

# 燃料アンモニアを利用した火力発電について

## 須田 俊之

株式会社IHI 戦略技術統括本部 戦略技術プロジェクト部  
カーボンソリューション担当部長

### 1. はじめに

2020年10月26日に政府が日本として「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言したことにより、脱炭素に向けた動きが加速している。カーボンニュートラルを達成するための方策の一つとして、利用時にCO<sub>2</sub>を発生しない水素エネルギーの推進が重要と考えられる。水素は自然からは直接採取できない2次エネルギーであり、化石燃料からの変換による製造や、太陽光・風力発電などの再生可能エネルギーからの製造が必要となる。日本は1次エネルギーの90%以上を海外の化石燃料に依存しており、海外でCO<sub>2</sub>フリー水素を製造し日本に輸入・利用することで、国内利用時のCO<sub>2</sub>を直接的に削減できるとともに、海外の再生可能エネルギーを水素の形で輸入できるため、エネルギーセキュリティの向上（供給構造の多様化）にも寄与すると考えられる。

一方で、水素は輸送ににくいという特徴がある。複数検討されているエネルギーキャリアの中では、アンモニアの社会実装が早いと考えられており、昨今注目を集めている。アンモニアは、他のキャリアに比較して、①単位体積当たりの水素含有量が大きい、②液化しやすく既存の製造・輸送・貯蔵の技術や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、などの特徴から、早期に社会実装が可能と考えられている。アンモニアは既に肥料や化学原料として広く流通しており、鉄触媒により窒素と水素からアンモニアを合成するハーバー・ボッシュ法という完成された製法があること、また、アンモニアは可燃性ガスであり、火力発電用燃料として直接利用できることがチェーン構築上の大きなメリットと言える。

### 2. アンモニアを火力発電で利用する場合の課題

アンモニアはエネルギーキャリアとして有望な物資であるが、燃焼の面で従来の石炭や炭化水素燃料とは異なった特徴が

あり、火力発電での利用にはいくつか課題がある。例えばガスタービンで燃料として用いられる天然ガスと比べると、アンモニアは燃焼速度が約1/5、発熱量が約1/2、断熱火炎温度が200～400℃低い等の特徴があり、火炎を安定させること、完全燃焼させるために十分な滞留時間を確保すること、輻射伝熱量の低下に対する対応、などが課題となる（図1参照）。特に重要なのが、分子中に含まれる窒素原子由来のFuel-NO<sub>x</sub>やN<sub>2</sub>Oの生成が予想されるため、これら窒素酸化物の生成を抑制した燃焼手法（バーナや炉）の開発が必要であることである。Fuel-NO<sub>x</sub>やN<sub>2</sub>Oの生成メカニズムについては、特に石炭燃焼の分野において長く研究されてきており、低NO<sub>x</sub>燃焼法も開発されている。石炭燃焼においては、石炭中の窒素分はHCNやNH<sub>3</sub>の形で気相に放出され、それが酸化されることでNO<sub>x</sub>が生成する。一方で、NH<sub>3</sub>によりNO<sub>x</sub>が還元される反応もあるため、これら酸化還元反応を制御することが低NO<sub>x</sub>化のカギとなる。例えば、空気を2段階で投入する2段燃焼や、低NO<sub>x</sub>バーナなどが開発されている。これら技術を適切に応用すれ

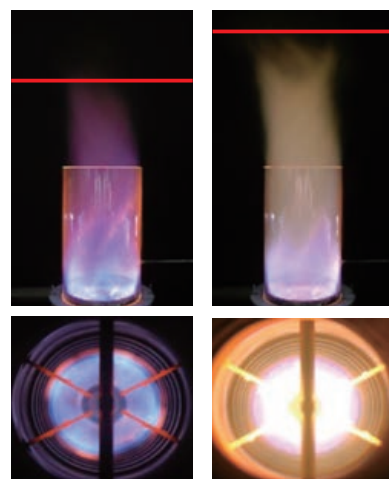


図1 火炎の比較

左：都市ガスのみによる火炎 右：都市ガスとアンモニアの混焼時火炎

ば、アンモニア燃焼においても早期に低NO<sub>x</sub>燃焼法が開発できる可能性がある。

### 3. 各種火力発電での利用技術

IHIでは、国からの支援のもと、石炭火力、ガスタービン、固体酸化物型燃料電池 (SOFC) を利用した発電におけるアンモニア利用技術の確立を行ってきた。以下、石炭火力・ガスタービンにおける開発状況について簡単に述べる。

