス焚きバーナで実績のあるマルチスパッドノズル構造を転用した。気焚きバーナでも、液焚きと同様、既存のガス焚きバーナ構造を転用し、液焚き、気焚きバーナとも、噴射孔数や噴射角、噴出流速などをアンモニア燃焼向けに最適化した(図 1(b))。対向燃焼ボイラでは、バーナ間の距離が離れており、アンモニアバーナには単体での安定着火・保炎が必須となることから、燃焼試験ではアンモニア専焼の状態での性能評価を行った。

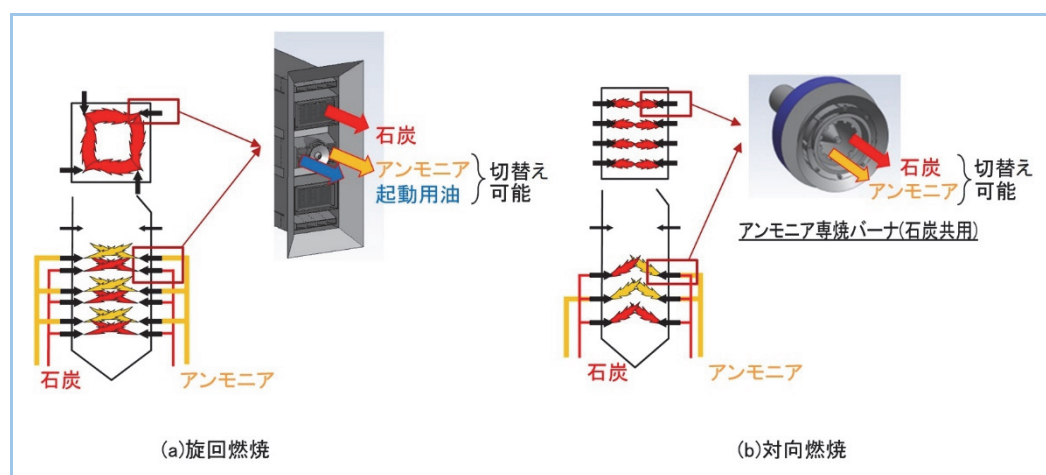


図1 各燃焼方式でのアンモニア 50%超燃焼バーナパターンとアンモニア専焼バーナ

3. 燃焼試験によるアンモニア専焼バーナの性能検証

3.1 燃焼試験設備

アンモニア燃焼試験に向けて NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 事業にて、アンモニア供給設備を導入した(図 2(a))。液送ポンプによる液体直接供給と、気

化器を用いた気体供給が可能であり、液焚きと気焚きの両試験に対応する。燃焼試験では、当社が保有する 0.5t/h 燃焼試験炉(定格入熱量 3.7MWth, 図 2(b)), 及び 4t/h 燃焼試験炉(定格入熱量 23MWth, 図 2(c))を使用した。0.5t/h 炉での性能評価結果を基に、バーナ基本構造や運転条件の目途付けを行った後、実機と同等サイズのバーナで燃焼試験が可能である 4t/h 炉にて、スケールアップ時の燃焼性能を評価し、実機バーナ仕様を決定した。

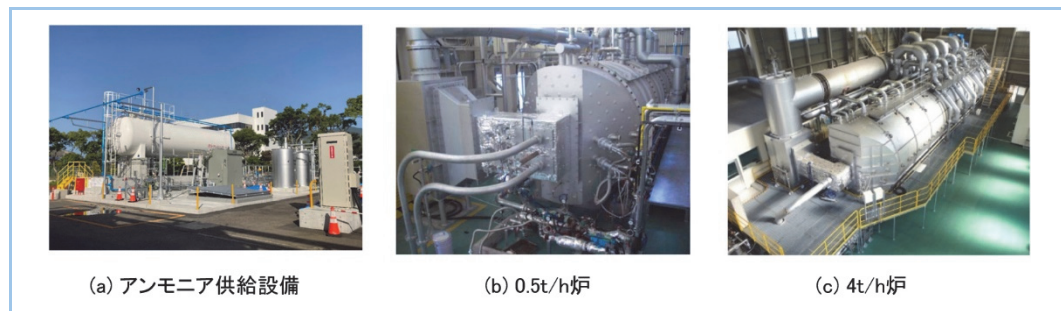


図2 試験設備外観

3.2 燃焼試験結果

(1) 巡回燃焼向けバーナ燃焼試験

既報では、0.5t/h 炉にて、石炭とのアンモニア燃焼割合 55%での燃焼試験を行い、液焚き、気焚きバーナともに、火炉出口での未燃アンモニアや温暖化係数の高い亜酸化窒素(N_2O)はともに計器検出下限未満であり(アンモニア:0.2ppm 未満, N_2O :0.4ppm 未満), NO_x や灰中未燃分も石炭専焼と同等以下に抑制可能であることを示した⁽²⁾。

