

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「CO2フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・輸送関

連技術の開発」

研究題目「火力発電燃料としてのCO2フリーアンモニアサプライチェーン

の技術検討」

研究開発期間：平成30年6月1日～平成31年3月31日

研究担当者：椎屋 光昭

所属研究機関：電源開発株式会社

目 次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	1
3. 研究開発実施内容	2
3-1. 国内石炭火力発電所におけるアンモニア受入・貯蔵に係る技術検討	2
3-1-1. アンモニア供給方法	
3-1-2. アンモニア受入・貯蔵系統および設備	
3-2. 国内石炭火力発電所でのアンモニア混焼のフィージビリティ検討	5
3-2-1. 技術検討の前提条件	
3-2-2. アンモニア払出・気化系統および設備	
3-2-3. アンモニア混焼系統および設備	
3-2-4. ボイラー設備改造の要否検討	
3-2-5. アンモニア混焼のボイラー性能に及ぼす影響	
3-2-6. アンモニア混焼の基本運用方法	
3-2-7. 発電コスト評価	
3-3. まとめ	15
3-4. 今後の課題	16
4. 外部発表実績	16
5. 特許出願実績	16
6. 参考文献	17

図表一覧

- 図 1. CO₂フリーアンモニアサプライチェーン
- 図 2. アンモニア受入・貯蔵・払出フロー
- 図 3. アンモニア貯蔵・払出設備レイアウト
- 図 4. CO₂フリーアンモニア混焼の発電コスト比較

- 表 1. 発電所諸元
- 表 2. 燃料諸元
- 表 3. アンモニア使用量
- 表 4. アンモニア輸送条件
- 表 5. アンモニア受入・貯蔵設備の主要機器一覧
- 表 6. アンモニア払出・気化設備の主要機器一覧
- 表 7. アンモニア混焼設備の主要機器一覧
- 表 8. アンモニア混焼システムの機器仕様
- 表 9. ボイラー性能評価項目
- 表 10. アンモニア混焼におけるボイラー性能、運用面への影響
- 表 11. 設備コスト
- 表 12. 発電コスト試算の前提条件
- 表 13. CO₂フリーアンモニア混焼の課題

1. 本研究の目的

石炭代替燃料として期待が高まるアンモニアは燃焼の際に CO_2 を発生しないが、製造段階においても CO_2 を発生させないアンモニア (CO_2 フリーアンモニア) を石炭火力発電所に供給できれば、石炭の一部をアンモニアに代替することで CO_2 排出原単位を大きく低減できる可能性がある。一方、火力発電所の燃料としては安定的で大量かつ低廉なサプライチェーンが求められる。即ち、これらサプライチェーンインフラの初期投資が大きな参入障壁となる。

本技術検討では、海外における CO_2 フリーアンモニアの製造、輸送、貯蔵、石炭火力発電所での混焼に係る想定コストの調査、サプライチェーン全体における課題の抽出、既存のインフラの活用 (LPG 船の転用等) によるコスト削減効果等の導入可能性調査を行い、今後の実証に向けた課題整理を行った。

このうち、丸紅株と当社は上流部分 (海外における CO_2 フリーアンモニアの製造、日本国内までの輸送) の検討を丸紅株が、下流部分 (日本国内におけるアンモニア貯蔵、石炭火力発電所におけるアンモニア混焼) の検討を当社がそれぞれ実施した (図 1.)。

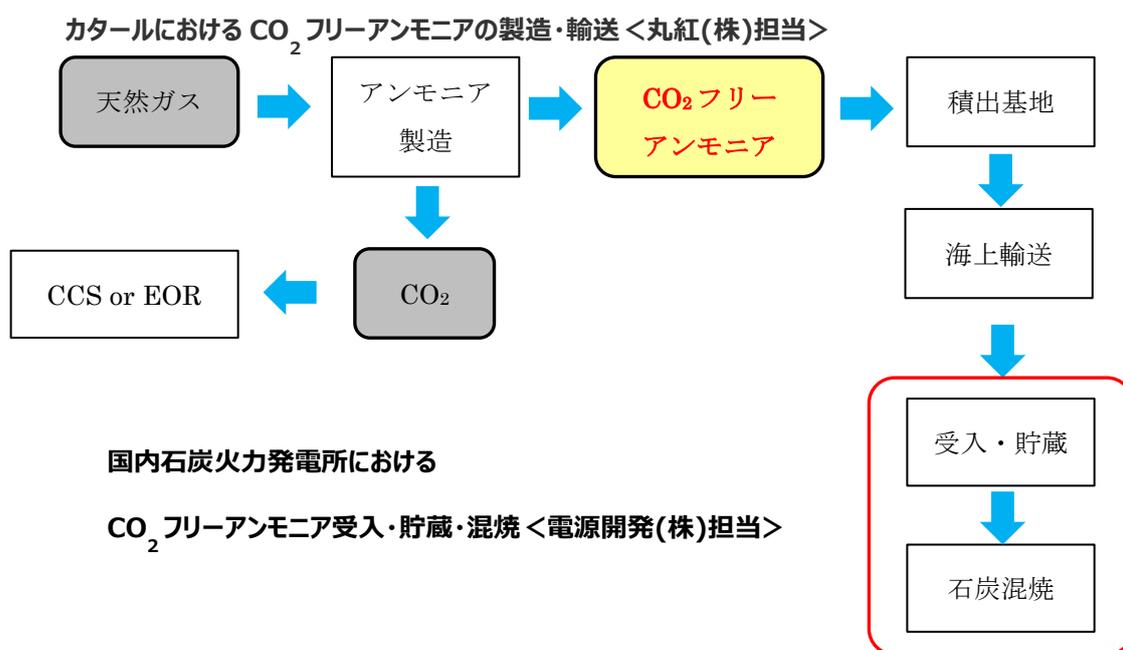


図 1. CO_2 フリーアンモニアサプライチェーン

2. 研究開発目標とマイルストーン

本研究開発では、海外における CO_2 フリーアンモニアの製造、日本国内までの輸送等の上流部分の技術検討を丸紅株が行い、石炭火力発電所近傍でのアンモニア貯蔵、石炭火力発電所における混焼等の下流部分の技術検討を当社が行う。