#### 3.1 石炭火力発電への適用

石炭火力からのCO<sub>2</sub>排出原単位は0.8kg-CO<sub>2</sub>/kWh程度と他の火力発電よりも大きい事が課題であるが、例えばアンモニアを発熱量ベースで20%混焼させることでCO<sub>2</sub>排出量はおおよそ20%削減となり、CO<sub>2</sub>削減効果大きい。一般に石炭火力では、石炭を数十μmまで粉砕してバーナで炉内に吹き込み燃焼させる微粉炭燃焼と呼ばれる手法が主流であるが(図2)、この発電所にどのようにアンモニア燃焼を適用させるかが課題である。IHIでは、アンモニアの投入・燃焼方法、発電所としての性能の変化の予測、必要なアンモニア供給設備の検討、など実施し、アンモニア燃焼適用の可否について検討した。

最も重要となる燃焼については、アンモニアを石炭と一緒に安定して燃焼させるため、アンモニア混焼が可能な微粉炭バーナを開発した(図3)。本バーナではアンモニアの投入方法を工夫することにより、安定した燃焼とともに、NO<sub>x</sub>の生成を抑制できる還元領域にアンモニアを投入することで低NO<sub>x</sub>化を図るものである。基本的にはバーナの交換によってアンモニア混焼の適用が可能となるため、既存の石炭火力設備を利用しつつ最小限の改造でアンモニア混焼によるCO<sub>2</sub>削減が可能となる。

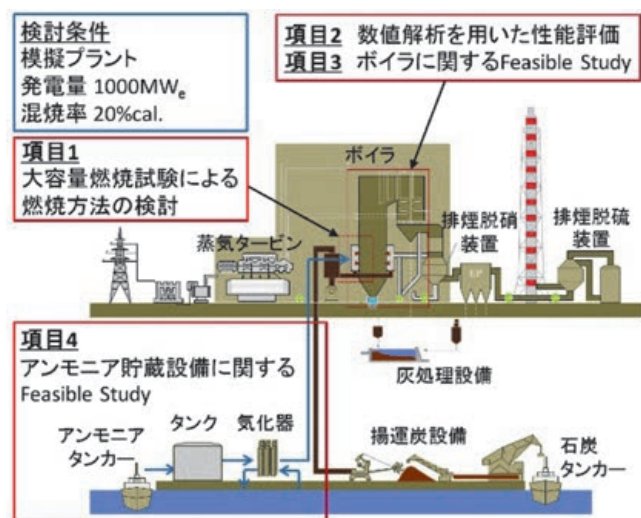


図2 石炭火力発電所(微粉炭燃焼)

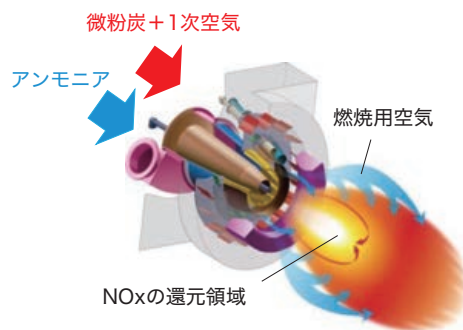


図3 アンモニア混焼微粉炭バーナ模式図

本バーナの性能を確認するため、IHIの燃焼試験設備を用いた燃焼試験を行った。試験設備の外観を図4に示す。本設備は微粉炭を燃焼させた際の燃焼挙動、排気ガス特性を探るための設備であり、今回、アンモニア供給設備を追設することで試験を行った。アンモニア混焼率は発熱量ベースで20%とした。

図5にアンモニア20%混焼時の火炎の様子を示す。火炎は微粉炭専焼時と同等で安定しており、火炎の安定性については問題無いことが分かった。排気ガス中のCO<sub>2</sub>濃度は、20%アンモニア混焼によって13.3%から10.6%へと20%削減されていることが確認できた。排気ガス中の未燃アンモニアについては、試験全体を通して、煙突部でアンモニアは検知されておらず、投入したアンモニアはすべて火炉内で分解、燃焼されており、アンモニアを安全に燃焼できることがわかった。課題で



