

石炭火力発電における微粉炭・アンモニア混合燃焼技術の開発

Development of Co-Firing Method of Pulverized Coal and Ammonia in Coal Fired Plant

長谷 玄一郎	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 技術センター基本設計部
石井 大樹	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 技術センター燃焼技術部
伊藤 隆政	技術開発本部基盤技術センター熱流体グループ 主査 博士(工学)
大野 恵美	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 技術センター燃焼技術部 主幹
大熊 喜朋	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 技術センター基本設計部 主幹

温室効果ガスの排出削減のため、株式会社 IHI は「アンモニアを燃料としたカーボンフリーエネルギーネットワークの構築」の検討を加速させ、幾つかのアイテムを研究開発している。本稿では利用側技術の一つである石炭火力発電における微粉炭・アンモニア混合燃焼技術の開発について紹介する。アンモニアを燃料として活用する際に幾つかの懸念が挙げられる。そのなかで IHI は自社で保有している大容量燃焼試験設備を活用して燃焼性能を評価し、また、フィージビリティスタディをとおして課題抽出および対応策を検討することで、アンモニア混合燃焼を実現するための課題を解決してきた。IHI が目指すアンモニア社会に向けてこれまで開発してきた技術を紹介していく。

IHI is accelerating studies such as “Building carbon-free energy networks using ammonia as fuel” in the mission of reducing greenhouse gas emissions. Several items have been researched and developed to construct this system. This paper introduces the development of the co-firing method of pulverized coal and ammonia in a coal fired plant. We have faced numerous challenges when using ammonia as a fuel. Among them, IHI uses its own large-capacity combustion test facility to evaluate the combustion performance, and through the feasibility study, identify issues and examine countermeasures to realize ammonia co-firing. This paper presents technologies that have been developed for the ammonia society that IHI is aiming for.

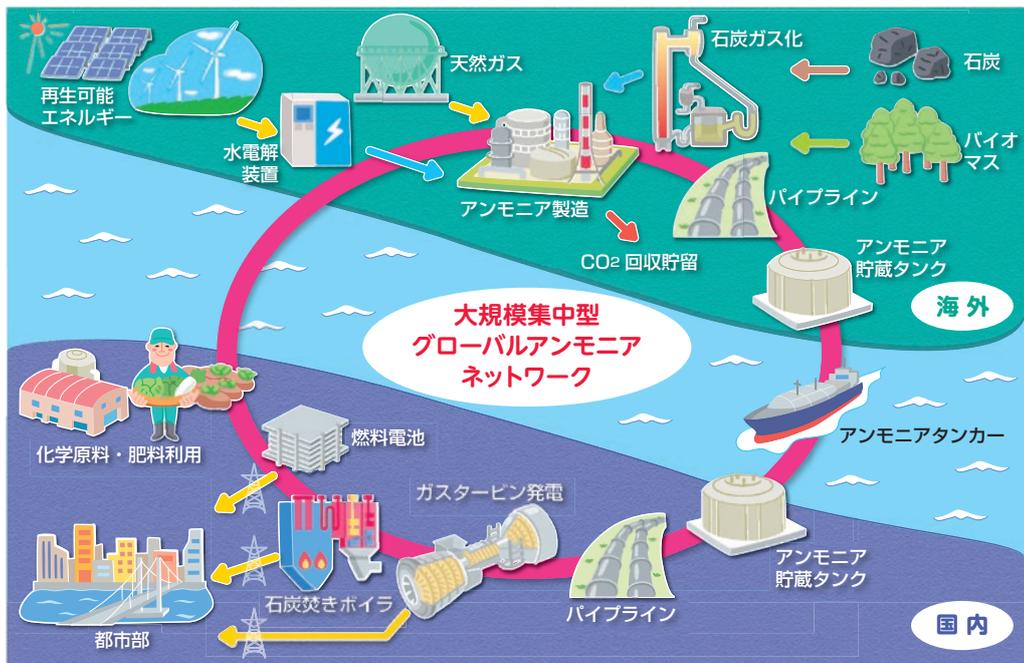
1. 緒 言

世界的に地球温暖化への取組みが加速しているなかで、パリ協定を踏まえた温室効果ガスの排出削減目標達成のためには、水素エネルギーの普及が重要な役割を果たすと考えられている。水素エネルギーは 2030 年ごろに商用規模のサプライチェーンを構築し、年間 30 万 t 程度の水素を調達するとともに、30 円/Nm³ 程度の水素コストの実現を目指すため、燃料電池自動車を中心とした研究・開発が活発に行われている⁽¹⁾。それに伴い、水素を輸送・貯蔵するためのキャリアも注目されており、そのなかで IHI はアンモニアに着目し種々開発を進めている。肥料や化学材料の原料として広く世の中に流通しているアンモニアは、① 単位体積当たりの水素含有量が多い、② 既存の製造・輸送・貯蔵インフラを活用できる、③ 水素に再変換することなく直接燃焼が可能である、などの特長から、早期に社会実装が可能と考えられるためである。IHI では、**第 1 図**に示すアンモニアのサプライチェーン構築を目指し、アンモニアをガスタービン、微粉炭^だ焚きボイラ、固体酸化物型燃料電池で利用するための技術開発を実施してい

る⁽²⁾。

本稿では、そのなかでも石炭火力発電から排出される CO₂ を削減するためのアンモニアと微粉炭の混合燃焼（以下、混焼）技術の開発について報告する。

石炭火力発電の燃料の一部を石炭からアンモニアへの代替は、単に CO₂ 削減を実現できるだけでなく、火炉内の灰付着や灰処理量、硫化腐食の緩和なども期待されている。しかし、対照的に幾つかの懸念事項が存在することも事実である。燃料の一部が石炭からアンモニアに置き換わることによるボイラ取熱量の変化や、アンモニアの燃焼に伴う NO_x 発生などボイラの性能面に関する懸念が挙げられる。また、従来石炭火力発電所においては NO_x の還元剤として使用されているアンモニアであるが、本研究では燃料として扱うため、大量のアンモニアガスを使用することになる。そのため従来の還元剤としての設備だけでは不足するため、新たに大規模なアンモニア供給設備などが必要となる。性能面や設備改造・増設などの懸念事項に対して将来的にはこれらの事象を検証するために長期的な連続運転であったり、実機による運転評価を実施したりすることが必要不可欠となる。



第 1 図 IHI が目指すカーボンフリーエネルギーサプライチェーン
 Fig. 1 Carbon-free energy supply chain targeted by IHI

本研究は、アンモニア混焼バーナを開発し燃焼試験による評価をすることで、石炭専焼と同程度に NO_x 生成を抑制できるアンモニア混焼方法を検証する。また、将来の実機検証に向けてボイラのフィージビリティスタディを実施し実証機適用時の改造内容の概要を明らかにすることを目的とする。

2. 実施内容

2.1 燃焼試験

アンモニアは石炭に比べて多量の窒素分が含まれるため、大型発電用ボイラに燃料として投入した場合、従来の石炭専焼と比べて排ガス中の NO_x 濃度が上昇する懸念がある。

