

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「実機微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼シミュレーション」

研究開発期間：平成 28 年 12 月 15 日～平成 31 年 3 月 31 日
研究担当者：樋口 誠一
所属研究機関：関西電力株式会社

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. 実機微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼シミュレーション	2
3-1-1. 支配方程式	2
3-1-1-1. 基礎式	2
3-1-1-2. 気相反応	2
3-1-1-3. 乱流燃焼モデル	2
3-1-1-4. 微粉炭燃焼モデル	2
3-1-2. 解析条件	4
3-1-2-1. 解析対象	4
3-1-2-2. 境界条件	6
3-1-2-3. 石炭性状	6
3-1-3. 解析結果	6
3-1-3-1. 微粉炭専焼およびアンモニア混焼結果	6
3-1-3-2. アンモニア混焼ケーススタディ結果	9
3-1-4. まとめ	11
3-2. 微粉炭石炭火力・アンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時の 各種設備に与える影響評価	12
3-2-1. 概要	12
3-2-2. アンモニア混焼時のアンモニアスリップの可能性について	12
3-2-3. 発電所における排煙処理システムについて	13
3-2-4. 火力発電所におけるアンモニアの設備および用途	13
3-2-5. アンモニアスリップ時の各種設備に与える影響評価	13
3-2-5-1. 脱硝装置に対するアンモニア影響評価	14
3-2-5-2. 空気予熱器に対するアンモニア影響評価	14
3-2-5-3. ガス加熱器（GGH）に対するアンモニア影響評価	15
3-2-5-4. 電気集じん器に対するアンモニア影響評価	15
3-2-5-5. 脱硫装置に対するアンモニア影響評価	18
3-2-5-6. 通風機に対するアンモニア影響評価	19
3-2-5-7. 排水処理装置に対するアンモニア影響評価	19
3-2-5-8. 煙突に対するアンモニア影響評価	20
3-2-6. アンモニアスリップ時の各種設備に与える影響を抑制する 対策検討	22
3-2-6-1. 脱硝装置に対するアンモニア影響抑制対策	22
3-2-6-2. 空気予熱器に対するアンモニア影響抑制対策	22
3-2-6-3. ガス加熱器（GGH）に対するアンモニア影響抑制対策	23
3-2-6-4. 電気集じん器に対するアンモニア影響抑制対策	24
3-2-6-5. 脱硫装置に対するアンモニア影響抑制対策	24

3-2-6-6. 通風機に対するアンモニア影響抑制対策	24
3-2-6-7. 排水処理装置に対するアンモニア影響抑制対策	25
3-2-6-8. 煙突に対するアンモニア影響抑制対策	25
3-2-7. まとめ	25
3-2-8. 今後の課題	26
4. 外部発表実績	26
5. 特許出願実績	26
6. 参考文献	26

図表一覧

図1-1. NO _x 生成モデル概念図
図1-2. 舞鶴発電所1号機ボイラ側面図およびバーナ配置図
図1-3. 解析メッシュ
図1-4. 微粉炭専焼解析結果
図1-5. アンモニア20%混焼解析結果
図1-6. アンモニア混焼率変化
図1-7. アンモニア投入位置変化(1)
図1-8. アンモニア投入位置変化(2)
図1-9. 拡散燃焼と予混合燃焼の比較
図2-1. 火力発電所におけるアンモニアの設備および用途
図2-2. ダストの電気抵抗とEP集じん性能の挙動
表1-1. 石炭性状表
表2-1. 石炭ボイラおよび重油ボイラのダスト性状比較
表2-2. 排水中N分およびCOD成分の排出基準
表2-3. アンモニア排出に関する規制(事故時の措置)
表2-4. アンモニア排出に関する規制(排出基準)

1. 本研究の目的

エネルギーキャリアであるアンモニア利用技術の中に、アンモニアを燃料として利用する直接燃焼がある。アンモニア直接燃焼については、技術開発のベースとなるガスタービン、工業炉等が存在し、かつ火力発電所や工業事業所には一定規模のアンモニア輸送、貯蔵インフラがすでにあるので、それぞれの技術開発の成果を実用燃焼システムに速やかに応用できる位置にある。また、アンモニア専焼に拘ることはなく、現在の火力発電の主力である微粉炭燃焼をアンモニア燃焼に部分的に置き換えることによって、大幅なCO₂排出削減に繋がる可能性があることから、この技術開発に取り組んでいく必要がある。

本研究では、実機微粉炭焚きボイラにおいてアンモニアを混焼させる場合を想定し、運用方法について以下の調査・研究を行う。

a. 実機微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼シミュレーション

実機微粉炭焚きボイラを対象とした混焼シミュレーション手法を開発し、混焼時の運用予測および検討を行う。

b. 微粉炭石炭火力・アンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時の各種設備に与える影響評価

微粉炭焚きボイラでのアンモニア混焼実施時におけるアンモニアスリップ発生時の後続設備への影響について各種設備ごとに調査、研究し、対応策等についても検討を行う。

2. 研究開発目標とマイルストーン

本研究における研究開発目標およびマイルストーンは次のとおりである。

a. 実機微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼シミュレーション

[マイルストーン]

H28 目標 解析対象プラントを選定し、形状作成・メッシュ作成に着手する。

H29 目標 実機混焼シミュレーション手法を開発する。

H30 目標 シミュレーションによる燃焼予測を実施し、知見を得る。

b. 微粉炭石炭火力・アンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時の各種設備に与える影響評価

[マイルストーン]

H28 目標 アンモニアの各設備への影響について過去の文献調査に着手する。

H29 目標 過去文献および実機微粉炭火力のアンモニアリーク時の影響について整理する。

H30 目標 調査結果の精査ならびに想定した各設備への影響を抑制する対策検討を行う。

3. 研究開発実施内容

3-1. 実機微粉炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼シミュレーション

3-1-1. 支配方程式

本研究で用いる解析コードは、汎用熱流体解析ソフトウェアである ANSYS FLUENT 18.2⁽¹⁻¹⁾ である。そのため解析手法やモデルは本ソフトで採用されているモデルが基本となる。以下に支配方程式と使用モデルについて述べる。

3-1-1-1. 基礎式

本研究で対象とするのは、3次元定常非圧縮性流れであり、質量、運動量、化学種、エネルギーの各保存式を解く。解析手法は SIMPLE 法を採用した。乱流モデルは標準型 $k-\varepsilon$ モデル、輻射モデルは P-1 モデル⁽¹⁻²⁾ を用いた。

3-1-1-2. 気相反応

微粉炭とアンモニアの混焼シミュレーション手法については、現在簡略化モデルは存在しないため、NO_x 生成・還元等の反応を調査するためには化学反応を解く必要がある。実機ボイラを対象としたシミュレーションでは、詳細な反応機構をそのまま使用することは解析負荷的に適当ではなく、いわゆる簡略化反応機構を使用することが現実的である。簡略化反応機構については、アンモニア直接燃焼チーム内において、電力中央研究所殿が微粉炭とアンモニアの混焼シミュレーション手法の開発に取り組まれておられ、すでに簡略化反応機構を作成済みであることから、当研究では電力中央研究所殿作成の反応機構（以下、電中研モデル）を活用する。それは 304 化学種、1414 素反応の反応機構⁽¹⁻³⁾ を簡略化したもので、75 化学種、219 反応式で構成されるものである。

3-1-1-3. 乱流燃焼モデル

ANSYS FLUENT において反応機構を扱える乱流燃焼モデルとして EDC（Eddy Dissipation Concept）モデル^(1-1, 1-4) が標準装備されていることから、これを採用する。EDC モデルは渦消散モデルの機能を拡張したもので、反応はファインスケールと呼ばれる微細乱流構造で起こるものと仮定し、乱流統計量 k, ε から緩和時間を算出し化学反応解くモデルである。

3-1-1-4. 微粉炭燃焼モデル

微粉炭粒子の運動はラグランジェ法による粒子相として扱う。

微粉炭燃焼モデルについて以下に述べる。

a. 揮発分放出モデル

揮発分の放出モデルとして、Badzioch らの単一反応速度モデル⁽¹⁻⁵⁾ を用いた。

$$-\frac{dm_p}{dt} = k(m_p - (1 - f_{v0})m_{p0})$$

m_p : 石炭粒子の質量
 m_{p0} : 初期の石炭粒子の質量
 f_{v0} : 初期の石炭中の揮発分の質量分率

ここで k は反応速度を表し、以下のようなアレニウス型の式をとる。

$$k = A \exp(-E / RT_p)$$

A : 頻度因子
 E : 活性化エネルギー
 R : 一般ガス定数
 T_p : 石炭粒子温度

今回の計算においては、 $A = 4.92 \times 10^5$ 、 $E = 7.4 \times 10^7$ とした⁽¹⁻¹⁾。

b. 表面反応モデル

表面反応モデルは、拡散速度と化学反応速度両方の影響を考慮する Field の反応律速／拡散律速モデル⁽¹⁻⁶⁾を用いた。

拡散速度

$$R_{PH} = C_{PH} \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{D_p}$$

C_{PH} : 定数
 T_p : 石炭粒子の温度
 T_∞ : 気相の温度
 D_p : 石炭粒子径

反応速度

$$R_{CH} = C_{CH} \exp(-E_{CH} / RT_p)$$

C_{CH} : 頻度因子
 E_{CH} : 活性化エネルギー

以上より、次式でチャー燃焼速度が算出される。

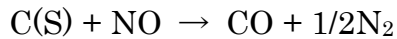
$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p Y_j p_n \frac{R_{PH} R_{CH}}{R_{PH1} + R_{CH}}$$