当社は自社保有の石炭火力発電所における燃料用アンモニアの受入・貯蔵、混焼の技術検討を行う。本検討では、石炭火力発電所でのアンモニア混焼に際し、バーナーやその他燃焼系統の設備改造に伴う技術的・運用上の課題の抽出を行うとともに、トータル

的なコスト評価を行う。

また、平成 30 年度のマイルストーンは、燃料用アンモニアの受入・貯蔵、混焼に伴うトータル的なコスト評価を行う。

3. 研究実施内容

当社保有の石炭火力発電所における燃料用アンモニアの受入・貯蔵、およびアンモニア混焼の技術検討を行う。石炭火力発電所でのアンモニア混焼に際し、バーナーなどの燃焼系統の設備改造に伴う技術的・運用上の課題を抽出するとともに、トータル的なコスト評価を実施した。

3-1. 国内石炭火力発電所におけるアンモニア受入・貯蔵に係る技術検討

本検討では、海外において CO₂ フリーアンモニアを製造し、アンモニア船にて国内の石炭火力発電所まで輸送することを想定した。発電所諸元を表 1. に示す。

表 1. 発電所諸元

項目	仕様
ユニット出力	600 MW
使用燃料	石炭
石炭使用量	215 t-dry/h

3-1-1. アンモニア供給方法

海外における CO₂ フリーアンモニア製造は、短期的には化石燃料からの製造が期待される。供給可能な候補地としては、アメリカ、カタール、サウジアラビアが考えられるが、原料天然ガス価格、EOR や CCS の環境整備の度合い、プラントコスト、輸送距離の観点で一長一短がある。本検討においては、天然ガス埋蔵量が豊富でコスト面で有利と考えられるカタールからの輸送を想定した。

カタールから輸送する場合、輸送回数は最大で年 8 回と考えられる。アンモニア混焼の使用量に応じて供給量を確保する必要がある。アンモニア混焼における燃料諸元を表 2. に、アンモニア混焼率 20 cal.% でのアンモニア使用量を表 3. に、アンモニア輸送条件を表 4. に示す。

アンモニア混焼率 20 cal.% での年間アンモニア使用量は約 31.2 万トン(利用率 80%)と想定されるため積載量は 4 万トン級のアンモニア船 (LPG 船転用) での輸送を想定した。

表 2. 燃料諸元

項目	発熱量
石炭発熱量 (高位)	23.12 MJ/kg
アンモニア発熱量 (高位)	22.40 MJ/kg

表 3. アンモニア使用量

項目	使用量	備考
アンモニア混焼率	20 cal.%	参考文献 ^[1,2,3,4] より、シングルバーナーでの混焼試験において混焼率20cal.%でNO _x 濃度は石炭専焼と変わらない事が検証されていることから、混焼率を20cal.%に設定した。
アンモニア払出流量	45 t/h	
アンモニア使用量（日量）	1,000 t/日	
年間アンモニア使用量（利用率80%）	312,000 t/年	

表 4. アンモニア輸送条件

項目	仕様	備考
積載量	40,000 t/隻	既存のアンモニア船の内、輸送コストを踏まえて最大級の積載量を設定した。
受入頻度	8隻/年（カタール～日本）	

自社保有の石炭火力発電所における燃料用アンモニアの受入、貯蔵に関する技術検討を行った。既設発電所の限られた敷地内に燃料用アンモニア受入設備、貯蔵・気化設備を設置する場合の設備レイアウト、技術的・運用上の課題抽出、設備費・運転費等のコスト調査等を実施した。

3-1-2. アンモニア受入・貯蔵系統および設備

アンモニア受入は、国内石炭火力発電所にある既設の揚炭栈橋で行うこととし、アンモニア受入・貯蔵に必要な設備（ローディングアーム、受入配管、貯蔵タンク、ブリージングタンク）を設置する。アンモニア受入・貯蔵設備の主要機器一覧を表 5. に示す。

表 5. アンモニア受入・貯蔵設備の主要機器一覧

大項目	設備名	数量
アンモニア受入設備	ローディングアーム	1 基
	アンモニア受入配管	1 式
アンモニア貯蔵設備	アンモニア貯蔵タンク	1 基
	ブリージングタンク	1 基

(1) アンモニア受入設備

カタールから輸送したアンモニアを国内石炭火力発電所にある既設の揚炭岸壁に着岸させて、ローディングアーム接続により受入れを行う。受入れたアンモニアは受入配管を通じてアンモニア貯蔵タンク（容量：47,000t）へ送られて貯蔵される。

(2) アンモニア貯蔵設備

アンモニアは銅と鋳体を生成するためインタックポンプを製作できるベンダーがなく

日本国内への導入実績もない。本検討では、防液堤を要せずタンク設置面積を小さくできるプレストレストコンクリート（PC）タンクではなく、受入・貯蔵・送液ともに技術的に確立されている金属二重殻タンクおよび防液堤（タンク内のアンモニア液全量を受ける容量）を選定した。

