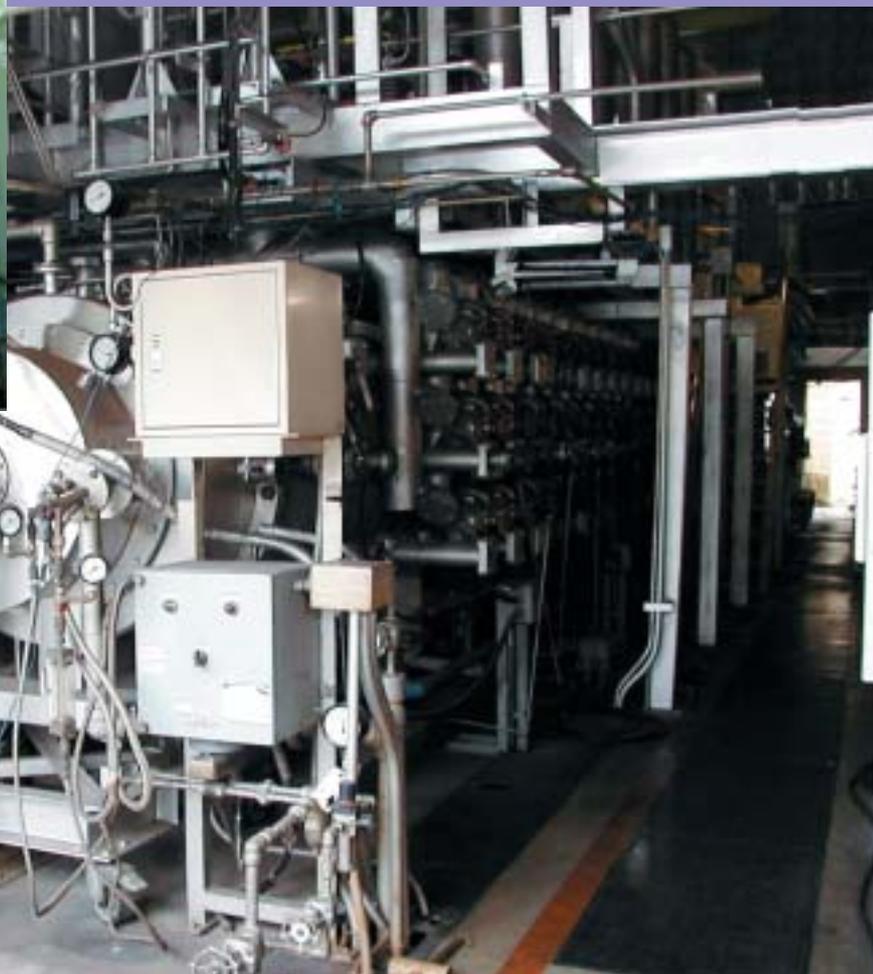


DENCHUKEN REVIEW

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

電中研レビュー No.46 2002.11



* 石炭燃焼特性実証試験装置 (MARINE炉) (上) と * 石炭燃焼試験設備 (BEACH炉) (下)

財団法人 電力中央研究所

巻頭言	九州大学機能物資科学研究所 持田 勲	3
「微粉炭火力発電技術の高度化研究」のあゆみ		7
はじめに	常務理事 深田 智久	8
第1章 石炭の特徴・性状		9
1-1 石炭の賦存量と分布		11
1-2 石炭の分類方法		12
1-3 石炭の性状		13
第2章 石炭利用方式の概要		15
2-1 石炭を利用した各種発電方式		17
2-2 微粉炭火力発電方式の特徴		19
第3章 微粉炭火力発電技術の変遷と課題		23
3-1 微粉炭火力の発電技術の変遷		25
3-2 微粉炭火力の高度化に向けた課題		26
第4章 微粉炭火力用燃料の適性評価		29
4-1 研究の背景		31
4-2 発電用炭適性評価手法		31
4-3 適合炭種拡大化技術		37
4-4 今後の展開		43
第5章 微粉炭火力の高効率化		45
5-1 研究の背景		47
5-2 蒸気条件の高温・高圧化の歩み		47
5-3 高温用材料の進歩		50
5-4 所内率低減による高効率化		55
5-5 今後の展開		56

第6章 微粉炭火力の環境性の向上	57
6-1 研究の背景	59
6-2 排煙処理システムの特徴	60
6-3 低 NOx 燃焼技術	61
6-4 脱硝技術	67
6-5 集じん技術	69
6-6 脱硫技術	71
6-7 今後の展開	73
コラム1：排ガス中水銀の化学形態別連続分析手法.....	74
第7章 微粉炭火力の運用性の向上	75
7-1 研究の背景	77
7-2 低負荷燃焼安定性の改善	77
7-3 低 NOx 燃焼との併用	81
7-4 今後の展開	85
コラム2：微粉炭濃度・粒度計測技術.....	86
第8章 微粉炭火力用燃料の多様化	87
8-1 研究の背景	89
8-2 低発熱量炭の利用	89
8-3 難燃性石炭の利用	95
8-4 今後の展開	97
コラム3：高灰分炭・高水分炭の改質技術.....	98
コラム4：CWM 乾式製造技術	99
第9章 微粉炭燃焼場の高度計測・数値解析技術	101
9-1 研究の背景	103