A_p : 粒子表面積
 Y_j : 粒子化学種の質量分率

p_n : 酸化剤の分圧

今回の計算においては、 $C_{PH}=5.0 \times 10^{-12}$ 、 $C_{CH}=2.0 \times 10^3$ 、 $E_{CH}=7.9 \times 10^7$ とした⁽¹⁻¹⁾。

チャーの表面反応として考慮した反応は以下の3式である。



これらの反応速度定数については、 $C(S)$ と $C(N)$ の酸化反応については上記定数を用い、 $C(S)$ のNO還元反応については次項で述べる。

c. NO_x 生成モデル

石炭に含まれる窒素分は揮発分とチャーに分配され、それぞれNO_x生成に関与する。本研究ではLockwoodらのモデル^(1-1, 1-7)を参考にした。概念図を図1-1に示す。揮発分N分はHCNとして放出され、チャーN分はチャーの酸化反応としてNOとなる。生成されたHCNとNOは先に示した反応機構によりNO_x生成・還元に関与する。さらにチャー(炭素分)はNOをN₂に還元する。

チャーN分の酸化反応はチャーの表面反応と同じものとして扱い、チャーのNO還元反応はLevyらの研究⁽¹⁻⁸⁾を参考に反応速度定数を下記の通り設定した。

$C_{CH}=4.66 \times 10^{-2}$ 、 $E_{CH}=1.45 \times 10^8$ とした。

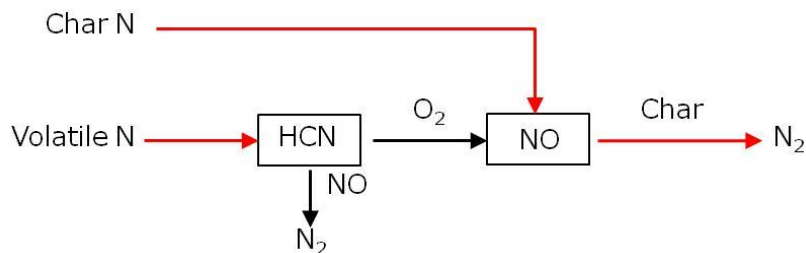


図1-1. NO_x 生成モデル概念図

3-1-2. 解析条件

3-1-2-1. 解析対象

解析対象は、関西電力舞鶴発電所1号機ボイラ⁽¹⁻⁹⁾である。図1-2にボイラ側面図とバーナ配置図を示す。舞鶴発電所1号機ボイラは、三菱重工業製定格出力900MWの微粉炭焚きボイラであり、旋回燃焼方式を採用している。火炉の側面に水平方向に8か所、高さ方向に6段のコールバーナが設置され、2つのファイアボールを発生させる設計となっており、その形状は左右対称形となっている。各段においては、コールバーナ2組と起動用油バーナ等が1つのウインドボックスにまとめられ、高さ方向に計3つのウインドボック

スからなる。またバーナ上部には高さ方向に2段の Additional Air ポート (A.A. ポート) が設置される二段燃焼方式を採用している。

アンモニアの投入方法としては、既存の設備を有効活用する観点から、油バーナをアンモニアバーナとして利用することとする。高さ方向に計3つのウインドボックスが設置されているが、起動用の油バーナは下段のA段とB段、中段のC段とD段の各コールバーナの間に設置されている。最上部のE段とF段のコールバーナの間に油バーナは設置されていないが、同様の位置に空気口が設置されていることから、そこに上流側と同様の仮想的な油バーナを設置することとする。

解析に使用するために作成したメッシュを図1-3に示す。前述のとおりボイラは左右対称形状であることから、対称境界を用いて解析領域はその半分とした。本研究では伝熱に関する評価は行わないため、伝熱管等は無視し火炉壁のみの構成とした。反応機構を用いた化学反応解析を行うことで非常に多くの計算時間が必要になることが想定されることから、メッシュ数を約88,000と少なくした粗いメッシュとしている。

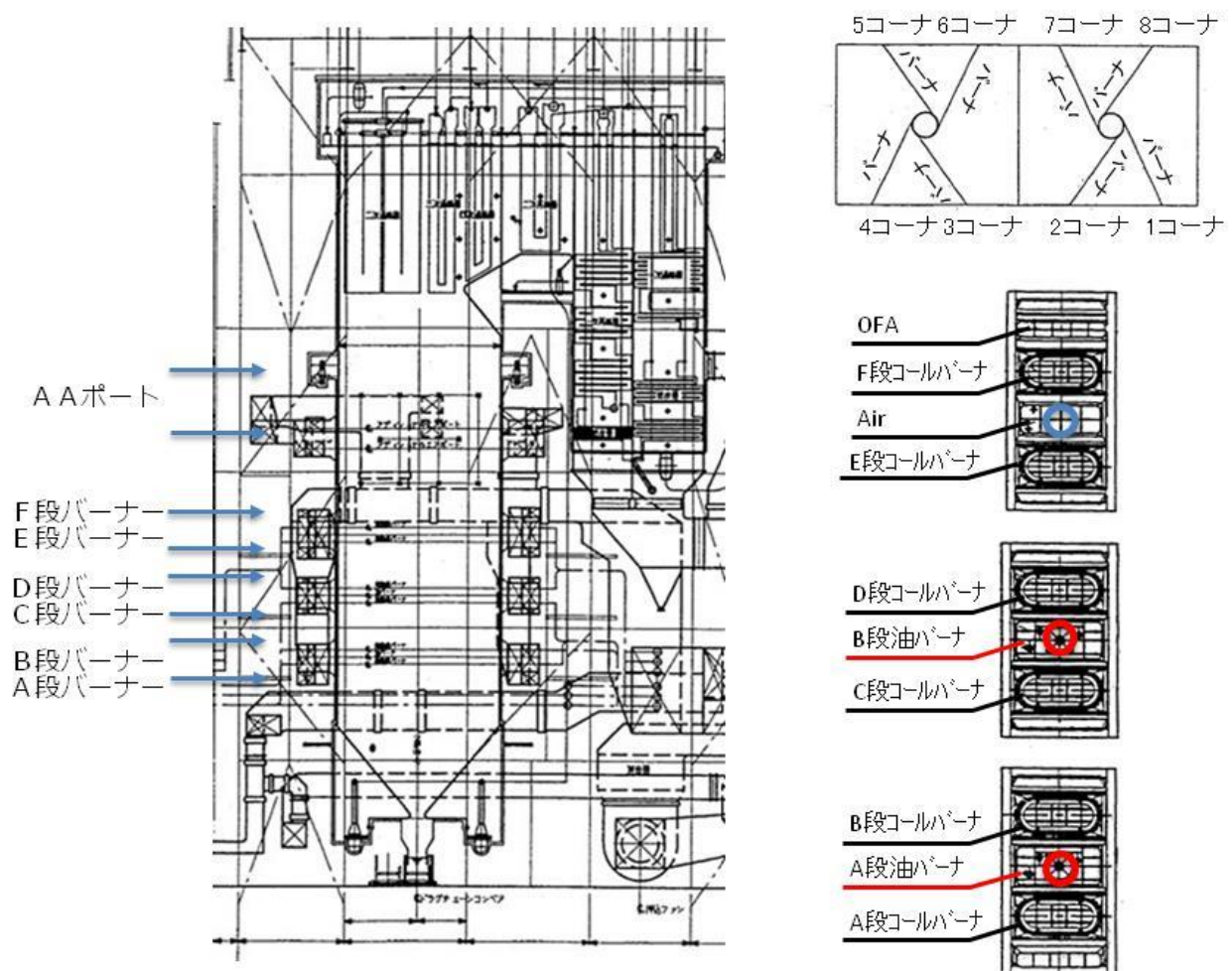


図1-2. 舞鶴発電所1号機ボイラ側面図およびバーナ配置図

3-1-2-2. 境界条件

空気量や微粉炭投入量等の境界条件については、基本的に実機の運転条件に合わせた。

アンモニア混焼については、熱量比で 20%の混焼率をベースとし、アンモニア投入条件を変化させた解析を行った。アンモニア混焼時の燃料投入条件として、ウインドボックス単位で投入熱量が変化せず一定となる条件とした。微粉炭については、アンモニア投入熱量分を減量している。

3-1-2-3. 石炭性状

解析に用いる石炭（微粉炭）は、中国産のD炭の性状を用いた。性状を表に示す。揮発分は、簡略化のため全量メタンとしてモデル化を行った。



図 1-3. 解析メッシュ

表 1-1. 石炭性状表

高位発熱量	(MJ/kg)	27.65
全水分	(wt%)	12.1
工業分析	(wt%)	
	水分	5.2
	固定炭素	53.5
	揮発分	28.7
	灰分	12.6
燃料比	(-)	1.86
元素分析	(wt%)	
	炭素	70.8
	酸素	9.9
	水素	4.2
	窒素	0.99
	全硫黄	0.85

3-1-3. 解析結果

3-1-3-1. 微粉炭専焼およびアンモニア混焼結果

微粉炭専焼時の結果について、図 1-4 にボイラ中心での垂直断面における温度と NO 濃度の分布を示す。NO 濃度について、ボイラ出口での NO 濃度の断面平均値は実機測定値の約 3 割程度の低い値となった。解析結果の実機との整合性については、解析条件のマ