アンモニア貯蔵タンクの内槽および内外層間の各圧力が監視されており、内槽の圧力に応じてBOG処理設備が起動停止することでタンク内圧を一定に保っている。また、アンモニア貯蔵タンクの保護を目的に安全弁を設置した。タンク安全弁の吹出し先は、アンモニア除害設備に繋がっており、アンモニアガスが大気へ直接放出されない系統とした。

金属二重殻タンクの内外槽間には、窒素が充填されておりブリージングタンクに繋がっている。ブリージングタンク内には窒素が封入されており、内部のダイヤフラムレベルに応じて、金属二重殻タンクの内外槽間の圧力一定にたもつように窒素が供給される系統となっている。なお、安全装置として、内外槽間にも安全弁が設置されているが、この安全弁からは窒素が吹出すため大気放出とした。タンクは負圧に弱いため、内槽及び内外槽間に真空防止弁を設置した。

アンモニア受入・貯蔵・払出フローを図 2. に示す。また、アンモニア貯蔵・払出設備レイアウトを図 3. に示す。

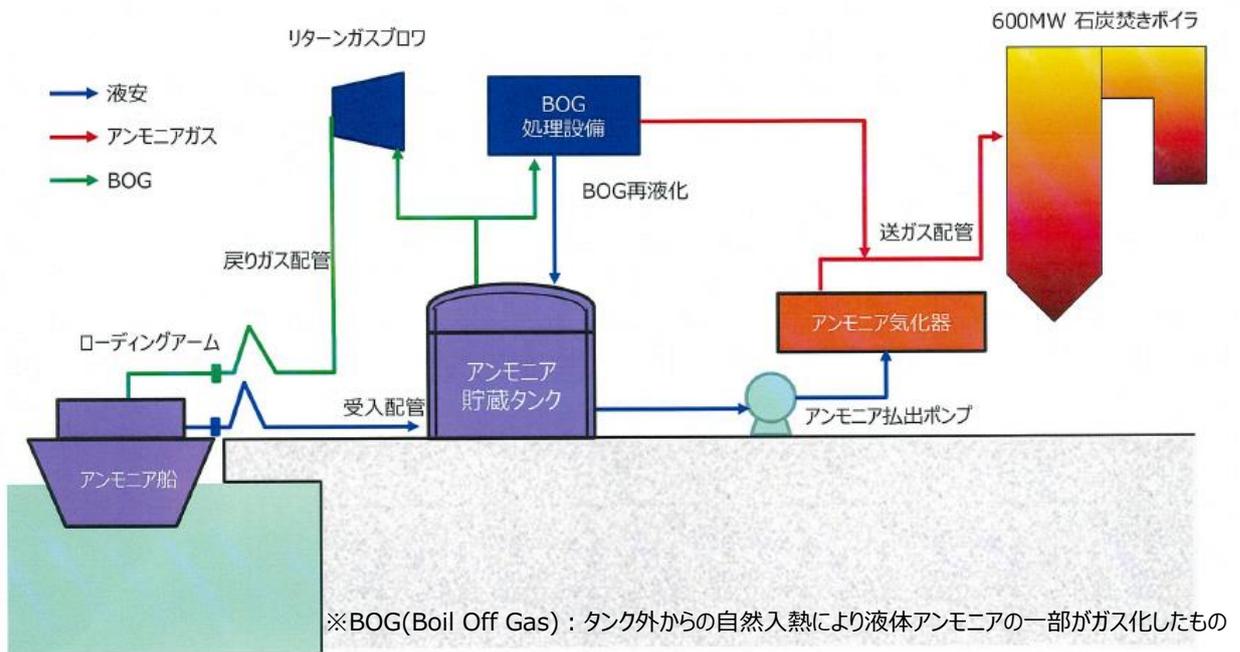


図 2. アンモニア受入・貯蔵・払出フロー

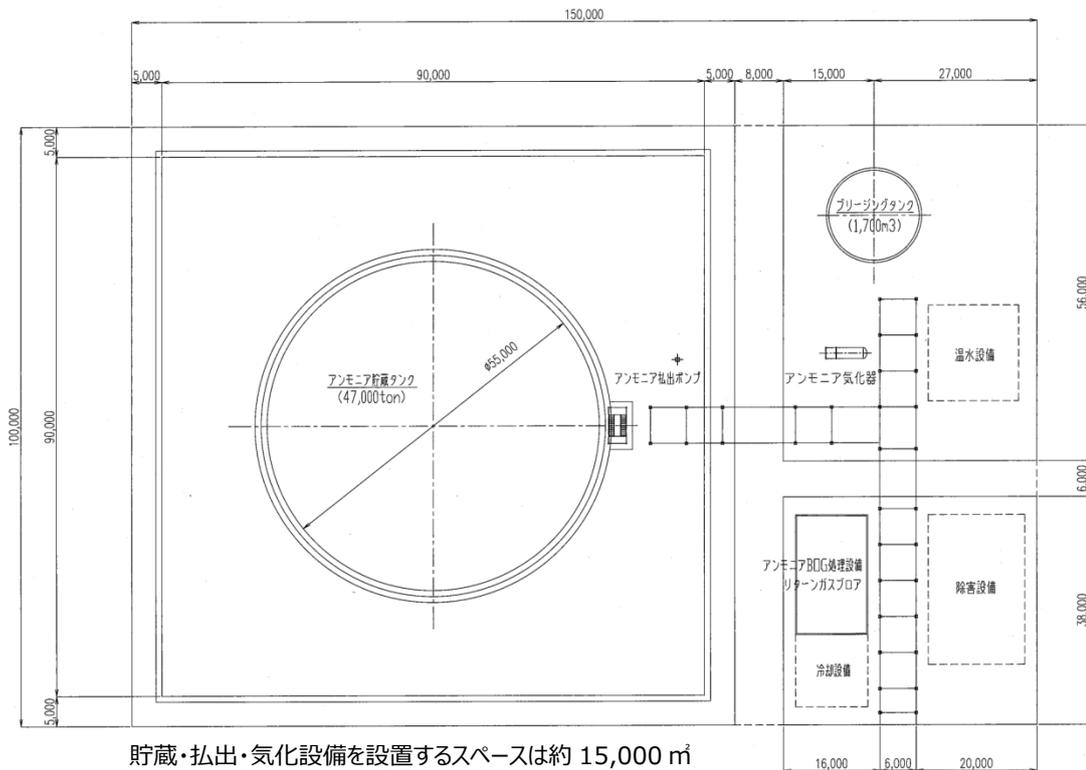


図 3. アンモニア貯蔵・払出設備レイアウト

3-2. 国内石炭火力発電所におけるアンモニア混焼のフィージビリティ検討

自社保有の石炭火力発電所における燃料用アンモニア混焼に関する技術検討を行った。アンモニア混焼率は、参考文献^{1,2,3,4}より、シングルバーナーでの混焼率 20cal.%で NOx 濃度は石炭専焼と変わらない事が検証されていることから 20cal.%に設定した。

当該混焼率に関するアンモニア混焼系統および設備、ボイラー設備改造の要否検討、アンモニア混焼のボイラー性能に及ぼす影響や基本運用方法、発電コスト評価について検討した。

3-2-1. 技術検討の前提条件

(1) 予備機について

アンモニア供給設備停止時は、石炭投入量を増やすことで出力を維持できることから、基本的に予備機は設けない。但し、予備機を設けないことで安全確保に支障が生じる危機については予備機を設けることとした。

(2) アンモニア貯蔵システム

貯蔵条件：-34℃、大気圧

タンク容量：47,000 トン

タンク型式：金属二重殻タンク

その他：高さ 8m の防液堤（形状：正方形）、ブリージングタンクあり

(3) アンモニア払出・気化システム

払出流量：47.7 ton/h（設計流量）、44.5 ton/h（100%流量）

払出ポンプ：遠心ポンプ（タンク外置き）

気化器：シェル&チューブ熱交換器