9-2	レーザ計測を用いた燃焼火炎内の非接触計測	103
9-3	数値解析技術	107
9-4	今後の展開	111
第10章	微粉炭火力技術高度化のための将来課題	113
10-1	今後の微粉炭火力の役割と運用	115
10-2	微粉炭火力の将来課題	115
10-3	石炭燃焼特性実証試験装置の役割と機能	116
おわりに	===== 理事 横須賀研究所長 瀬間 徹	119
引用文献・資料等	120

**表紙絵：石炭燃焼特性実証試験装置*¹と石炭燃焼
試験設備*²**

* 1) Multi Fuel and Multi-burner Equipment for
Advanced Combustion Research for the
Development of Ideal No Pollutant Emission
Technology (MARINE)

* 2) Basic Equipment for Advanced Combustion
Technology using Horizontal Furnace and
Single Burner (BEACH)

微粉炭火力発電技術のたゆまざる高度化努力に期待する



オイルショックの記憶が未だに鮮明な私のような世代の人間には、“油断”への懸念がいつも念頭を離れない。低価格高品質なエネルギーの安定した供給は、国の文明，産業を支える国家の大きな戦略責任のひとつであり、短中長期に亘るしっかりしたビジョンと周到な準備が必要である。そのひとつの面として、生産，精製転換，流通を荷うエネルギー産業の国策への発言と責任は極めて大きい。

こうした供給を可能にする技術の開発は、同時に国際競争力のある技術を生み出すものであり、その基礎としての優れた科学は、国の品位と尊敬と技術の商品価値を高める基盤である。完成された技術・プロセスは勿論、開発の各ステージにおいて、綿密に構造化されたコンセプト，要素技術，制御技術等の知識も商品として輸出され、開発の資金とすると同時に、我国の開発の戦略，開発力を伝播する努力が必要であろう。このことが、完成された技術・プロセスへの信頼と親しみを生み、さらに開発を継続できる駆動力となるであろう。

石炭は地球上に大量に賦存する重要な化石資源であり、これ迄の人類文明の発展を支えてきた。その過程で多くの技術的ブレークスルーによって利用効率を改善し、環境への負荷を低減してきた。今日、燃焼時の熱量に対して発生するCO₂量が化石資源中最大であるため、その利用が極めて経済的であるにも拘わらず、我国では利用しにくい、利用を避けるべき資源かのように見られるようになっている。この経済性の高い石炭を利用しないで地球上の人類が再生可能エネルギー時代を迎えることは、ほとんど不可能であり、これから大成長する発展途上国のエネルギー消費が急増すれば、

石炭の大量利用はさらに拡大を続けると思われる。つまり、COP3で想定するCO₂排出削減はほとんど意味を失う。基本的には、人口一人当たりのCO₂発生量を基準とする排出量を地球環境負荷増大が零になるベースに近づける努力を約束する以外は、効力をもたないであろう。日本政府には、地球環境保全のための真の戦略と論理の早急な構築を期待したいが、一方、我国のエネルギーの研究者・技術者は、すべての化石資源からCO₂排出を削減できる経済的に競争力のある高効率利用技術の確立と再生エネルギーの低コスト実現が努力目標となる。

従って、石炭の高度利用技術は、上記の観点から開発を強力に推進し、我国が世界をリードする武器としての実用技術を継続的に生みだして行く対象である。

現在石炭は、発電、製鉄、一般産業熱源、マテリアルの分野で主として利用されている。量的には発電での利用が最も大きく、世界的なテーマである。石炭利用発電技術は、既存の商業化された技術 今後実用化に向けて開発が進められる次世代技術に分類できる。今後50～100年以上に亘って石炭が利用されることを考えれば、両技術の持つ長所、特徴、改善点と貢献する時期を明確にして、両者の継続的發展を戦略的に低コストかつ開発資金を広く求めつつ、実施追求すべきことは明らかである。勿論、商業化においては両者の厳密な比較がなされると、経済的には次世代技術が不利になることが多いが、地球環境負荷対応のために、現行とは違うコストの算出法もあり得ることに留意して、次世代技術の開発を怠ってはならない。