ッティングを行うのであるが、これについては後述する。

次にアンモニアを熱量比 20%分を混焼した結果について、同様に図 1－5 に示す。NO 濃度については、アンモニア混焼により NO 濃度が増大する結果となっており、ボイラ出口での NO 濃度の断面平均値は微粉炭専焼時の 7 倍弱であった。ウインドボックス付近での NO 濃度が増加していることから、アンモニア由来の NO 生成によるものと考えられる。電力中央研究所殿や IHI 殿の実証試験の結果では、アンモニア投入条件によっては NO_x 濃度は増大しない結果が得られているが、本解析結果ではそれを再現できていない。本研究が対象とする舞鶴発電所 1 号機ボイラは、電力中央研究所殿や IHI 殿の実証試験を行った対向流ボイラ用バーナとは異なる旋回流方式であることから、燃焼方式の違いによる差異であることが考えられる。しかし、電力中央研究所殿が実施された単一バーナ炉のシミュレーションにおいても、条件によっては、アンモニア混焼により NO_x が増大している^(4・10) ことを考慮すると、現状の解析技術では微粉炭燃焼場へのアンモニア混焼の状態を再現できていないものと推測する。

前述の微粉炭専焼時の結果の実機とのマッチングについて、実際には、「3－1－1－4．微粉炭燃焼モデル」項で示した揮発分放出やチャー燃焼のパラメータを実機に合うように調整することが一般的である。本研究でもパラメータの調整を行い NO 排出濃度が実機レベルとなる解析結果を得られているが、アンモニア混焼時との比較については、同じように NO 濃度は増大し、後述のケーススタディ結果も同様の傾向を示す結果となっている。そのため、後述のケーススタディにおいては、パラメータ調整等のマッチングは行わない条件で解析を行い、アンモニア混焼の各条件における結果を微粉炭専焼時の結果との比較値を算出し、その差異について知見を得ることとする。具体的には、ボイラ出口境界における NO 排出濃度の断面平均値に注目し、微粉炭専焼時との比で比較することとした。

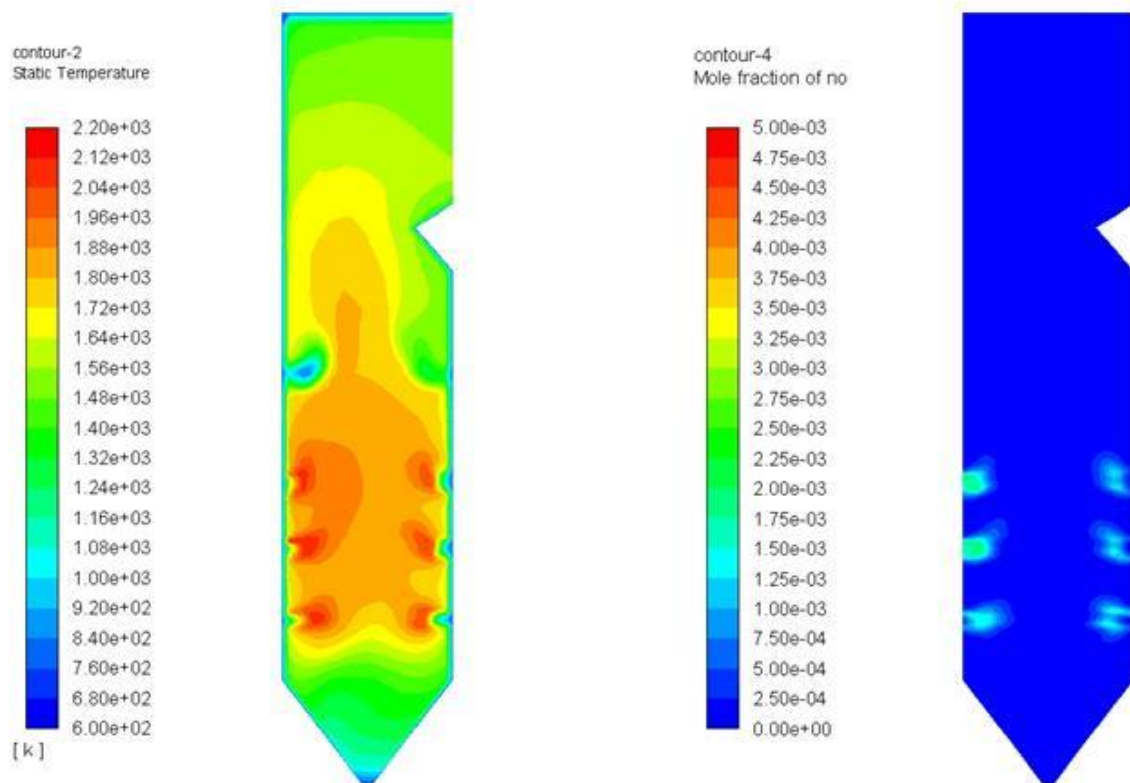


図 1－4．微粉炭専焼解析結果

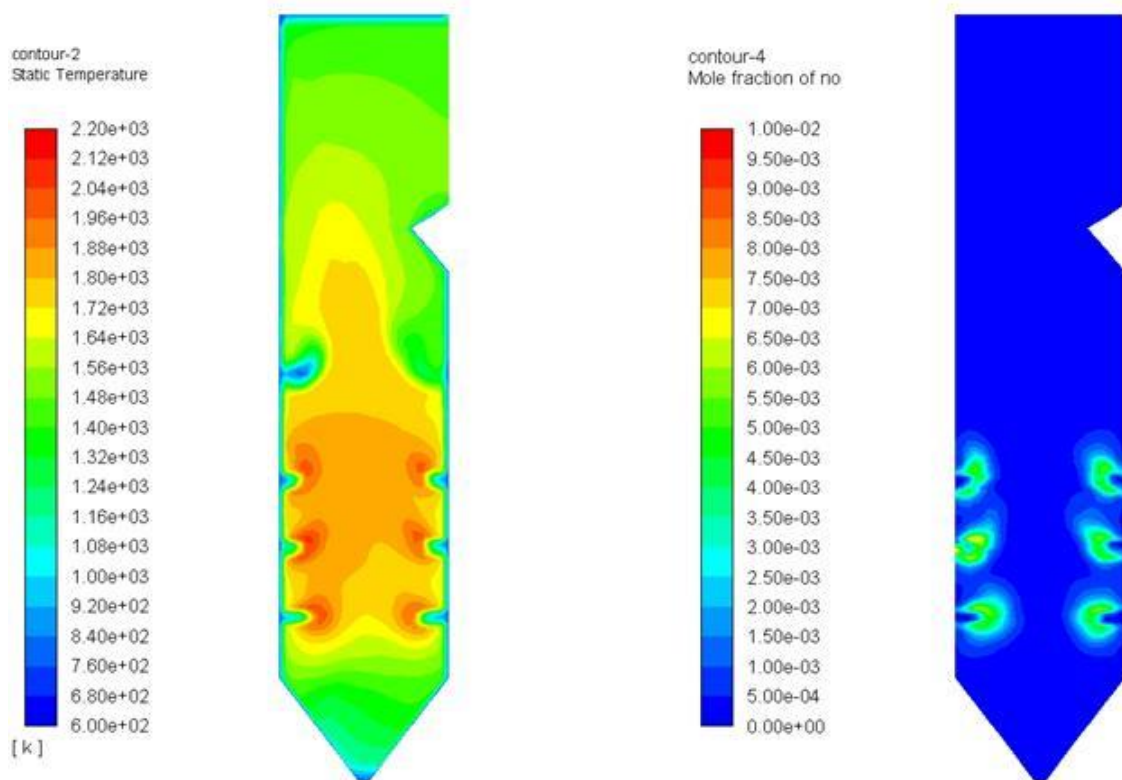


図 1－5．アンモニア 20%混焼解析結果

3-1-3-2. アンモニア混焼ケーススタディ結果

本項では、アンモニア混焼時の運用面での知見を得るためアンモニア投入方法に関するケーススタディを行った結果を示す。バーナー出口境界における NO 排出濃度に注目し、微粉炭専焼時の NO 排出濃度の比で比較する。

図 1-6 にアンモニア混焼比率を変化させた時の NO 排出濃度比変化を示す。混焼率にほぼ比例して NO 排出濃度比が上昇しており、アンモニア混焼率に応じてアンモニア由来の NO 生成によるものと推測できる。

次に、図 1-7 にアンモニア混焼率 20%分のアンモニアを各段単独で投入した場合の NO 排出濃度比変化を示す。微粉炭量はアンモニア投入段のみ混焼分を減らしている。その結果、下段にアンモニアを投入する方が NO 排出濃度比は減少することがわかった。各段における燃料の投入条件は同じであるので、燃烧条件の差として滞留時間が考えられる。微粉炭燃焼場にアンモニアを注入することでアンモニア由来の NO 発生量が増加するが、その NO が気相およびチャーにより還元される反応時間が増大するためであると考えられる。

次に、図 1-8 にアンモニア混焼率 20%分のアンモニアを 3 段のうち 2 段を用いて投入した場合の NO 排出濃度比変化を示す。微粉炭量は同じくアンモニア投入段のみ混焼分を減らしている。その結果、上段・中段に投入した場合が若干 NO 排出濃度比が高くなり、中段・下段および上段・下段はほぼ変化がない結果となった。全体的に変化はあまり見られないが、これも前述のとおり下段投入による NO 還元反応時間の増大効果により NO 濃度が減少していることも考えられる。

上記 2 つのケーススタディにより、アンモニアの投入方法については、全バーナ均一に投入するよりもボイラ下部より投入することにより NO 排出濃度を抑えられる可能性があると考えられる。

これまでは、起動用油バーナ等を代用したアンモニアバーナからアンモニアを投入した結果を示したが、ここではアンモニアを空気と予混合して微粉炭バーナに投入した結果をアンモニア混焼率の変化として図 1-9 に示す。この結果を「予混合燃焼」とし、今までのアンモニアバーナによる投入を「拡散燃焼」として比較している。その結果、予混合燃焼方式の方が NO 排出濃度比は高くなるが、その差は小さい結果となった。