気化熱源：蒸気

(4) BOG 処理システム

通常運転時に発生する BOG を処理するシステム、およびアンモニアを船からタンクに受け入れる際に発生する戻りガスを船側へ返送するための戻りガスブロワで構成する。

通常運転時に発生する BOG は基本的にボイラーへ燃料として圧送されるが、ボイラーが停止しており圧送が不可能な場合には再液化されアンモニア貯蔵タンクへ戻されるものとする。

(5) アンモニア除害システム

安全弁の吐出、ブローダウン等の余剰アンモニアは除害システムに集められ、水に吸収することで処理する。生じたアンモニア水は産廃処理する。

3-2-2. アンモニア払出・気化系統および設備

アンモニア払出・気化設備は、アンモニア払出・気化設備、BOG 処理設備、アンモニア除害設備、ユーティリティ設備があり、アンモニア払出・気化設備の主要機器一覧を表 6. に示す。

表 6. アンモニア払出・気化設備の主要機器一覧

大項目	設備名	数量
アンモニア払出・気化設備	①アンモニア払出ポンプ	1 基
	②アンモニア気化器	1 基
BOG 処理設備	①アンモニアBOG処理設備	2 基
	②リターンガスブロワ	1 基
アンモニア除害設備	①吸収塔	1 基
	②吸収塔循環ポンプ	1 基
	③ブローダウンタンク	1 基
	④除害タンク	1 基
	⑤除害タンク循環ポンプ	1 基
	⑥排ガススタックシール装置	1 基
ユーティリティ設備	①温水ヒーター	1 基
	②温水循環ポンプ	1 基
	③温水タンク	1 基
	④温水膨張タンク	1 基
	⑤冷却塔	2 基
	⑥冷却水循環ポンプ	2 基

(1) アンモニア払出・気化設備

アンモニア貯蔵タンク内の液は、アンモニア払出ポンプによりアンモニア気化器に送られ、そこで完全に気化されたガスが送ガス配管を通過してボイラーのバーナーへ供給される。バーナーへの供給流量制御は、送ガス管圧力を一定に保つようアンモニア気化器に供給するアンモニア液流量を制御している。

アンモニア気化器に使用する熱媒（温水）の循環ラインは独立とし、その熱媒温度は60℃以上とした。アンモニア気化熱源は全て補助蒸気で賄うものとした。

アンモニア払出ポンプ、アンモニア気化器は各1台のみとし、払出ラインも1条とした。これらはボイラーへのアンモニア供給のための設備であり、アンモニア供給が停止した場合は石炭バックアップ運用とした。

(2) BOG 処理設備

アンモニア貯蔵・気化設備内で発生したBOGは全てアンモニア貯蔵タンクに集められる。そのため、アンモニア貯蔵タンク内圧力を一定範囲内に保つべくBOG処理設備を発停させることでBOGを処理する。