2.1 節ではアンモニア混焼率 20% (低位発熱量ベース) の条件下で、安定した燃焼と NO_x 濃度 200 ppm 以下 (酸素濃度 6% 換算) を両立する微粉炭・アンモニア混焼技術の開発を主目的として、IHI 相生事業所 D&D パークの 10 MWth 級の燃焼試験炉を使用して試験を実施した。

2.1.1 試験装置

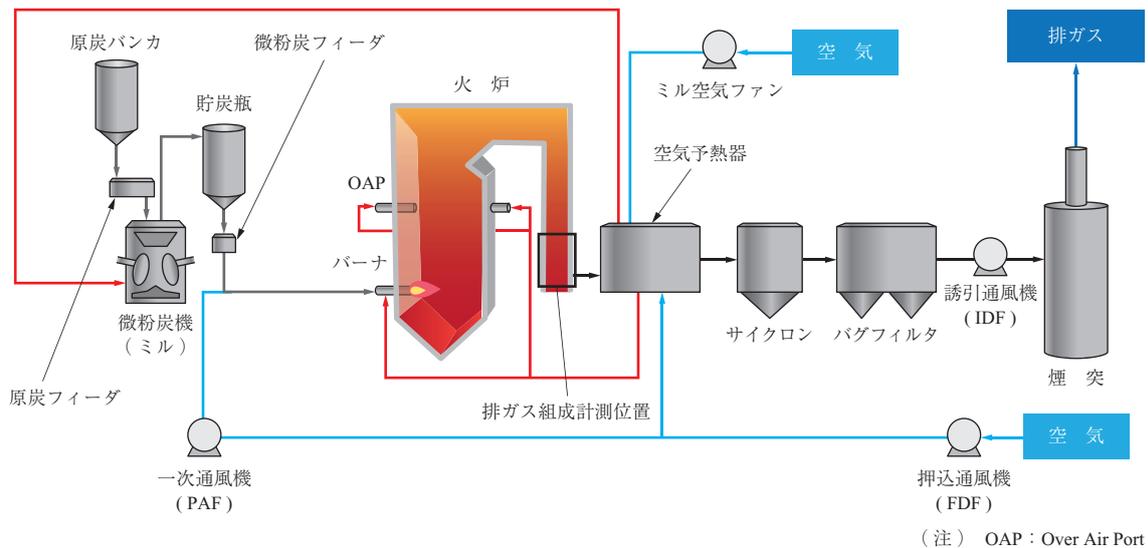
微粉炭・アンモニア混焼試験で使用した燃焼試験炉の仕様および主系統図を第 1 表、第 2 図に示す⁽³⁾。燃焼試験炉は火炉前面に 1 本バーナが設置されている。押込通風機 (Forced Draft Fan : FDF) から供給された空気は、予熱器で排ガスと熱交換しバーナへ燃焼空気として搬送される。燃焼空気のうちの一部はバーナ上段に設置された

第 1 表 燃焼試験炉の仕様
 Table 1 Specification of test furnace

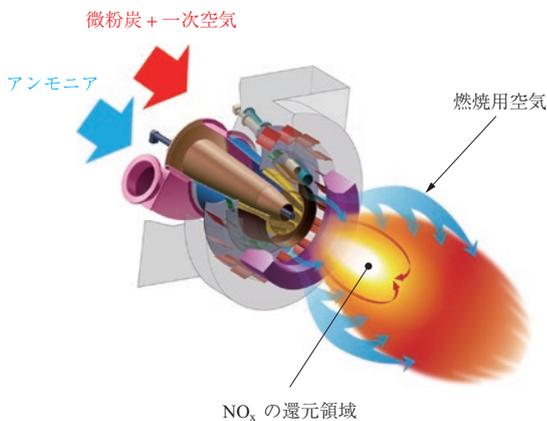
項目	仕様
火炉	前面燃焼水冷炉 (幅 3×奥行 4.5×高さ 7m)
バーナ	IHI-DF (Dual Flow) バーナ, 単一

OAP (Over Air Port) と呼ばれるポートへ供給される。ミル空気ファンから供給された空気は予熱器で排ガスと熱交換し微粉炭へ供給され、石炭の乾燥および粉碎された石炭を搬送するために用いられる。粉碎された石炭は貯炭瓶に貯蔵される。貯蔵された石炭は所定の量を微粉炭フィーダによって貯炭瓶から排出され一次通風機 (Primary Air Fan : PAF) によって搬送用空気とともにバーナへ供給される。誘引通風機 (Induced Draft Fan : IDF) によって火炉に供給される空気を引き込むことで火炉内は負圧になるように調整される。排ガスの組成はガス分析計 (株式会社堀場製作所製 PG-250A) にて行っており、排ガスは第 2 図に示す位置にてサンプリングしている。また、煙突入口にはレーザ計 (NEO Monitors AS 製 LaserGas™ version II) を設置しており、赤外線単線吸収分光法により排ガス中のアンモニア濃度を連続監視した。これは、燃料として投入したアンモニアが燃え残った際に、多量のアンモニアが大気へ排気されないことを確認するためである。

第 3 図にバーナの概略図を示す⁽³⁾。バーナは軸対称の構造で、中心から微粉炭流路、エアレジスタ、ウインドボックスの順に配されている。微粉炭は搬送用空気とともに



第2図 燃焼試験炉の主系統図
Fig. 2 Main diagram of test furnace



第3図 大容量燃焼試験で用いたバーナの拡大図
Fig. 3 Enlarged view of burner used in co-firing experiment

に微粉炭流路を通り火炉へ供給される。燃焼用空気はウインドボックスから火炉へ供給される。燃焼用空気の流路に配されたエアレジスタは軸対称に複数の可動ペーンを有した構造であり、ペーンの角度を調節することで燃焼用空気の旋回力を調整することができる。燃焼用空気には旋回を与えることで炉内ガスの循環流を形成する。循環流により高温燃焼ガスと燃料が急速に混合することで燃料中の揮発分とN分の放出を促進、安定した火炎を形成するとともに還元性雰囲気中でのNO_xの低減を図る。

アンモニアはアンモニア供給設備によりバーナへ搬送される。アンモニア供給設備は0.5 t ボンベを4台設置することができ、2台の温水式蒸発器を有している。アンモニアは蒸発器を経て気化し、質量流量を制御しながらバーナへ搬送される。アンモニアは最大で0.38 t/hの流量で連続供給が可能である。本研究では、アンモニアを微粉炭

バーナの中心から供給した。これは商用機に適用する際に、アンモニア混焼に必要な改造箇所を可能な限り低減することを目的としている。

2.1.2 試験条件

本稿では、以下の4項目について評価した試験結果を報告する。

- ① アンモニア混焼時の未燃アンモニアの有無、火炎の安定性の確認
- ② 二段燃焼率が排ガス組成へ与える影響
- ③ 投入熱量が排ガス組成へ与える影響
- ④ 石炭の燃料比が排ガス組成へ与える影響