本報では、4t/h 炉での実機スケール液焚き燃焼試験結果について紹介する。アンモニア燃焼割合は 0.5t/h 炉試験と同一の 55%とした。0.5t/h 炉にて最も良好な燃焼性能が得られた液体アンモニア噴霧ノズルタイプに加え、更なる燃焼性能向上を狙い、CFD (Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学)を用いて複数の噴霧ノズルタイプを考案し、燃焼試験にて性能を評価した。図 3 に NO_x 、灰中未燃分計測結果を示す。ノズル D にて最も良好な性能となり、 NO_x 、灰中未燃分ともに石炭専焼から約 30%低減した。

既報で述べたとおり、液焚きでの NO_x 抑制には、液体アンモニア噴霧の分散促進による早期の気化完了が重要である⁽²⁾。一方、噴霧ノズルと石炭バーナの配置が近接しているため、広角分散化を狙ったノズル A, C などでは、石炭火炎への液体アンモニア噴霧の流れ込みにより石炭着火が阻害され、灰中未燃分が増加する挙動が見られた。 NO_x と灰中未燃分の両立には、噴霧分散の促進と石炭火炎への流れ込み抑制を同時に満足することが重要であると分かった。なお、いずれのノズルにおいても火炉出口での未燃アンモニアや N_2O は計器検出下限未満であった。

また、実機運転を考慮して、部分負荷における液体アンモニアの着火安定性や燃焼性能確認のため、石炭とアンモニア、両バーナの負荷を 100→75→50%と段階的に低減し、燃焼性能への影響を評価した。100%と 50%負荷時の火炎状況を図 4 に示す。50%負荷においても、火炎検出信号や排ガス性状は安定しており、未燃アンモニア及び N_2O は計器検出下限未満であった。 NO_x は各負荷の石炭専焼時よりも低く抑えられ、100%負荷時と同等レベルを維持し、良好な燃焼性能を示した。