BOG処理設備は圧縮機と冷却器で構成される。アンモニアガス送ガス時にはBOG圧縮機で圧縮されたガスが送ガスラインに送られ、送ガスしていない時にはBOG圧縮機通過後の冷却器で再液化され、アンモニア貯蔵タンクに戻される。再液化のための冷却水はBOG処理設備毎に供給される。尚、BOG処理設備はタンク安全弁を吹かさないようにする為の安全上必要な設備であることから冷却設備を含め冗長化する。

アンモニア受入に伴い、アンモニア貯蔵タンク内で発生する受入による体積置換分のガスは、リターンガスブロワを用いて液体アンモニア船へ返送される。リターンガスブロワは1基とし、仮にブロワがトリップした場合は受入レートを下げ、陸側のアンモニア貯蔵タンクと船側のタンクとの圧力差でガスを返送することで受入を継続できる。

(3) アンモニア除害設備

アンモニアは毒性ガスであり、基本的に直接大気放出は認められない。アンモニア除害設備は、各部の安全弁から排出されたガスやメンテナンス時のブローダウンを適切に処理して排出する。処理系統は、吸収塔および吸収塔循環ポンプ、除害タンクおよび除害タンク循環ポンプの2種類に分けて処理を行う。

BOG処理設備やアンモニア払出ポンプからのブローダウンは、一度、ブローダウンタンクに流し入れ、補助蒸気により気化させた後、吸収塔へ導かれる。一方、アンモニア貯蔵タンク安全弁やBOG処理装置内安全弁、ブローダウンタンクから流れ始めたアンモニアガスも吸収塔へ導かれ、吸収塔内でアンモニア水となり、吸収塔下部に貯水される。アンモニア貯蔵タンク安全弁やBOG処理装置内安全弁の噴出しによるガスライン昇圧、またはブローダウンタンクがある一定圧力以上になると、吸収塔循環ポンプが稼働して吸収塔内にスプレー水が流れる。吸収塔内のアンモニア水の濃度（密度）を把握し、所定の濃度以上となったものは産廃処理する。

アンモニア気化器出口に設置された送ガスラインの安全弁は、気化器の最大処理量が膨大であるため、吸収塔による処理では基数が増加してしまい非効率であるため除害タンクで処理する。除害タンクの容量は、安全弁が最大処理量で30分間噴き続けた場合（安

全弁噴出し後、アンモニア貯蔵設備を手動にて安全に停止するまでの時間)とした。送ガスラインの安全弁から放出されたガスは、除害タンクの底部に設置されたリング状配管の小さな穴からバブリングされて貯水中に溶ける。アンモニア送ガスラインの圧力がある一定圧力以上になると、除害タンク循環ポンプが稼働して除害タンク内のアンモニア濃度・温度を均一にするための循環ラインが設置されている。除害タンク内のアンモニア水の濃度(密度)を把握し、所定の濃度以上となったものは産廃処理する。

吸収塔および除害タンクのガス層は、排ガススタックへ接続されており、大気圧となっている。但し、アンモニアが直接大気放出されないようラインは窒素ガスシールとした。万が一、吸収塔または除害タンクで吸収されずにガスが抜け出した場合、排ガススタックの上流に設置したガス検知器が作動して、大量の窒素ガスが流れて希釈される。

除害設備の機器は緊急時設備であり、二重故障は考慮しないものとして全て1基ずつとした。

(4) ユーティリティ設備

ユーティリティ設備には、アンモニア気化器用の温水ヒーターおよび温水循環設備、BOG 処理設備用の冷却塔および冷却水循環設備がある。

アンモニア気化器から出た温水は、ボイラー補助蒸気により温水ヒーター出口で60℃になるように制御され循環される。温水ヒーター内の凝縮水はヒーターチューブ伝熱面を阻害しないように凝縮水レベルが上昇すると、適宜、温水タンクへ排水される。

温水は、温水循環ポンプによりアンモニア気化器と温水ヒーターを一定流量で循環する。温水循環ラインの温度変化による膨張分を吸収するため温水膨張タンクが設置されている。

また、BOG 処理設備2基のそれぞれに対して冷却塔および冷却水循環ポンプが設置されており常時運転される。冷却塔は湿式タイプであり、既設の雑用水から補給される。その他に洗身・洗眼装置を設置する。

3-2-3. アンモニア混焼系統および設備

ボイラー設備として、アンモニア燃焼設備、アンモニア供給設備、制御装置があり、アンモニア混焼設備の主要機器一覧を表7.に示す。また、それぞれの機器仕様を表8.に示す。

表7. アンモニア混焼設備の主要機器一覧

大項目	設備名	数量
アンモニア燃焼設備	①アンモニア混焼バーナー	25 本
アンモニア供給設備	①アンモニア貯蔵設備～アンモニア混焼バーナー配管	1 式
	②調節弁・遮断弁ほか	1 式
制御装置	①制御回路の改造 (APC、AMBS等)	1 式

表 8. アンモニア混焼システムの機器仕様

項目	仕様
アンモニア燃焼設備 ①アンモニア混焼バーナー 本数 微粉炭最大供給量 アンモニア最大供給量	25 本 215 t/h 45 t/h
アンモニア供給設備 ①アンモニア貯蔵設備～アンモニア混焼バーナー配管 ②調整弁・遮断弁ほか	1 式 1 式
制御装置 ①制御回路の改造	1 式