それぞれの試験条件を第2表に示す。この試験ではアンモニアの混焼率は常に低位発熱量ベースで20%とした。試験で使用した石炭の燃料比(固定炭素と揮発分の質量比(-))は1.16~1.70までの瀝青炭である。

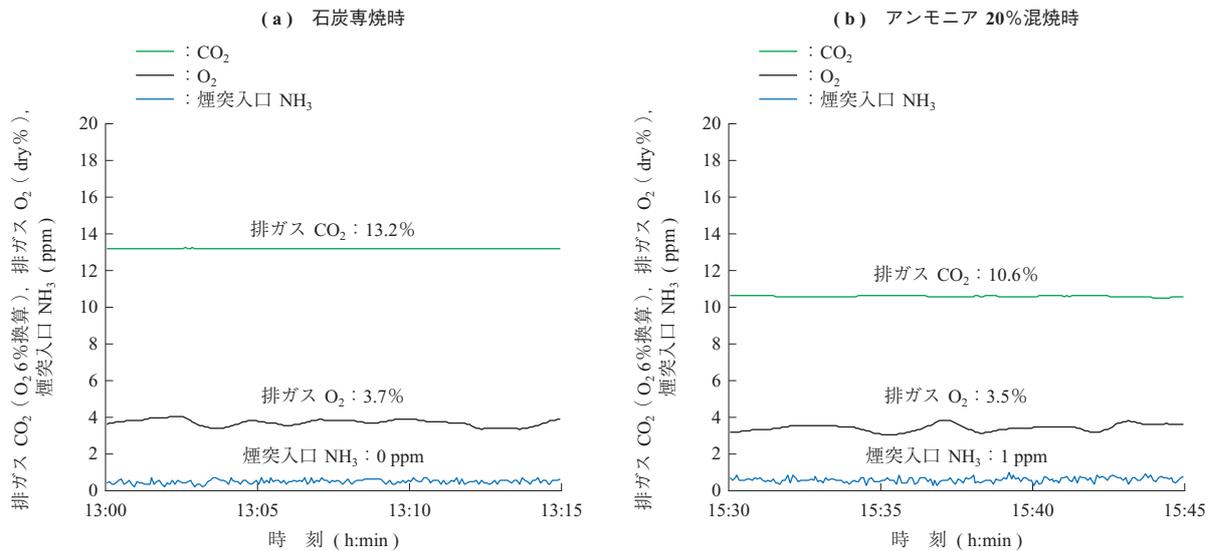
2.1.3 試験結果

2.1.3.1 アンモニア混焼時の未燃アンモニアの有無、火炎の安定性の確認

第4図に石炭専焼時およびアンモニア20%混焼時の排ガス組成の計測値の経時変化について示す⁽⁴⁾。アンモニア混焼時は、石炭専焼時と比較して石炭燃焼量が20%減

第2表 大容量燃焼試験の条件
Table 2 Conditions of co-firing experiment

項目	単位	ベース条件	低負荷条件
投入熱量	MW	10	6.0~8.6
空気比	-	1.2	1.1~1.7
二段燃焼率	-	0.3	0.2~0.4



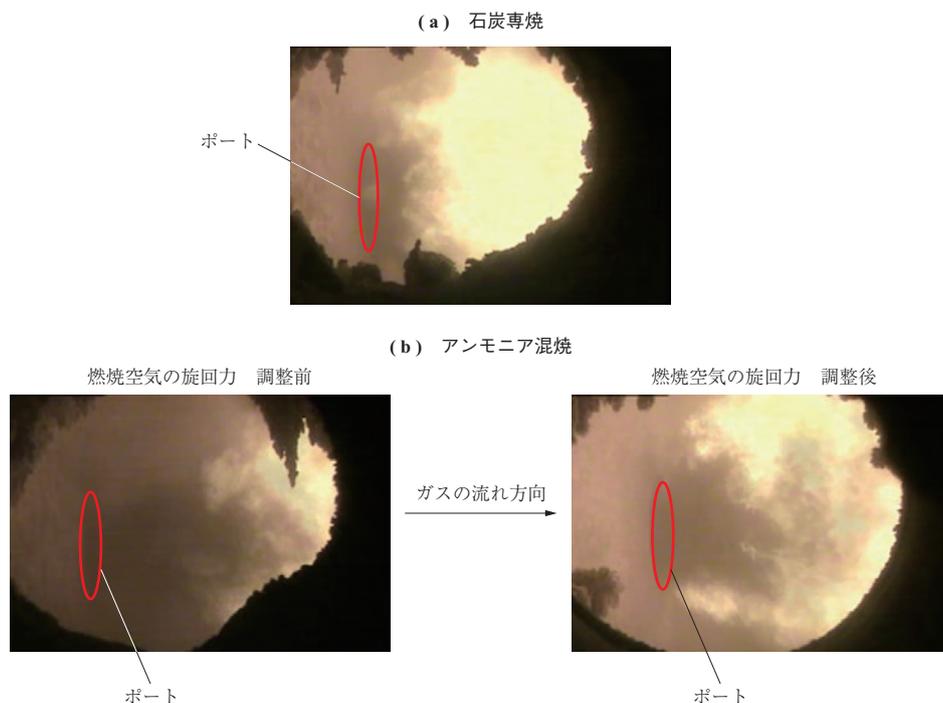
第 4 図 排ガス組成の経時変化量
Fig. 4 Time history of flue gas composition

少するため、排ガス CO₂ 濃度も約 20%減少することが確認された。また、煙突入口におけるアンモニア濃度は 1 ppm であるため、火炉へ投入したアンモニアは、ほぼ全量火炉内で消費されていると考えられる。

第 5 図に火炎の様子を示す⁽⁴⁾。アンモニア混焼時、燃焼空気の旋回力が同程度だと、石炭専焼時と比べて火炎の着火位置がバーナポートから離れることが確認された。これは、難燃性のアンモニアがバーナの中心から供給されているためと考えられる。なお、燃焼空気の旋回力を調整す

ることで、アンモニア混焼時においても火炎の着火位置を石炭専焼時と同程度に位置させることができる。本稿での以降の試験結果については、火炎の着火位置を石炭専焼時と同程度に調整したものを報告する。

上述のとおり、アンモニア混焼時において排ガス組成が時間的に安定していること、未燃のアンモニアがないこと、石炭専焼時と同様の火炎形状を形成できることから、微粉炭バーナ中心からアンモニアを供給する構造のバーナを用いることで、アンモニア混焼は可能であると判断した。



