

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「アンモニア直接燃焼」

研究題目「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と

社会実装に向けた課題の抽出」

研究開発期間：平成 29 年 4 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

研究担当者： 藤森 俊郎

所属研究機関：株式会社 IHI

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. 大容量燃焼試験	2
3-2. 数値解析を用いたボイラ性能評価	16
3-3. 大型発電用石炭焚きボイラを対象とした Feasible Study	25
3-4. アンモニア貯蔵設備を対象とした Feasible Study	32
3-5. まとめ	39
3-6. 今後の課題	39
4. 外部発表実績	40
5. 特許出願実績	41
6. 参考文献	41

図表一覧

図 1 プロジェクトの概要図	1
図 2 大容量燃焼試験設備の主系統図	4
図 3 大容量燃焼試験で用いたバーナの拡大図	4
図 4 大容量燃焼試験設備の計測窓の位置 (左側壁)	4
図 5 大容量燃焼試験で設置したアンモニア供給設備	5
図 6 大容量燃焼試験の計測結果: 排ガス組成計測結果の一例	7
図 7 大容量燃焼試験の計測結果: 火炎の様子(一例)	8
図 8 大容量燃焼試験の計測結果: 放射温度計を用いた火炎温度	8
図 9 大容量燃焼試験の計測結果: NO _x と灰中未燃分	9
図 10 大容量燃焼試験の計測結果: アンモニアノズル先端位置と NO _x の関係	10
図 11 大容量燃焼試験の計測結果: 投入熱量と NO _x の関係	11
図 12 大容量燃焼試験の計測結果: 炭種 (窒素含有量) の影響	12
図 13 大容量燃焼試験: 熱流束センサの構成	13
図 14 大容量燃焼試験: 熱流束センサの検知部近傍の拡大図	13
図 15 大容量燃焼試験の計測結果: 熱流束計測結果の一例	14
図 16 大容量燃焼試験: 熱流束計測装置と計測時の様子	14
図 17 大容量燃焼試験の計測結果: 熱流束の高さ方向の分布	15
図 18 大容量燃焼試験の計測結果: 熱流束の等高線	15
図 19 1次元リアクタネットワーク	17
図 20 1次元リアクタネットワーク Exit における排ガス組成	18

図 21	大容量燃焼試験を対象とした三次元熱流体解析のジオメトリ	18
図 22	大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果：石炭専焼とアンモニア混焼の温度分布 ...	20
図 23	大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果：石炭粒子とガスの輻射強度の分布	20
図 24	大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果：NO 濃度の分布	21
図 25	発電量 1000MW ボイラを対象とした三次元熱流体解析のジオメトリ	21
図 26	発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内のガス温度分布	22
図 27	発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内の CO ₂ 濃度分布	23
図 28	発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内の H ₂ O 濃度分布	23
図 29	発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：熱流束の分布	24
図 30	発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内ガスの輻射強度	24
図 31	発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内の粒子の輻射強度	25
図 32	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：ボイラ効率	27
図 33	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：燃料消費量	27
図 34	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：燃焼空気量@MCR	28
図 35	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：排ガス量@MCR	28
図 36	石炭焚きボイラシステムの一般的な系統構成	29
図 37	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：アンモニアガス系統の概略図	31
図 38	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：主要プロセスフロー	33
図 39	水分量 0.5mol.%を含むアンモニアの沸点および露点	35
図 40	大気圧におけるアンモニア-水混合物の沸点および露点	35
図 41	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：応用ケースの系統図	36
図 42	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：アンモニア貯蔵設備の配置(陸上部)	37
表 1	大容量燃焼試験設備の仕様	3
表 2	大容量燃焼試験の基本条件	5
表 3	大容量燃焼試験で用いた石炭およびアンモニアの組成	6
表 4	大容量燃焼試験の計測項目、計測場所および計測方法	6
表 5	大容量燃焼試験を対象とした三次元熱流体解析における計算条件	19
表 6	大容量燃焼試験を対象とした三次元熱流体解析における代表的な解析結果	19
表 7	発電量 1000MW ボイラを対象とした三次元熱流体解析の石炭性状	22
表 8	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の主要条件	26
表 9	発電量 1000MW ボイラを対象とした FS で用いた燃料の発熱量	26
表 10	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の主要条件	32
表 11	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の主要設備および機器の構成条件	33
表 12	貯蔵タンクの候補と特徴	34
表 13	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：アンモニア気化熱源の候補	36
表 14	アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：タービン効率への影響	36
表 15	アンモニア設備に関する災害事例	38

1. 本研究の目的

本研究は、石炭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燃料として活用するため、微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の開発を行なう。

石炭火力発電に微粉炭/アンモニア混合燃焼を適応する際の技術課題は主に 2 つある。一つは、アンモニアの燃焼に伴う NO_x の発生であり、もう一つは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である。本研究では、これらの懸念に対する程度を明らかにし、その対策およびその必要性を検討する。

また従来、石炭火力発電所においてアンモニアは NO_x の還元剤として扱われてきたが、本研究ではアンモニアを燃料として扱うため、石炭火力発電所にあらかじめアンモニアの貯蔵および供給設備を必要とする。本件ではこれらの Feasible study を合わせて行い、微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の社会実装に向けた課題を検討する。本研究の目的を達成するため、本研究では主に 4 つの実施項目を設定した。その概要を図 1 に示す。また、各項目の目標を次項に記す。

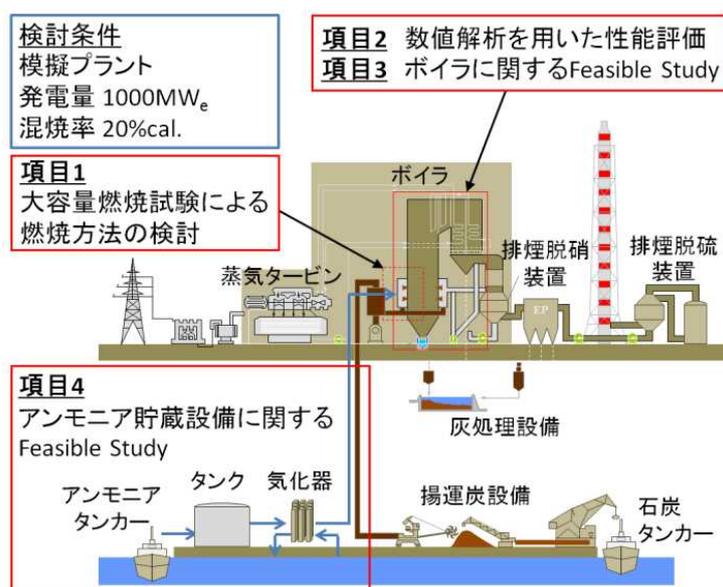


図 1 プロジェクトの概要図

2. 研究開発目標とマイルストーン

図 1 に記す 4 つの実施項目に関する研究開発目標は次の通り。

大容量燃焼試験

本項目では、アンモニア混焼率 20% の条件下で、NO_x 濃度を従来の石炭専焼と同程度の 200ppm (酸素濃度 6% 換算) に抑制する微粉炭/アンモニア混合燃焼技術を開発する。

数値解析を用いたボイラ性能評価

本項目では、数値解析を用いて NO_x を抑制するアンモニア供給方法を検討し、上記の大容量燃焼試

験へ反映する。また同様のアンモニア供給方法を大型発電用ボイラへ適応した場合のボイラ性能を評価し、ボイラ性能に関する微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の課題を抽出する。

大型発電用石炭焚きボイラを対象とした Feasible Study

上記、2 項目の成果および一般的な石炭専焼用の設備仕様をもとに、従来の石炭専焼用の設備をアンモニア混合燃焼へ流用する可能性、または追設、改造の必要性を評価し微粉炭/アンモニア混合燃焼を実装するための課題を抽出する。

アンモニア貯蔵設備を対象とした Feasible Study

アンモニアを燃料として石炭火力発電所の敷地内に貯蔵し、気化させてボイラへ供給するために必要な設備の仕様を検討し、微粉炭/アンモニア混合燃焼を実装する上でアンモニア貯蔵設備に関する課題を抽出する。

全体のマイルストーン

以下に本研究全体のマイルストーンを記す。

- 4 年度 (H30.3) : 大容量微粉炭/アンモニア燃焼試験のためのアンモニア供給設備の導入と混焼技術の検討、ならびにアンモニア貯蔵設備の基本設備仕様の検討。
- 5 年度 (H31.3) : アンモニア混焼装置の開発とボイラ混焼設備追設案の確立。

3. 研究実施内容

以下に各実施項目に対する実施内容を記す。

3-1. 大容量燃焼試験:

3-1-1. 目的と成果概要

アンモニアは石炭に比べて窒素含有量が多いため、排ガス中の NOx が上昇する懸念がある。本項目ではアンモニア混焼率 20% の条件下で、安定した燃焼と NOx 濃度 200ppm (酸素濃度 6%換算) を両立する微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の開発を主目的として、弊社相生事業所 D&D パークの Coal Firing Test Facility (以下、CFT という) で大容量燃焼試験を実施した。後述する数値解析から導かれたアンモニア供給方法をもとに、アンモニアを石炭専焼バーナの中心軸から供給することで、アンモニア混焼下で安定した火炎を保持しながら、NOx を石炭専焼と同程度の 200ppm (酸素濃度 6%換算) に抑制できる技術を確立した。また、限定的ではあるが低負荷運転、炭種の影響などについても評価を行ない、NOx、灰中未燃分について従来の石炭専焼とほぼ同程度であることを確認した。このことから、微粉炭/アンモニア混合燃焼を社会実装する上で、石炭火力発電所の既存の脱硝設備に大きな追設の必要性は低いことが分かった。今後は、本研究では評価出来なかった灰付着の影響や、他炭種の影響を引き続き評価していく必要である。また、CO₂ 排出削減効果や、ボイラ運用の利便性の向上などを考えると、今後は更に高い混焼率での検討が必要と考える。

評価項目：火炎の安定性、排ガス組成

運転条件（基本）：アンモニア混焼率 20%（低位発熱量ベース）

二段燃焼率 30%

空気比 1.2

3-1-2. 大容量燃焼試験の設備/アンモニア供給設備の導入

本試験は弊社相生工場 D&D パークにある Coal Firing Test Facility（以下、CFT という）を用いて実施した。この設備の仕様を表 1 に記す。また、燃料・空気の主系統を図 2 に示す。本設備はスワール型のバーナが炉の前壁に 1 本配置されている。投入熱量は最大で 12 MW まで可能であるが、本試験では石炭専焼時、アンモニア混焼時ともに 10 MW を基本条件とした。石炭は一度、粉砕機で粉砕され、貯炭瓶に貯蔵される。条件に応じて必要な量を一次空気と呼ばれる搬送空気ですバーナへ搬送する。燃焼に必要な主空気は二次空気と呼ばれ、事前に排ガスで予熱され炉に供給される。二次空気の一部は直接バーナに供給されるが、その 2 割から 4 割は炉の下流（炉の上部）へ供給する。これは、二段燃焼という技術で、意図的にバーナ近傍を還元雰囲気にするすることで NO_x の生成を抑制する燃焼方法である。

バーナ部の拡大図を図 3 に示す。通常、このスワール型のバーナは火炎がスロート近傍に形成される。空気の流量、燃料の燃焼性などの影響から、スロートから火炎までの距離が長くなる場合は、主空気流路に配されているベーンの開度を調整し、空気の旋回強度を調整することで火炎を適切な位置に調整することが可能である。この炉は左側の壁（以後、左側壁という。）に複数の計測窓が配されており、必要に応じて火炎の観察、計測プローブの挿入などが出来る。図 4 に計測窓の位置を示す。本研究では、図 4 の黄色の点を対象に熱流束を計測した。

今回のアンモニア供給方法は、後述の数値解析をもとに検討した。出来るだけ既存設備に存在する既存のポートを利用することで、社会実装に向けた改造にかかる負担を軽減することを意図した。

表 1 大容量燃焼試験設備の仕様

火炉	前面燃焼水冷炉（幅3 m×奥行4.5 m×高さ7 m）
バーナ	IHI-DFバーナ，単一
燃料量	石炭 1.0～1.6 t/h、アンモニア 0.38 t/h（新設）
投入熱量	12 MW（本研究は10MWを基本とした。）

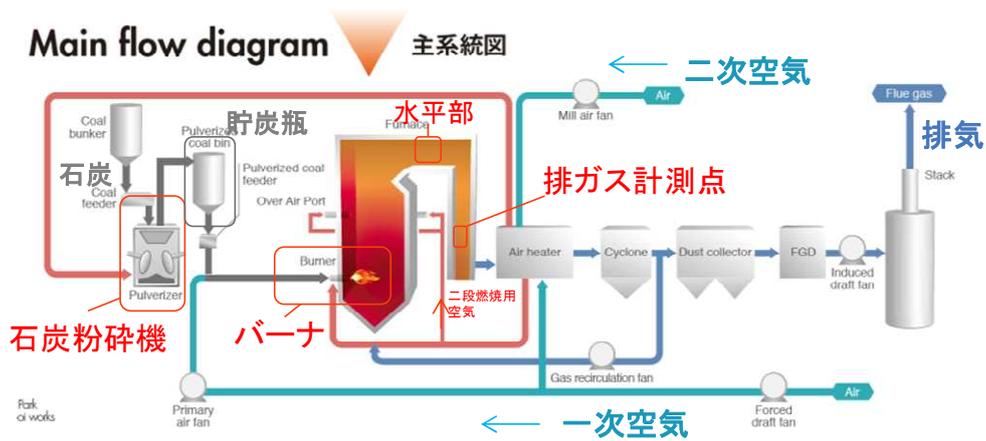


図 2 大容量燃焼試験設備の主系統図

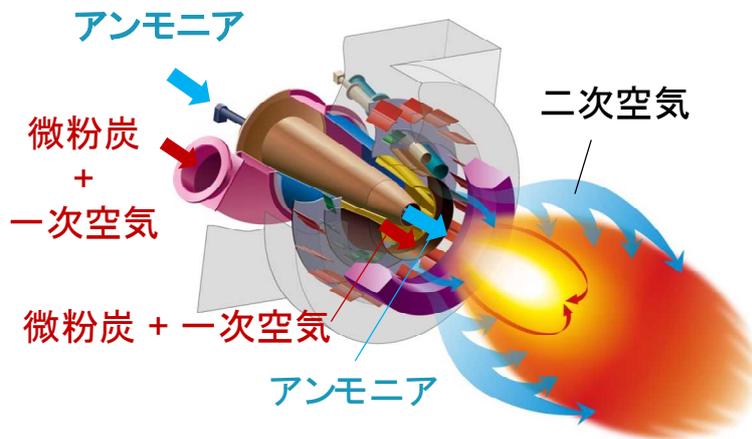


図 3 大容量燃焼試験で用いたバーナの拡大図

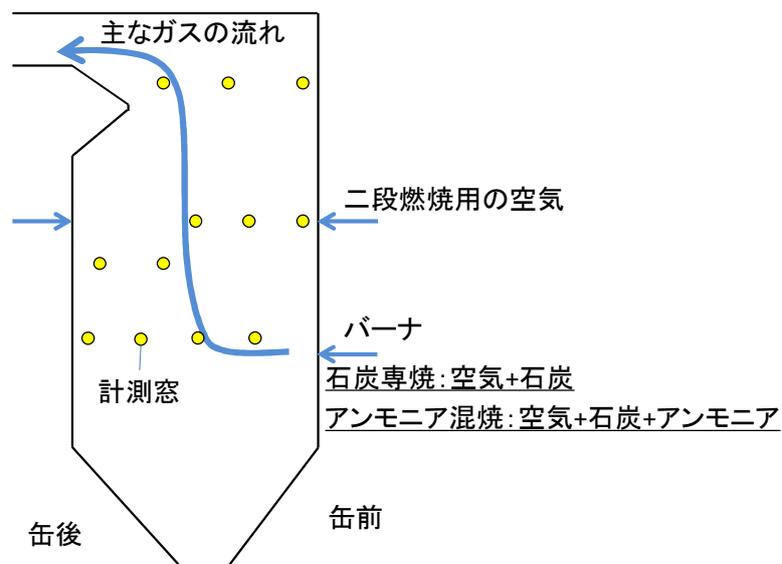


図 4 大容量燃焼試験設備の計測窓の位置 (左側壁)

この試験ではアンモニア混合燃焼を実施する上で、新たにアンモニア供給設備を設置した。設備の様子を図 5 に示す。この設備はアンモニアタンク (0.5ton/本) を 4 本、合計 2.0ton 設置できる。タンク内の液体アンモニアは二機の蒸発器を経て 75℃、0.15MPa ゲージに気化され、最大 0.38ton/hour で約 5 時間の連続供給が可能である。この流量は、今回の大容量燃焼試験 (投入熱量 10MW) において混合率 20% (発熱量ベース) を達成する仕様になっている。



アンモニア供給設備

アンモニア貯蔵量
2.0 ton
(0.5 ton/本 × 4本)

蒸発器

アンモニア処理能力
最大 200kg/hr × 2機
気化熱源 温水75℃

制御盤

図 5 大容量燃焼試験で設置したアンモニア供給設備

(アンモニア供給速度 最大 0.38ton/hour、供給圧力 0.15MPaG、供給温度 75℃)