3-2-4. ボイラー設備改造の要否検討

アンモニア混焼時のボイラー性能について、IHI が SIP の中で別途実施した混焼試験および熱流体解析 (CFD) の結果 (参考文献^[1,2,3,4]) を踏まえ、表 9.の要領でボイラー収熱特性、NO_x および灰中未燃分特性、マテリアルバランス (空気・排ガス・燃料) に関する検討を行い、ボイラー設備改造の要否を評価した。

表 9. ボイラー性能評価項目

項目	内容	該当部位
ボイラー収熱特性	アンモニア混焼時の収熱特性の変化を燃焼CFDにて想定した。	ボイラー耐圧部
NO _x 、灰中未燃分	参考文献 ^[4] を踏まえて想定した。	アンモニア混焼バーナー
マテリアルバランス (空気・ガス量・燃料量)	アンモニア20cal.%混焼条件で燃焼計算を行いマテリアルバランスを計算し、空気やガス量などの変化を評価した。	PAF、FDF、IDF、GAH、アンモニア混焼バーナー

以下に、ボイラー各部の設備改造の要否について検討した結果を示す。特に通風機の風量が厳しくなることが想定されたが、アンモニア混焼時においても機器の仕様条件内にある結果となったことから改造は不要とした。

(1) ボイラー耐圧部

混焼試験および CFD 解析の結果、火炉出口ガス温度および各部の収熱は石炭専焼時と殆ど変わらないと想定されることからボイラー本体の改造は不要とした。

(2) 微粉炭バーナー

アンモニア混焼のため、既設の微粉炭バーナーのバーナースロートと同軸にアンモニアを供給して混焼できるようアンモニアノズルの設置が必要になる。各バーナーについて、ボイラーMCR燃料投入量に対して20cal.%のアンモニアを混焼する容量を考慮する必要がある。

(3) 通風機 (PAF、FDF、IDF)

一次通風機 (PAF)、押込通風機 (FDF)、誘引通風機 (IDF) それぞれについて、アンモニア混焼 (ボイラーMCR) 時と石炭専焼時 (仕様条件) の風量を比較した結果、アンモニア混焼 (ボイラーMCR) 時の風量は、仕様条件よりも少ないため通風機の改造は不要とした。

(4) 再生式空気予熱器 (GAH)

アンモニア混焼時には、石炭専焼時と比較して一次空気量が減少するため、GAHにおける排ガスー空気流量バランスが変わることで排ガス出口温度が若干上昇するが GAH 改造は不要とした。

3-2-5. アンモニア混焼のボイラー性能に及ぼす影響

アンモニア 20cal.%混焼によるボイラー性能、運用面への影響を表 10.に示す。

表 10. アンモニア混焼によるボイラー性能、運用面への影響

項目	ボイラー性能に及ぼす影響
熱効率	<p>アンモニア混焼時は燃料中の水素の増加により、排ガス中の水分が増加するため、「燃料中の水素による損失」が増加してボイラー効率が若干低下する。</p> <p>アンモニア気化器の加熱源に補助蒸気を使用することから、プラント効率が若干低下する。</p>
蒸気温度特性	<p>参考文献^[1,2,3,4]での混焼試験及びCFD解析結果より、アンモニア混焼を行ってもボイラー収熱特性は大きく変わらないことから、主蒸気・再熱蒸気温度、蒸気温度制御が石炭専焼時から変わらないと想定した。</p>
環境特性	<p>参考文献^[1,2,3,4]での混焼試験結果より、アンモニア混焼時のボイラー出口NO_x及び未燃分は、石炭専焼時と同等と想定した。</p> <p>アンモニア混焼時は、燃料中のS分や灰分が低下することから、ボイラー出口排ガス中のSO_x及びばいじん濃度は若干低下する。</p>
運用特性	<p>アンモニア混焼における安定燃焼（NO_x増加、残存アンモニア発生抑制など）を確保するため、ミル減台時には、ミル停止前にアンモニア混焼から石炭専焼に切替えてミル操作を行い、ミル増台時には、石炭専焼でミル起動後にアンモニア混焼へ移行することで石炭専焼時と変わらない。</p>
ユニット起動停止	<p>アンモニア混焼における安定燃焼を確保するため、燃料切替えやバーナー一点消火を頻繁に行うユニット起動時にはアンモニア混焼は実施しない。</p>

3-2-6. アンモニア混焼の基本運用方法

(1) 基本運用

アンモニアガスは劇物及び毒物であるため、系外に漏らさないことを基本思想とする。アンモニア混焼の基本運用方法について、石炭専焼からアンモニア混焼およびアンモニア混焼から石炭専焼への切替えは、残存アンモニアの増加防止、NO_x 上昇抑制のために、石炭専焼安定運転時に行う。ユニット起動・停止時およびミル入切替え運転時には当該バーナーのアンモニアガス供給は停止する。

(2) アンモニア混焼開始

アンモニア系統のリークチェック完了後にバーナーにアンモニア注入を開始する（ミル1台分の1段目バーナーにアンモニアを注入してゆく）。1段目のアンモニア 20cal.%混焼が完了後に、2段目のアンモニア 20cal.%混焼を開始する。以降、運転段数分のバーナーのアンモニア混焼を実施する。

(3) アンモニア混焼停止

混焼停止バーナー段のアンモニア注入を段階的に絞り、アンモニア注入を停止したバーナーは窒素でパージする。1段の専焼切替え完了後、次のバーナー段のアンモニアを減じる。すべての段のアンモニア注入が停止後、アンモニアガス母管の窒素パージを行う。