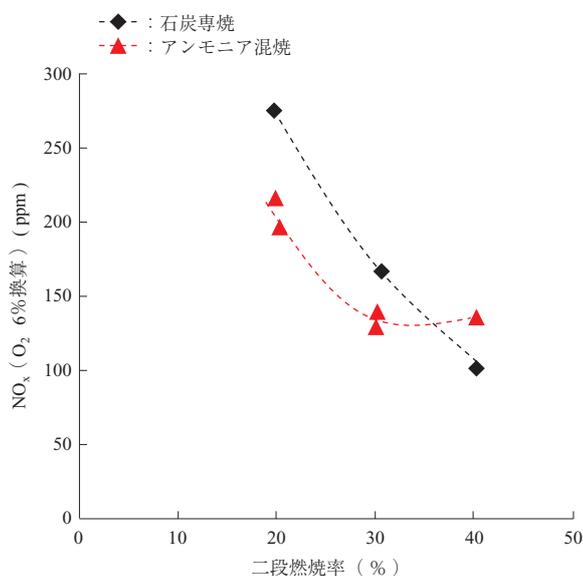
第 5 図 火炎の様子の一例
Fig. 5 Flame appearance

2.1.3.2 二段燃焼率が排ガス組成へ与える影響

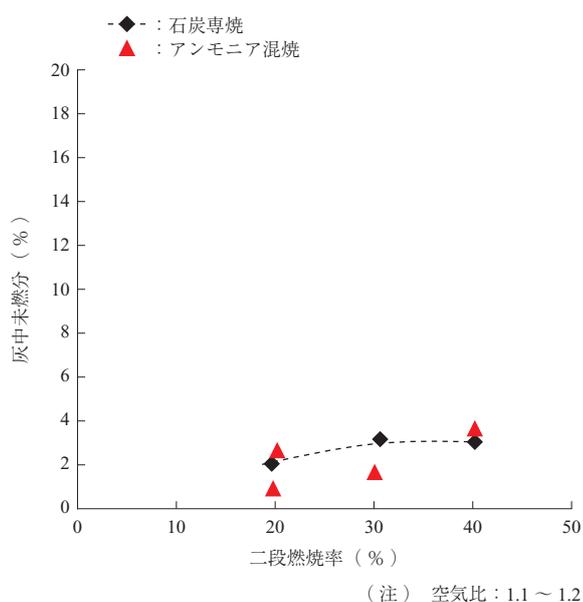
二段燃焼率は、排ガス NO_x を制御するための重要なパラメータであり、火炉へ投入する全空気量に対する二段燃焼用の空気量の質量割合で定義される。ここでは、投入熱量 10 MW、空気比 1.1 ~ 1.2 の条件で、二段燃焼率をパラメータとしアンモニア混焼試験を行い、二段燃焼率が排ガス組成へ与える影響を評価した結果を報告する。

第 6 図に二段燃焼率と排ガス NO_x の関係、第 7 図に二段燃焼率と灰中未燃分の関係を示す⁽⁴⁾。

石炭専焼の場合、二段燃焼率が 20% から 40% に増加すると NO_x は単調に減少していく。一方、アンモニア混焼



第 6 図 二段燃焼率と排ガス NO_x の関係
Fig. 6 Relationship between two-stage ratio and NO_x



第 7 図 二段燃焼率と灰中未燃分の関係
Fig. 7 Relationship between two-stage ratio and unburned carbon

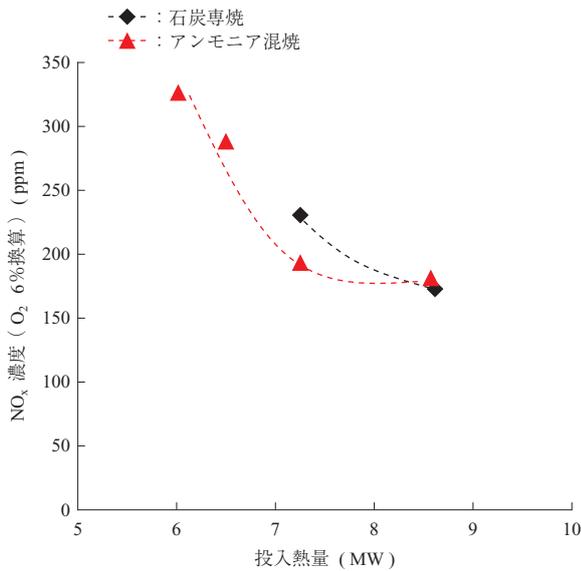
時は二段燃焼率 30% 程度で極小値を取った。石炭専焼においても二段燃焼率の増加に伴い NO_x は減少するが、ある二段燃焼率を超えると、NO_x は増加する傾向を示すことが報告されている⁽⁵⁾。これは二段燃焼率を高くすると空気比が低いバーナレベルでは NO_x 生成の抑制が行われるが、未燃分が残存しそれが二段燃焼位置で燃焼することで燃料中の窒素分が酸化し NO_x 生成が起こるためである。本試験の二段燃焼率の範囲において、その傾向を示すのはアンモニア混焼の場合だけである。バーナレベルで燃焼するのは石炭の揮発分および NH₃ であると考えられるが、アンモニア混焼の場合、石炭専焼の場合と比較してその量が多い。このことからアンモニア混焼の場合、高い二段燃焼率において石炭の揮発分および NH₃ に対するバーナレベルでの空気比が低く、未燃分が比較的多く残存し、それが二段燃焼位置で燃焼することにより NO_x の増加となったと考える。

本試験の二段燃焼率の範囲においては、灰中未燃分はアンモニア混焼時と石炭専焼時とで同程度の値を示しており、二段燃焼率を適切に設定すれば NO_x を石炭専焼時より上回らないようにアンモニア混焼を実施することが可能であることが示唆される。

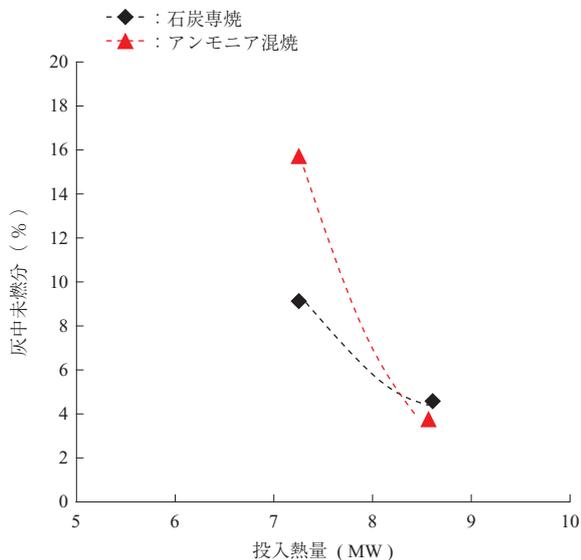
2.1.3.3 投入熱量が排ガス組成へ与える影響

アンモニア混焼技術の実機への適用を見据えると、定格負荷以外でもアンモニア混焼可能であることが望ましい。しかしながら、低負荷帯では燃料の供給量の減少に伴い火炉内の温度が低下し、アンモニアの燃焼を維持できず未燃のアンモニアが生じる懸念がある。本項目では、低負荷帯においてもアンモニア混焼時の排ガス組成が石炭専焼時と同等かを確認するため、混焼率は 20% で一定として低負荷において微粉炭・アンモニア混焼を実施し、その際の排ガス組成を評価した。第 8 図、第 9 図に投入熱量と NO_x の関係、灰中未燃分との関係をそれぞれ示す⁽⁶⁾。