3-1-3. 試験条件および計測項目

次に、試験条件を述べる。本研究では主に 2 種の試験を行なった。一つは投入熱量を一定にして、空気比や二段燃焼率の影響を検討する試験である。もう一つは、投入熱量および炭種の影響を評価する試験である。それぞれの試験条件を表 2 に示す。この試験ではアンモニアの混焼率は条件に関係なく常に LHV ベースで 20%とした。試験で使用した石炭およびアンモニアの組成を表 3 に示す。使用した石炭の燃料比(固定炭素/揮発分の重量比[-])は 1.16 から 1.70 までの瀝青炭である。計測項目と計測場所および計測方法を表 4 に示す。排ガスに関する計測場所は主に図 2 に示す排ガス計測点であるが、アンモニアに関しては重ねて煙突入口でレーザー法による連続計測を実施し、設備外へアンモニアが排気しないよう配慮した。火炎の観察および熱流束は図 4 に示す計測窓を利用して実施した。

表 2 大容量燃焼試験の基本条件

項目	ベース条件	低負荷条件
投入熱量	10 MW	6~10MW
空気比	1.2	1.1~1.7
二段燃焼率	0.3	0.2~0.4

表 3 大容量燃焼試験で用いた石炭およびアンモニアの組成

		項目	単位		石炭 (ベース)	石炭A	石炭B	NH ₃
工業分析	発熱量	MJ/kg	無水		27.5	29.0	29.1	18.5
	水分	wt %	気乾		2.2	2.2	2.0	
	固定炭素	wt %	無水		52.0	56.2	48.1	
	揮発分	wt %	無水		36.0	33.0	41.6	
	灰分	wt %	無水		12.0	10.8	10.3	
	燃料比	-	-		1.44	1.70	1.16	
元素分析	炭素	wt %	無水		71.2	71.1	69.7	
	水素	wt %	無水		4.5	4.6	5.3	
	窒素	wt %	無水		1.7	1.4	1.1	
	酸素	wt %	無水		10.3	11.7	13.2	
	全硫黄	wt %	無水		0.3	0.4	0.5	

表 4 大容量燃焼試験の計測項目、計測場所および計測方法

計測項目	計測場所	計測方法
排ガス 5 成分 NO _x , SO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂	図 2 の排ガス計測点	型番 : PG-250A、メーカー : 堀場製作所 計測レンジ備考 : NH ₃ 燃焼時に使用。
NH ₃		JIS K 0099 による (検出下限 0.2 ppm)
N ₂ O		GC 電子捕獲検出方式 (検出下限 5 ppm)
灰中未燃分割合		JIS M 8815 による
NH ₃	煙突入口	レーザー計による赤外線単線吸収分光法 型式 : LaserGas Version II メーカー : NEO Monitors AS
火炎の観察	図 4 の観察窓	PENTAX Optio W80
炉内ガス温度		CHINO 社製単波長温度計 型番 : IR-AH1S
熱流束		IHI 製作のオリジナル計測器
スペクトル計測		浜松ホトニクス社製 マルチチャンネル分光器 PMA-12

図 6 に排ガス計測結果の一例を示す。石炭およびアンモニアの供給および火炎が安定しているため、排ガス組成も安定していることが分かる。アンモニア混焼により CO₂濃度が減少していること、また懸念されていた未燃のアンモニアが設備の外へ放出されることもなく、煙突入口で常に 1ppm 以下であることが確認された。

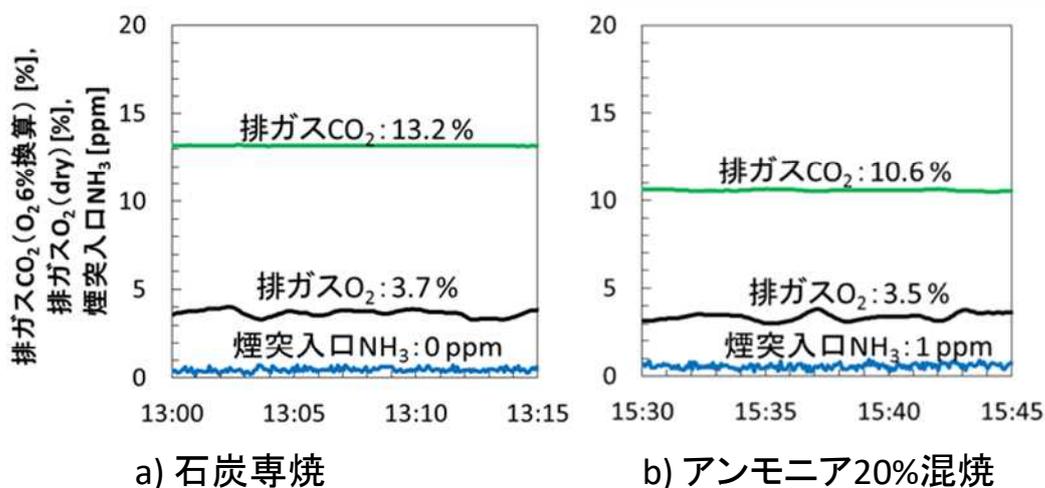


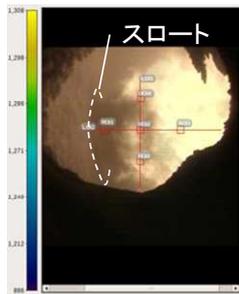
図 6 大容量燃焼試験の計測結果：排ガス組成計測結果の一例

3-1-4. 大容量燃焼試験の結果

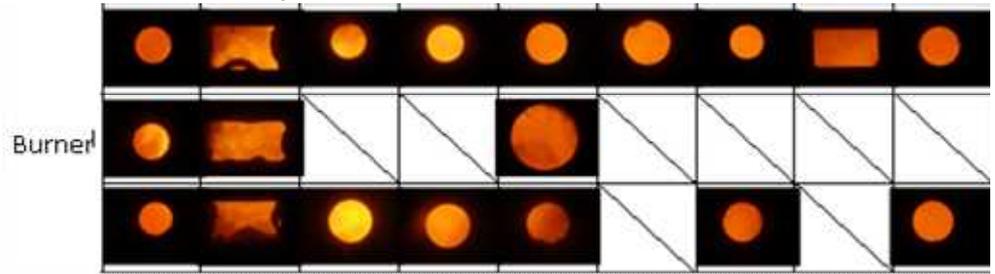
3-1-4-1. 代表的な結果について

ここでは、全計測を通じて確認されたアンモニア混合燃焼の代表的な特徴について述べる。図 7 にバーナ近傍の計測窓から撮影した火炎の様子を示す。石炭専焼と比べてアンモニア混焼の火炎はスロートから少し下流へ移動していることが観察された。これは、先述したようにアンモニアをバーナ中心から供給したためと考えられる。従来、石炭専焼では火炎はスロート近傍に存在していることが望ましいとされている。このように火炎がスロートから離れた場合、図 3 に示すスワール型のバーナでは二次空気流路に配されているベーンの開度を調整することでガス旋回流の強弱を調整し、火炎の位置をスロート近傍へ調整する。実際に、今回の試験においてもこの調整により容易に調節が可能であった。これ以降、本項目で示す試験結果は、その都度ベーンの開度を調整し火炎をスロート近傍で安定させた状態の計測値を示す。

石炭専焼



流れ方向 →



アンモニア混焼

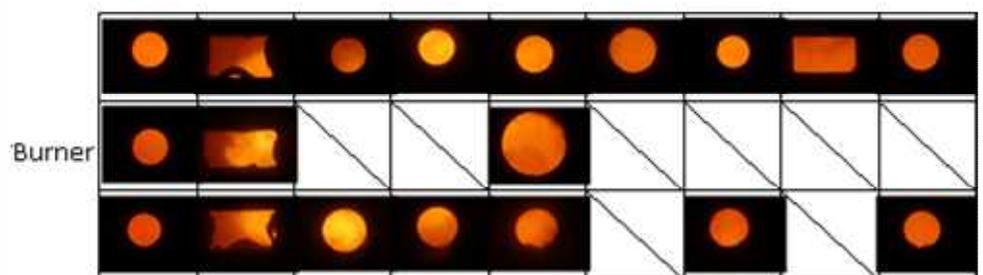
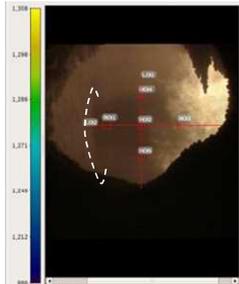


図 7 大容量燃焼試験の計測結果：火炎の様子(一例)

次に炉内温度を放射温度計を用いて計測した結果を図 8 に示す。これは図 7 の上段の覗き窓から Chino の単波長温度計 (IR-AH1S) を用いて計測を行なった結果である。空気比や二段燃焼率によって若干の変化はあるが、概ねアンモニア混焼時の温度が石炭専焼時を超えることは無かった。アンモニアはもともと石炭に比べて断熱火炎温度が低いため、実現象においてもアンモニア混焼時の火炎温度は石炭専焼に比べて低下することが予想されていた。図 8 の計測値は、この予想に沿った結果となっている。

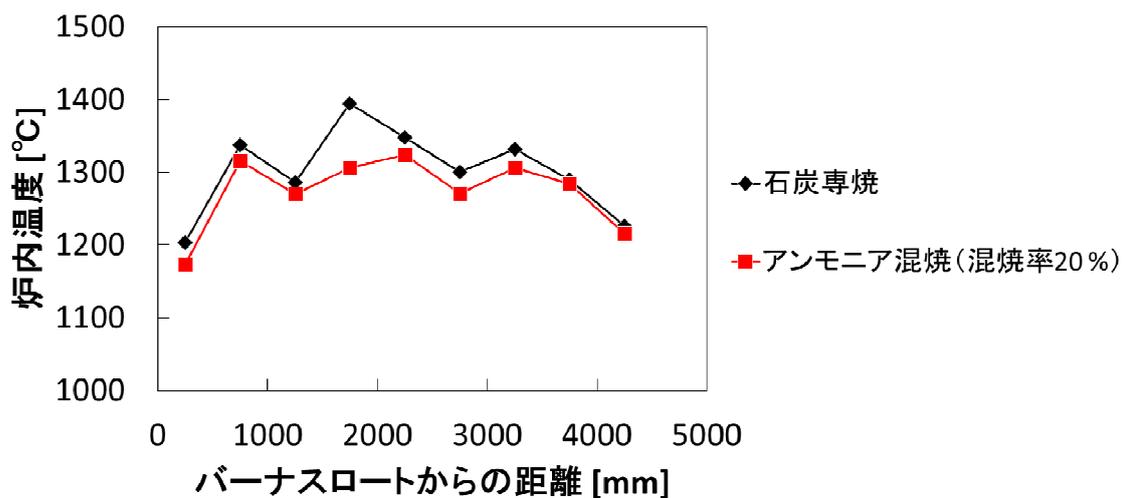


図 8 大容量燃焼試験の計測結果：放射温度計を用いた火炎温度
(空気比 1.20、二段燃焼率 0.3 の場合)

図 9 に排ガス計測点の NO_x 濃度と灰中未燃分の代表的な結果を示す。この図は石炭焼きボイラの運転条件を検討する上で主要なパラメータである空気比と二段燃焼率についてまとめている。一般的に石炭専焼では、空気比が上昇するにつれて NO_x 濃度が上昇する。これはバーナレベルの酸素量が増加することで火炎温度が上がり、石炭に含まれる窒素分が酸化されるためである。一方で、二段燃焼率を増加させていくと、NO_x 濃度は低下する。これはバーナ近傍の酸素量が減少し石炭由来の窒素分が N₂ まで還元されるためである。そのため灰中未燃分は逆に増加する傾向にある。このように一般的に NO_x と灰中未燃分はトレードオフの関係にある。

図 9 を見ると、アンモニア混焼における NO_x および灰中未燃分の傾向は、上記で述べた石炭専焼の傾向を踏襲している。その絶対値を比較すると、NO_x においては、ほぼ全条件下で石炭専焼よりもアンモニア混焼の方が低い値を示しており、当初目標としていた 200ppm（酸素濃度 6%換算）以下に抑制できることが確認された。また灰中未燃分においては、石炭専焼とほぼ同程度の値を有している。

微粉炭/アンモニア混焼下で NO_x の発生が抑制できた要因としては、強い還元雰囲気アンモニアを供給することでアンモニアが NO_x に転換する量を抑制できたためと考える。また、アンモニアは本来 NO_x を還元する作用も持っているため、NO_x を還元する可能性も高い。加えて、今回の計測からアンモニア混合燃焼下ではガス温度が低いことが分かったため、Thermal NO を抑制していることも期待される。加えて、今回のような二段燃焼を実施した場合、バーナ近傍の領域では強い還元領域となっており、そこでアンモニアの熱分解が促進されている可能性もある。結果として、今回の試験結果のような広い運転領域で石炭専焼に比べてアンモニア混焼の方が低い NO_x 濃度を示したことが推測される。今後、これらの要因を定量的に比較・評価するため、引き続き産学の連携を取りながら数値解析や基礎試験を取り入れた検討が必要となる。

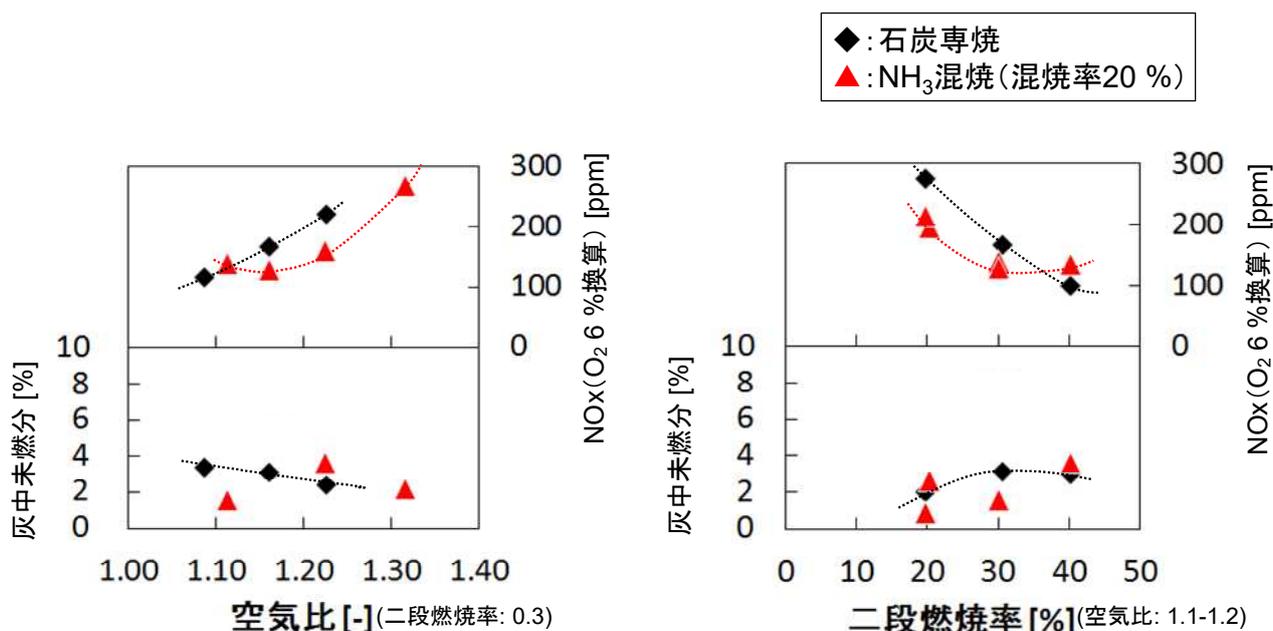


図 9 大容量燃焼試験の計測結果：NO_x と灰中未燃分

3-1-4-2. 微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の詳細な検討について

上記までにアンモニア混焼下においてNO_xを石炭専焼と同程度に抑制できることを確認した。さらに詳細なパラメータを検討するため主に以下の3つのパラメータについて検討した。

- ・項目1 アンモニア供給ノズル位置がNO_x濃度へ与える影響
- ・項目2 投入熱量がNO_x濃度へ与える影響
- ・項目3 炭種がNO_x濃度へ与える影響

アンモニア供給ノズル位置がNO_x濃度へ与える影響

アンモニア供給ノズルの位置は、アンモニアが火炎に到達するまでに空気と混合する滞留時間に影響を与えるため、NO_xの生成量に大きく影響を与える可能性がある。本項ではアンモニアノズルの位置がNO_x生成に与える影響を評価した。図10に示すAからEの5点を比較した。なお、前項までに示した結果は、図10の位置Bにアンモニアノズルの先端を設置して得られた結果である。

試験の結果から、位置AとEではアンモニア混焼時のNO_xは石炭専焼時よりも高い値を示した。この理由として位置Aは火炎までの距離が長くなるため、アンモニアと空気の混合が促進することでより多くのNO_xが生成していることが予想される。位置EにおけるNO_xの増加要因は不明であるが、あまり炉内にノズルを近づけすぎると、未燃のアンモニアが炉壁に衝突している危険があるため注意が必要である。今回の試験で検討した5つの位置はNO_x濃度に若干の影響を与えるが、いずれも脱硝設備の拡張を必要とするほどの影響は無いことが分かった。今後は、数値解析を用いて炉内環境の把握に務めながら引き続きアンモニアノズルの最適な位置を検討していく。