(4) ユニット負荷変化時

同一ミルバンド内での負荷変化では、アンモニアは目標負荷に応じた規定流量制御とする。ミル台数切替え時には起動停止対象ミルのバーナー段のアンモニア混焼開始・停止の手順で起動停止し、石炭専焼状態にした後にミル停止操作を行う。もしくは、ミル起動完了後にアンモニア混焼へ切替える。

(5) アンモニアガス緊急停止

直ちに各バーナーの供給遮断弁を閉じ、残留アンモニアを炉外へパージする。同時に、アンモニアガス母管の窒素パージを行う。

(6) 特殊運転

MFT やランバック発生時には、直ちにアンモニアを遮断し、(5)アンモニアガス緊急停止に準じて窒素パージを行う。

(7) アンモニア混焼率設定

アンモニア混焼率の変更は、バーナー段毎のアンモニア混焼を入切することで調整する。例えば、4段（全段）では 20cal.%混焼となり、3段では 15cal.%混焼となる。

3-2-7. 発電コスト評価

国内石炭火力発電所でアンモニア混焼するには、液体アンモニア船からアンモニアを受入・貯蔵・払出するための設備の新設と、既設ボイラーの微粉炭バーナーの改造が必要になる。

本検討においては、アンモニア 20cal.%混焼を安定的に行うこと、設備の初期投資を最小限に抑えることを前提とした。尚、保全設備および防災設備は対象外とした。アンモニアの受入から混焼までの設備コストを表 11.に示す。

表 11. 設備コスト

設備項目	概要	概算額
受入・貯蔵・払出設備	ローディングアーム、受入配管、貯蔵タンク、ブリージングタンク、アンモニア払出ポンプ、気化器、BOG処理設備、アンモニア除害設備、ユーティリティ設備、電気計装設備等	210 億円
混焼設備	アンモニア混焼バーナー、アンモニア供給系統、制御装置等	40 億円
合計		250 億円

発電コストの試算は、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 発電コスト検証ワーキンググループの「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告（平成 27 年 5 月）」⁵⁾での計算方法、諸元に基づき算出した。

発電コスト試算にあたっては、発電コスト検証ワーキンググループでの試算諸元をベースとし、今回のモデルプラント（600MW、設備利用率 70%）の場合に変更が必要となる項目のみを見直して、石炭専焼、石炭専焼+国内 CCS との発電コスト比較を行った。発電コスト試算の前提条件を表 12.に示す。

CO₂ フリーアンモニア価格は、丸紅㈱検討結果より、日本エネルギー経済研究所が推定している価格（350USD/t 程度）に納まる可能性があると見込まれていることから、本検討での発電コスト試算における CO₂ フリーアンモニア価格は 350USD/t として、これに為替レート 110.4 円/USD（2018 年平均、日銀）を乗じて算出し 38,600 円/t とした。

国内 CO₂ 費用は、各種文献等にある平均値 10,000 円/t・CO₂ として発電コストを算出した。

表 12. 発電コスト試算の前提条件

項目		石炭 専焼	CO ₂ フリー-NH ₃ 20%混焼	石炭専焼 +国内CCS
為替レート		110.4円/\$		
モデルプラント規模（出力）		600MW		
設備利用率、稼働年数		70%、40年		
資本費	建設費	25万円/kW		
	混焼設備設置費用	—	250億円	—
	設備の廃棄費用	建設費の5%		
運転 維持費	直接費	人件費	3.6億円/年	
		修繕費	建設費の1.8%	
		諸費	建設費の1.5%	
	一般管理費	直接費の14.3%		
燃料費	燃料単価 （石炭）	7,800円/t ^[6]		
	燃料単価 （アンモニア）	—	38,600円/t	—
	燃料発熱量(HHV) （石炭）	25.97MJ/kg		
	発熱量(HHV) （アンモニア）	—	22.40MJ/kg	—
	熱効率(HHV)	42%		
	所内率	6.4%		
社会的費用		環境対策費用（CO ₂ 対策費用）、政策経費		
国内CCS費用		—	—	10,000円/t-CO ₂ ^[7,8,9]

CO₂フリーアンモニア 20cal.%混焼の試算結果について、石炭専焼、石炭専焼+国内CCSの試算結果と比較して図 4.に示す。

CO₂フリーアンモニア混焼の発電コストは 12.9 円/kWh と試算した。但し、発電コストには、社会的費用として CO₂ 対策費用および政策経費を含む。

アンモニア混焼の発電コストについて、丸紅(株)におけるカタール産の CO₂フリーアンモニア価格は、日本エネルギー経済研究所が推定した 350USD/t 程度に収まる可能性があるとの検討結果が得られており、若干のアンモニア価格低減が見込まれるが、それを考慮してもまだ十分でない状況にある。