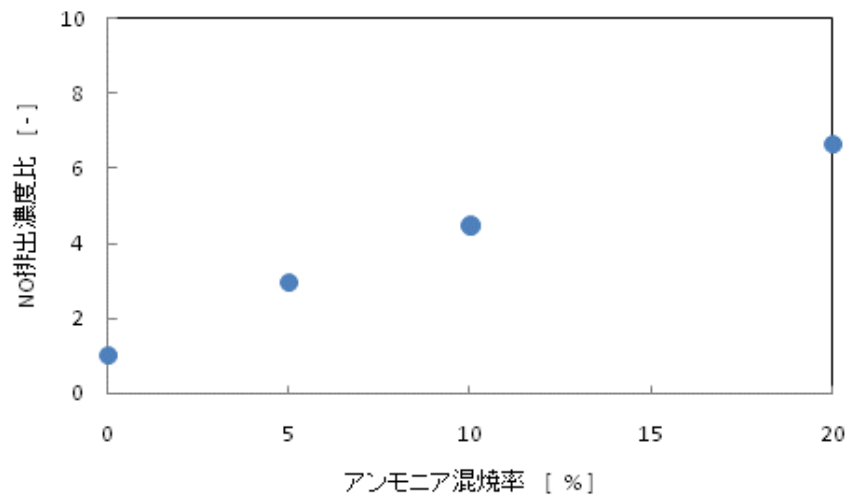


図 1－6．アンモニア混焼率変化

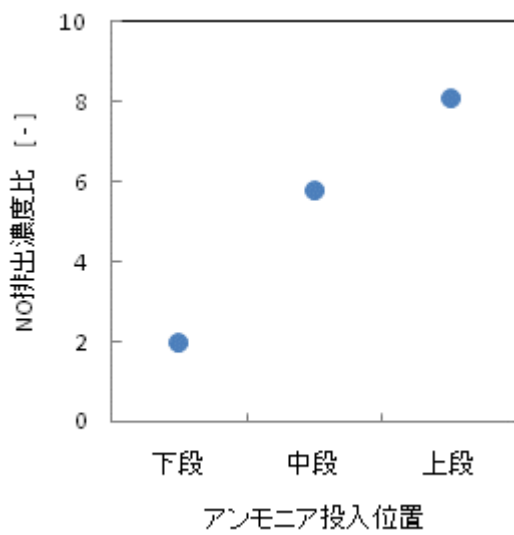


図 1－7．アンモニア投入位置変化（1）

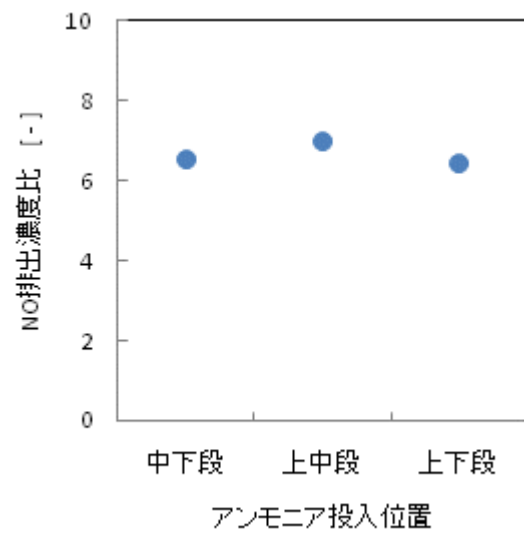


図 1－8．アンモニア投入位置変化（2）

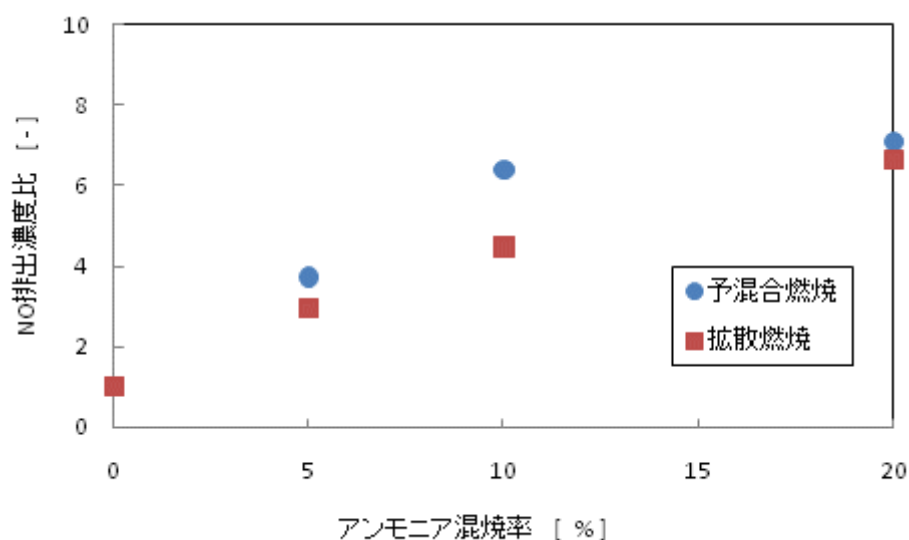


図 1－9．拡散燃焼と予混合燃焼の比較

3－1－4．まとめ

舞鶴発電所 1 号機ボイラを対象とした簡略化反応機構を用いた微粉炭燃焼場のアンモニア混焼シミュレーションを実施し、以下の知見を得た。

- (1) アンモニア混焼により NO 排出濃度は増大する結果が得られた。これは現状の解析技術の限界であり、新たな微粉炭燃焼場へのアンモニア混焼解析技術の開発が必要であると考えられる。
- (2) アンモニアの投入方法について、全バーナ均一に投入するよりもボイラ下部より投入することにより NO 排出濃度を抑えられる可能性がある。
- (3) アンモニアバーナによる拡散燃焼とコールバーナによる予混合燃焼との比較においては、予混合燃焼の方が NO 排出濃度は増大するが、その差は小さい。

3-2. 微粉炭石炭火力・アンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時の各種設備に与える影響評価

3-2-1. 概要

アンモニアのエネルギーキャリアとしての利用については、化石燃料の代替燃料としての利用が考えられる。そこで、現在の火力発電の主力であり、単位発電量あたりの二酸化炭素排出量の多い石炭火力発電所の燃料にアンモニアを混焼させることを目的にその実現性を検討する。

火力発電所の微粉炭焚きボイラにおいてアンモニアの混焼を実施するにあたってはアンモニアを混焼することによるリスクおよびその対策等の事前検討が必要となる。しかし、現在アンモニア混焼プラントは存在しないため、実機微粉炭火力の運転実績、設備および過去文献からアンモニアの各設備に与える影響を検討することが有効な手段となる。本研究においては、文献調査および当社微粉炭火力発電所の運転実績を調査の対象とし、微粉炭石炭火力のアンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時において、各種設備に与える影響およびその影響を抑制する対策検討を実施した。

3-2-2. アンモニア混焼時のアンモニアスリップの可能性について

一般的にアンモニアの燃焼速度は遅いことが知られており、本SIP「エネルギーキャリア」のアンモニア直接燃焼検討においても燃焼性の低いアンモニア火炎の安定化等の検討が行われている。しかし、アンモニアは700℃～900℃程度で分解する⁽²⁻¹⁾ことが確認されており、ボイラ火炉内の排ガス温度はより高温であることから未燃アンモニアが存在した場合においても、多くは火炉内で分解するものと考えられる。また、SIP内の電力中央研究所による研究「既設火力発電所におけるアンモニア利用に関する検討」において、試験炉でのアンモニア20cal.%混焼条件にて火炉出口の未燃アンモニアはほとんど確認されなかった【電力中央研究所 終了報告書参照】ことより、適切なアンモニア混焼条件下では安定した燃焼中にアンモニアスリップする可能性は低いものとする。アンモニアスリップが発生する場合については燃焼異常時が考えられるが、発電設備の運転中に異常が発生した際には、発電設備を安全かつ即座に停止させるためにインターロック機能を有している設備が多く、燃焼異常時には燃料が遮断される。アンモニアの供給についても、燃焼異常を検知した場合に主燃料と同じくアンモニア供給を自動的に遮断する機能を設けることにより、アンモニアスリップを防ぐことが可能である。また、運転員の判断によって手動で発電設備を即座に停止することも可能であることから、異常発生時においてもアンモニアスリップ発生の可能性は低く、発生したとしても極めて短時間であると考えられる。

ただし、実機微粉炭火力における高濃度アンモニア混焼運転実績が無いことから、アンモニアスリップした場合に備えて、アンモニアが各種設備に与える影響について検討を実施する。

3-2-3. 発電所における排煙処理システムについて

燃料の違いや排煙処理システムの違いにより様々な方式があるが、本研究では石炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼を取り上げるため石炭焚きシステムに着目し、さらに石炭焚きボイラにおいて特に国内実績の多い低低温 EP システムを対象とし、アンモニア混焼におけるアンモニアスリップ発生時の各種設備への影響評価を実施する。なお、低低温 EP システムとは GGH 熱回収器の後流に EP を設置する方式である。

3-2-4. 火力発電所におけるアンモニアの設備および用途

現在の火力発電所において、アンモニアは発電所の運用に大きな役割を果たしている。発電所に設置されている主なアンモニア設備としては受入れローディングアーム、圧縮機、アンモニアタンク、アンモニア気化器、アキュムレーター等があり、アンモニアローリー車または船からローディングアームを用いて液化アンモニアを受入れ、アンモニアタンクに貯蔵される。そして、必要量に応じて液体アンモニアを払出し、気化器にて気化、アキュムレーターから安定的にアンモニアガスを各使用箇所へ送ることができる。アンモニアの主な使用箇所としては給水处理、脱硝装置、乾式 EP 上流へのアンモニア注入があり、その各用途は以下のとおり（図 2-1）。