第 8 図から、石炭専焼でも 20% アンモニア混焼でも投入熱量の減少に伴い NO_x は増加するが、アンモニア混焼でのその増加傾向は石炭専焼と同程度であることが分かる。このことから、低負荷帯においてもアンモニア混焼時の NO_x は石炭専焼と同程度であることが示唆される。一方で第 9 図から、投入熱量 7.3 MW におけるアンモニア混焼時の灰中未燃分の値は、石炭専焼時の 2 倍程度であることが分かる。これは、投入熱量が低い条件ではアンモニア流速が低下してアンモニアの直進方向の運動量が減少し、アンモニアと燃焼用空気中の酸素と反応しやすくなる



第 8 図 投入熱量と排ガス NO_x 濃度の関係
Fig. 8 Relationship between heat input and NO_x concentration



第 9 図 投入熱量と灰中未燃分の関係
Fig. 9 Relationship between heat input and unburned carbon

一方で、微粉炭は反応しづらい状況が形成されたことが原因と考えられる。この原因を特定するためにさらなるデータ拡充を図り、再現性の確認を行う必要がある。

2.1.3.4 石炭の燃料比が排ガス組成へ与える影響

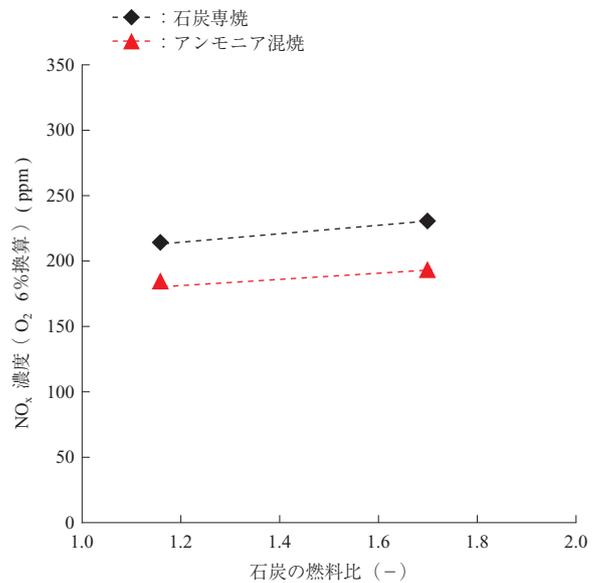
商用機においては、瀝青炭のほかに亜瀝青炭を燃料として利用することがある。その条件を想定し、燃料比の低い石炭との混焼についてもアンモニア混焼時に排ガス組成が石炭専焼時と同等であるか評価するために、アンモニア混焼において石炭の燃料比が排ガス組成に与える影響を評価した。使用した石炭は第 3 表に示す燃料比 1.16 または 1.70 のものである。第 10 図に排ガス NO_x の計測結果を示す⁽⁶⁾。なお、本試験は設備の都合上、投入熱量を

第 3 表 燃料の性状

Table 3 Fuel properties

項目	単位	石炭 A	石炭 B	NH ₃	
低位発熱量	MJ/kg	29.0	29.1	18.5	
工業分析	水分	wt%	2.2	2.0	-
	固定炭素	wt%	56.2	48.1	
	揮発分	wt%	33.0	41.6	
	灰分	wt%	10.8	10.3	
	燃料比	-	1.70	1.16	
元素分析	炭素	wt%	71.1	69.7	-
	水素	wt%	4.6	5.3	
	窒素	wt%	1.4	1.1	
	酸素	wt%	11.7	13.2	
	全硫黄	wt%	0.4	0.5	

(注) 水分のみ気乾ベース、他項目は無水ベース



第 10 図 燃料比と排ガス NO_x 濃度の関係
Fig. 10 Relationship between fuel ratio and NO_x concentration

7 MW として実施した。

第 10 図から、石炭専焼、アンモニア混焼とも燃料比が増加すると NO_x は僅かに増加する傾向があることが分かる。また、いずれの燃料比においても、アンモニア混焼時の NO_x は石炭専焼時を上回らない。このことから、アンモニア混焼時の排ガス NO_x に対する石炭の燃料比の影響は小さいことが示唆される。これは、20%アンモニア混焼の場合、投入する燃料（石炭およびアンモニア）に含まれる窒素量の 9 割以上がアンモニア由来であり、燃料比が 1.16 ~ 1.70 の範囲では投入窒素量の絶対値に大きな違いがなく、石炭の燃料比の影響が小さくなっているためと考えられる。

この結果から、亜瀝青炭のように燃料比が小さい石炭との混焼においても、アンモニア混焼は適用可能であることが示唆される。

2.2 大型発電用石炭焚きボイラを対象としたフィージビリティスタディ

2.2.1 目的

2.2節では、既設大型発電用石炭焚きボイラにてアンモニア混焼した際のフィージビリティスタディを実施し、ボイラ性能の評価を行った。石炭専焼用の設備についてアンモニア混焼を実施した際の各種性能データを反映し評価を行い、そのままの設備を流用可能か、または追設、改造の必要性があるのかなど、アンモニア混焼時の問題点およびそれに対する対応案について検証する。

2.2.2 ボイラフィージビリティスタディの主要条件

本研究は、1 000 MW 級の既設大型発電用石炭焚きボイラを対象に検討を実施した。検討条件の詳細については第 4 表に示す⁽³⁾。本研究は主燃料である石炭に加えて、アンモニアをボイラ入熱の 20%混焼させることで検討する。またボイラは、長時間運転していく過程でその性能に経年変化を伴うが、本件では新設時の性能を想定した。負荷としては燃焼空気量や排ガス量などが最大となる最大連続蒸発量 (Maximum Continuous Rating : MCR) の条件を採用した。そしてアンモニアの投入方法としては、プラント全体で 20%混焼を達成することとして、バーナ全段にアンモニア 20%を投入することを前提とする。

2.2.3 ボイラフィージビリティスタディ検討内容の詳細

本項では主に次の三つについて評価を行った。

① ボイラ効率およびマテリアルバランスの評価

石炭とアンモニアの混合燃料性状を用いて燃焼計算を実施し燃料消費量や空気、ガスのバランスを検討する。

② ボイラシステムの改造内容の検討

燃焼計算で算出された空気およびガス量を用いて補機を含めたボイラ機器の容量を検討する。

③ アンモニアの供給システムの検討

アンモニアガスの投入位置や系統内に設置する機

第 4 表 発電量 1 000 MW ボイラを対象としたフィージビリティスタディの主要条件

Table 4 Main conditions of Feasibility Study for 1 000 MW boiler

項目	内容
対象プラント	1 000 MW 級発電プラント
アンモニア混焼率	高位発熱量ベースで 20%
基本とするボイラ性能	新設時を想定
検討炭種	新設時の性能確認炭を想定
検討負荷	MCR 負荷条件をベースに評価
バーナ単体の混焼率	各バーナで 20%

器およびアンモニアガスのパージ手法について検討する。

2.2.3.1 ボイラ効率およびマテリアルバランスの評価

ここでは、石炭専焼時とアンモニア混焼時のボイラ性能を比較し、それぞれの機器に対するマテリアルバランスを確認することで既設設備の改造要否の検討データとする。本検討に使用した石炭 (性能確認炭) およびアンモニアの発熱量を第 5 表に示す⁽³⁾。