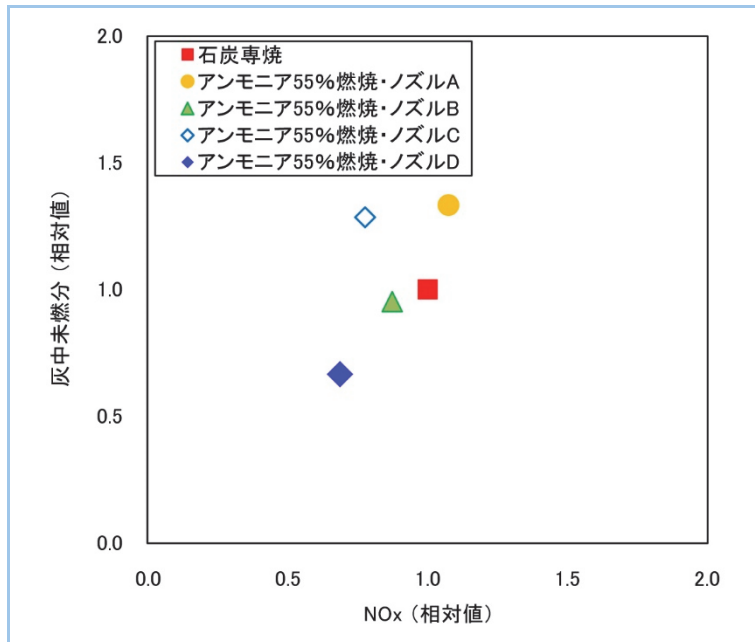


図3 4t/h 炉液焚き燃焼試験での NO_x・灰中未燃分特性

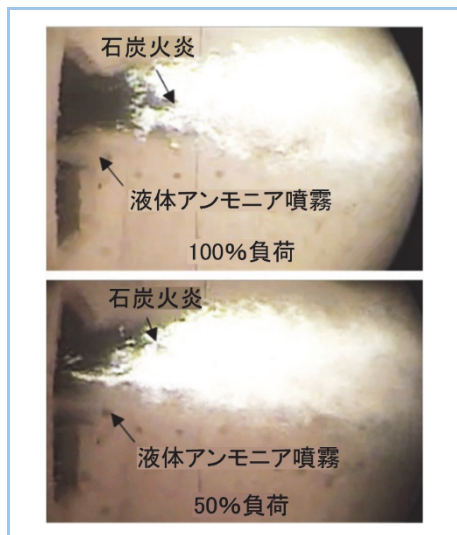


図4 部分負荷運転時の火炎状況

(2) 対向燃焼向けバーナ燃焼試験

既報では、0.5t/h 炉での液焚き、気焚き専焼試験、及び 4t/h 炉での実機スケール液焚き専焼試験において、液焚き、気焚きバーナともにアンモニアの完全燃焼と石炭専焼と同等以下に NO_x を抑制できたことを示した⁽²⁾。

本報では、実機運用を考慮した、4t/h 炉液焚き専焼での部分負荷試験について紹介する。100% 負荷にて NO_x を最も低減できた液体アンモニア噴霧ノズルにて、バーナ負荷を下げていく際の着火性への影響を評価した。図 5 に各負荷の火炎状況を示すとおり、65% 負荷においてもバーナ近傍に火炎形成でき、火炎検出信号や排ガス性状も安定して燃焼させることに成功した。

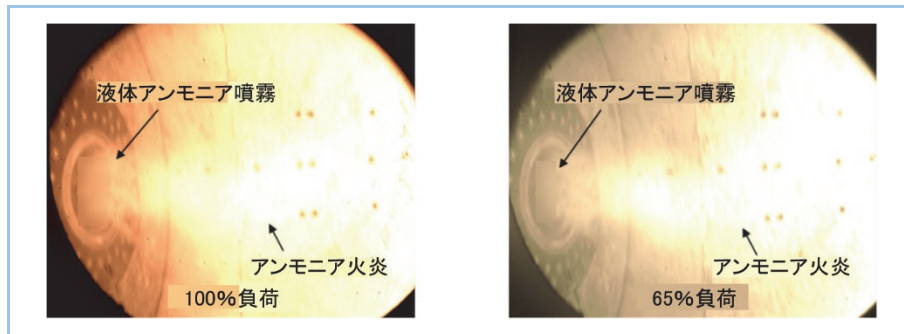


図5 部分負荷時の液体アンモニア専焼火炎状況

(3) アンモニア燃焼による石炭燃焼灰への影響

石炭とアンモニアとの燃焼では、石炭灰中へのアンモニア化合物残留や、燃焼温度低下に伴った灰粒子形状変化による灰の流動性悪化が懸念された。そこで、石炭専焼とアンモニア55%燃焼の燃焼灰サンプルを燃焼試験にて採取し、灰中の各種アンモニア化合物有無検出のため、イオンクロマトグラフ、X線回折法、全有機体炭素測定等の化学分析を実施した。その結果、両サンプルともアンモニア由来の化合物は検出されず、性状に差異は見られなかった。アンモニア化合物はいずれも低融点であり、火炉内の高温環境下では分解し、燃焼灰中へは残留しないものと推定される。

また、電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) により両サンプルの灰粒子形状を観察した (図 6)。石炭専焼、アンモニア燃焼とも球形の粒子が多数存在しており、顕著な違いは見られなかった。灰粒子は一定温度に達すると融解し、球形となるが、石炭とアンモニアは別々のバーナで燃焼させるため、アンモニア燃焼による火炎温度低下の影響を受けにくく、灰粒子形状への影響は小さかったものと推定される。

以上から、アンモニア燃焼による石炭燃焼灰への影響は小さく、問題ないものと考えるが、燃焼試験の燃焼灰サンプルでの評価であるため、最終的には実機にて燃焼灰サンプルを採取し、比較評価を行う必要があると考える。