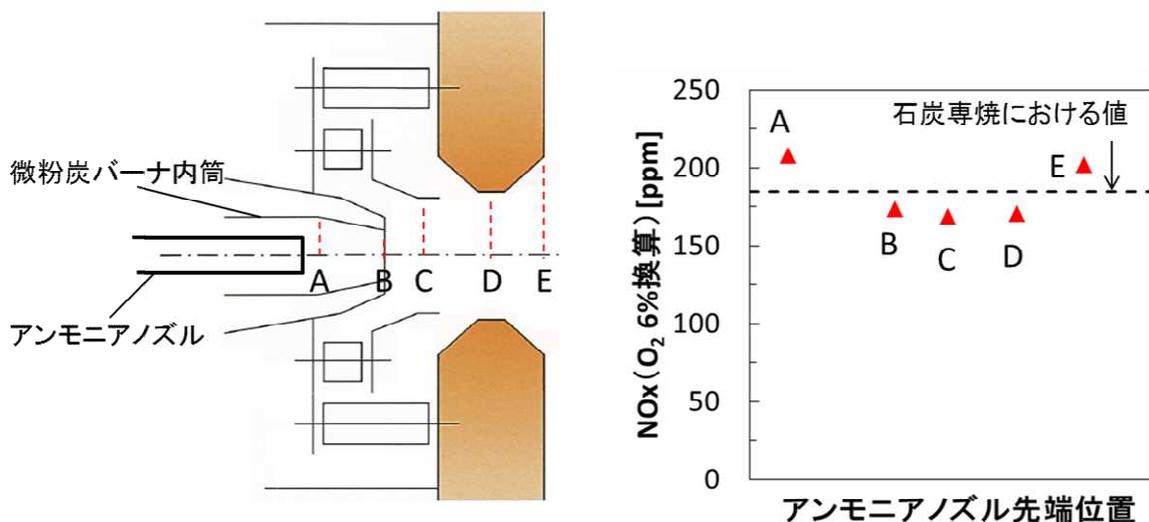


図10 大容量燃焼試験の計測結果：アンモニアノズル先端位置とNO_xの関係

投入熱量が NOx 濃度へ与える影響

投入熱量を低下させる場合、炉内温度の低下にともなう火炎の不安定性、またガス流速の低下にともなうダクト内の逆火の危険などが懸念事項としてあげられる。これらの懸念を補うため、投入熱量を低下させる際には空気比を増加させる。石炭専焼の場合、この対策によって NOx 濃度が僅かに上昇するのが一般的だが、この対策をそのままアンモニア混焼に適応した場合に、急激に NOx が上昇することが懸念される。本項ではこの懸念を確認するため、投入熱量の低下が NOx 濃度へ与える影響を評価した。その結果を図 11 に示す。

図 11 では投入熱量の低下に伴い NOx 値が増加していることが分かる。アンモニア混焼において、その増加の傾向は従来の石炭専焼と同程度であり、上記で懸念していたような急激に石炭専焼を上回るような傾向は確認されなかった。このことから、アンモニア混焼下においても従来の石炭専焼と同程度の空気比を適応しながら投入熱量を低下できる可能性が示唆された。

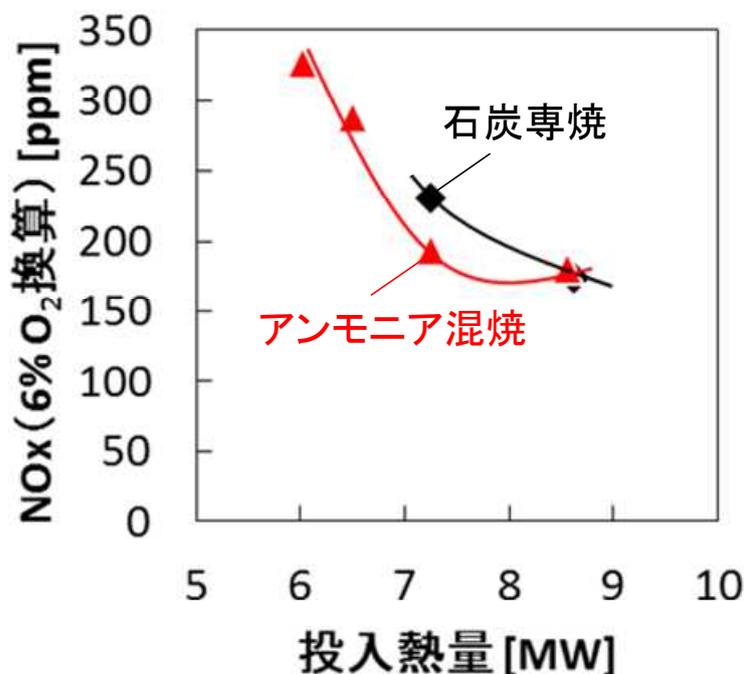


図 11 大容量燃焼試験の計測結果：投入熱量と NOx の関係

炭種が NOx 濃度へ与える影響

石炭専焼では、もともと石炭に含まれる窒素分の量が排ガスの NOx 濃度に大きく影響を与えることが知られている。アンモニア混焼の場合、燃料全体に含まれる窒素分のほとんどはアンモニア由来であるため、石炭に含まれる窒素分の影響は小さいことが予想される。ここではアンモニア混焼下において石炭中の窒素分が NOx 濃度へ与える影響について検討したので報告する。図 12 に試験結果から得られた NOx の値を示す。使用した炭種は表 3 の炭種 A と B である。なお、設備の都合上、投入熱量は 7.0MW 程度と従来の基本条件よりも低い値となっている。

石炭専焼の場合、上述のとおり石炭中の窒素含有量の増加に伴い、NOx の値が増加する傾向が見られた。一方、アンモニア混焼の場合は、その勾配は石炭専焼ほど高くないことが分かる。これは、先に述べたとおり窒素の発生源のほとんどがアンモニアであるため、石炭の初期の窒素含有量が NOx 濃度へ

与える影響が小さくなっていると考えられる。炭種の影響に関しては、上記の結果をさらに汎用的させるため、引き続き他炭種を対象とした評価が必要である。

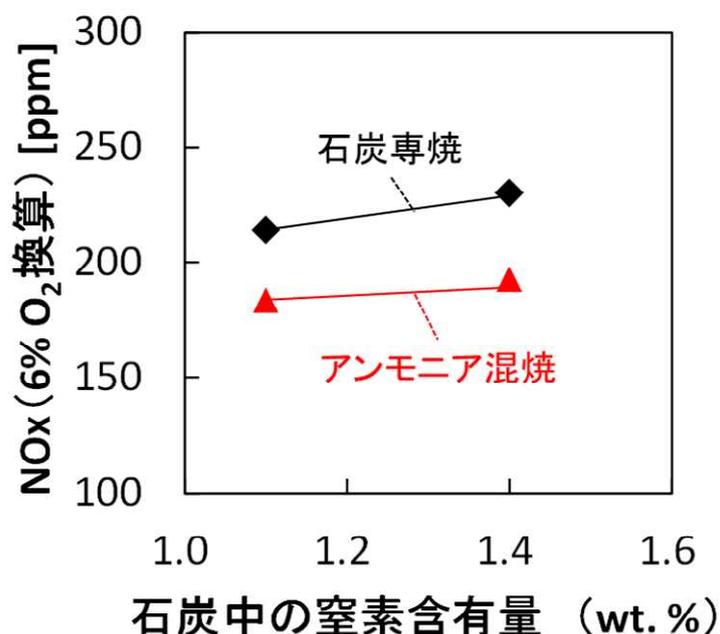


図 12 大容量燃焼試験の計測結果：炭種（窒素含有量）の影響
（二段燃焼率 30%、燃料比 7.0MW 前後）

3-1-4-3. 収熱量の評価

本項では、上記の試験の中で燃焼試験設備の側壁から計測した熱流束について述べる。まず、図 13 に本計測のために製作した熱流束センサの構成を示す。センサは①センサ本体、②熱流束の検知部および検知部以外からの入熱を防ぐための③輻射シールドから構成されている。図 14 に検知部近傍の拡大図を示す。輻射シールドと本体の間には灰粒子の付着を防ぐためシールガスが流れる隙間が設けられている。図 15 に計測結果の一例を示す。計測開始から約 3 分程度で検知部の温度が静定する。本項では、この温度が静定した状態の電圧出力値を熱流束値に換算している。参考までに、計測している様子を図 16 に計測の様子を示す。

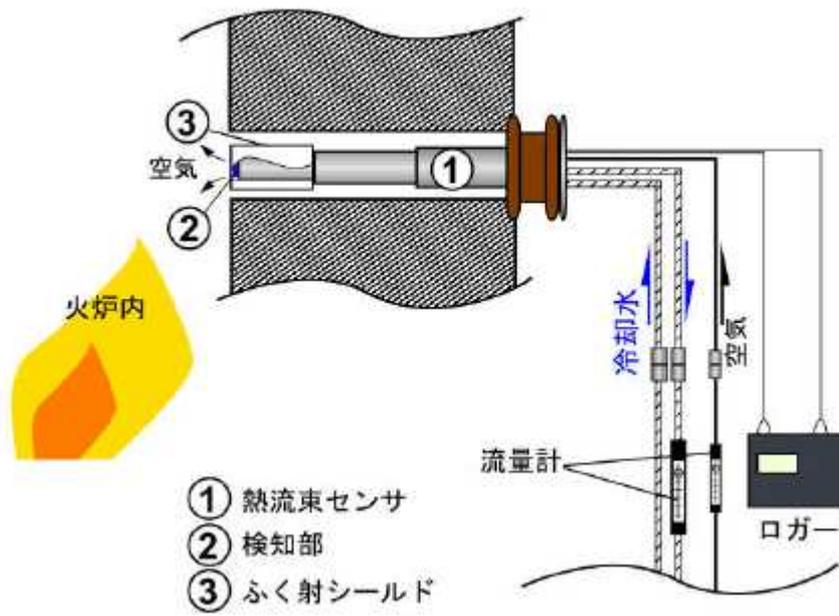


図 13 大容量燃焼試験：熱流束センサの構成

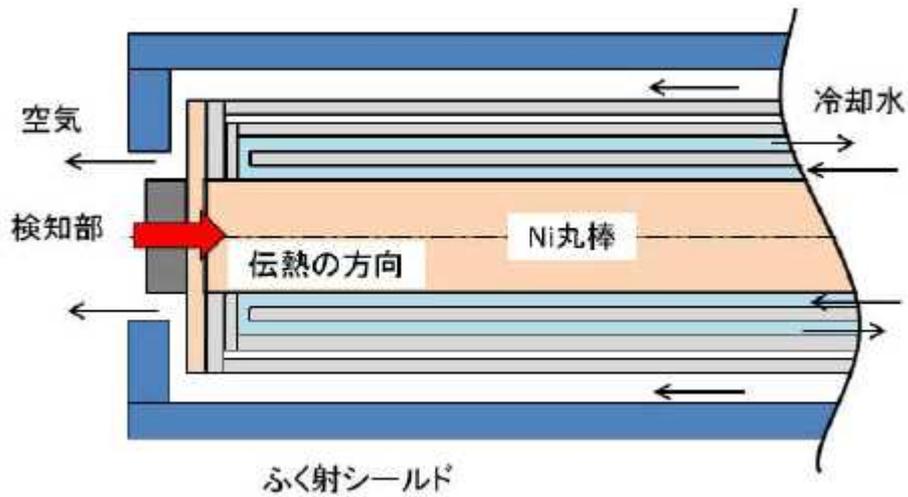


図 14 大容量燃焼試験：熱流束センサの検知部近傍の拡大図

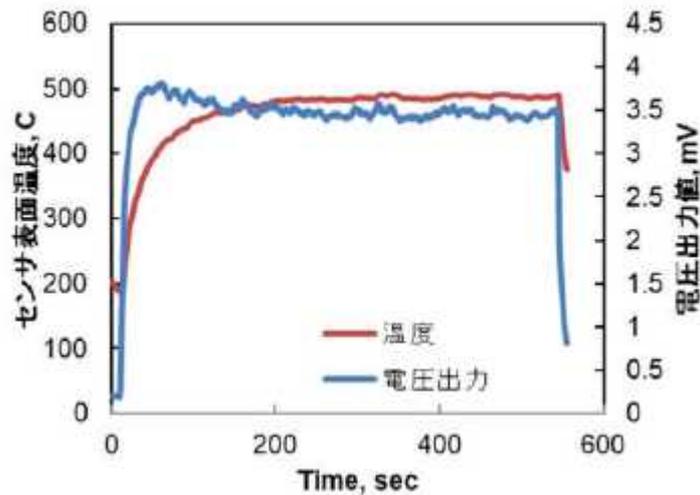
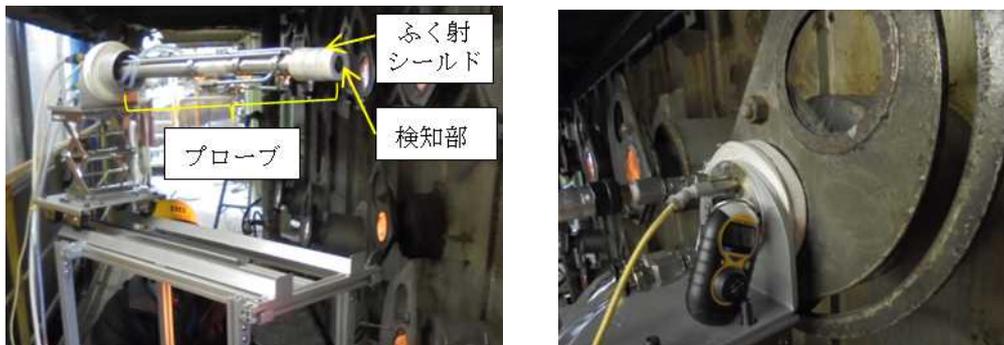


図 15 大容量燃焼試験の計測結果：熱流束計測結果の一例



a) 架台上の熱流束センサプローブ b) 計測の様子

図 16 大容量燃焼試験：熱流束計測装置と計測時の様子

図 17 に高さ方向の熱流束の分布を示す。この図は図 17 a)に示すとおり、各計測窓で計測した値を各段で個数平均化した値である。下段では石炭専焼に比べてアンモニア混焼の方が低い値を有しているのに対して、上部に移動するにつれてアンモニア混焼の方が石炭専焼よりも高い値を示している。また、石炭専焼時と比べてアンモニア混焼時は熱流束分布の高さ方向への勾配が緩やかである。

さらに詳細な熱流束の分布を評価するため、二次元的な等高線を図 18 に作成した。等高線の値は各計測値をそのうちの最大値で除して標準化した値である。図 18 の特長は、石炭専焼に比べてアンモニア混焼の方が、0.7 と 0.9 に挟まれる領域が広く分布していることである。このことから、この大容量燃焼試験では、アンモニア混焼では下段で収熱が低くなりその代わり炉の上部で収熱量が上昇している様子が伺える。

実際のボイラでは石炭燃焼後の灰が壁面に付着することで、収熱量が僅かに低下する。また、アンモニア混焼では、石炭の投入量が低下するため、灰による収熱量の低下が抑制されることが予想される。今回の計測では、単純な火炎の輻射による熱流束値を評価しているため、灰の影響を確認するには至らなかった。今後は、この灰の付着を考慮した計測が重要と考える。