本検討は、第 4 表に示すとおり MCR を対象としている。第 11 図に石炭専焼時とアンモニア混焼時のボイラ効率を示す⁽³⁾。ボイラ効率は石炭専焼時に比べてアンモニア混焼時の方が僅かに低下することが分かった。これはアンモニア混焼することにより石炭の燃え残りに起因する未燃損失は減少するものの、アンモニア燃焼によりボイラ排ガス中の水分が増加することで、ガスから排出される水分の潜熱増加が影響していると考えられる。

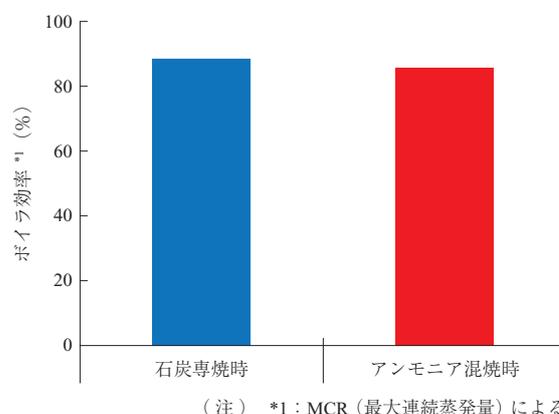
次に第 12 図に石炭専焼時とアンモニア混焼時の石炭消費量を示す⁽³⁾。アンモニアを 20%混焼することで単純に石炭の投入量は減少するが、アンモニアの単位質量当たりの発熱量が低いため、全燃料消費量 (石炭 + アンモニア) としてはアンモニア混焼時の方が多くなるため、ランニングコストとしては増加する。

第 13 図には石炭専焼時とアンモニア混焼時の燃焼空気量を示す⁽³⁾。また、第 14 図にはそれぞれの排ガス量をまとめた⁽³⁾。燃焼空気は、全燃焼空気量としては少なく

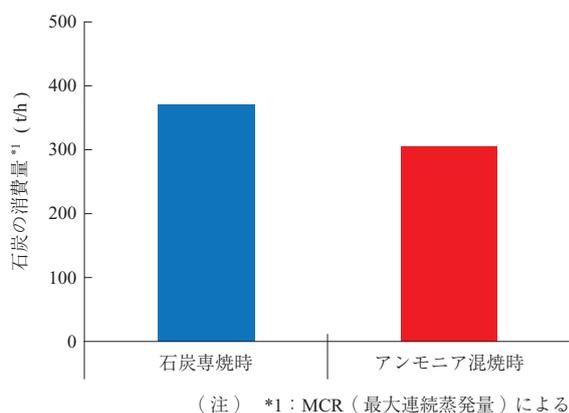
第 5 表 1 000 MW 級ボイラを対象としたフィージビリティスタディで用いた燃料の発熱量

Table 5 Calorific value of fuel used in Feasibility Study for 1 000 MW class boiler

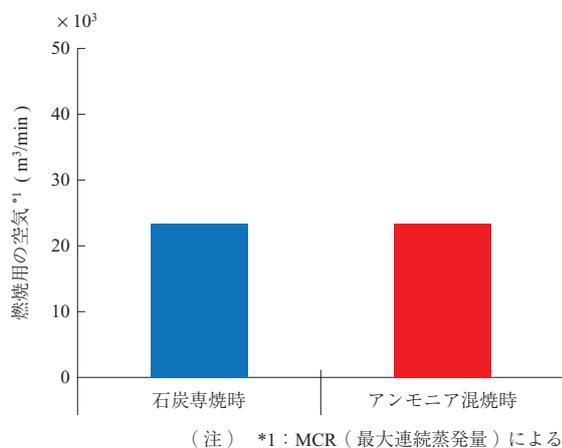
項目	単位	石炭 (性能確認炭)	アンモニア
高位発熱量	MJ/kg	24.1	22.4



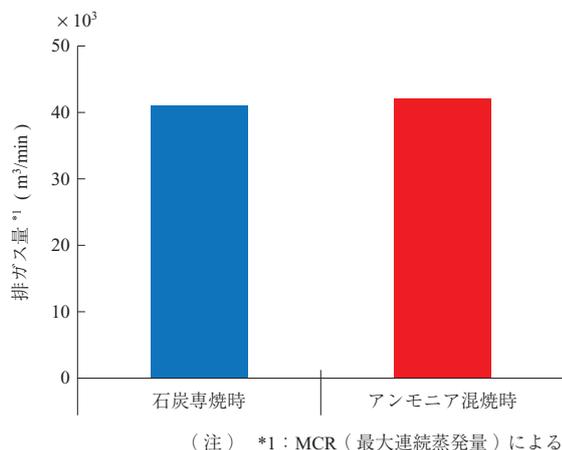
第 11 図 1 000 MW 級ボイラのボイラ効率
Fig. 11 1 000 MW class boiler_boiler efficiency



第12図 1000 MW 級ボイラの石炭消費量
Fig. 12 1000 MW class boiler_fuel consumption



第13図 1000 MW 級ボイラの燃焼用の空気
Fig. 13 1000 MW class boiler_combustion air



第14図 1000 MW 級ボイラの排ガス量
Fig. 14 1000 MW class boiler exhaust gas volume

なるが、空気の割振り量が増え二次燃焼空気の割合が増える傾向になる。排ガス量としては、アンモニア混焼時の方が石炭専焼時と比べて僅かに多くなる。これらの結果から空気側、ガス側ともに建設時に石炭専焼用として計画された通風システムの機器がアンモニア混焼時にそのまま流用で

きるかどうかは通風システムの余裕などを含めて詳細検討が必要である。

2.2.3.2 ボイラシステムの改造内容の検討

まず一般的なシステム構成について確認した後、ボイラシステムの改造内容を検討していく。第15図に石炭焼きボイラシステムの一般的なシステム構成および検討内容を示す⁽³⁾。

石炭焼きボイラでは、燃焼用空気は FDF により、空気予熱器 (Gas-Air-Heater: GAH) に送られる。GAH では、ボイラ出口側で高温ガスがエレメントに触れることで加熱 (ボイラ排ガスの熱回収) され、その加熱されたエレメントが燃焼用空気を加熱し、その空気によってボイラでの燃焼を促進する。GAH を出た高温空気はバーナへ送られる。また、FDF により送られた空気は一部をボイラ上部から供給することで燃焼用空気を二段階で供給して燃焼させることにより、燃焼排ガスの NO_x を低下させる手法を取っている。これはバーナ部の空気供給で過剰空気を少なくして意図的にバーナ近傍を還元雰囲気にするすることで、燃料中の N 分に起因する NO_x (Fuel NO_x) を還元させるものである。全体としては、二段目の空気供給を行うことで不足酸素を供給し、所定の空気過剰率を確保している。