商業化された石炭利用発電には、微粒炭燃焼発電と加圧流動床燃焼複合発電（常圧流動床も商業化されているが、将来性は大きくない）があるが、大規模発電プラントとしては前者が圧倒的強さを有しており、とくに現在の電力低コスト追求のなか、競争力は強固である。日本からのプラントおよび技術輸出も増加しており、既存発電技術としては発電効率も最高水準であることから、CO₂排出削減の確実な方法として、CO₂排出権取引における我国の戦略武器に位置づけることも可能である。

こうした時代背景から、微粉炭燃焼発電技術の一層の高度化継続は、我国にとってエネルギー戦略の一端を占める重要なターゲットである。つまり、現行商業技術が輸

出によって発信され、普及することはその技術の拡散、必要地での再生産が数年で進むことを意味している。つまり、我国としては、この技術に進歩の余地がある限り、先取りして知恵と工夫を注入して、次の世代の技術に育てておくことが肝要である。進歩の余地を明確にして、ターゲット、実現性、困難度、効果を十分に解析して、開発に努力することが要求される。

こうした状況のなかで、電力中央研究所が微粉炭燃焼発電技術について自身が進めた研究の最新の成果を特集としてまとめたことの意義は大きい。成果を知識として構造化し、次の進歩への足掛かりにすると同時に、次の開発への支持を獲得する足掛かりになると信じている。

微粉炭燃焼発電技術の高度化に向けたターゲットには、経済性、効率、運転性、エミッション制御に関する以下のような事項が想起できる。

高効率化のための蒸気条件の高温・高圧化（USC）および高温用材料のコスト削減

一層の低NO_x燃焼

安定的な負荷変動運転

燃焼運転の監視，自動化，高度化

微粉炭燃焼に適した石炭性状の評価、および炭種の拡大、石炭資源の拡大と石炭コストの削減

フライアッシュ付着性の制御

スラッキングの制御

ゼロエミッション達成に向けた排出灰の有効利用、排出SO_x、NO_xおよび極微量物質の一層の削減、低コスト化

こうした微粉炭燃焼発電技術の向上は、次世代石炭火力発電技術の実用化ハードルを高くして、一見次世代技術開発の障害になる。しかし、国際競争力のなかで勝抜き、真に貢献できる技術の宿命でもある。技術開発の質とスピードをあげて、商業化を実

現していかなければならない。ここで日本の技術開発の決定的欠陥として、基礎、基盤、実証、商業化の開発ステップの連結、研究協力、組織的で包括的な研究、発展段階の継続が欠ける点である。特に、実証試験の期間が極めて短く、巨額の設備費と多年の建設準備が結局無に帰するケースが少なくないことがあげられる。実証試験の長期間の運転は、運転の安定性、健全性のみならず、経済性の向上にも繋がり、商業化への信頼性が影響を向上する。

このために、実証運転について長期試験が可能になるよう、立地、運転経費、場合によっては実証運転における収入、国内外の参加者、支持者募集について十分な検討が必要である。景気浮揚のための無意義な道路工事の繰り返しのような開発は、厳に排除しなければならない。