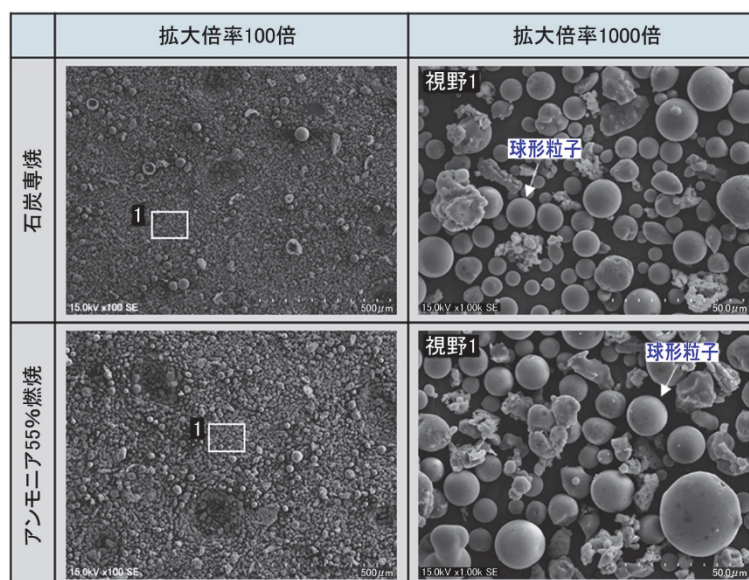


図6 石炭専焼とアンモニア燃焼での石炭燃焼灰の FE-SEM 分析

(4) バーナ候補材の窒化特性評価

アンモニアバーナでは、高濃度アンモニアにより部材に窒化が生じ、材料表面硬度の上昇による靱性低下が懸念された。そこで、運転状態でのバーナ表面のガス組成やメタル温度環境を模擬した窒化曝露試験を行い、バーナ部材の窒化特性を評価した。試験装置の外観を

図 7(a)に示す。

試験では、電気炉内で部材サンプルを所定の温度に保持し、実機の運転環境を模擬したアンモニア混合ガスに一定時間曝露した後、部材サンプルの組織観察を行い、窒化の有無を評価した。供試した材料種はバーナ材として用いる可能性がある高クロム鋳鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、低クロム鋼である。部材サンプルの組織観察結果の一例を図 7(b)に示す。低クロム鋼において表層に全面的な窒化層が形成された。一方、オーステナイト系ステンレス鋼では局所的な窒化層形成にとどまり、高クロム鋳鋼では窒化層は検出されなかった。クロム含有率が高いほど材料表面に生成する不動態皮膜が安定維持されることにより窒化抑制効果が高くなるものとする。

このように、温度や混合ガス組成を種々変化させ、部材の窒化特性データベースを構築した。高濃度のアンモニアと接触する可能性がある部位については、耐窒化性が高い材料を利用する方針である。