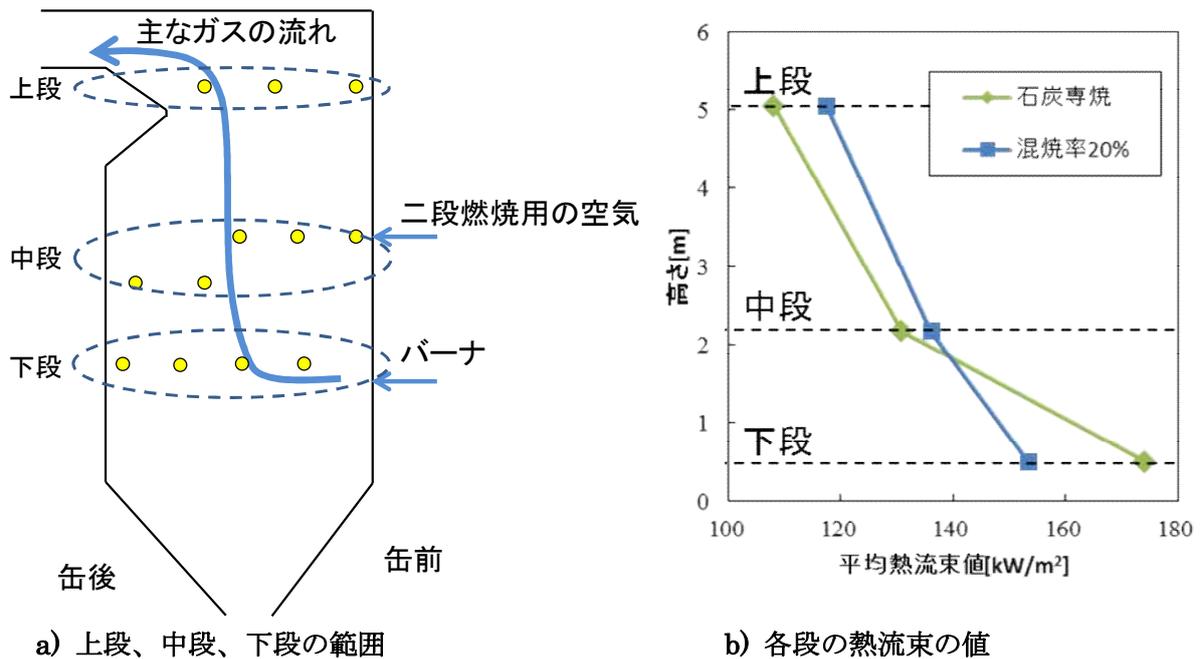


図 17 大容量燃焼試験の計測結果：熱流束の高さ方向の分布

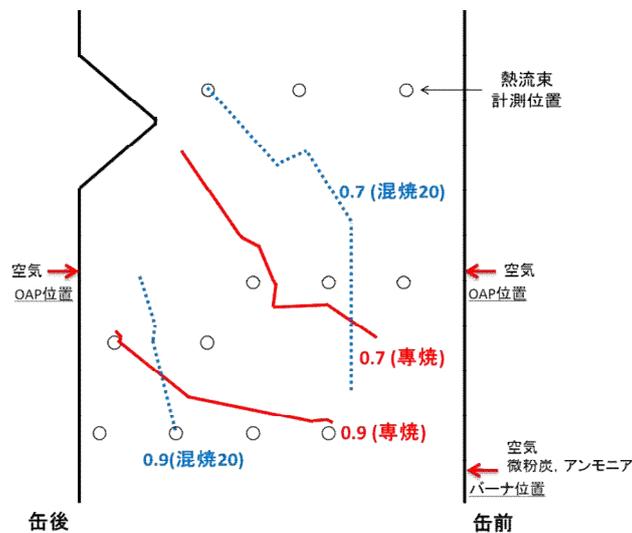


図 18 大容量燃焼試験の計測結果：熱流束の等高線

3-1-6. 本項目の成果と今後の課題

アンモニア混焼率 20% の条件下で、安定した燃焼と NO_x 濃度 200ppm (酸素濃度 6%換算) を両立する微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の開発を主目的として、弊社相生事業所 D&D パークの Coal Firing Test Facility (以下、CFT という) で大容量燃焼試験を実施した。後述する数値解析から導かれたアンモニア供給方法をもとに、アンモニアを石炭専焼バーナの中心軸から供給することで、アンモニア混焼下で安定した火炎を保持しながら、NO_x を石炭専焼と同程度の 200ppm (酸素濃度 6%換算) に抑制できる技術を開発した。また、低負荷運転や炭種についても限定的に評価を行ない、NO_x、灰中未燃分につい

ては従来の石炭専焼とほぼ同程度であることが確認できた。このことから、微粉炭/アンモニア混合燃焼を実施する上で、NO_x 関連設備に関する追設の必要性は低いことが分かった。今後は、本研究では評価出来なかった灰付着の影響や、他炭種の影響について引き続き評価していく必要である。また、CO₂ 排出削減効果や、ボイラ運用の利便性の向上などを考えると、今後は更に高い混焼率での検討が必要と考える。

3-2. 数値解析を用いたボイラ性能評価

3-2-1. 目的と成果概要

本項では化学反応解析を用いて NO_x を抑制するアンモニア供給方法を検討し、先述の大容量燃焼試験へ反映する。また三次元熱流体数値解析を用いて、同様のアンモニア供給方法を大型発電用ボイラへ適応した場合のボイラ性能を評価し、ボイラ性能に関する微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の課題を抽出する。この章では、主に以下の3つの検討を行なった。以下にその成果概要を記す。

化学反応解析を用いた NO_x 抑制方法

化学反応解析を用いて NO_x 生成を抑制させるアンモニア投入方法を検討した。結果として酸素濃度が低く温度が高い強い還元雰囲気アンモニアを供給することで、NO_x の生成を抑制しながら、アンモニアをボイラ蒸気発生の熱源として活用できる方針を立てた。上記のアンモニア投入方法をもとに大容量燃焼試験を実施し、NO_x を石炭専焼程度に抑制できたことは前述のとおりである。

大容量燃焼試験を対象とした数値解析の精度検証

数値解析を用いて発電量 1000MW のボイラを評価する前段として、大容量燃焼試験を対象に数値解析をおこないその精度を評価した。結果として、収熱量を評価することはできるが、NO_x 濃度の予測には、更なる技術向上を必要としている。この評価の結果から、次の発電量 1000MW のボイラの性能評価については主に収熱量を評価することにした。

発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析

発電量 1000MW のボイラを対象に三次元熱流体数値解析を実施し、アンモニア混焼における収熱量を評価した。アンモニア混焼することで、火炎温度が低下すること、それに加えて微粉炭粒子の存在量が低下するため炉内排ガスおよび粒子の輻射強度がともに低下していることが確認された。結果的に僅かながらアンモニア混焼により収熱量が低下する傾向がみられるが、炉内の収熱分布はアンモニア混焼と石炭専焼で大きな差異はない。結果としてアンモニア混合燃焼を実装する上で伝熱面など収熱に関する追設の必要性は低いことが確認された。

本研究では主に定格運転を対象に検討をおこなった。今後は、石炭専焼からアンモニア混焼への切り替えや、低負荷運転など、さらにボイラの運用面に着目した検討を進めていく必要がある。

3-2-2. 実施内容

次に本項目の実施内容詳細を述べる。

3-2-2-1. 化学反応解析を用いた NO_x 抑制方法

バーナからアンモニアを投入する場合、アンモニアが酸化し NO_x が発生する懸念がある。ここでは、化学反応解析ソフト CHEMKIN-PRO を用いて、NO_x を抑制させながらアンモニアを供給する方法を検討したので報告する。検討方法は開放型完全混合反応器 (Perfectly Stirred Reactor; PSR) を図 19 のように組み合わせ、この青い領域に直接アンモニアを投入した場合の NO 発生量を比較し Exit で検出される NO の値が一番低くなる領域を検討した。なお図 19 中の OF Air とは Over Firing Air の略で、大容量燃焼試験の項で先述した二段燃焼用の空気に相当している。

本手法では、化学反応データを必要とするが、本解析では、[1]のデータを使用した。この文献は石炭専焼を対象とした検証を実施しており、なおかつ揮発分由来のアンモニアを考慮していることから、本件の検討に適したデータとして選定した。

計算した結果を図 20 に示す。これは石炭専焼を基準値とした場合の NO、CO、灰中未燃分とアンモニア混焼時のそれらの値を相対的に比較している。計算結果を確認すると、Flame zone からアンモニアを供給した場合が一番 NO が低い値となった。この領域は温度が高く強い還元雰囲気有しており、NH₃が N₂と H₂に分解され NO の発生を抑制できる結果となっている。参考までに Combustion Air または OF Air に投入すると、アンモニアが事前に酸素と混合するため、NO が発生してしまう。また Mixing Zone では温度が低いためアンモニアの分解が進まず、残留したアンモニアが下流で酸化して NO が上昇してしまう傾向が確認された。本解析では温度が高く、また酸素濃度が低い還元雰囲気を有する Flame zone が NO_x の生成を抑制するに適切な投入方法であることと結論づけ、先述の大容量燃焼試験に適応した。

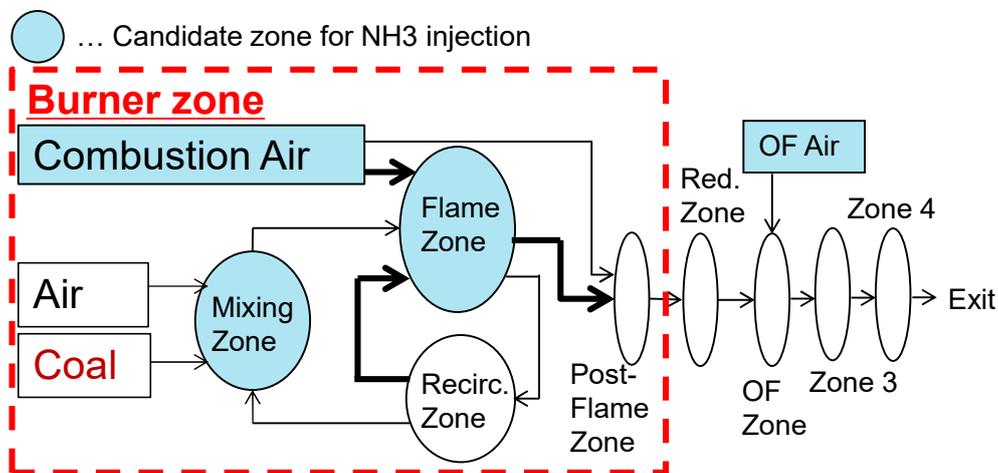


図 19 1次元リアクタネットワーク

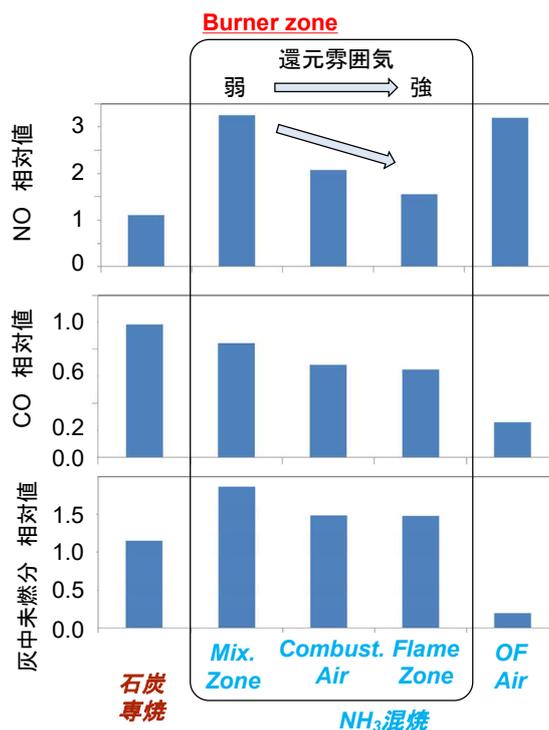


図 20 1次元リアクタネットワーク Exit における排ガス組成

3-2-2-2. 大容量燃焼試験を対象とした数値解析の精度検証

ここでは、大容量燃焼試験を対象に三次元熱流体解析を実施しその精度を検証したので報告する。

解析手法

図 21 に本解析に使用したジオメトリを示す。また計算条件を表 5 に示す。本解析ではバーナと火炉を一体化しており、そのメッシュ数は総数 108 万程度である。本作業では熱流体数値解析ソフト FLUENT 15.0 を用いて検討を行った。各種（質量、運動量、エネルギー）保存式は 2nd order upwind 離散化方法を採用した。これら詳細な情報については[2]-[4]に記載したので参照のこと。

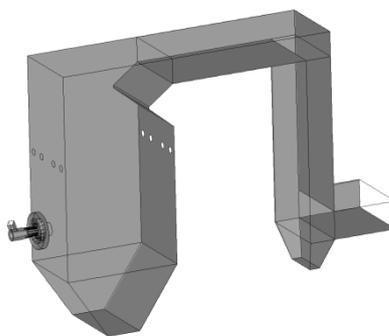


図 21 大容量燃焼試験を対象とした三次元熱流体解析のジオメトリ

表 5 大容量燃焼試験を対象とした三次元熱流体解析における計算条件

項目	値
投入熱量 (MW)	9.5
二段燃焼率 (%)	31
空気比 (-)	1.22

大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果概要

出口の排ガス性状の比較を表 6 に示す。ガス温度、CO₂濃度、灰中未燃分について計測値を再現するに至っている。NO については計測値から大きくずれてはいないが、石炭専焼よりもアンモニア混焼が低い傾向を再現するには至らなかった。次に解析結果の詳細を説明する。

表 6 大容量燃焼試験を対象とした三次元熱流体解析における代表的な解析結果

	石炭専焼		アンモニア混焼 (20 cal.%)	
	計測	解析	計測	解析
水平部のガス温度 (°C)	1045	1051	1033	1043
出口 NO 濃度 (ppm, 6% O ₂)	222	214	160	263
出口 CO ₂ 濃度 (vol.%, 6% O ₂)	13.0	13.6	11.0	10.9
灰中未燃分 (wt.%)	2.4	2.5	3.7	3.4

図 22 に炉内ガス温度の分布を示す。石炭専焼と比べてアンモニア混合燃焼の方が僅かに火炎温度が低いことが分かる。これは、アンモニアの燃焼速度と火炎温度が、石炭の揮発分の主成分であるメタンよりも低いことが要因として考えられており、実際の試験でも同様の傾向が確認されている。次に粒子とガスの輻射強度を図 23 に示すが、いずれも石炭専焼に比べてアンモニア混焼が低い値を示していることが分かる。これはアンモニア混焼によるガス温度の低下と粒子数の低下によるものが主な要因として考えられる。

一方で、図 2 に記した水平部のガス温度は石炭専焼とアンモニア混焼で同程度であるため、この大容量燃焼試験の収熱は石炭専焼とアンモニア混焼で同程度であることが分かる。この理由は先の試験結果でも述べたとおり、アンモニア混焼では石炭専焼に比べて火炉上部の収熱が促進しているためと考える。数値解析では、この水平部のガス温度を±10%以内で再現するに至っており、これにより収熱量を再現するに十分な精度を有すると考えている。

NO 濃度についてはその絶対値は計測値と大きく差異はないが、アンモニア混焼が石炭専焼に比べて低い値を示す点については再現性に乏しい。参考までに図 24 に炉内の NO 濃度の分布を示す。この数値解析におけるアンモニア混焼の特長は、アンモニアが一度、酸化して NO になり、それがふたたび還元する傾向にある。この際のアンモニアの酸化反応と NO の還元反応およびアンモニア自身の熱分解の相対的な速度を評価することが、今後のアンモニア混焼の解析精度の向上には重要と考える。

本検討により、三次元熱流体解析を用いたアンモニア混焼について、火炉の収熱および灰中未燃分の評価が出来ることが確認された。NO_x 濃度については、絶対値としては、さほど実現象から乖離はない

ものの、アンモニア混焼と石炭専焼の差異を評価する点においては更なる検証が必要である。この評価を踏まえて、次の発熱量 1000MW ボイラの解析では主に収熱量を評価した。