図4 燃焼試験設備



図5 アンモニア混焼火炎

あったNOxについては、石炭専焼と同等もしくはそれ以下であった。以上の結果より、石炭火力において、アンモニアを安定して混焼可能であることを確認することができた。

### 3.2 ガスタービン

ガスタービン燃焼器においてアンモニアを利用する場合、安定して燃焼させる技術（失火・不完全燃焼などの抑制）や、アンモニアからのFuel-NOxの生成を抑制する燃焼器コンセプトが重要となる。天然ガスを燃料としたガスタービンで発生するNOxは、空气中窒素分起源のThermal-NOxであり、燃料中の窒素分を起源とするFuel-NOxは発生しない。Thermal-NOxは温度依存性が高いため、ガスタービンにおける低NOx手法は希薄予混合燃焼など高温場の発生を抑制する手法が主流であるが、Fuel-NOxの場合、二段燃焼など還元雰囲気を利用した低NOx手法を用いる必要がある。IHIでは、数値解析や燃焼器単体の加圧燃焼試験等により、安定燃焼・低NOxを達成するアンモニア/天然ガス混焼燃焼器の研究開発を進めた結果、新しく開発した燃焼器を商用ガスタービンに搭載、原理実証試験を実施した。

図6に試験設備の概略図を示す。設備は主に、天然ガスコンプレッサ、アンモニア供給装置、ガスタービンエンジン、脱硝装置の4つで構成されている。ガスタービンエンジンにはIHI製2MWe級ガスタービンであるIM270を用いた。設備改造は燃焼器のみとし、開発したアンモニア/天然ガス混焼用燃焼器を搭載、それ以外のエンジン構成部品については天然ガス焚き用標準品を使用した。タービン出口には、選択還元方式の脱硝装置を設置した。アンモニアは液体状態でタンクに貯留し、液体のままポンプで加圧した後、気化器で気化させる構成とした。試験では、起動から2MWe発電までの運転を天然ガス専焼にて行った後、発電出力を2MWeで一定に保持した状態で、

アンモニアの供給を増加させ、アンモニアを20%（低位発熱量基準）まで安定して混焼させた。

ガスタービンの運転の結果、微粉炭燃焼の場合と同様に、アンモニア混焼率が増加するとCO<sub>2</sub>濃度は単調に減少し、直接的な低減が可能であることが分かった。NOx濃度はアンモニア混焼開始とともに急増するが、アンモニア混焼率5%以上では大きく変化しないことがわかり、天然ガス混焼時よりはNOx濃度は高くなるものの脱硝装置通過後のNOx濃度は環境規制値7ppm@16%O<sub>2</sub>以下まで低減可能であった。その他成分は、COは3ppm以下、NH<sub>3</sub>、THC (Total Hydro Carbon)、N<sub>2</sub>Oは1ppm以下であり、いずれも計測器の定量下限値以下であった。以上の結果より、ガスタービンでアンモニアを安定して混焼可能であることを実証することができた。

なお、現在はアンモニアを気化させるのではなく液体のまま燃焼器に投入する手法の試験を実施しており、2020年度末の時点で70%の混焼まで成功している。今後、100%アンモニアでの専焼を目指した研究開発を実施していく予定である。

## 4. アンモニアの受入・供給設備

ここでは火力でのアンモニア利用時に必要となるアンモニアの受入・供給設備の検討状況について簡単に述べる。

### 4.1 アンモニア受入・貯蔵

2030年に300万トン、2050年には3,000万トンのアンモニア需要が想定されており、アンモニアの輸入・貯蔵等が可能となる環境の整備が求められている。国内港湾においては、大量に輸入されるアンモニアを複数ユーザーが多様な用途に活用することで港湾・臨海部におけるカーボンニュートラルを推進することが可能となることから、これを実現するためのアンモニア受入・貯蔵設備は非常に重要な設備と位置付けられる。上

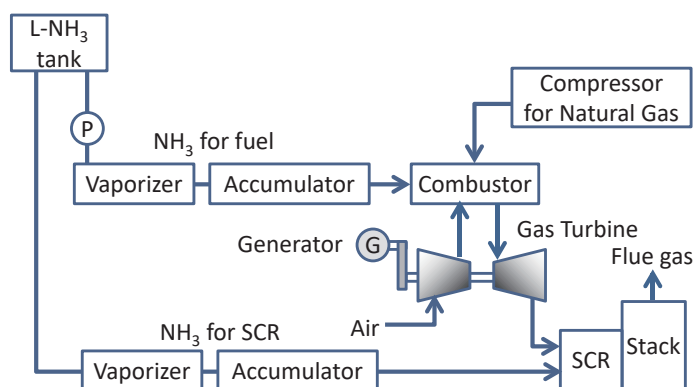
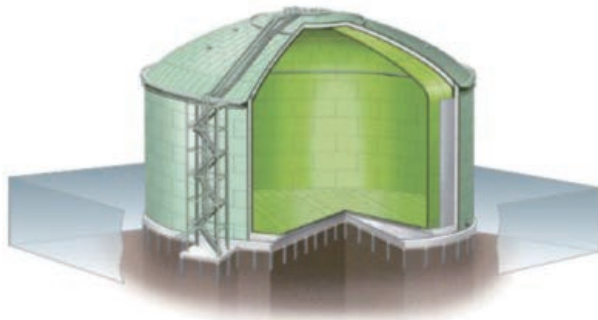