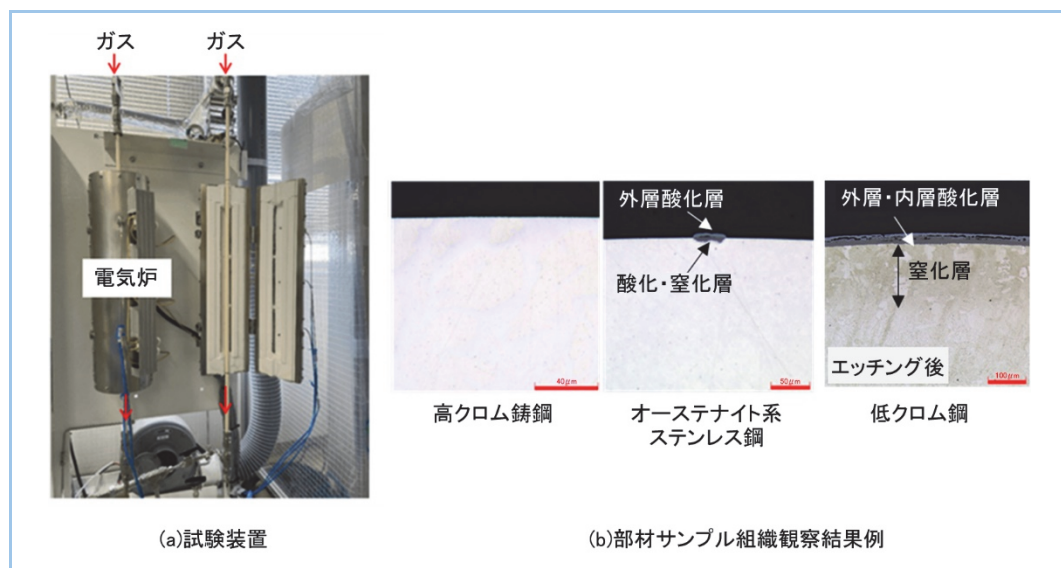


図7 窒化試験装置と部材サンプル組織観察結果の例

4. 燃焼 CFD による実機ボイラ性能評価

既報では、対向燃焼方式の液焚き、気焚きバーナの実機ボイラ適用時の燃焼 CFD を行い、両バーナとも石炭専焼よりも NO_x 、未燃損失ともに同等レベルに抑制でき、実機適用用途を得たことを示した⁽²⁾。

本報では、旋回燃焼方式の液焚き、気焚きバーナについて、実機ボイラ適用時の燃焼 CFD による性能評価結果を紹介する。解析対象は旋回燃焼方式の既設事業用大容量石炭焚ボイラとした。石炭バーナが 6 段、石炭バーナの上に起動用油バーナが 3 段配置されているうち、液焚き、気焚きともに各起動用油バーナへ開発バーナを適用した状況を模擬した。アンモニア燃焼割合はいずれも 55%とした。図 8 に炉内のガス温度、 NO_x 濃度、アンモニア濃度分布を示す。表示断面は、ボイラ缶前側バーナの縦中心断面である。液焚き、気焚きとも、火炉出口での未燃アンモニアは確認されず、アンモニアは完全燃焼した。 NO_x 、アンモニア濃度分布から、アンモニアはバーナ部で燃焼完結し、バーナ部では NO_x 生成するものの、追加空気投入部までの還元雰囲気にて、ほぼ還元されることが分かる。図 9 に示すとおり、火炉出口での NO_x は石炭専焼よりも低減し、未燃損失は同等レベルであった。以上から、旋回燃焼方式の液焚き、気焚きバーナについても、燃焼試験にて所定性能を満足するとともに、実機燃焼 CFD において良好な燃焼性能を示し、実機ボイラへの適用用途を得た。