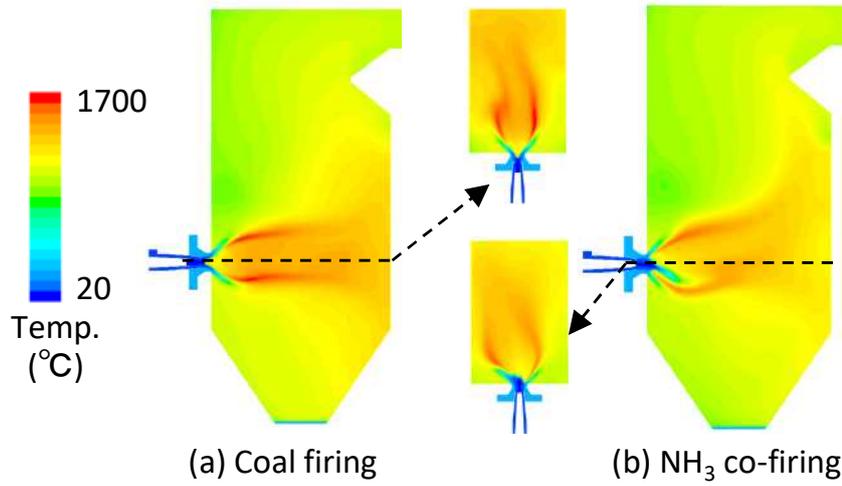


図 22 大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果：石炭専焼とアンモニア混焼の温度分布

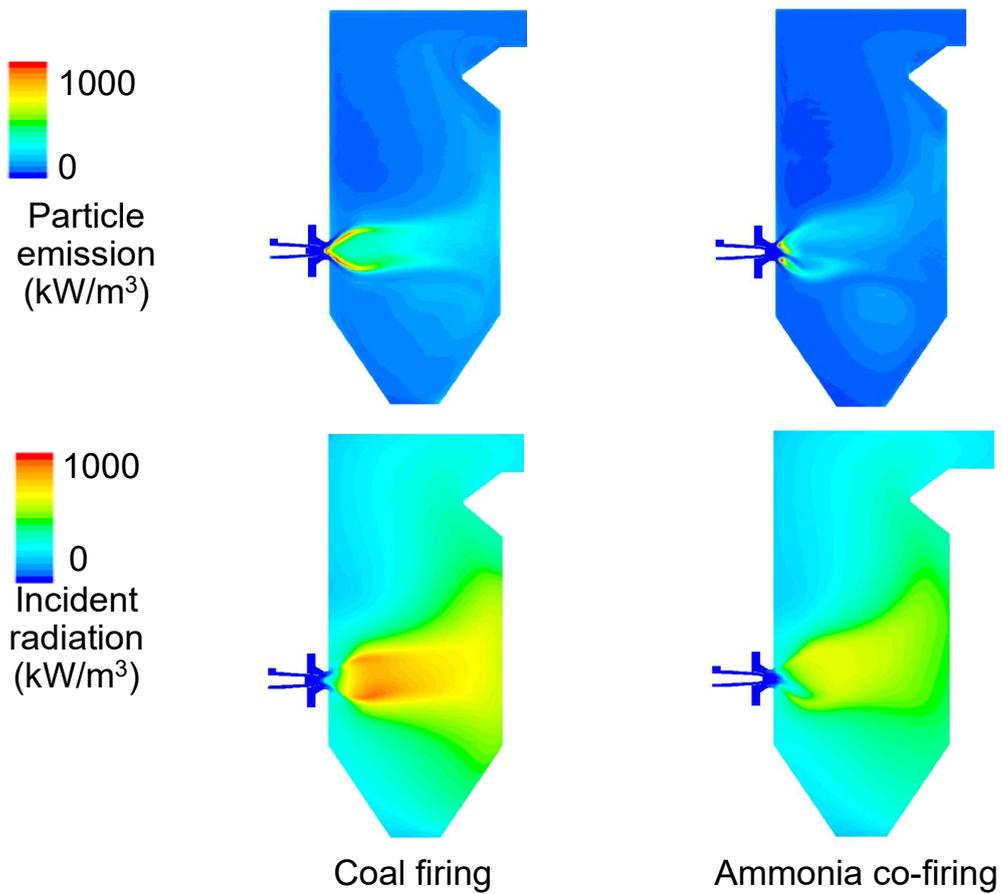


図 23 大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果：石炭粒子とガスの輻射強度の分布

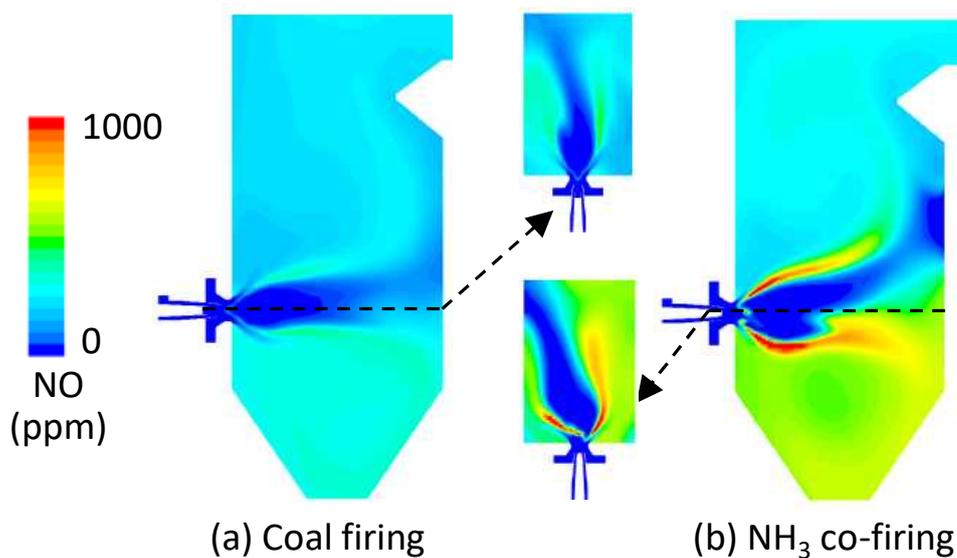


図 24 大容量燃焼試験を対象とした数値解析の結果：NO 濃度の分布

3-2-2-3. 発電量 1000MW ボイラを対象とした解析

発電量 1000MW のボイラを対象とした 3 次元熱流体解析を実施し、アンモニア混焼における収熱性能について評価した。対象としたボイラとバーナの形状を図 25 に示す。表 7 に対象とした石炭の組成を示す。石炭は燃料比（固定炭素量/揮発分量；重量ベース）1.6 程度の瀝青炭である。今回の評価では、アンモニアは大容量燃焼試験と同様の方法ですべてのバーナから一様に供給している。

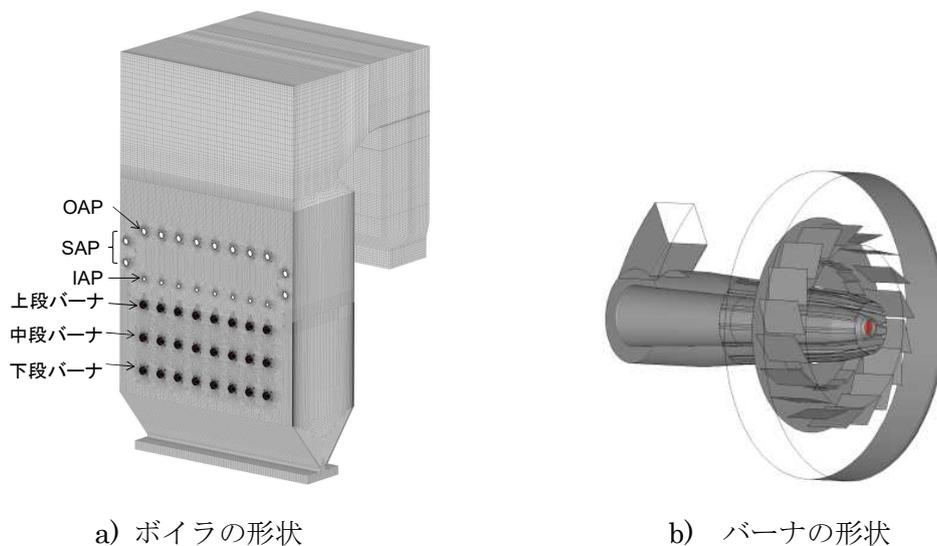


図 25 発電量 1000MW ボイラを対象とした三次元熱流体解析のジオメトリ

表 7 発電量 1000MW ボイラを対象とした三次元熱流体解析の石炭性状

工業分析 (wt.%, ad.)				元素分析 (wt.%, daf.)				燃料比	LHV (MJ/kg)
Moisture	VM	FC	Ash	C	H	N	S		
13.9	28.8	47.1	10.2	87.4	5.2	1.9	1.1	1.6	28.2

ボイラ内部のガス温度を図 26 に示す。石炭専焼に比べてアンモニア混焼の方が全体的に僅かながら温度が低くなっている。これは、先の大容量燃焼試験を対象とした解析でも述べたとおり、もともとアンモニアの火炎温度が石炭に比べて低いためである。その要因の一つに排ガスの一部が CO_2 から H_2O に置き換わることが挙げられる。参考に炉内の CO_2 、 H_2O の濃度分布を図 27 と図 28 に示す。これを見ると、アンモニア混焼によって CO_2 が H_2O に置き換わっていることが分かる。

次に壁面の熱流束の分布を図 29 に示す。これを見ると石炭専焼とアンモニア混焼とでその分布に大きな差は生じていない。これにより既存の石炭焚きボイラにアンモニア混焼を実施しても局所的な収熱負荷に大きな変化は生じないと考える。全体の収熱量は、アンモニア混焼は石炭専焼に比べてわずかに低下することが予想される。これは、先の大容量試験を対象とした解析でも確認したように石炭専焼に比べてアンモニア混焼では火炎温度が低くガスおよび粒子からの輻射強度が低下するためと考えており、今回のボイラを対象とした解析でも同様の傾向が伺える。参考までにガスおよび粒子の輻射強度に関する分布を図 30 および図 31 に示す。それぞれの分布で、石炭専焼に比べてアンモニア混焼の方がその値が低下している様子が確認できる。

最後に灰中未燃分については、結果として微増する傾向にある。ガス温度の低下にともない石炭粒子の温度も低下することで、未燃分が微増すると考える。

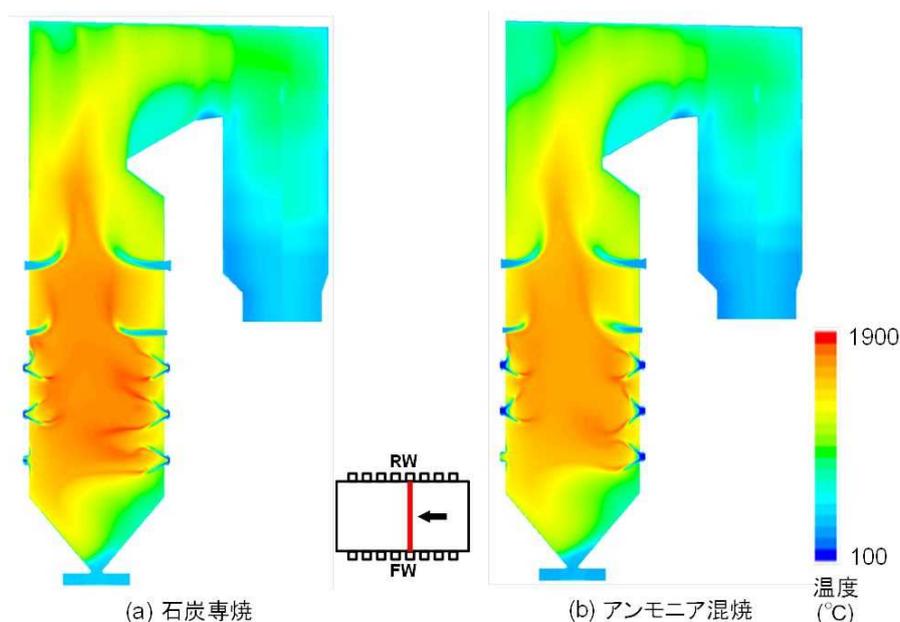


図 26 発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内のガス温度分布

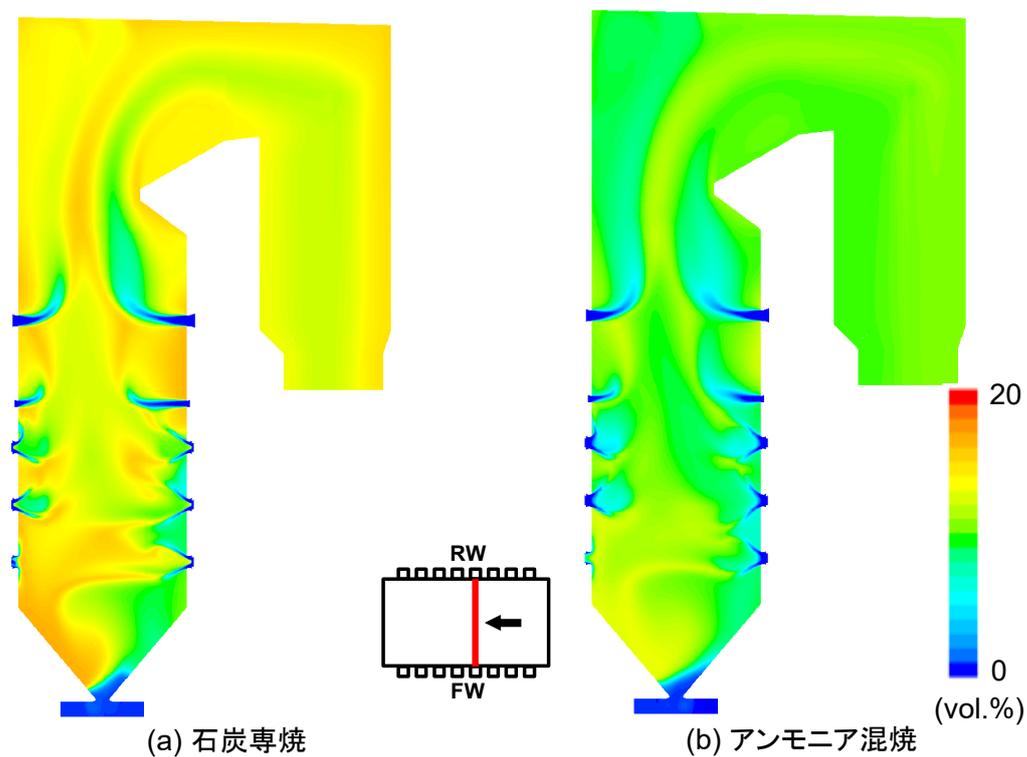


図 27 発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内の CO₂ 濃度分布

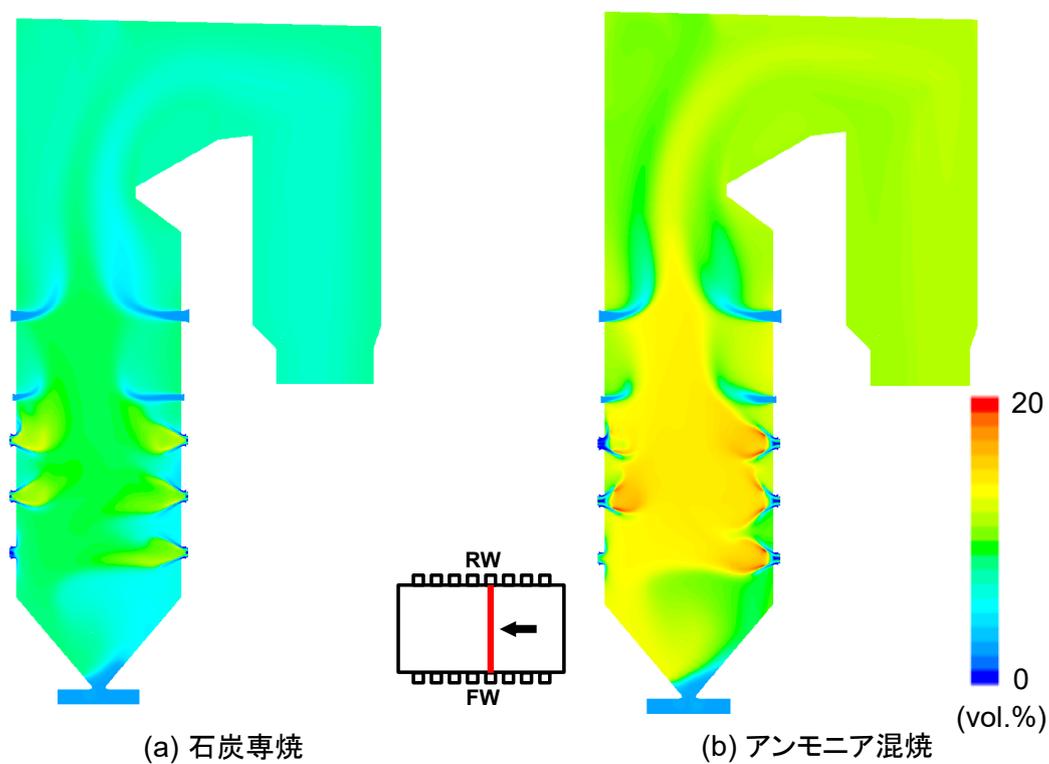


図 28 発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内の H₂O 濃度分布

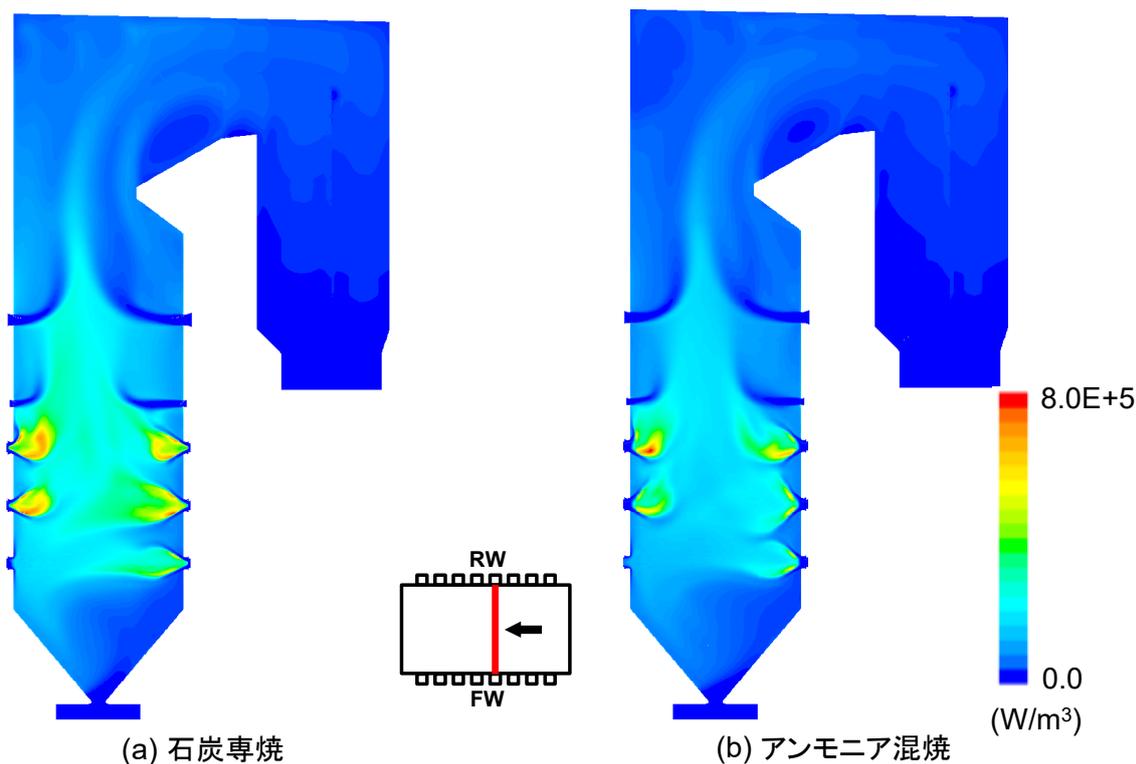


図 31 発電量 1000MW ボイラを対象とした数値解析の結果：炉内の粒子の輻射強度

3-2-3. 本項目の成果と今後の課題

化学反応解析を用いて NO_x 生成を抑制させるアンモニア投入方法を検討した。結果として酸素濃度が低く温度が高い強い還元雰囲気アンモニアを供給することで、 NO の生成を抑制しながら、アンモニアをボイラ蒸気発生の熱源として活用できる方針を立てた。