図6 燃焼試験設備概略図

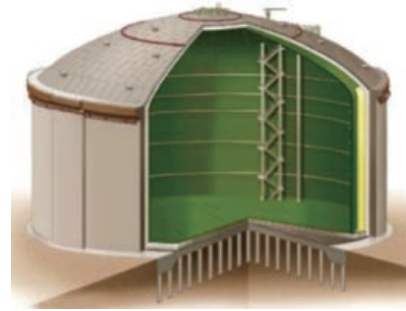


図7 2MWe 級ガスタービンIM270





金属二重殻タンク



PC二重殻タンク

図8 アンモニアタンク外観

記の実現に向けて、限られたCNPの敷地を有効に利用して最大限のアンモニアを受入・貯蔵するためには貯蔵タンク設置面積の最小化と、貯蔵タンク容量の大型化が求められる。国内にはアンモニア貯蔵タンクとして防液堤を有する金属二重殻式タンクの設置実績があるが防液堤を有する分設置面積が大きくなる傾向となる。

LNG貯蔵タンクなどですでに実績のあるPC(プレストレストコンクリート)タンク(タンク外槽の外側にPCが設置されているタンク型式)を採用することで、貯蔵タンクに必要な設置面積をほぼタンク本体設置面積とすることができ、設置面積の最小化が可能となる。タンク容量に関しては、現在アンモニアタンク内槽材として使用されているSLA材では板厚制限により貯蔵容量4万トン程度が最大となる。大容量化に際しては、より高強度の内槽材を使用する必要があるが、鋼材はアンモニアに対してSCC(Stress Corrosion Cracking: 応力腐食割れ)感受性を有しており、内槽材鋼種のSCC耐性を検証し大容量化に適用可能な鋼種を早期に選定する必要があり、IHIにおいてもアンモニアタンク大容量化に向け材料選定を実施中である。

#### 4.2 アンモニア供給

アンモニア供給の主要設備としてアンモニア気化設備が挙げられる。燃料アンモニアを効率よく気化させるためにはCNP周辺から取水可能な海水を熱媒とすることが望ましいが、発電設備へ燃料アンモニアを供給する場合、アンモニアの物性上発電設備との取り合い圧力近傍において常温下で凝縮が生じることから、海水を熱媒とするだけでは不十分であり、アンモニア気化設備の2次側にアンモニアガスが凝縮温度を下回らないように加温するシステムが必要となる。加温器の熱源は発電所が隣接する場合は発電効率に影響を与えない範囲で供給可能な蒸気等を利用するのが望ましいが、CNP等で発電所が隣接しな

い場合には別途熱源を準備する必要があるため計画時に注意が必要となる。

上記以外に、将来的にCNP運営のカーボンニュートラル化を促進する為、受入・貯蔵設備にアンモニア燃料バンカリング設備を有することによって、アンモニア船着棧、離棧時にアンモニア船をサポートするアンモニア燃料タグボート(実用化開発中)や、アンモニアの船用燃料導入後のアンモニアバンカリング船への燃料供給を可能とし、CNP運営及び国際海運のカーボンニュートラル化に貢献することが期待できる。

## 5. まとめ

本稿では、微粉炭焚ボイラおよびガスタービンにおけるアンモニア混焼技術開発の状況とともに、アンモニア受入・供給設備についても概略を述べた。現在、石炭火力での20%混焼については実証段階にあるが、さらに混焼率を上げるための研究開発を継続して実施する必要がある。早期社会実装が可能となるよう、今後も力を入れて研究開発を進める予定である。

## 6. 謝辞

本稿で述べた研究の一部は、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」(管理人: 国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST))、および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託事業(JPNP16002)の支援によって実施されました。ここに謝意を表します。