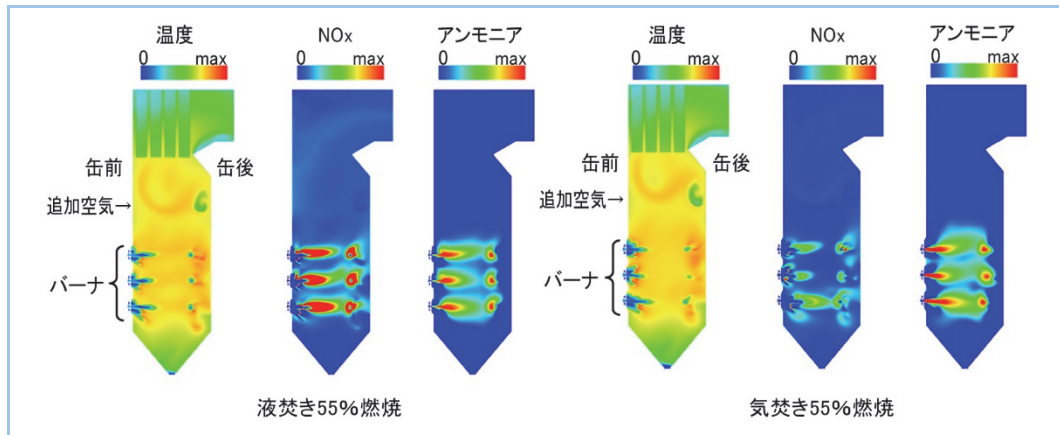


図8 旋回燃焼方式/実機ボイラ燃焼 CFD 解析結果

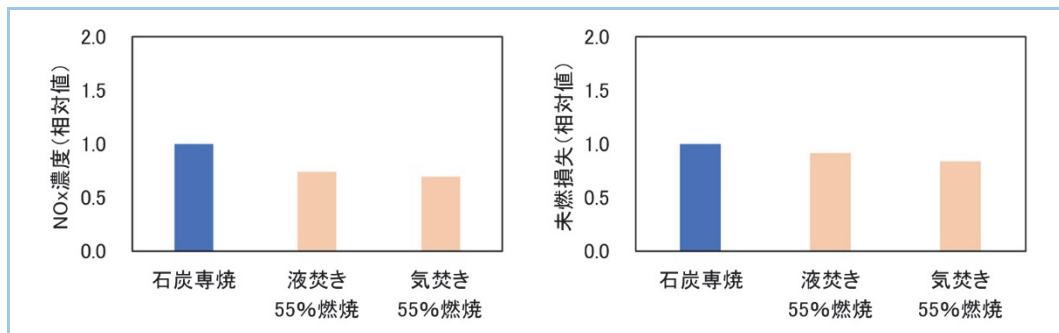


図9 旋回燃焼方式/実機ボイラアンモニア 55%燃焼の燃焼性能

5. ボイラプラント改造計画

5.1 アンモニア燃料転換時のボイラプラント改造計画

既設石炭焚ボイラにおいて、50%以上のアンモニア燃料転換が可能となる改造工事を実現するために、対向燃焼方式及び旋回燃焼方式それぞれについて、バーナ基本計画、ボイラ改造計画、ボイラ性能、運転制御、補機改造(環境設備含む)計画、安全対策などの検討を実施した。燃料アンモニアの燃焼方式として、気焚きと液焚きの異なる方式があるが、燃料費を含む運用コストで有利となる気焚き方式をボイラプラントの改造計画では採用した。

既設ボイラへのアンモニア燃料転換改造概要を図10に示す。改造方針としては、既存設備の有効利用、改造コスト抑制、ユニット停止期間最小化を図り、炭種や大気温度等により限定的に運転に支障が出る場合には運転制限を設けることとした。それにより、ボイラ本体耐圧部、大型補機、排煙処理設備の大規模改造は回避することができた。ボイラ設備設計の要項は以下のとおりである。

- ・ボイラ出口 NOx 値は、石炭専焼時と同等以下を目標値とする。
- ・追設するアンモニア燃焼設備は、対象発電設備での 50%アンモニア燃料転換時においても定格負荷を達成できる容量にて計画する。
- ・アンモニア燃料転換改造後も、安定的な電力供給のため石炭専焼運転可能な計画とする。
- ・既設設備を最大限に流用し、改造・追設範囲は最小限に抑える。
- ・プラント起動/停止操作は、既設同様に補助燃料を用いて実施し、アンモニア燃焼運転は、石炭専焼による通常運転中に切替え/復帰するものとする。
- ・燃料アンモニアガス配管には漏洩防止策を施すことに加え、ガス漏洩時は速やかに検知できる設備とし、漏洩ガスを滞留させず除害のための措置を講じる。
- ・燃料供給設備にて燃料アンモニアを加熱するために、補助蒸気をボイラより供給する。