また、三次元熱流体解析を用いてボイラの性能評価を行なった。アンモニア混焼することで、火炎温度が低下すること、それに加えて微粉炭粒子の存在量が低下するため炉内排ガスおよび粒子の輻射強度がともに低下していることが確認された。結果的に僅かながら火炉の収熱が低下する傾向がみられた。しかしながら炉内の収熱分布は、アンモニア混焼と石炭専焼で大きな差異はなく、結果としてアンモニア混合燃焼を実施しても伝熱面局所的にかかる負荷に大きな変化は生じないことが確認された。ここで得られた成果をもとに、次章のボイラ FS にてボイラ伝熱面の改造の必要性を検討していく。

本研究では、主に定格運転をベースに議論をおこなった。また、実際のアンモニア混焼ボイラでは、石炭の投入量が減少するため、壁面に堆積する灰量が減少することが想定される。これによる収熱量への影響は本研究では検討出来ていない。

今後は、石炭専焼からアンモニア混焼への切り替えや、低負荷運転など、さらにボイラの運用面に着目した検討を進めていく必要がある。

3-3. 大型発電用石炭焚きボイラを対象とした Feasible Study:

3-3-1. 目的と成果概要

本章では先述の大容量燃焼試験および数値解析の成果と、一般的な石炭専焼用の設備仕様をもとに、

従来の石炭専焼用の設備をアンモニア混合燃焼へ流用する可能性、または追設、改造の必要性を評価し、微粉炭/アンモニア混合燃焼を実装するための課題を抽出した。

結果として、必須となる追加設備はアンモニア供給系統であり、その他の設備に関する改造・追設の必要性は低い。なお、各部の追設・改造の必要性については既存設備の仕様や使用する炭種、アンモニアの混焼率によっても変化するため引き続き注意が必要である。以下に検討結果の詳細を述べる。

3-3-2. ボイラ FS の主要条件

発電量 1,000MW のボイラを想定し、表 8 をもとに検討をおこなった。ボイラは、長期間運転していく過程でその性能に経年変化を伴うが、本検討では新設時の性能を想定した。また、対象とした負荷はボイラ最大連続蒸発量（英語名：Maximum Continuous Rating）という条件で、ボイラに求められる空気量、燃料量ともに最大の条件を想定している。また、発電量 1000MW 級のボイラにはバーナが数十本装備されており、アンモニアの供給方法には様々な仕様が可能だが、本件では先述の大容量燃焼試験、および数値解析の成果をもとに検討を行うため、各バーナから混焼率 20% でアンモニアを供給することを前提に検討した。

表 8 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の主要条件

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

※1：Maximum Continuous Rating ボイラ最大連続蒸発量条件。ボイラに供給される燃料、空気の供給量が最大となる条件。

3-3-3. ボイラ FS 検討内容の詳細

本項目では主に次の3つについて評価を行なった。その詳細を次に述べる。

- ・ボイラ効率およびマテリアルバランスの評価
- ・ボイラシステムの改造内容の検討
- ・アンモニアの供給系統の検討

3-3-3-1. ボイラ効率およびマテリアルバランスの評価

ここでは、石炭専焼下とアンモニア 20%混焼下のボイラ効率、燃料消費量、燃焼用の空気量、排ガスを 0 次元ベースで検討し、アンモニア混焼時のマテリアルバランスの特長を把握することで、その後記すボイラシステムの改造内容の基礎データとする。この検討に使用した燃料の発熱量を表 9 に示す。また、ボイラ効率およびその他のマテリアルバランスを検討した結果を図 32 から図 35 に示す。

表 9 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS で用いた燃料の発熱量

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

本検討は、表 8 に示す通り MCR を対象としている。これは、その条件が各機器にとって最大負荷となるためであるが、ボイラ効率と燃料消費量については参考までに 100%Load (以下、L と示す。) の場合も併記した。まずボイラ効率を図 32 に示す。この図の通りボイラ効率はアンモニア混焼時の方が石炭専焼時よりも僅かに低下することが分かった。この主な要因は、石炭の一部をアンモニアに代替することで、排ガスに含まれる水分が増加する。そのため、排ガスから排出される水分の潜熱が影響していると考えられる。次に、図 33 に燃料の消費量を記す。アンモニア混焼では石炭の一部をアンモニアに代替することで、石炭の消費量は減少する。また、表 9 に示す通りアンモニアは石炭に比べて単位重量あたりの発熱量が低いため、アンモニア混焼時の方が石炭専焼時に比べてより多くの燃料を供給することになる。

図 34 に燃料を燃焼させるために必要な空気量を示す。また図 35 に燃焼後にボイラから排出されるガス量を示す。これらはいずれも石炭専焼に比べてアンモニア混焼の方が僅かに多くなるため、石炭専焼時通風系統をアンモニア混焼に流用できるか注意が必要である。

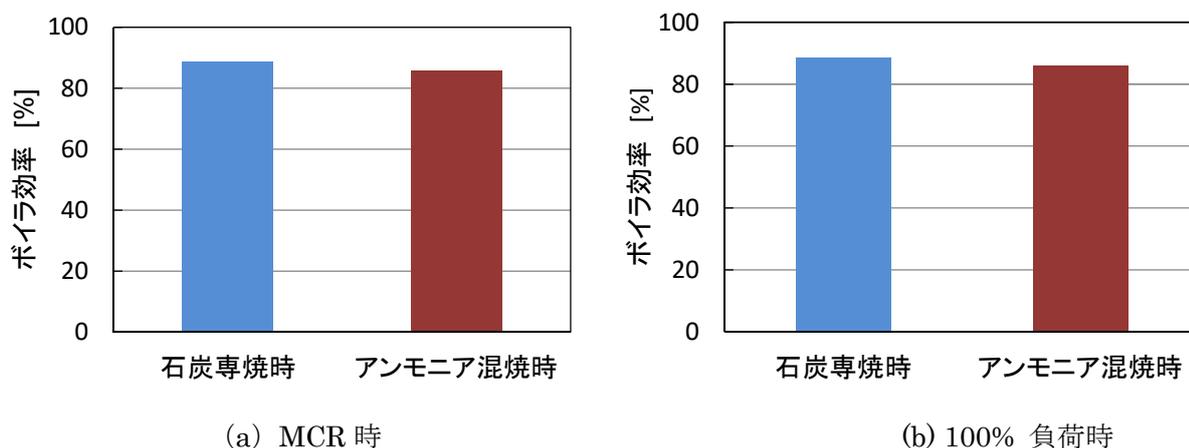


図 32 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：ボイラ効率

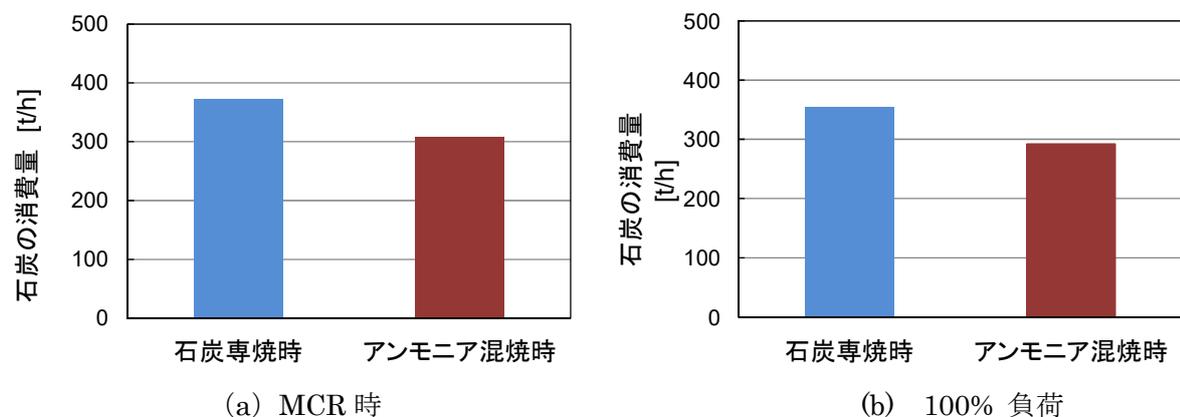


図 33 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：燃料消費量

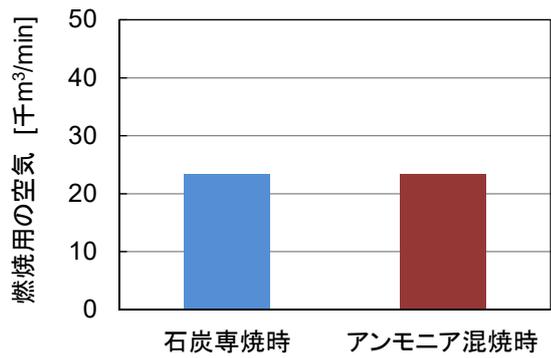


図 34 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：燃焼用の空気@MCR

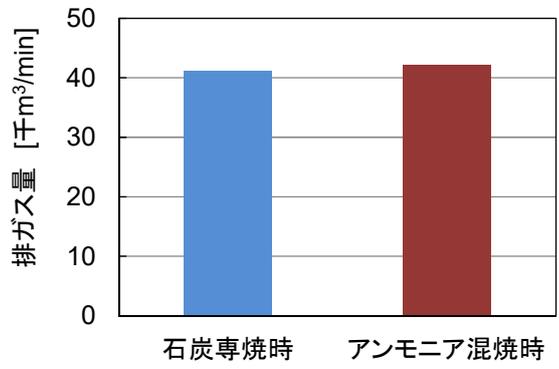


図 35 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：排ガス量@MCR

3-3-3-2. ボイラシステムの改造内容の検討

本検討結果を報告する上で、まずはボイラシステムの一般的な系統構成を説明する。その概要を図 36 に示す。石炭焚きボイラは燃料の燃焼に用いられる空気の大部分は押込通風機(英語名：Forced Draft Fan。以下、FDF という)から供給され再生式空気予熱器(英語名：GAS-Air-Heater。以下、GAH という)を経てボイラに供給される。GAH では、ボイラ出口の高温の排ガスを熱源として燃焼用空気を加熱することで燃焼を促進させるとともにボイラの排熱を回収し高い熱効率を維持している。GAH を出た燃焼用空気は二方向へ分岐され、その一方はバーナへ供給される。残りの一方は火炉上部から供給される。これは、バーナ近傍の燃焼用空気を意図的に不足させ還元雰囲気を形成することで、燃焼過程で燃料から放出される窒素分が酸化し NOx に転換する割合を低下させるためである。この燃焼方法は二段燃焼と呼ばれ、先の大容量燃焼試験炉でも適応されていた燃焼方法である。

また、残りの燃焼用空気は、一次通風機(英語名：Primary Air Fan。以下、PAF という。) を介して微粉炭機に供給される。この空気は微粉炭機で粉碎した微粉炭をバーナに搬送することを主な役割しており、また微粉炭中の水部を空気に移すことで石炭を乾燥させる役割も担う。とりわけ PAF を通過する空気を一次空気と呼び、その一部はバイパスして GAH を介して加熱され、微粉炭機で石炭を乾燥するに適した温度に調整される。

燃焼後、火炉内で発生する排ガスは、誘引通風機(英語名：Induced Draft Fan。以下、IDF という)で誘引され、NOx や煤塵および SOx を除去するための環境設備を経て、大気に放出される。

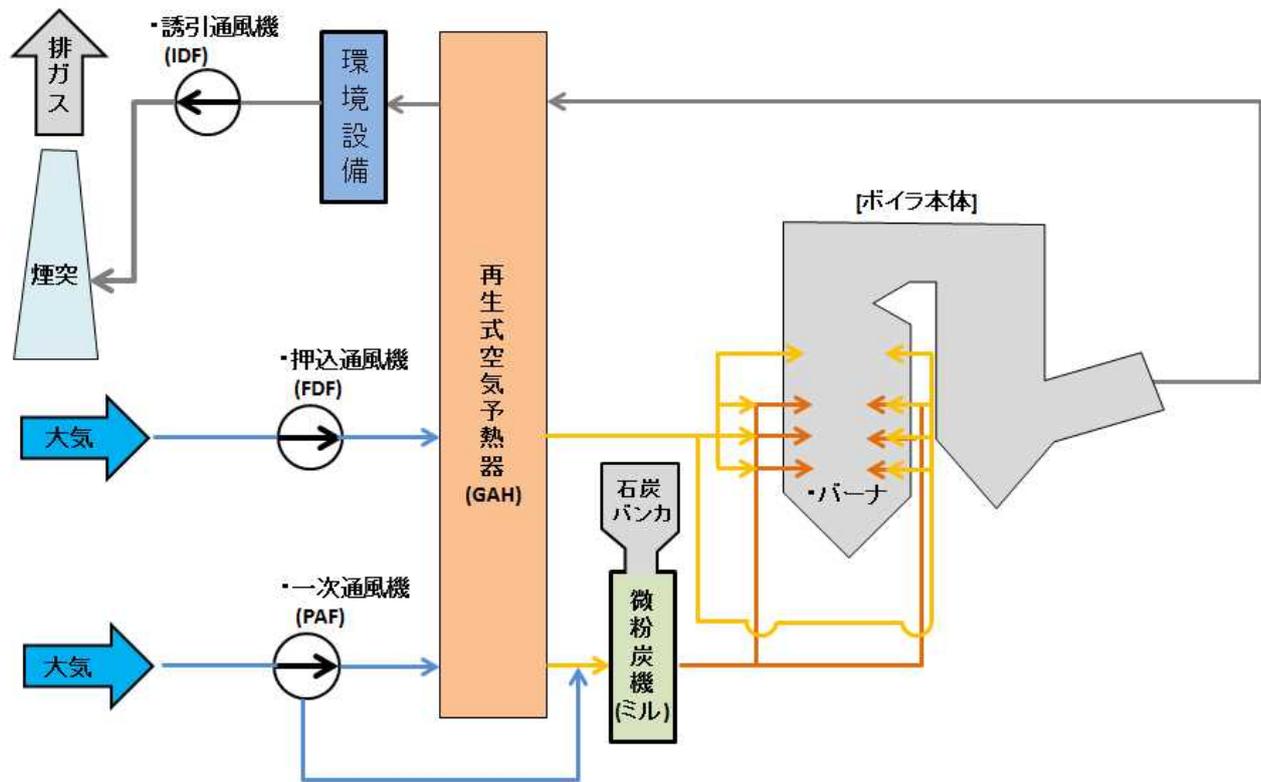


図 36 石炭焼きボイラシステムの一般的な系統構成

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 箇所である。なお、ボイラの収熱性能については先述の数値解析の結果から、石炭専焼とアンモニア混焼で大きな変化がないことが確認されているため、本検討でのアンモニア混焼の収熱性能は石炭専焼時と同程度として検討した。また、NO_xおよび灰中未燃分については大容量燃焼試験により、アンモニア混焼と石炭専焼で大きく差が生じていないことから、本検討において脱硝設備などその他の環境設備の改造の必要性を評価する際も NO_xおよび灰中未燃分については石炭専焼時と同程度とし検討した。次にこれらの検討結果を記す。

- ・ボイラ伝熱面
- ・バーナ
- ・ファン式（一次通風機，押込通風機，誘引通風機）
- ・微粉炭機
- ・再生式空気予熱器
- ・環境設備（脱硝装置，集じん装置，脱硫装置）

ボイラ伝熱面

先述の数値解析の検討からアンモニア混焼時の収熱量は石炭専焼時と同等程度であり、各部位の蒸気温度も計画時から大きく変化がないため、今回の検討ではボイラ伝熱面の改造は不要である。

バーナ

石炭専焼用のバーナに対して、大容量燃焼試験で実施したバーナ中心軸からアンモニアを供給するた

めの追加設備を設置する必要がある。

一次通風機 (PAF)

燃料が石炭からアンモニアへ代替されることで、石炭を搬送するために必要な一次空気の需要が少なくなるため、一次通風機の改造は不要である。

押込通風機 (FDF)

アンモニア混焼時の押込通風機の流量の特長は、上記の一次通風機の流量が減少した分を押込通風機で供給するため、石炭専焼に比べて流量が増加する傾向となる。今回の模擬プラントでは仕様決定点に余裕があることを想定したため改造は不要と判断するが、仕様決定点における余裕が少ない場合は改造の必要性が考えられることに注意のこと。

誘引通風機 (IDF)

先のマテリアルバランスの検討から、石炭専焼時に比べてアンモニア 20cal%混焼時の方が流量が多くなる傾向にある。これについても上記の FDF と同様にもととの仕様決定点の裕度によっては、改造の必要性が考えられることに注意のこと。

微粉炭機 (ミル)