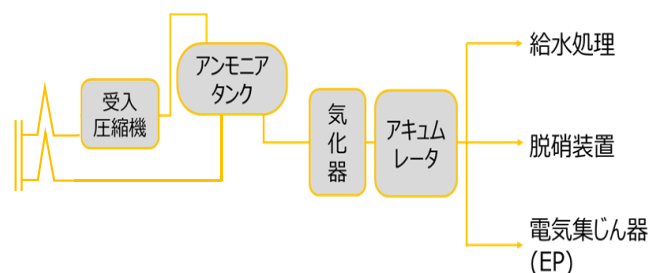


図 2-1. 火力発電所におけるアンモニアの設備および用途

[給水处理]

給水处理についてはボイラ給水の pH を調整し、配管の腐食および減肉を防ぐためにアンモニアを用いる（アンモニア水として供給）。

[脱硝装置]

脱硝装置（特に選択接触還元法）については、ボイラ排ガスに含まれる NOx を脱硝触媒上で窒素と水蒸気に分解するためにアンモニアが注入される。

[乾式 EP]

乾式 EP については、主に高硫黄分重油焚きボイラにおいて EP 上流にアンモニア注入されており、硫酸および酸性硫酸の生成を抑え、硫酸を生成させることで EP の腐食を防ぎ、かつ灰の電気抵抗値を上げて集じん率向上のためにアンモニアが用いられる。

3-2-5. アンモニアスリップ時の各種設備に与える影響評価

研究・調査対象として、大規模微粉炭石炭火力発電所の排煙処理システムにおいて主流となっている低低温 EP 方式を対象として選定し、アンモニアスリップ時の各種設備に与

える影響評価に関して文献調査および検討を実施した。

3-2-5-1. 脱硝装置に対するアンモニア影響評価

脱硝装置にとってのアンモニアは NO_x の還元剤の役割を担っており、排ガス中 NO_x 量に応じて脱硝触媒上流側にアンモニアを注入している。アンモニアによる脱硝性能の低下要因としては、アンモニア起因の反応生成物である酸性硫酸が触媒上に析出することによる触媒目詰まりおよび活性点の被覆が考えられる。しかし、脱硝装置の温度域は約 $350\sim 400^\circ\text{C}$ と高温であることから、酸性硫酸による触媒上への析出および活性点の被覆は発生しないと考えられ、また開放点検時において触媒層の上層部に硫酸等の堆積および詰まりが発生していないことから、アンモニア混焼実施時にボイラからアンモニアがリークした場合においても脱硝装置に対して悪影響を及ぼす可能性はほとんどないと考えられる。

しかし、ガス温度が低温（約 250°C 以下）であるボイラ起動・停止時については、脱硝反応は進行しにくく、アンモニアが存在する場合は酸性硫酸による目詰まりや活性点被覆による脱硝触媒の劣化が発生することもあると考えられる。よって、微粉炭火力発電所におけるアンモニア混焼において、ボイラ起動・停止操作中のアンモニアの注入は避けるべきと考える。

3-2-5-2. 空気予熱器に対するアンモニア影響評価

(1) 空気予熱器へのアンモニアの影響

空気予熱器へのリークアンモニアは、酸性硫酸による空気予熱器閉塞の原因となるが、酸性硫酸の生成については以下の反応式 ($\text{NH}_3 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4$) のとおり進行するため、空気予熱器の閉塞についてはリークアンモニア濃度が大きく関係していると考えられる。また、ばいじん量も関係しており、石炭発電所のように排ガスに灰分を多く含む場合、空気予熱器エレメントに付着した酸性硫酸は少量であれば灰分が後流側へ除去する。しかし、酸性硫酸の量が増加すると空気予熱器エレメントに付着した酸性硫酸に灰分等が付着し、空気予熱器閉塞を引き起こすことが考えられる。また、石炭焚きボイラ空気予熱器におけるリークアンモニア濃度に対する差圧上昇速度については、リークアンモニア濃度の増加に伴って空気予熱器閉塞速度が加速すると考えられている。

(2) 高濃度アンモニアの空気予熱器への影響

空気予熱器にリークするアンモニアが低濃度のとき、ボイラ排ガスにおいて、アンモニアと SO_3 から酸性硫酸が生成する反応は約 $150\sim 210^\circ\text{C}$ で進行すると考えられており⁽²⁻²⁾、空気予熱器閉塞はこの温度域にある中温エレメントで発生する。低濃度リークアンモニアと比較し、高濃度アンモニアが空気予熱器にリークした際には空気予熱器内で生成する酸性硫酸の生成量増加および付着位置の変化によって、空気予熱器閉塞が加速すると考えられる。アンモニア濃度の上昇に伴い、酸性硫酸析出温度が上昇することが知られており、空気予熱器内では NH_3 濃度が上昇するにしたがって、より高温域で酸性硫酸が析出すると考

えられる。アンモニア濃度の上昇に伴い酸性硫酸析出位置が空気予熱器の上部（高温層側）へ拡大し、空気予熱器低温側に設置する空気予熱器スートブロワの差圧低減効果が低くなり、さらにアンモニア濃度が上昇すると中温エレメント域を超えて構造が複雑な高温エレメントに酸性硫酸が付着することも考えられ、 NH_3 濃度が増加するに伴って空気予熱器閉塞は加速するリスクがあると考えられる。

空気予熱器が閉塞することで空気予熱器差圧が上昇し、プラント運転のためのファン動力が増大する。ファンの負荷増大によるサージング等が発生した際には、負荷抑制や停止に至ることも考えられる。また、ボイラ内や煙道の圧力を正常域に保てなくなる可能性もあり、通風系ダクト設計圧力の超過等、発電設備の安定運転に支障をきたす恐れがある。

3-2-5-3. ガス加熱器（GGH）に対するアンモニア影響評価

ガス加熱器の構造および排ガス環境は空気予熱器と類似の部分が多く、アンモニアが及ぼす影響も空気予熱器と同様の傾向があると考えられる。

3-2-5-4. 電気集じん器に対するアンモニア影響評価

（1）電気集じん器集じん性能に影響する因子

a. ダスト電気抵抗率と集じん性能の関係

電気集じん器は、ダストを荷電し、電氣的にダストを分離捕集する方法であるため、ダストの電気抵抗が集じん性能に最も影響を及ぼす因子であることが知られている。ダストの電気抵抗率と電気集じん器集じん性能（以下、EP 集じん性能）の挙動を図 2-2 に示す^(2-3,4)。

- 電気抵抗率 $\leq 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$

電気抵抗の低いダストでは捕集されたダストが集じん極上で直ちに電荷を失って再飛散するジャンピング現象が発生し、集じん性能は低下する。

- $10^4 \Omega \cdot \text{cm} \leq$ 電気抵抗率 $\leq 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$

集じん極に捕集・堆積したダスト内を適度な電流が流れるため、供給電流・電圧が安定し、高い集じん性能を維持できる。

- $10^{11} \Omega \cdot \text{cm} \leq$ 電気抵抗率 $\leq 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$

集じん極に捕集されたダストが電荷を中和しきれず、部分的に絶縁破壊される逆電離現象が発生し、集じん性能が低下する。

- $10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \leq$ 電気抵抗率

集じん極上のダストの絶縁破壊が全面に広がり、集じん極から放電極へプラスイオンが放出され、集じん極に向かうマイナスに帯電しているダストの電荷を中和することで集じん性能が大きく低下する。

したがって一般に EP 集じん性能を十分に発揮できるのは $10^4 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ とされている。

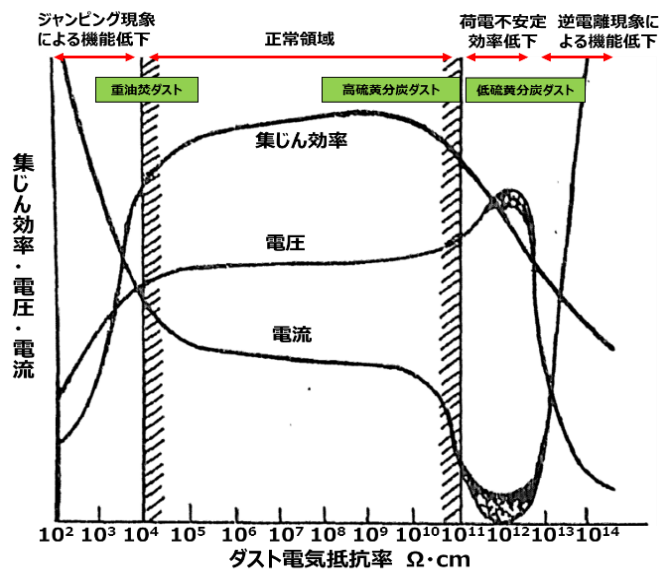


図 2-2. ダストの電気抵抗と E P 集じん性能の挙動

b. ダスト電気抵抗

ダストの電気抵抗の違いは主に下記の内容に起因することが知られている。

- (a) 燃料性状、ダストの成分組成
- (b) 排ガス温度、排ガス中の水分、SO₃ 量
- (c) 燃料性状、ダストの成分組成

一般的な石炭ボイラおよび重油ボイラのダストの性状を比較すると表 2-1 のようになる。⁽²⁻⁵⁾

重油ボイラのダストでは主成分が未燃カーボンであり電気抵抗率が低いのに対して、石炭ボイラのダストでは主成分がシリカやアルミナであるためダスト全体の電気抵抗率が高くなることが特徴である。

表 2-1. 石炭ボイラおよび重油ボイラのダスト性状比較

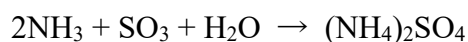
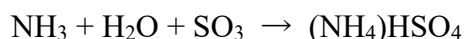
項目			石炭焚ダスト	重油焚ダスト
ばいじん濃度		g/m ³ N	10~20	0.05~0.15
ダスト粒子径		μm	20~30	1~3
ダスト成分	SiO ₂	wt%	60~75	15~20
	Al ₂ O ₃	wt%	15~20	-
	SO ₃	wt%	0.3~0.7	25~35
	C	wt%	0.4~0.8	50~60