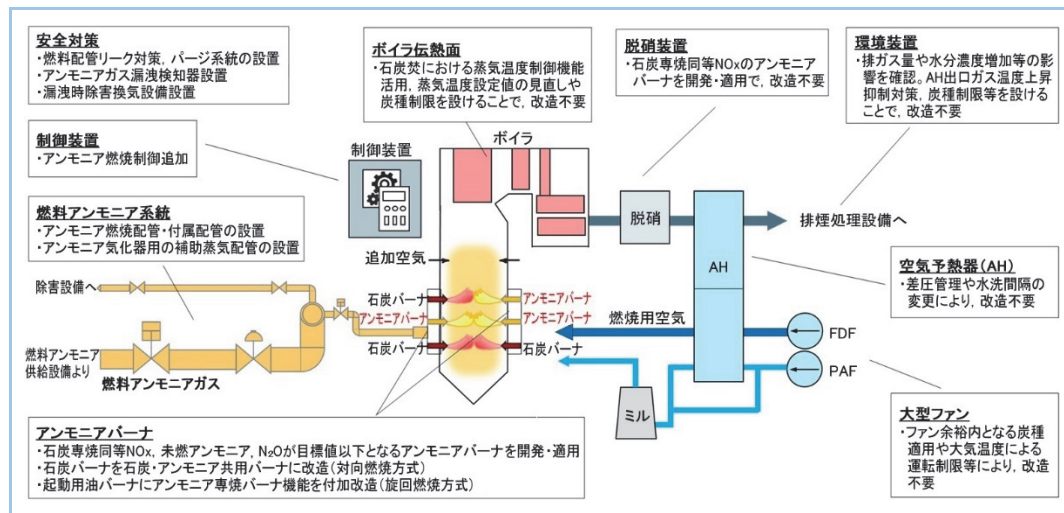


図 10 アンモニア燃料転換ボイラ改造概要

5.2 アンモニア燃料配管と安全対策

燃料アンモニア供給設備より供給される燃料アンモニアは、流量計、遮断弁、流量調節弁を経て、各アンモニアバーナに供給される。プラント起動・停止時に燃料アンモニア配管内を窒素・空気で置換するための系統を設け、毒性のあるアンモニアは、燃料アンモニア供給設備側に設置される除害設備にページする計画とした。燃料アンモニア供給設備とボイラ設備との取合い部や、バーナ入口部には、確実な系統隔離を可能にするため、ダブルブロック・アンド・ブリード方式を採用した。

追設する燃料アンモニア配管のルートに関しては、既設配管配置図にて追設配管計画を実施し、現地調査を通じて配管計画の妥当性(主な干渉物の有無とアクセス性)を確認した。また、弁や計器等の操作性、アクセス性、メンテナンス性に留意しながら、配管支持が可能で、配管荷重の追加が許容できるボイラ鉄骨支持梁を考慮し、配管ルートを計画した。図 11 に燃料アンモニア供給系統の配管配置図を示す。

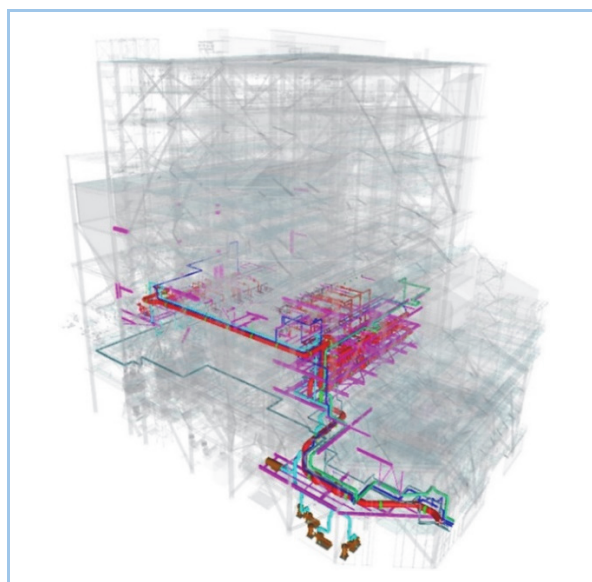


図 11 燃料アンモニア供給系統配管配置図

対向燃焼方式のケースを示す。追設配管を着色にて示す。

今回、大量のアンモニアを燃料として取り扱う設備を追設するにあたり、近隣住民及び発電所構内従事者に対する安全性を確保することを目的に、安全設計に関する基本方針を定めた。漏洩防止対策及び火災・爆発防止対策を重点とし、追設するアンモニア燃焼設備に対して必要な設備設計を実施した。

アンモニア漏洩に関する保安防災設計の考え方として、まず漏洩を防ぐための“漏洩防止対策”を施し、それに加えて万一漏洩が発生した場合の“漏洩拡大防止対策”，漏洩発生後の被害を最小限とする“被害防止対策”といった段階ごとの安全対策を行った。これにより、多重防護の思想に基づく安全対策を策定した。各対策の概要は以下のとおりである。

・漏洩防止対策

アンモニアは毒性ガスであるため、漏洩させないよう適切な材料選定、腐食対策、耐震設計、配管接続部設計を行った。配管及び継手は、溶接による接合を基本とし、溶接が適当でない場合のみ、保安上必要な強度を有するフランジを適用した。

・漏洩拡大防止対策

万一のアンモニア漏洩発生時には早期に漏洩を検知し、漏洩拡大を防止するための対策を施す必要がある。早期検知のためのガス検知器配置、漏洩可能性がある部位への障壁設置、異常時の燃料遮断機能の設置による拡散防止を図った。漏洩可能性のある部位周辺の障壁には換気設備を設けることで、後述の除害のための措置を兼ねており、またその内側にガス検知器を設置し、より早期の漏洩検知を図ることとした。