アンモニア 20cal%混焼することで石炭投入量が減少するため、ミル運転負荷としては低減する。このためミルの改造は不要である。また、その他の特長としては、アンモニアを混焼するにつれてミル内で乾燥させる石炭の量が減少するため、ミル入口空気に求められる温度が低下する。これにより、石炭専焼では回収されてきた熱量が排ガスに留まるため、排ガスの温度が上がる傾向となる。次の再生式空気予熱器の検討では、排ガス温度の影響を検討する必要があることが分かった。

再生式空気予熱器 (GAH)

ミル入口空気に求められる温度の低下や、排ガス内の水分量の増加などから GAH 出口のガスに含まれる熱量が回収されずに温度が上昇する傾向にある。しかしながら温度の上昇幅は数℃～十数℃程度であり、この程度の温度上昇は一般的な石炭専焼用の新設時の仕様で吸収できるため、GAH の改造は不要である。

環境設備 (脱硝装置, 集じん装置, 脱硫装置)

先述の大容量燃焼試験からアンモニア混焼において NO_x 濃度は石炭専焼と同程度であることが分かっている。また石炭投入量の減少にともない SO₂, ばいじんが減少するため、環境設備 (脱硝装置, 集じん装置, 脱硫装置) に関する環境設備の増設は不要と考える。

結果として、上記の 6 箇所においてはアンモニア混焼を実装する上で改造、追設の必要性は低い。しかしながら、この検討は石炭専焼設備の仕様決定点の裕度にも影響されるため、今後も注意深く評価する必要がある。

3-3-3-3. アンモニアの供給系統

本検討では、アンモニア貯蔵設備で気化した後のアンモニアの供給系統を検討した。検討した系統の概略を図 37 に示す。今回は、アンモニアをガス燃料として扱うため、一般的なガス燃料の系統を参考

に検討した。アンモニアは全てのバーナから供給することし、そのための配管を配した。また、アンモニアは劇物であるため、系外に漏らさない(=大気放出しない)ことを前提として窒素でパージする系統を合わせて想定した。

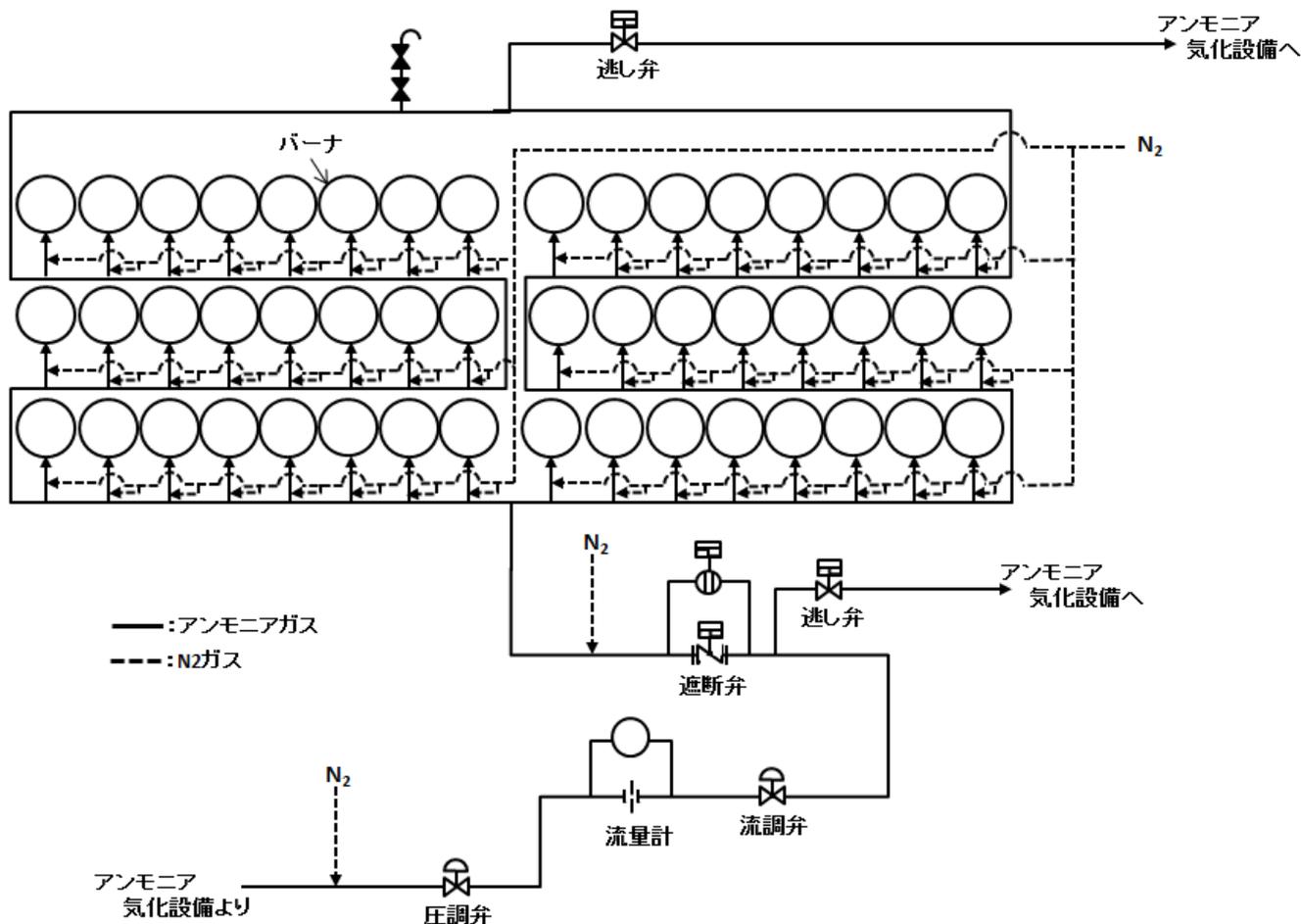


図 37 発電量 1000MW ボイラを対象とした FS の検討結果：アンモニアガス系統の概略図

3-3-4. 本項目の成果と今後の課題

本項目では、先の大容量燃焼試験や数値解析の成果をもとに、従来の石炭専焼用の設備をアンモニア混合燃焼へ流用する可能性、または追設、改造の必要性を評価し微粉炭/アンモニア混合燃焼を実装するための課題を抽出した。

結果として、必須となる追加設備はアンモニア供給系統であり、その他の設備に関する改造・追設の必要性は低いことが分かった。ただし、これら各部の追設・改造の必要性については既存設備の仕様や使用する炭種、アンモニアの混焼率によって変化するため引き続き注意が必要である。

今後の課題としては、今回の研究では主に MCR 条件を対象に評価をおこなった。今後は、石炭専焼からアンモニア混焼への切り替えや、低負荷運転など、さらにボイラの運用面に着目した検討を進めていく必要がある。

3-4. アンモニア貯蔵設備を対象とした Feasible Study

3-4-1. 目的と成果概要

アンモニアを燃料として石炭火力発電所の敷地内に貯蔵し、気化させてボイラへ供給するために必要な設備の仕様を検討し、微粉炭/アンモニア混合燃焼を実装する上でアンモニア貯蔵設備に関する課題を抽出した。検討の結果、アンモニアの気化熱源および災害想定と防災設備について更なる検討が必要であることが分かった。

アンモニア混焼に必要なアンモニアの気化熱は、燃料として投入する熱量の数%を必要とするため、その熱源として安易に補助蒸気を適応するとタービン効率を低下させる懸念がある。出来る限り補助蒸気の使用量を削減しタービン効率を維持する気化熱源の検討が重要となる。

災害想定と防災設備については、アンモニアは高い水溶性を持つ劇物であるため、従来の火力発電所の液体燃料の代表である LNG の仕様を踏襲するだけでは不十分であることが予想されるため、慎重に検討する必要がある。

その他の設備についても、発電所の立地、既存設備などの条件によって更なる検討を要するため、引き続き注意が必要である。

3-4-2. アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の主要条件

表 10 にアンモニア貯蔵設備を対象とした FS の主要条件を示す。

表 10 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の主要条件

アンモニアを供給するボイラ	1,000 MWe/缶×1缶
アンモニア混焼率	20%(熱量ベース)
アンモニア消費量	600,000 ton/year (75 ton/hour)
貯蔵タンク容量	出荷可能量 31,000 ton 貯蔵容量 33,000 ton
アンモニア貯蔵タンク基数	1基

※本 FS では、棧橋等海上設備基礎は対象外とする。

3-4-3. アンモニア貯蔵設備の構成

主要設備および機器の構成条件を表 11 に示す。また主要プロセスフローを図 38 に示す。このプロセスは、アンモニアを液の状態の外航船から石炭火力発電所へ受け入れタンクで貯蔵する。アンモニア混焼時は必要に応じてアンモニアを気化してボイラへ供給する。プロセスで生じる Boil Off Gas (以下、BOG という。) はタンクへ戻す、または、アンモニア混焼時は直接ボイラへ供給することにした。特に主要な設備の検討について次項で述べる。

表 11 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の主要設備および機器の構成条件

設備	機器	基数
アンモニア液受入設備	アンローディングアーム/リターンガスアーム	2 本
	リターンガスブロワ	1 基
アンモニア液貯蔵設備	アンモニア貯蔵タンク	1 基
	ブリージングタンク	1 基
BOG*処理設備	BOG 処理設備	1 基
アンモニア払出設備	アンモニア払出ポンプ	1 基
	アンモニア気化器 (STV)	1 基
アンモニア除害設備	アンモニア除害タンク/循環ポンプ	1 式
	アンモニア除害塔/スタック	1 式
ユーティリティ設備	BOG 処理設備用冷却水システム	1 式
	アンモニア気化器用温水システム	1 式
	窒素供給システム	1 式
	計装空気供給システム	1 式
保安/防災設備	侵入監視モニター/フェンス	1 式
	水幕設備/粉末設備 (栈橋)	1 式
	散水設備/消火栓 (陸上設備)	1 式

※BOG : Boil Off Gas

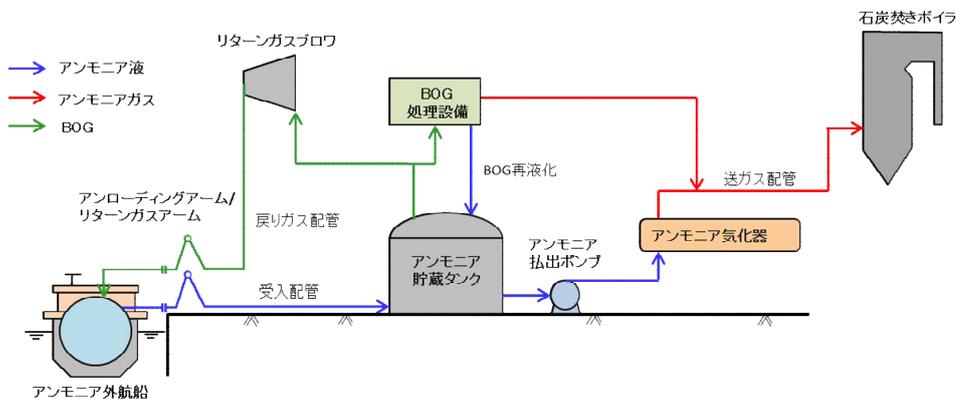


図 38 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：主要プロセスフロー

3-4-5. 主要設備に関する検討

ここでは、アンモニア貯蔵タンクとアンモニア気化熱源について検討したので報告する。

アンモニア貯蔵タンクの検討

アンモニア貯蔵タンクの候補は、おもに金属二重殻タンク、PC タンク、球形タンクの 3 方式が考えられる。各々の特徴を表 12 に記す。一般的に今回のような貯蔵量が大きな条件の場合、設置面積を抑え

られる PC タンクが好まれるが、貯蔵する対象物がアンモニアの場合は PC タンクの要素の一つであるインタンクポンプの導入実績が日本国内に無い（2018年3月時点）。そのため本検討では主要条件に見合うだけの貯蔵量が得られ、かつ実績がある金属二重殻タンクを採用した。

表 12 貯蔵タンクの候補と特徴

種類	金属二重殻タンク	PCタンク	球形タンク
貯蔵時のアンモニアの圧力	常圧	常圧	加圧
貯蔵時のアンモニアの温度	約-34℃	約-34℃	常温
長所と短所	<p>長所： 受入、貯蔵、送液ともに技術的に確立されており、タンクの大型化も可能。</p> <p>短所： 液漏えいを考え防液堤が必要となるため、タンク設置面積が大きくなる。</p>	<p>長所：防液堤が不要なため、タンク設置面積を小さくすることが出来る。</p> <p>短所：払出にインタンクポンプが必要だが、日本国内に導入実績がない。</p>	<p>長所：常温加圧状態のアンモニアを受入れ、貯蔵することが出来る。</p> <p>短所：大型化が出来ない。</p>

アンモニア気化熱源

ここでは、液体の状態では貯蔵していたアンモニアを気化させるための気化熱源について検討した。一般的に市場で取引されているアンモニアは水分が 0.5 mol.%程度含まれるため、純粋なアンモニアに比べて高い沸点及び露点を有する。参考までに図 39 および 図 40 にアンモニア-水混合物の沸点および露点を示す。ここで、火力発電所内で使用されている脱硝設備向けアンモニア気化器に関する規定を確認したところ、「電気技術規定 火力編 アンモニア設備規定」3.5.2 (7)にて「気化器の出口においてアンモニアのミストを同伴しない構造とする。」と規定されているため、必ず露点以上に加温させる必要がある。市販されているアンモニアの水分含有量をもとに図 40 にてその露点を確認すると約 40℃であることが分かる。今回の検討では配管中の温度降下を見込み、気化器出口温度はさらに高い 45℃として検討した。この温度までアンモニアを昇温させるための気化熱源として、少なからず蒸気タービンの補助蒸気の使用が必要と考えた。補助蒸気とは、ボイラ蒸気の循環系統から排出される高圧・高温の蒸気であり比較的今回のような追設の仕様時に取り出しやすい。しかしながら補助蒸気を熱源することで蒸気タービンの効率が大きく低下することが懸念される。ここでは次に、アンモニア気化熱源として補助蒸気を使用するにあたり、それが石炭火力発電所で重要な蒸気タービンの効率へ与える影響を評価したので以下に記す。

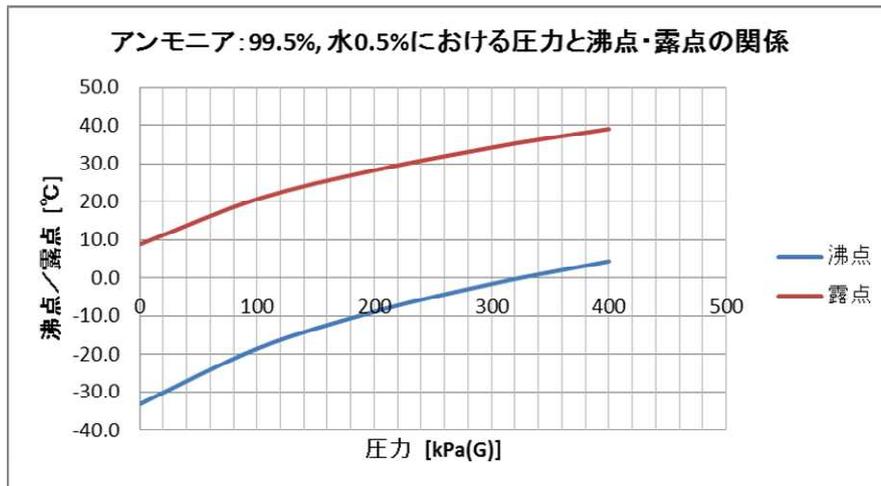


図 39 水分量 0.5mol.%を含むアンモニアの沸点および露点

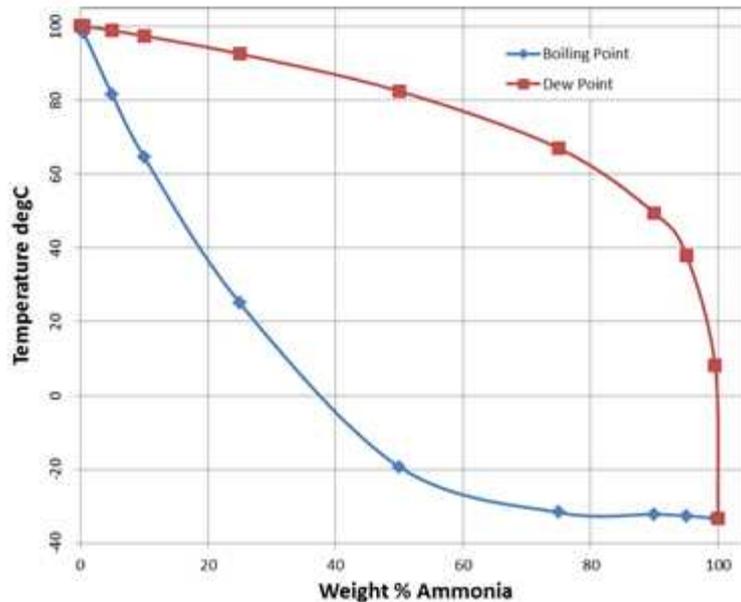


図 40 大気圧におけるアンモニア-水混合物の沸点および露点

表 13 に本研究で評価した仕様を記す。基本ケースでは、熱源をボイラ補助蒸気とし、その熱媒体として補助蒸気によって加熱した温水とした。応用ケースでは、補助蒸気の使用量を抑制するため、一般的な石炭火力発電の蒸気サイクルで使用される復水器に着目し、その冷却源として用いられた海水を再度、アンモニアの気化熱源として利用することを検討した。先述の 45°Cまでアンモニアを昇温させるためには、この海水だけでは不十分であったため、さらに先述の補助蒸気を熱源として追加した。結果的にどちらのケースも補助蒸気を使用されるが、応用ケースではその使用量が削減されるため、タービン効率の低下を抑制できることが期待できる。参考までに応用ケースの系統図を図 41 に示す。