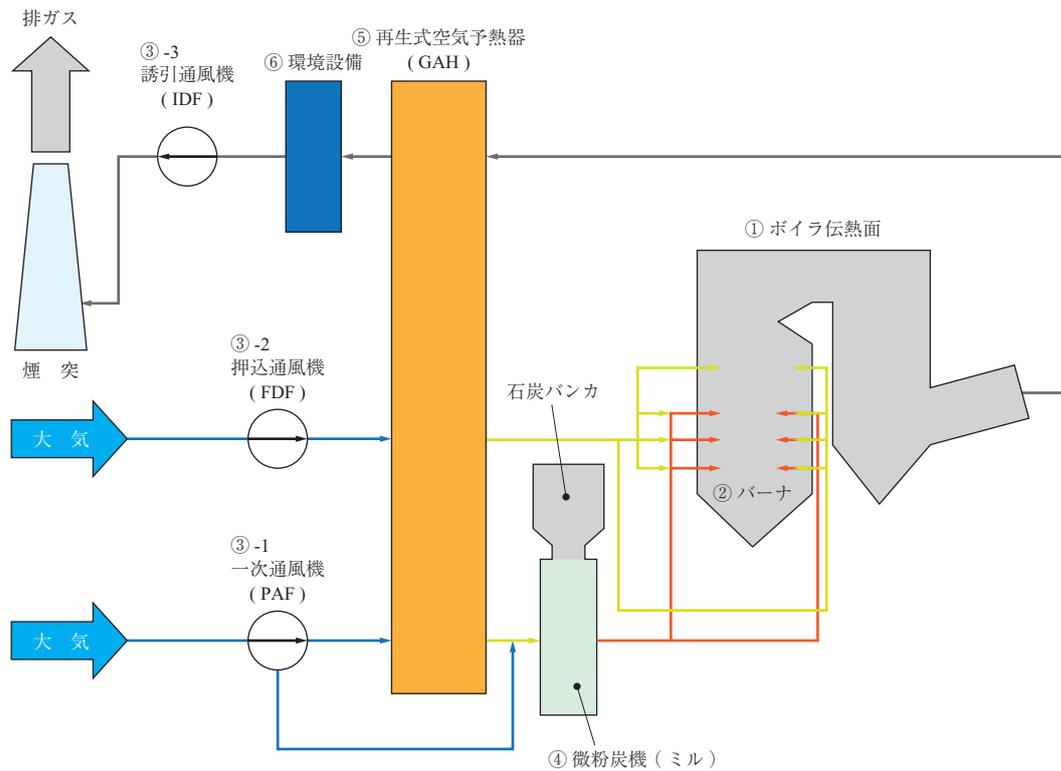
また、FDF からの供給空気の残りの燃焼用空気は PAF により微粉炭機まで送られる。一次空気は微粉炭機で粉碎された微粉炭をバーナに搬送するとともに、石炭の乾燥にも使用される。一次空気の一部は GAH に送られ、加熱されて高温空気となり微粉炭機入口で冷空気と混合され、微粉炭機内で石炭を乾燥するために必要な温度に調整され微粉炭機に送り込まれる。

バーナにて燃焼された後、発生した燃焼排ガスは、IDF にて誘引される。そのため火炉内は常に負圧を保っている。燃焼排ガスは、ボイラ各伝熱面や GAH で熱回収され、その後 NO_x や煤じん、SO_x を除去するための環境設備を通り排ガス性状を整えられ、最終的に大気へと放出される。

今回のボイラシステムの改造について、検討した箇所は次の6か所である (検討箇所の詳細については、第15図を参照)。

- ① ボイラ伝熱面
- ② バーナ
- ③ 通風システム機器 (PAF, FDF, IDF)
- ④ 微粉炭機 (ミル)
- ⑤ GAH
- ⑥ 環境設備 (脱硝装置, 集じん装置, 脱硫装置)

(a) 石炭焼きボイラシステムの系統構成



(b) 石炭焼きボイラシステムの検討内容

番号	検討箇所	検討内容
①	ボイラ伝熱面	ボイラを模擬したシミュレーションを用いた数値解析の結果 ⁽³⁾ 、石炭専焼時とアンモニア混焼時とで取熱量は同程度の結果を得られており、また各部位の蒸気およびガス温度も計画と変化が見られないため、アンモニア混焼によるボイラ伝熱面の改造は発生しない。
②	バーナ	バーナについては、アンモニア混焼時にも基本的には石炭専焼バーナを流用する。ただしアンモニアガスを吹き込むための設備およびアンモニア起因の懸念事項に対応するためのシステムを含めたアンモニア供給設備を追設する。
③-1	PAF	PAF は前項でも述べたように、粉碎した微粉炭をバーナに搬送する役割があるが、今回アンモニア混焼を実施する際に燃料を石炭からアンモニアガスに代替することで石炭を搬送する空気量が少なくなるため、PAF の改造は発生しない。
③-2	FDF	燃焼に必要な空気量は PAF と FDF とで賄われている。必要空気量を確保するため、アンモニア混焼時には PAF が受けもつ空気量が少なくなる分を FDF で補わなければならない。FDF 側の流量が増加する傾向となる。今回の模擬プラントについては FDF の仕様決定点に余裕があるため改造は発生しない。しかし、仕様決定点の設定によっては余裕の少ない場合も考えられるため、改造要否については配慮が必要である。
③-3	IDF	マテリアルバランスの評価を行った結果、アンモニア混焼時のガス量については僅かに増加する傾向にある。FDF 同様に今回の模擬プラントについては仕様決定点に余裕があるため改造は発生しないが、余裕の取り方で改造要否が変わる可能性もあるので配慮が必要である。
④	微粉炭機 (ミル)	ミルについては、アンモニア混焼時は石炭投入量が減少するため、ミル運転負荷としては低減される。そのため、ミルの改造は発生しない。また石炭投入量が減少することで乾燥用空気に求められる温度が低減する。そのため、石炭専焼時には GAH で回収されてきた熱量が排ガスに残されるため、排ガス温度が高い傾向になる。
⑤	GAH	GAH については、ミル入口温度の低下やガス流量の増加・ガス性状の変化などからガス側の熱量を回収しきれずに排ガス温度が上昇する傾向になる。排ガス温度の検討が必要であるが、温度の上昇は数℃～十数℃程度であり、この程度の上昇であれば新設時の設備余裕の範囲で吸収できるため、GAH も改造は発生しない。
⑥	環境設備 (脱硝装置, 集じん装置, 脱硫装置)	アンモニア混焼時、NO _x 濃度が石炭専焼並みであるとともに石炭投入量減少に伴って CO ₂ や SO ₂ 、煤じんが減少することが確認されている。環境値としてはクリアしているが、一方でガス量および排ガス中水分が増加することも分かってきており、環境設備についての改造・増設については今後評価をしていく必要がある。