・被害防止対策

アンモニアは可燃性ガスであるため、火災・爆発の防止を目的として防爆対策及び静電気対策を講じた。また、アンモニアは毒性ガスのため、人体への被害を防ぐために安全かつ迅速に除害可能な設備を設ける必要がある。このため、漏洩可能性がある部位に設けた障壁に換気ダクトを接続し、押込通風機の吸込口へ排気することで、漏洩したガスはボイラにて燃焼処理を行う計画とした。除害換気設備の概要を図 12 に示す。

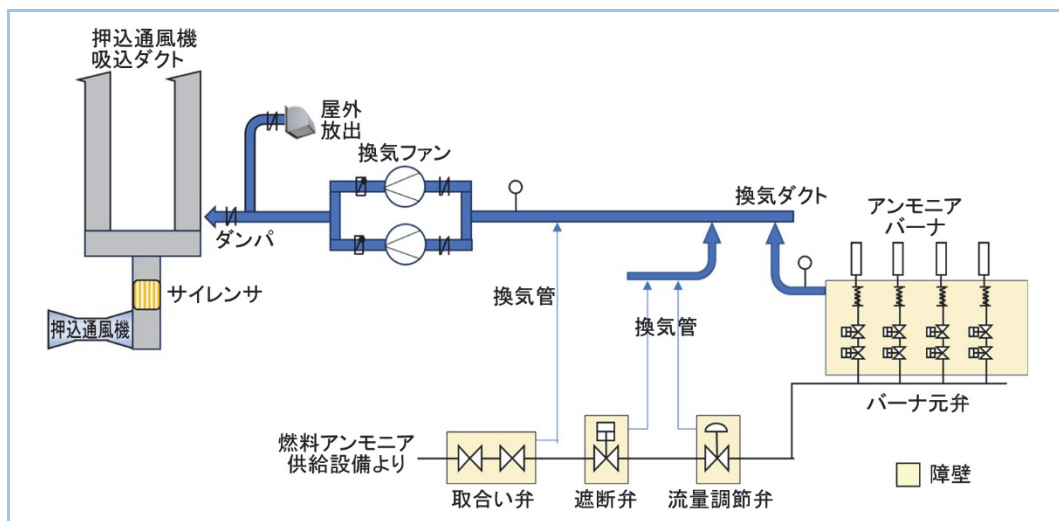


図 12 除害換気設備の概要

6. まとめ

石炭焚ボイラのアンモニア燃料転換に向けて、アンモニア専焼バーナの開発を行い、燃焼試験で取得したデータと実機での燃焼 CFD による性能評価により、実機適用の目途を得たことを示した。また、50%以上のアンモニア燃料転換時のボイラプラント改造計画の概要と、アンモニアを燃料として取り扱う際の安全対策を示した。この燃料転換技術は、アンモニア初期導入でニーズのある 20%燃料転換においても、改造するバーナ段数を調整することで適用が可能である。

今後、国内外の様々なお客様がカーボンニュートラルに向けて燃料アンモニアを利用できるよう、事業用・産業用ボイラにおける幅広いニーズに対応した取組みを鋭意進める所存である。

本開発は NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の“JPNP21020 グリーンイノベーション基金事業/燃料アンモニアサプライチェーンの構築/アンモニアの発電利

用における高混焼化・専焼化/石炭ボイラにおけるアンモニア高混焼技術(専焼技術含む)の開発・実証/アンモニア専焼バーナを活用した火力発電所における高混焼実機実証”にて実施したものである⁽³⁾。

参考文献

- (1) 山下登敏ほか, カーボンニュートラル社会に向けた石炭焚ボイラにおけるアンモニア混焼技術の開発, 三菱重工技報 Vol.59 No.4 (2022)
- (2) 山下登敏ほか, カーボンニュートラルの実現に向けたボイラ用アンモニア専焼バーナの開発, 三菱重工技報 Vol.61 No.3 (2024)
- (3) 三菱重工株式会社プレスリリース, 石炭ボイラにおけるアンモニア高混焼技術の開発・実証について (2022)
<https://www.mhi.com/jp/news/22010702.html>