(2) 電気集じん器へのアンモニアの影響

上述のとおり、EP 集じん性能はダストの電気抵抗によって大きく変化し、過去の発電所運転実績から、ダストの電気抵抗は排ガス中にアンモニアが存在することによって変化することがわかっている。

ダストの電気抵抗へのアンモニアの影響を検討する際の参考として重油ボイラにおいて電気集じん器前にアンモニアを注入している事例がある。石炭ボイラと異なり、重油ボイラ排ガスのダストはカーボンが主成分であるため電気抵抗率が極めて低い。そのため、重油焚きダストでは再飛散現象を引き起こして集じん性能が低下するリスクを有する。そこで、この対策としてダストの電気抵抗率を上昇させるために、電気集じん器前の排ガス中にアンモニアを注入し、排ガス中 SO_3 と反応・生成する硫酸を、重油ボイラのダストと混合させ、EP 集じん性能向上を図っている（特に高硫黄分重油焚きの場合は、集じん性能向上の他に集じん極の防食にも効果がある）。

一方、石炭焚きボイラのダストは、主成分がシリカやアルミナであるため電気抵抗率が高い。そこで石炭発電所では電気集じん器入口ガス温度が低く、表面伝導（ H_2O および SO_3 ）によってダストの電気抵抗率を低下させることができる低低温 EP 方式を採用することで EP 集じん性能を向上させている。石炭ボイラにおいてアンモニアがボイラからスリップしてきた場合においても、重油ボイラの場合と同様に排ガス中 SO_3 がアンモニアと反応して硫酸や酸性硫酸になると考えられ、ダストの電気抵抗率に影響を及ぼす可能性がある。排ガス中 SO_3 とアンモニアが反応して硫酸および酸性硫酸が生成される反応式はそれぞれ以下のとおり。



反応式から、いずれの反応においても表面伝導を示す SO_3 および H_2O が排ガス中から減少することがわかり、ダストの表面伝導が減少し、電気抵抗率を上昇させる可能性があると考えられる。よって、アンモニアスリップ時において良好な集じん性能を示すダストの電気抵抗率の領域を逸脱してしまう可能性があると考えられる。

排ガス中ダスト電気抵抗の上昇によって EP 集じん性能が低下した場合には、電気集じん器後流側のばいじん濃度が上昇することとなり、ばいじん排出規制値を超過するおそれがある。

（３）集じん灰性状へのアンモニアの影響

ボイラからのアンモニアスリップによって電気集じん器入口アンモニア濃度が高いときには灰中水分等へアンモニアが溶解込むことによって集じん灰中アンモニア濃度が上昇することが考えられる。また EP で捕集した灰については埋立ておよびセメント原料として利用されることが多いが灰中にアンモニアが存在すると大気中へのアンモニア放出による臭気、環境汚染、およびセメントの品質低下等を引き起こす可能性がある。

3-2-5-5. 脱硫装置に対するアンモニア影響評価

(1) 脱硫性能に影響する因子

本研究では国内の火力発電所向けに広く採用されている湿式法のひとつである石灰石こう法、特に当社微粉炭火力発電所で採用しているジェットバブリングリアクタ方式⁽²⁻⁶⁾（以下、JBR 方式）を研究・調査対象とする。

脱硫性能を支配する主要因子は吸収塔の浸液深、吸収液 pH および石灰石濃度である。

浸液深は JBR 方式（吸収液中に排ガスを噴出して気液接触によって SO₂ を吸収させる方式）で使用される指標の一つであり、吸収液面からスパージャパイプのガス噴出口までの液深さを指し、浸液深を大きくすると排ガス圧力損失が大きくなり、ファン動力が増加するが、排ガスと吸収液の接触が増加するため脱硫率は向上する。

また吸収液 pH は通常、石灰石を投入することによって一定に制御している。しかし、石灰石投入量を増加させて吸収液 pH を上昇させると、副生成物である石こう中に石灰石が混入するために石こうの純度が低下するおそれがあるが、脱硫率は向上する。

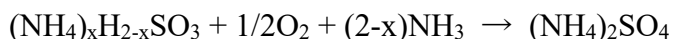
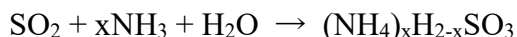
(2) 脱硫装置へのアンモニアの影響

a. 脱硫性能への影響

アンモニアは塩基性かつ溶解性を持つため、排ガス中にアンモニアが含まれると排ガスが脱硫装置に流入すると同時に、吸収液へアンモニアが溶解する。

脱硫性能を支配する主要因子（吸収塔の浸液深、吸収液 pH および石灰石濃度）のうち、浸液深については、脱硫率をコントロールするために排ガス量や入口 SO₂ 濃度によって制御される。よって、排ガス中にアンモニアが含まれていても影響はほとんどないと考えられる。

一方、吸収液 pH および石灰石濃度については、排ガス中アンモニアが脱硫装置へ流入することによって影響を及ぼす可能性がある。石灰石こう法において、一般的に吸収液 pH が高い方が脱硫率が上昇することが知られている。しかし、pH が高くなると未反応石灰石による石こう純度の低下やスケール付着の原因となりうることから、石灰石スラリー供給量を制御して適切な pH 域に調整している。排ガス中アンモニアが脱硫装置へ流入した場合、アンモニアの溶解に伴う吸収液 pH 上昇の分、石灰石スラリー供給量は減少することにより、pH の大きな変化は起こらないものと考えられる。また、アンモニアを用いた脱硫方式もあり、石灰石スラリー供給量減少による脱硫率低下については、アンモニアによる脱硫反応により補われるものと考えられ、結果として脱硫性能への大きな影響はないものと考えられる。アンモニア法による脱硫反応式は以下のとおり。



しかしながら、吸収液中アンモニアによる溶解塩類の不均衡や、アンモニア法の副生物である硫安等の配管等への付着影響が生じるおそれがあるため、注意する必要がある。

b. 副生物（石こう）への影響

排ガス中アンモニアが脱硫装置に流入すると、大部分のアンモニアは脱硫吸収液に溶解すると考えられる。当社微粉炭火力発電所を例に考えると、排ガス中アンモニア濃度が 5ppm で運転した場合、吸収液中アンモニア濃度は約 1,000mg/L になる。したがって、副生物である石こう含水にも約 1,000mg/L のアンモニアが含まれることになり、石こうからの臭気や品質低下を招く可能性がある。

c. 脱硫排水への影響

吸収塔では SO_2 の他にも排ガス中に含まれる塩素やフッ素等も吸収液に溶解、除去される。これらは吸収液内に不純物として蓄積されるため、脱硫装置の性能低下や装置材料の腐食などの悪影響を与える。よって、その対策として一定濃度以上に濃縮されないように吸収液の一部を石こう分離の後に脱硫排水として排出している。そのため、排ガス中のアンモニアが吸収液に溶解すると、その溶解したアンモニアを吸収液に含んだまま脱硫排水として排出されることとなり、アンモニアスリップ発生時には通常運転よりも高濃度のアンモニア成分を含む排水が排出されることとなる。

また、吸収液中においては排ガス中 SO_2 由来の亜硫酸水素イオン (HSO_3^-) および NO_x 由来の亜硝酸イオン (NO_2^-) が反応して N-S 化合物（含硫窒素化合物）を生成することが知られている。また、脱硫装置には、吸収液中に酸化空気を吹き込んでいることから、吸収液に溶解したアンモニアが N-S 化合物の原因となる亜硝酸イオンに酸化される可能性がある。この N-S 化合物は排水中 N 分の増加に加えて COD 成分となる物質もある。さらに N-S 化合物の COD 成分は難処理性 COD として知られており、通常の排水処理では除去することが難しく、処理するためには専用の処理設備を設置する必要がある。

3-2-5-6. 通風機に対するアンモニア影響評価

誘引ファンおよび脱硫ファンへのアンモニアスリップの影響としては、アンモニアおよび酸性硫酸による腐食が考えられる。しかし、石炭焚きボイラ後流側に設置されるファンについては、アッシュエロージョンや酸性硫酸による腐食対策をはじめとするファンの使用環境に応じた信頼性、耐久性向上の対策を実施している。そのためアンモニアがボイラからスリップした場合においても通風機への直接的な影響はほとんどないと考えられる。しかし、これまでも述べたようにアンモニアスリップは酸性硫酸や塩化アンモニウムによる空気予熱器やガス加熱器の閉塞を引き起こす可能性があり、それによって通風機の動力増大や安定運転可能な領域を逸脱し、サージング等の通風機運転への影響が発生する可能性がある。

3-2-5-7. 排水処理装置に対するアンモニア影響評価

ボイラからのアンモニアスリップによって脱硫排水性状に影響を及ぼす成分としては排水中窒素分および COD 成分である。

a. 排水中窒素分

排水中窒素分については、水質汚濁防止法によって表 2－2 のような規制基準が設けられている。しかしながら、通常排出基準については法令とは別に地方行政と環境協定を結ぶことになり、法令よりも厳しい排出基準を課される場合が多い。