第 15 図 石炭焼きボイラシステムの一般的な系統構成および検討内容

Fig. 15 General system configuration of coal fired boiler system

2.2.3.3 アンモニアの供給システムの検討

アンモニア混焼を実現するには、アンモニア気化設備からバーナまでのアンモニアガスシステムの追設が発生する。検討したアンモニアガスシステムの概略を第16図に示す⁽³⁾。アンモニア混焼時、液体アンモニアを気化させたアンモニアガスを石炭と混焼させるため、系統構成としては基本的にガス燃料を主燃料とするボイラにて計画される燃料系統と同様の系統構成とすることで信頼性を確保する。また、アンモニアガスと石炭は同軸で混焼させるものとし、バーナ全段にアンモニアガス配管を設け各バーナで20%混焼できるものとする。アンモニア混焼を検討していくなかで一番重要なことは、アンモニアガスが劇物および毒物であるため、系外に漏らさない＝大気に放出しないということである。上記条件が大前提であるため、通常ガス燃料の際には大気放出とするところをN₂による除害設備などへのパーズを基本方針として計画する。

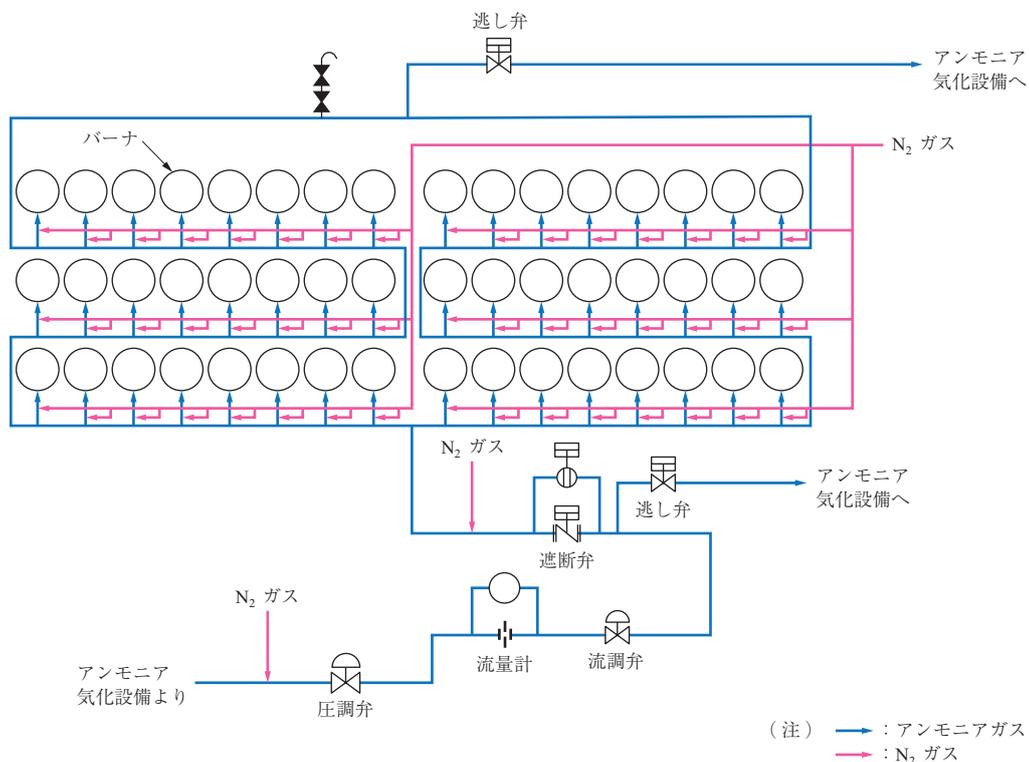
今回は基本的な系統構成のみ検討を実施したが、今後はアンモニア混焼した際のボイラ運用項目および仕様を確認し、それらを考慮した系統内詳細検討を進めていく必要がある。また、アンモニアガスを使用する際は安全面での配慮が必要不可欠であり、安全対策の検討も進めていく。

3. 結 言

石炭焚き火力発電所から排出されるCO₂を削減する方法として、水素キャリアであるアンモニアを石炭火力発電の燃料として活用するため、微粉炭・アンモニア混焼技術を開発した。

燃焼試験では、アンモニアを石炭専焼バーナの中心から供給することで、アンモニア混焼下でも安定した火炎を保持しながら、NO_xを石炭専焼と同程度に抑制できることを実証した。二段燃焼率、投入熱量、石炭の燃料比が排ガス組成に与える影響を評価し、適切な条件下ではNO_x濃度は石炭専焼を上回らないことが確認できた。本試験の結果から、微粉炭・アンモニア混焼を実施するうえで、NO_x関連設備については大きな追設の必要性はほぼないことが分かった。今後は、社会実装への適用可能性の向上のために、さらに低い投入熱量におけるアンモニア混焼の可否の評価や20%以上の混焼率での微粉炭・アンモニア混焼が可能なバーナの開発を行っていく。

大型発電用石炭焚きボイラのフィージビリティスタディでは、アンモニア混焼における改造内容としては、必須となるアンモニア供給システムのみであり、その他の設備については既設流用にて対応可能ということが分かった。ただ



第16図 1000 MW級ボイラ_アンモニアガスシステムの概略図
Fig. 16 Schematic diagram of 1000 MW class boiler_ ammonia gas system

し、これら既設設備の流用についてはある 1 条件での評価結果であり、使用する炭種や混焼率などによって変化するため引き続き配慮が必要である。また、燃料投入のタイミングや低負荷域での運用、アンモニア混焼停止・除害手法などボイラの運用面での項目について、今後引き続き検討していく。

今回のアンモニア混焼における性能や設備面の課題に対して、引き続き研究・開発を進めているが、将来的には既設プラントへ適用できるよう実機による運転評価を実施する必要がある。課題解決のための新たなバーナ開発やフイービリティスタディを進めるとともに、スケールアップした際の運転状態を評価するための実証先候補地を早期に確定し、実証事業を実現していく。世の中の流れとして環境配慮への動きが加速しているなかで、IHI はアンモニア混焼技術が温室効果ガス削減の一助となるよう研究・開発を加速させていく。

— 謝 辞 —

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「エネルギーキャリア」(管理法人：国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)) の委託研究課題「アンモニア直接燃焼」において実施しました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：水素基本戦略, <https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>, (参照 2019.9.3)
- (2) 株式会社 IHI：水素エネルギー利用技術で地球温暖化を STOP!, IHI 技報, Vol. 57, No. 2, 2017 年 6 月, pp. 16 - 17
- (3) 国立研究開発法人科学技術振興機構：SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 終了報告書, <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-14.pdf>, (参照 2019.9.3)
- (4) 石井大樹, 大野恵美, 小崎貴弘, 伊藤隆政, 藤森俊郎：排ガス NO_x 生成を抑制する微粉炭/アンモニア混焼方法, 第 23 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会, 2018 年 8 月, C231
- (5) 牧野尚夫, 木本政義, 佐藤幹夫, 二宮 徹：空気多段注入法による微粉炭燃焼時の NO_x 低減, 燃料協会誌, Vol. 69, No. 9, 1990 年, pp. 856 - 862
- (6) 石井大樹, 大野恵美, 小崎貴弘, 伊藤隆政, 藤森俊郎：排ガス NO_x 生成を抑制する微粉炭/アンモニア混焼方法 (第 2 報), 第 24 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 日本機械学会, 2019 年 6 月, D123