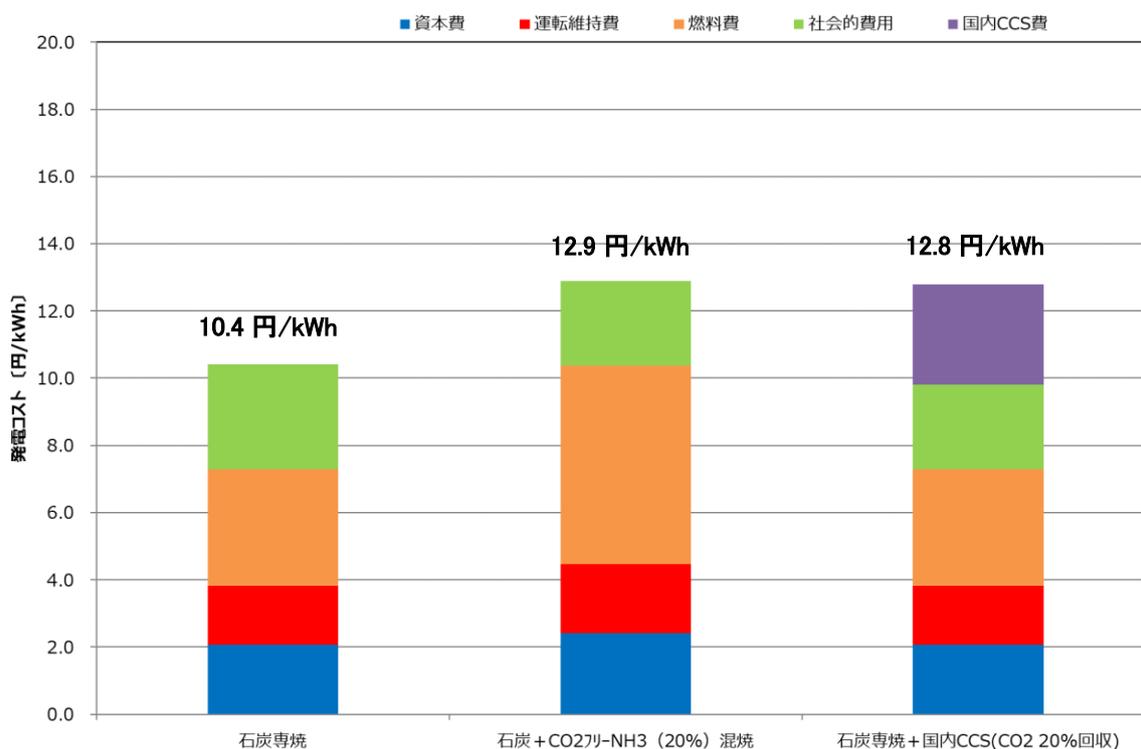


図 4. CO₂ フリーアンモニア混焼の発電コスト比較

3-3. まとめ

(1) アンモニア受入・貯蔵・払出設備

国内石炭火力発電所への新設が必要となる CO₂ フリーアンモニアの受入・貯蔵・払出設備について、技術的・運用上の課題を検討して設備仕様や設備系統を決定した。また、発電所構内での設備レイアウトを検討した。

(2) アンモニア混焼設備

アンモニア混焼に伴う設備改造範囲を検討した結果、既設のボイラー本体・通風機・空気予熱器の改造は不要であった。一方、アンモニア供給設備の新設と既設の微粉炭バーナー改造が必要になる。

また、アンモニア混焼に係る課題抽出を行った。今後は多段バーナーでの長期的な安定燃焼に係る検証が必要である。

(3) 発電コスト評価

アンモニア混焼の発電コストを試算して石炭専焼や石炭専焼+国内 CCS と比較した。アンモニア混焼の実現に向けて、更なる発電コスト低減のためにはアンモニア価格を含むトータルコストの低減が必要である。

3-4. 今後の課題

既設石炭火力発電所におけるCO₂フリーアンモニア混焼の課題を表13.に示す。

表 13. CO₂フリーアンモニア混焼の課題

項目	課題内容
アンモニア混焼	・多段バーナーでの長期的な安定燃焼に係る検証 ・負荷変化時の運用性検証
設置スペース縮小	・貯蔵タンク設置面積をより縮小する場合、防液堤設置スペースが不要となるPCタンク適用のための技術開発
経済性	・アンモニア価格の低減 ・貯蔵・気化・払出設備コスト低減 ・アンモニア混焼に係るCO ₂ 削減に対するインセンティブの付与

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 0件

<査読なし(総説等含む)> 0件

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内0件、海外0件

<口頭発表> 国内0件、海外0件

<ポスター発表> 国内0件、海外0件

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内0件、海外0件

(3) プレス発表

なし。

(4) マスメディア等取材による公表

なし。

5. 特許出願実績

なし。

6. 参考文献

- [1] 伊藤 隆政、「石炭火力発電を対象とした微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の開発」、平成 30 年度火力原子力発電大会（関西大会）、平成 30 年 10 月 25 日、グランキューブ大阪
- [2] 張 聚偉 et al. 「10MWth 級燃焼装置における微粉炭・アンモニア混焼の数値解析研究」、第 56 回日本燃焼シンポジウム、大阪、2018 年 11 月 14-16 日
- [3] 石原 咲子 et al. 「アンモニア-石炭混焼ボイラの運転条件が排出ガス組成に与える影響」、第 56 回日本燃焼シンポジウム、大阪、2018 年 11 月 14-16 日
- [4] 石井 大樹 et al. 「排ガス NO_x 生成を抑制する微粉炭/アンモニア混焼方法」、2018 年、第 23 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集
- [5] 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 発電コスト検討ワーキング「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の件承認関する報告（平成 27 年 5 月）」
- [6] 経済産業省 資源エネルギー庁「平成 29 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2018）」
- [7] 環境省「平成 26 年度環境配慮型 CCS 導入検討事業委託業務報告書」
- [8] 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「CCS（二酸化炭素回収貯留）の概要と展望（Vol.2）」、平成 29 年 3 月
- [9] エネルギー総合工学研究所「季報 エネルギー総合工学（Vol.36 No.2,2013.7）」