発電所ボイラ給水の pH 調整には主にアンモニアを使用しているため、高塩系排水処理装置で処理される排水の内、復水脱塩装置再生排水にはアンモニアが含まれていることが多い。このように高塩系排水処理系統で処理される排水の中には既にアンモニアが含まれている。しかし、ボイラからアンモニアがスリップして脱硫吸収液に溶解したアンモニアが脱硫排水として高塩系排水処理装置に大量に流入した場合、また既設排水処理設備にて処理できない形態の窒素が流入した場合には排水基準を超過する可能性がある。また、アンモニアスリップによって脱硫排水中に、N-S 化合物（含硫窒素化合物）濃度も増加する可能性があるため、これらの値に留意した運転が必要となる。

b. 排水中 COD

排水中 COD 成分については、水質汚濁防止法によって表 2－2 のような規制基準が設けられている。しかしながら、窒素分と同様に法令よりも厳しい排出基準を環境協定により課される場合が多い。

ボイラからのアンモニアスリップにより脱硫排水中 N-S 化合物（難処理性 COD）が増加した場合、排水中 COD 濃度偏差が大きい場合および既設処理設備で処理できない難処理性 COD が増加した場合には排水基準を超過する可能性があるため、これらの値に留意した運転が必要となる。

表 2－2. 排水中 N 分および COD 成分の排出基準

項目	水質汚濁防止法での許容限度
アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物、硝酸化合物	アンモニア性窒素に 0.4 を乗じたもの、亜硝酸性窒素および硝酸性窒素の合計値が 100mg/L
窒素含有量	120mg/L（日間平均 60mg/L） 【ただし環境大臣が定める水域にのみ適用】
化学的酸素要求量（COD）	160mg/L（日間平均 120mg/L）

3－2－5－8. 煙突に対するアンモニア影響評価

（1）煙突の概要およびアンモニア影響評価

石炭火力発電所の煙突においては、脱硝・脱硫装置、電気集じん器等の環境対策技術により公害防止対策が実施されているものの大気汚染低減を目的に煙突を高くすること、および集合煙突化が行われている。煙突は大別すると、鉄筋コンクリート製煙突と鋼製煙突の 2 種類がある。鉄筋コンクリートと比べると鋼製煙突は軽量で強く、材料的にも有利であったため 1990 年代以前は鋼製煙突が主流であり、鉄筋コンクリート煙突は高さ 100m 以下の小規模な煙突にのみ採用されてきた。しかし、近年ではコンクリート構造物の地震

力に対する解析技術の進歩により工事費が安価である鉄筋コンクリート煙突が主流となっている。

いずれの煙突においても、煙突の内部には内筒が設けられ、耐力材としての鋼材、耐候性および断熱性を有するライニングから成る。ライニングには耐力材にライニングとしての要素も併せ持つステンレスクラッド鋼、クローム鋼、FRP（サスペンション材として使用）等の軽量で耐候性に富んだメンテナンスフリー材料を採用することが多い⁽²⁻⁷⁾。また、ライニングはアンモニアおよび酸性硫安等の腐食に対して耐性を有すると考えられる。よって、ボイラからアンモニアがスリップした場合、煙突へのアンモニアの影響としては鋼製または鉄筋コンクリート煙突いずれにおいてもほとんど影響はないと考えられる。

（２）アンモニア排出基準

アンモニア排出の法規制としては大気汚染防止法第十七条および悪臭防止法第十条において以下のとおり事故時の措置について定められている（表２－３）。

また、悪臭防止法についてはこの他に表２－４のと通りの排出規制基準が定められている。なお、当社微粉炭火力発電所 100%負荷運転においてアンモニアを 20cal.%混焼したケースを考えると、投入アンモニア全体の約 4 分の 1 のアンモニアが煙突までスリップした場合には排出基準を超過する可能性がある。

表 2－3．アンモニア排出に関する規制（事故時の措置）

法令	条文	内容
大気汚染防止法	第十七条	事故等が発生し、アンモニアが大気中に多量に排出されたときは… ・直ちに応急措置を講じ、かつその事故を速やかに復旧するように努めなければならない。 ・直ちに事故の状況を都道府県知事に通報しなければならない。 ・都道府県知事は必要に応じてその事故の拡大または再発防止のための必要な措置をとることを命ずることができる。
悪臭防止法	第十条	都道府県知事が指定する地域内において、事故が発生し、悪臭原因物の排出が規制基準に適合せず、または適合しないおそれが生じたときは… ・直ちに応急措置を講じ、かつその事故を速やかに復旧しなければならない。 ・直ちに事故の状況を市町村長に通報しなければならない。 ・市町村長は必要に応じて引き続き当該悪臭物の排出の防止のための応急措置を講ずべきことを命ずることができる。

表 2－4．アンモニア排出に関する規制（排出基準）

法令	条文	内容	
			環境省令
悪臭防止法	第四条	排出される特定悪臭物質の「 敷地の境界線の地表における規制基準 」を環境省令で定める範囲において許容限度を定める。	大気中におけるアンモニア含有率が 1ppm 以上、5ppm 以下
		排出される特定悪臭物質の「 排出口における規制基準 」を環境省で定める方法により特定悪臭物質の流量または濃度の許容限度として定める。	算出方法は悪臭防止法施行規則第三条に規定

3-2-6. アンモニアスリップ時の各種設備に与える影響を抑制する対策検討

3-2-5章にて評価した各種設備に与えるアンモニアの影響に関して、管理ポイントを整理するとともに、既存の技術・設備および運用対策によりアンモニア影響を抑制する方法について、文献調査および検討を実施した。

3-2-6-1. 脱硝装置に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 脱硝触媒の閉塞および性能劣化に対する管理手法

脱硝触媒の閉塞状況の管理手法として、脱硝装置出入り口差圧計による監視が可能であり、管理値に到達した際には警報を発信させることが可能である。

また、脱硝触媒の性能劣化に対する管理手法として、負荷一定条件において常設 NO_x 計の指示値から算出される脱硝率の推移を確認して触媒性能を把握する手法および、排ガスダクトからガスを採取して NO_x 濃度やアンモニア濃度を多点分析して脱硝装置全面の触媒性能を確認する手法がある。

(2) 起動・停止操作中のアンモニア影響に対する運用対策

脱硝入口排ガス温度が低温となる間はアンモニア混焼を避けることが望ましく、ボイラ起動・停止操作中の燃料には重油や石炭等の燃料を利用し、ガス温度を十分高く維持できる通常運転中のみアンモニア混焼とする方法が考えられる。

3-2-6-2. 空気予熱器に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 空気予熱器の閉塞に対する管理手法

空気予熱器の閉塞状況の管理手法として、排ガス系統または燃焼用空気系統の空気予熱器出入り口差圧計による監視が可能であり、管理値に到達した際には警報を発信させることが可能である。

また、脱硝装置出口に設置されているアンモニア計により、脱硝装置出口のアンモニア濃度を測定し、空気予熱器に流入するアンモニア濃度の監視が可能である。

(2) 空気予熱器閉塞に対する運用対策

空気予熱器閉塞の運用対策として、スートブロワ、水洗および運転中水洗装置 (OSW: On Stream Washing System) がある。

[スートブロワ]

運転中に伝熱エレメント上の付着堆積物を除去するために、蒸気または空気を噴霧できるスートブローイング装置をガス入口および出口に設置している。空気予熱器閉塞物質は空気予熱器の低温側に付着するため主にガス出口側 (低温側) に設置されたスートブロワを定期的を使用している。空気予熱器閉塞兆候確認時には使用頻度の増加により一定の差圧低減効果は期待できるが、蒸気を直接噴霧することからエレメントに物理的な損傷を与

える場合があるため、その運用については注意が必要である。

[水洗]

空気予熱器閉塞の主原因である酸性硫酸は水に溶けやすいため、空気予熱器が閉塞した際に付着物を除去するための対応としては空気予熱器エレメントを水洗することが有効な手段である。ただし、空気予熱器水洗にはおよそ2～3日の発電設備の停止を要する。また、空気予熱器水洗時はエレメントの防錆対策（乾燥および防錆剤塗布）を十分に行わない場合、エレメントの腐食により空気予熱器の再閉塞の発生および空気予熱器の性能低下を引き起こすことがある。

[運転中水洗装置（OSW）]

通常空気予熱器はスートブロワの適切な使用により伝熱エレメント上の付着堆積物を除去することができるとされているが、使用燃料や運転条件によってはスートブロワでは十分な効果が得られない場合がある。このような場合においても OSW を設置している空気予熱器においては、運転中に高圧ジェット水を空気予熱器に吹きつけ、伝熱エレメント上の閉塞物質を除去することができる⁽²⁻²⁾。しかし、OSW は高圧水を噴霧するため、エレメントやロータへの熱衝撃の影響、および後流機器への洗浄ミストの飛散による運転上の問題（灰固着、差圧上昇等）がないように OSW の使用をする際には発電設備運転状況や OSW 使用頻度に注意が必要である。

3-2-6-3. ガス加熱器（GGH）に対するアンモニア影響抑制対策

（1）ガス加熱器の閉塞に対する管理手法

ガス加熱器の閉塞状況の管理手法として、熱回収器および再加熱器の排ガス系統の差圧計による監視が可能であり、管理値に到達した際には警報を発信させることが可能である。

（2）ガス加熱器閉塞に対する運用対策

ガス加熱器閉塞の運用対策として、スートブロワ、鋼球散布装置および水洗がある。

[スートブロワ]

運転中の伝熱エレメント上の付着堆積物除去を目的とし、3-2-6-2章（2）項に記載の空気予熱器用スートブロワと同様の設備がガス加熱器にも設けられている。

[鋼球散布装置]

本装置の設置目的はスートブロワと同様であり、設備によってはスートブロワの代わりに鋼球散布装置が設置されているものがある。鋼球散布装置は数 mm の鋼球を伝熱管の上部から散布し、付着物を除去するものであり、散布した鋼球はダストと分離され、再び上部に輸送される。なお、伝熱管に大量のばいじんが付着している場合、伝熱管の間隙が小さくなり鋼球が伝熱管の間に挟まるおそれがあるため、加速的に閉塞が進行している際には運用について注意が必要である。