表 13 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：アンモニア気化熱源の候補

ケース	基本ケース	応用ケース	
熱源	補助蒸気を熱源とし、 温水を熱媒体とする。	復水器出口の 海水	補助蒸気
追設主要機器	熱交換器2基 温水ポンプ1基	海水ポンプ1基	熱交換器2基

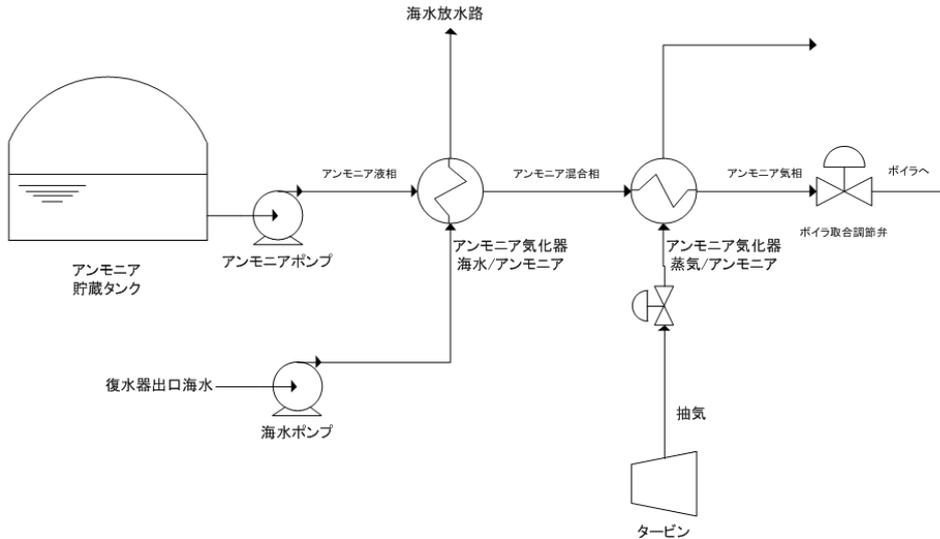


図 41 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：応用ケースの系統図

表 14 に各ケースにおけるタービン効率への影響を示す。基本ケースの場合、タービン効率の低下が 0.10～1.00 %程度見込まれるのに対して、応用ケースではその値が 0.01～0.10 %程度まで抑制された。これは、基本ケースに比べて応用ケースの方が補助蒸気の使用を削減できるためである。ただし、補助蒸気の削減量は海水によるアンモニアへの入熱量によって変化するため注意が必要である。また、発電所によっては構内の配置や工事上の制約から本研究で検討したケースが適応できない場合もある。アンモニア気化熱源の選定については今回の検討を参考に、対象とする発電所の緒条件に注意を払いながら検討していく必要がある。

表 14 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：タービン効率への影響

ケース	基本ケース	応用ケース
タービン効率への影響	0.10～1.00 %程度低下する。	0.01～0.10 %程度低下する。

除害設備

一般的な化学プラントなどで使用されているアンモニア供給設備では、通常、安全弁やブローダウンによって排出されたアンモニアはアンモニア除害塔で水に吸収させて処理する。今回、改めてアンモニアを燃料として使用する場合、その気化器出口の安全弁から放出されるアンモニアは、それ専用の除外タンクを用意しここで水に吸収させ処理することにした。これは、気化器出口の安全弁について「電気

技術規定「火力編 アンモニア設備規定」3.5.3.1 (3)にて定められている、安全弁の吹き出し容量を「気化器の1時間当たりの最大気化量(kg/hour)以上とすること。」に対する対策である。一般的な日本国内のアンモニア貯蔵設備の送ガス流量は、本検討の前提となるガス流量より十分小さく、除害塔で処理が可能であるが、本検討の主要条件である気化量 70ton/hour は除害塔で扱うには流量が大きいため、それ専用の除害タンクが必要となる。

その他設備

アンモニア受入設備、BOG 処理設備、アンモニア払い出し設備、ユーティリティ設備、保安/防災設備については、現在国内のアンモニア貯蔵設備、または LNG 貯蔵設備等類似設備で一般的に使われている技術が使用可能である。

3-4-4. 配置検討

上記の検討から得られた陸上設備の配置を図 42 に示す。設置には概ね 160m × 130m のスペースが必要となる。

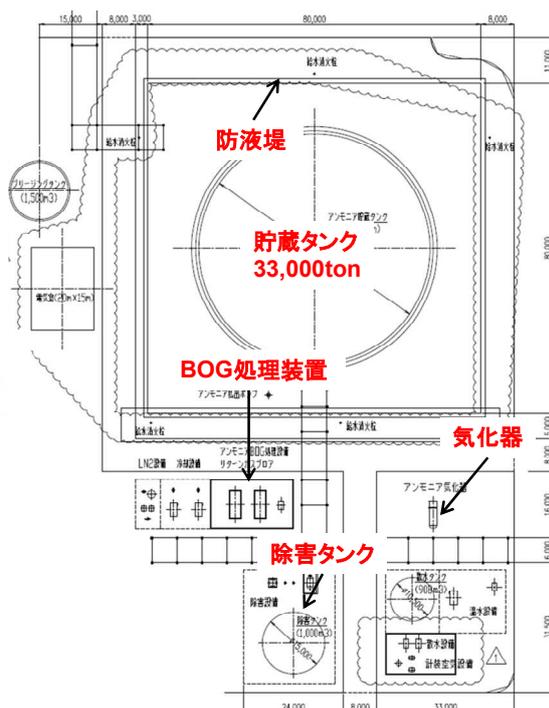


図 42 アンモニア貯蔵設備を対象とした FS の検討結果：アンモニア貯蔵設備の配置(陸上部)

3-4-5. アンモニア貯蔵設備の災害想定と防災設備

今回のアンモニア貯蔵設備の特徴は、過去最大級のアンモニア貯蔵タンクを発電所に設置することである。この条件に対する災害想定と防災設備は過去に例が無いため、今後も慎重に検討する必要がある。本項ではアンモニアにまつわる過去の災害事例を調査し、防災設備の重要性を改めて確認した。また、従来のアンモニアおよび LNG 関連設備の災害想定、防災設備を調査し、これらを今回の条件に適応し

た場合の懸念事項を抽出したので報告する。

アンモニア設備に関する災害事例の調査

過去に発生したアンモニア貯蔵タンクに起因する災害事例を中心に調査した。結果として、国内においてはアンモニア貯蔵タンクに起因する災害事例は確認できなかった。海外では 3 件報告されている。海外 3 件の災害の状況を表 15 に示す。この調査からも、貯蔵タンクが破壊しアンモニアが流出または爆発すると大惨事となることが分かるため、十分な対策が必要となる。

表 15 アンモニア設備に関する災害事例

発生年	発生場所	事故の流出量または貯蔵量	死傷者	影響
1994年	米国	5700トン流出	22名	2500名避難
1996年	フランス	3.8トン貯蔵	11名	
2013年	米国	50トン貯蔵	315名	2800名避難

既存のアンモニア基地および LNG 基地の災害想定

国内に設置されているアンモニア貯蔵設備の場合、液体アンモニアの受け入れノズルから漏洩を想定し防液堤が設置されている。しかし、それに伴うガス拡散、火災による輻射等の災害は想定されていない。参考までに金属二重殻タンクを備える既存の LNG 基地では、タンク内液が防液堤内に全量流出することを想定し、流出液によるガス拡散および流出液の火災による輻射熱により敷地境界へ影響が出ないように、必要防災設備を設けている。また、シミュレーションによりそれらの影響を評価している。

既存のアンモニア基地および LNG 基地の防災設備

既存のアンモニア貯蔵設備の場合、適用法規は高圧ガス保安法であり、関連法規で要求されている防災設備のみ設置されている。また、アンモニアは毒性ガスということもあり、その設備には除害散水設備が設けられている。それ以外でアンモニアに向けた特有な防災設備の例はない。

一方、火力発電所に併設される LNG 貯蔵設備（金属二重殻タンク）の場合、適用法規は電気事業法となる。防液堤内に全量流出した LNG によるガス拡散濃度および流出液着火で起こる火災の輻射熱を低減するため、高発砲設備および水幕設備が自主設置されているのが特徴である。

今後アンモニアを燃料として発電所内に貯蔵する際、適用法規が電気事業法となることを考えると、LNG と同様に高発砲設備および水幕設備の自主設置が考えられる。しかしながら、アンモニアの場合水幕設備では水幕にアンモニアが溶けて、防液堤周囲に飛散する危険があるため、これによる二次災害が懸念される。

このように、アンモニアを燃料として取り扱う場合、その防災設備については従来の液体燃料の代表である LNG の仕様を踏襲するだけでは不十分な場合があるため、今後も慎重な検討が必要である。

3-4-6. 本項の成果と今後の課題

アンモニアを燃料として貯蔵しボイラへ供給するために必要な設備の仕様を検討した。その結果、アンモニア気化熱源の選定と防災設備に関する検討が重要であることが分かった。

アンモニア気化熱源として必要な熱量は投入熱量の数%に相当しており、これをタービン蒸気で賄うとタービン効率を低下させる懸念がある。今後も出来る限り補助蒸気の使用量を削減しタービン効率を維持する気化熱源を検討する必要がある。

また、災害想定および防災設備については、従来の液体燃料の代表である LNG の仕様を踏襲するだけでは不十分な場合があるため、今後も慎重な検討が必要である。他の設備に関しても、発電所の立地や既存設備の仕様によっては更なる検討が必要となるため、引き続き検討が必要である。

3-5. まとめ

本研究は、石炭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/アンモニア混合燃焼技術を開発した。またアンモニアを燃料として石炭火力発電所の敷地内に貯蔵、供給する設備について Feasible study を行い、微粉炭/アンモニア混合燃焼技術の社会実装に向けた課題を検討した。以下にその結果を記す。

大容量燃焼試験では、化学反応解析から導かれたアンモニア供給方法をもとに、アンモニアを石炭専焼バーナ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の 200ppm（酸素濃度 6%換算）に抑制できることを実証した。また、暫定的ではあるが低負荷運転、炭種の影響などについても評価を行ない、NO_x、灰中未燃分については従来の石炭専焼とほぼ同程度であることが確認できた。このことから、微粉炭/アンモニア混合燃焼を実施する上で、NO_x 関連設備について大きな追設の必要性はほぼ無いことが分かった。

三次元熱流体解析を用いたボイラの収熱性能の評価では、アンモニア混焼下では僅かながら火炉の収熱が低下する傾向がみられた。しかしながらその差は非常に小さく、且つ、炉内の収熱分布はアンモニア混焼と石炭専焼で大きな差異はないことが分かった。結果としてアンモニア混合燃焼を実施する上で伝熱面など収熱に関する追設の必要性は低いことが確認された。

石炭焚きボイラを対象とした Feasible Study では、上記の大容量燃焼試験や数値解析の成果をもとに、従来の石炭専焼用の設備をアンモニア混合燃焼へ流用する可能性、または追設、改造の必要性を評価した。結果として、必須となる追加設備はアンモニア供給系統であり、その他の設備に関する改造・追設の必要性は低いことが分かった。ただし、これら各部の追設・改造の必要性については既存設備の仕様や使用する炭種、アンモニアの混焼率によって変化するため引き続き注意が必要である。

アンモニア貯蔵設備を対象とした Feasible Study では、投入熱量の数%を必要とするアンモニア気化熱源の選定が重要であること、またアンモニア供給量約 70ton/hour という仕様において、災害想定と防災設備の検討が重要性であることが改めて確認された。

3-6. 今後の課題

今回の研究では大容量燃焼試験を行ない、アンモニア混焼下において NO_x 濃度および灰中未燃分を従来の石炭専焼と同程度まで抑制することに成功した。低負荷運転の影響および炭種の影響については、2炭種のための暫定的な検討に留まっているため、今後も引き続き評価が必要となる。

ボイラの収熱性能については、本研究では主に定格運転をベースに、数値解析を用いて評価した。アンモニア混焼では、石炭投入量が減少し、ボイラ内部の灰付着量が減少することが予想されるが、本研究ではその影響を評価するまでには至っていない。今後は、この灰付着量の変化が収熱量へ与える影響を評価する必要がある。また、商用機による運用を想定した場合、石炭専焼からアンモニア混焼への切り替え運転や、低負荷運転など、定格運転以外の運用面に着目した検討が必要となる。特に、商用ボイ

ラは多段のバーナを有するため、その運用方法を最適化するためには、バーナ単体で20%以上の高混焼率を対象とした技術開発が必要と考える。

アンモニア貯蔵設備の課題としては、アンモニア気化熱源必要な熱量は投入熱量の数%に相当しており、これをタービン蒸気で賄うとタービン効率を低下させる懸念がある。今後も出来る限り補助蒸気の使用量を削減しタービン効率を維持する気化熱源を検討する必要がある。また、災害想定および防災設備については、従来の液体燃料の代表であるLNGの仕様を踏襲するだけでは不十分な場合がある。上記のボイラ運用の詳細も反映させながら引き続き検討していく必要がある。

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

<口頭発表> 国内3件、海外1件

- ・石原 咲子, 張 聚偉, 伊藤 隆政, 藤森俊郎(株式会社 IHI), 微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼が排出NO_xに与える影響, 第55回 日本燃焼シンポジウム, 富山, 2017年11月13-15日.
- ・張 聚偉, 石原 咲子, 伊藤 隆政, 藤森俊郎(株式会社 IHI), Numerical investigation on co-firing ammonia with pulverized coal in a 10MWth combustion facility, 第35回 Annual INTERNATIONAL PITTSBURGH COAL CONFERENCE, 中国、2018年10月15 - 18日.
- ・石原 咲子, 張 聚偉, 伊藤 隆政, 藤森俊郎(株式会社 IHI), 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.
- ・張 聚偉, 石原 咲子, 伊藤 隆政, 石井 大樹, 藤森俊郎(株式会社 IHI), 10MW_{th}級 微粉炭・アンモニア混焼試験を対象とした数値解析, 第56回 日本燃焼シンポジウム, 大阪, 2018年11月14-16日.

<ポスター発表> 国内0件、海外1件

- ・石原 咲子, 張 聚偉, 伊藤 隆政, 藤森俊郎(株式会社 IHI), Effects of Ammonia-coal Co-firing in Boilers, 第37回 国際燃焼シンポジウム, ダブリン、2018年7月29-8月3日.

(3) プレス発表

2018年3月28日、株式会社IHI、「石炭火力発電所向け 燃焼試験設備で世界最高水準のアンモニア混焼を実証 ～CO₂排出量低減に寄与 アンモニアの燃料利用を可能にする燃焼技術を開発～」

概要：低炭素社会を実現する新たな燃料として期待されるアンモニアと微粉炭を混合燃焼する実証試験を、相生工場(兵庫県相生市)内の大容量燃焼試験設備(投入熱量10MW)で2017年12月に実施し、

世界最高水準となる熱量比率 20%のアンモニア混焼に成功した。既存の発電所に対して小規模な改造で NOx 排出濃度を従来の石炭火力発電所からの排出濃度と同程度に抑制することに成功した。

(4) マスメディア等取材による公表

- ・日刊工業新聞「アンモニア混焼に成功 IHI、技術実用化にめど」
- ・日経産業新聞「アンモニア混焼に成功 IHI、石炭火力発電所で」
- ・電気新聞「IHI アンモニア混焼実用化へ 熱量比率 20%で最高水準」
- ・化学工業日報「IHI アンモニア混焼成功 熱量比率 20% 石炭火力利用にめど」

掲載年月日 上記4誌は、いずれも2018年3月29日に掲載済み。

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	2017-213208	ボイラ	平成29年11月2日	株式会社IHI
2	2017-213209	ボイラ	平成29年11月2日	株式会社IHI
3	2017-213210	ボイラ	平成29年11月2日	株式会社IHI
4	2017-213255	ボイラ	平成29年11月2日	株式会社IHI
5	2018-092033	蒸気発生設備	平成30年5月11日	株式会社IHI
6	2018-098655	蒸気発生設備	平成30年5月23日	株式会社IHI
7	2018-169588	ボイラ	平成30年9月11日	株式会社IHI
8	2018-169624	燃焼装置及びボイラ	平成30年9月11日	株式会社IHI

6. 参考文献

- [1] Mendiara et. al, Combust. Flame 156 (2009) 1937-1949.
- [2] 張 聚偉 et al., 10MW_{th}級 微粉炭・アンモニア混焼試験を対象とした数値解析, 第56回 日本燃焼シンポジウム, 大阪, 2018年11月14-16日.
- [3] Zhang et al. Energy & Fuels 2016, 30: 6117-6122.
- [4] Brouwer et al. In 26th Symposium (Int'l) on Combustion. The Combustion Institute. 1996.