[水洗]

3-2-6-2章（2）項に記載の空気予熱器における運用対策同様、ガス加熱器に対しても水洗は有効な手段であると考えられる。なお、注意点についても空気予熱器の項目記載内容と同様である。

3-2-6-4. 電気集じん器に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 電気集じん器の性能低下に対する管理手法

大気汚染防止法によりばい煙測定の実施について規定されており、定められた頻度で煙突から排出されるばいじん濃度を測定する必要がある。

(2) 電気集じん器の性能低下に対する運用対策

石炭ボイラにおいてアンモニアがボイラからスリップしてきた場合、排ガス中 SO_3 がアンモニアと反応して硫酸や酸性硫酸になり、ダストの電気抵抗率を上昇させる可能性があると考えられるため、良好な集じん性能を示すダストの電気抵抗率範囲から高側に逸脱する場合を想定して運用対策を検討する。運用対策としては、使用石炭種の変更および電気集じん器荷電制御の変更がある。

[使用石炭種の変更]

燃料として使用する石炭性状に関して、硫黄分やアルカリ分が高い石炭を使用した場合、低ダスト電気抵抗率の灰が生成しやすいと考えられる。また灰分が低い石炭を使用する場合、ばいじん量が低下するため対応可能となりうるものと考えられる。

[荷電制御の変更]

高ダスト電気抵抗率の場合に発生する逆電離現象に対して、連続荷電から間欠荷電またはパルス荷電に変更して電圧印加の休止期間を設けることにより、ダスト層の絶縁破壊を抑制し、集じん性能を上昇させることが可能であると考えられる⁽²⁻⁸⁾。

3-2-6-5. 脱硫装置に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 石こうの品質低下に対する管理手法

石こうの品質管理として、ある一定の頻度で性状分析を実施し、引取先の基準値を満足しているか確認している。分析項目としては、石こう純度、pH、含有水分量等がある。基準値を満足していない場合には引取りを拒否されるおそれがあるため、石こうの品質についても留意する必要がある。

(2) 石こうの品質低下に対する対策

石こう中のアンモニアを除去するためには新たな技術開発、検討が必要であるものと考えられるため、アンモニア混焼率の低減等により脱硫排ガス中のアンモニア濃度を問題としない程度まで低減することが望ましいと考える。なお、石こうの品質低下により引取り先を確保できない場合には産業廃棄物としての処理も考えられる。

3-2-6-6. 通風機に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 通風機に対する運用対策

石炭焚きボイラ後流側に設置される通風機についてはアンモニアの直接的な影響はほとんどないが、排ガス中 SO_3 との反応によって生じる酸性硫酸や塩化アンモニウムによる空気予熱器やガス加熱器の閉塞による通風機の動力増大および安定運転への影響が生じる可能性があると考えられる。

空気予熱器およびガス加熱器の閉塞に関する対策については、3-2-6-2および3-2-6-3章に記載のとおり。

3-2-6-7. 排水処理装置に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 排水処理装置のアンモニア影響に対する管理手法

排水処理装置のアンモニア影響の管理手法として、全窒素、アンモニア性窒素、COD等の計器による排水中濃度の監視が可能であり、管理値に到達した際には警報を発信するとともに、排水送水を遮断して再循環させることも可能である。

(2) 排水処理装置のアンモニア影響に対する設備対策

アンモニアスリップにより水質汚濁防止法、条例、公害防止協定等により定められた排水基準を超過する可能性が発生した際には、対象物質を除去するための排水処理装置の設置または増設により対応可能となる。

代表的な排水中窒素処理方法としては、微生物を利用した処理方法である生物脱窒法、排水のpHおよび温度を高くしてNH₃を放散させるストリッピング法、触媒を利用して排水中アンモニアおよび硝酸イオン等の窒素を処理する触媒脱窒法等がある。また、排水中COD処理方法としては、石炭等を炭化して水蒸気などにより賦活した活性炭を用いて排水中の有機物等の成分を吸着除去する活性炭吸着法、樹脂内の細孔表面と被吸着物質間の物理的相互作用により排水中から様々な有機物を吸着する合成吸着剤処理等がある⁽²⁻⁹⁾。

3-2-6-8. 煙突に対するアンモニア影響抑制対策

(1) 煙突出口のアンモニア濃度の管理手法

煙突入口にアンモニア計を設置することにより、煙突出口のアンモニア濃度の監視が可能である。

(2) 煙突出口のアンモニア濃度に関する対策

当社発電所設備を想定した場合、アンモニアを20cal.%混焼した際に、投入アンモニア量全体の約4分の1のアンモニアが煙突までスリップした場合には排出基準を超過する可能性があるが、その程度のアンモニアが排ガス中に存在する場合には煙突前段の設備に多大な影響を及ぼしており発電設備の運転継続は困難な状況であるものと考えられるため、現実的な懸念事項として考慮する必要はないものとする。

3-2-7. まとめ

微粉炭石炭火力のアンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時において、各種設備に与える影響について検討を実施した。アンモニアの影響をほとんど受けないと想定される設備、アンモニアにより発電所稼動にも影響を与える可能性がある設備等、設備によりアンモニアが与える影響の度合いは異なることが確認された。また、各設備のアンモニア影

響に関して、管理ポイントおよび影響抑制のための設備・運用対策についても検討し、整理を行った。

他研究の試験炉によるアンモニア混焼試験結果より、アンモニア混焼時にアンモニアスリップが発生する可能性は低いものと考えるが、実機アンモニア混焼においてアンモニアスリップが発生した場合に関しても、本研究において各種設備に与える影響およびその抑制対策を整理した結果がアンモニアスリップ対応の一助となるものと考える。

3-2-8. 今後の課題

アンモニアスリップ時に各種設備に与える影響の度合いについては、スリップするアンモニア濃度により異なるものと考えられる。本研究では想定されうる設備影響に関して検討を行ったが、実機アンモニア混焼時におけるアンモニアスリップ発生の有無および各種設備に与える影響については実機試験にて検証する必要があると考える。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

なし

(2) 学会、展示会等発表

<ポスター発表> 国内 1 件

関西電力㈱, 「微粉炭石炭火力・アンモニア混焼におけるアンモニアスリップ時の各種設備に与える影響評価」, SIP「エネルギーキャリア」公開シンポジウム2018, 東京, 2018年10月19日

(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

(1-1) ANSYS FLUENT Theory Guide.

(1-2) P. Cheng, Two-Dimensional Radiating Gas Flow by a Moment Method, AIAA Journal, Vol.2, (1964), 1662-1664.

(1-3) 山本晃, 梅本賢, 庄司哲也, 渡邊裕章, 石炭揮発分の二次分解における N 分挙動の数値解析, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), C314.

(1-4) B. F. Magnussen, On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow, 19th AIAA Science meeting, St. Louis, Missouri, USA, 1981.

(1-5) Badzioch, S. and Hawksley, P. G. W., Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., Vol.9, No.4

- (1970), 521-530.
- (1-6) Field, M. A., Rate of Combustion of Size-Graded Fractins of Char from A Low-Rank Coal between 1200K and 2000K, Combust Flame, Vol.13, (1969), 237-252.
- (1-7) F. C. Lockwood and C. A Romo-Millanes., Mathematical Modelling of Fuel-NO Emissions From PF Burners, J. Int. Energy. 65, (1992), 144-152.
- (1-8) Levy, J. M., Chan, L. K., Sarofim, A. F., and Beer, J. M., NO/Char reactions at pulverized coal flame conditions, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1981), 111-120.
- (1-9) 入江健一, 菅沼博, 桃尾孝史, 駒田至秀, 小島澄夫, 最新鋭石炭焚き 900 MW 発電プラント “関西電力 (株) 舞鶴発電所 1 号機” の営業運転開始, 三菱重工技報, Vol.41, No.5(2004) , pp.268-271.
- (1-10) 電力中央研究所, SIP エネルギーキャリア アンモニア直接燃焼 終了報告書.
- (2-1)アンモニアを燃料とした燃料電池システムによる 1kW の発電に成功 ～CO₂フリーのクリーンな燃料電池 低炭素社会の実現に寄与～, 株式会社 I H I プレスリリース, https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2018/technology/2018-5-16/index.html, (参照 2018.12.13)
- (2-2)火力発電プラント用付帯設備材料 1.ボイラ付帯設備, 火力原子力発電技術協会会誌, Vol.67, No.12 (2016) p.829-834.
- (2-3)三坂俊明, 大気圧非平衡プラズマの環境工学への応用 電気集塵, プラズマ・核融合学会誌, 第 74 巻第 2 号(1998)p.128-133.
- (2-4)電中研レビュー 微粉炭火力発電技術の高度化-環境性の向上と発電コストの低減-, No.46 (2002) p57-74.
- (2-5)入門講座 火力発電所の環境保全技術・設備 集じん設備, 火力原子力発電技術協会会誌, Vol.53, No.7 (2002) p.825-842.
- (2-6)入門講座 火力発電所の環境保全技術・設備 (改訂版) 脱硫設備, 火力原子力発電技術協会会誌, Vol.65, No.8 (2014) p.592-607.
- (2-7)入門講座 火力発電所 (全体計画と付属設備) (改訂版) 土木建築設備 土木設備, 火力原子力発電技術協会会誌, Vol.64, No.12 (2013) p.1055-1074.
- (2-8)片山博幸他, 新荷電方式集じん技術について, 三菱重工技報, Vol.31, No.4 (1994) p252-254.
- (2-9)入門講座 火力発電所の環境保全技術・設備 (改訂版) 排水処理設備, 火力原子力発電技術協会会誌, Vol.65, No.11 (2014) p.854-880.
- 他、社内文書および運転データを参照