この意味で、国内外から敬意を勝ち得る知恵、工夫、着実な執念の大切さを改めて強調したい。

本レビューが微粉炭燃焼発電技術開発の新生第一歩となり、国際競争力のある技術へさらに発展していくことを、切に祈念している。

九州大学機能物質科学研究所

持 田 勲

電中研『微粉炭火力発電技術の高度化研究』のあゆみ

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1979 年代		<ul style="list-style-type: none"> ・第2次石油危機 ・IEAの石油火力新設禁止決議、燃料の多様化進む
1981	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭燃焼試験設備（BEACH^{*1}炉）を設置し、各種海外炭（瀝青炭）の燃焼特性評価研究を開始 	<ul style="list-style-type: none"> ・わが国初の海外炭焚き超臨界圧火力である電源開発(株)松島1、2号機（蒸気温度538/538）が運開
1985		<ul style="list-style-type: none"> ・海外炭焚きの超臨界圧変圧運転を初めて採用した北海道電力(株)苫東厚真2号機（538/566）が運開
1986	<ul style="list-style-type: none"> ・「発電用炭適性評価手法」を石炭燃焼試験炉において確立 	
1987	<ul style="list-style-type: none"> ・超低NO_x燃焼に関する研究として、まず、空気多段注入法の開発に着手 	
1988	<ul style="list-style-type: none"> ・ワイドレンジバーナの開発に着手 	
1989	<ul style="list-style-type: none"> ・超低NO_xバーナの開発に着手 	
1990		<ul style="list-style-type: none"> ・電源開発(株)松浦1号機（538/566）において、石炭焚きとして初めての1,000MW機を採用
1991		<ul style="list-style-type: none"> ・北陸電力(株)敦賀1号機で主蒸気温度566を採用
1992		<ul style="list-style-type: none"> ・国連環境開発会議（リオ・サミット）開催
1993	<ul style="list-style-type: none"> ・ワイドレンジバーナの実証試験を四国電力□西条発電所で開始 ・超低NO_x・ワイドレンジバーナの開発に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・中部電力(株)碧南3号機、国内で初めて再熱蒸気温度593を採用
1994	<ul style="list-style-type: none"> ・四国電力□西条発電所でワイドレンジバーナの本格運用開始 	
1995	<ul style="list-style-type: none"> ・低品位炭（高灰分炭、高水分炭）および高燃料比炭の燃焼技術開発に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・第1回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP1）がボンにて開催
1996	<ul style="list-style-type: none"> ・「火炎内燃焼反応基レーザ計測装置」を設置し、火炎内反応挙動の詳細解明に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・大気汚染防止法の一部改正 有害大気汚染物質対策として、優先取組物質が決められる
1997		<ul style="list-style-type: none"> ・COP3、京都にて開催
1998	<ul style="list-style-type: none"> ・亜瀝青炭の高度燃焼技術開発に着手 ・適合炭種拡大化技術の開発に着手 	<ul style="list-style-type: none"> ・中国電力(株)三隅1号機、東北電力(株)原町2号機において、蒸気温度600/600を採用
1999	<ul style="list-style-type: none"> ・「超低NO_xバーナ（CI-バーナ）」が自家発用ボイラ（東ソー南陽発電所5号ボイラ）においても実用化される 	<ul style="list-style-type: none"> ・PRTR法（環境汚染物質排出移動登録）の制定
2000	<ul style="list-style-type: none"> ・「適合炭種拡大化技術」で開発した評価システムを電力各社に配布、試運用開始 	<ul style="list-style-type: none"> ・電源開発(株)橘湾1、2号機において600/610を採用
2001	<ul style="list-style-type: none"> ・石炭燃焼特性実証試験装置（MARINE^{*2}炉）の建設に着手 	
2002	<ul style="list-style-type: none"> ・MARINE炉竣工（11月） 	<ul style="list-style-type: none"> ・電源開発(株)磯子新1号機において純変圧方式での600/610を採用

* 1) Basic Equipment for Advanced Combustion Technology using Horizontal Furnace and Single Burner (BEACH)

* 2) Multi Fuel and Multi-burner Equipment for Advanced Combustion Research for the Development of Ideal No Pollutant Emission Technology (MARINE)

はじめに

常務理事 深田 智久



古くて新しい燃料「石炭」が、二度に亘るオイルショックの後に、発電用エネルギー源として再び注目されてから、20年以上が既に経過しました。当時は、ほとんどの火力発電所が石油系燃料を用いる火力発電所として、新設あるいは燃料転換された時期であり、当研究所においても石炭を扱ったことのある研究者が非常に数少なくなっていました。このような状況の中、当研究所は安価な輸入炭の微粉炭火力への適合性評価法の開発を目的に、昭和56年1月に石炭燃焼量100kg/hrで単一バーナの石炭燃焼試験設備（BEACH炉）を設置し、現在まで微粉

炭火力技術に関連する様々な課題の解決に取り組んでまいりました。

これらの技術の中から、ワイドレンジバーナやCI-バーナなどが、運転操作性あるいは環境保全性に優れたバーナとして実用化されると共に、炭種適合性評価技術も実機において利用されているなど、当所成果を着実に活用して頂いておりますことは、我々関係者にとってこの上ない喜びであり、御支援頂いた関係各位に対して心から感謝の意を表す次第であります。

今回、石炭を取り巻く環境を勘案しまして、これらの成果を含めて微粉炭火力技術の高度化に関するレビューをまとめさせて頂きました。燃料として埋蔵量の豊富な石炭を用いていることに加え、技術的に成熟度が高く、コスト的にも優れていることを考えますと、微粉炭火力技術の重要性は今後も益々高くなっていくものと思われれます。そのような状況を踏まえ、当研究所では、石炭燃焼試験炉に比べ、実用機を一層良く模擬できるマルチバーナ方式の新たな研究設備（MARINE炉）を設置し、微粉炭火力技術のさらなる高度化に邁進していく所存でございます。皆様からの従来に増してのご指導、ご鞭撻をお願い致します。

第 1 章

1

石炭の特徴・性状



1 - 1 石炭の賦存量と分布	11
1 - 2 石炭の分類方法	12
1 - 3 石炭の性状	13



牧野 尚夫（1979年入所）

入所以来、集塵技術の高性能化・高温化ならびに関連する粉体物性の計測などの粉粒体研究に携わると共に、微粉炭の低NO_x燃焼技術、低負荷時の安定燃焼技術などの開発を行ってきました。最近では特に、微粉炭火力の燃料供給源の強化に向けて、亜瀝青炭、褐炭など低品位な石炭の高度燃焼技術の開発、ならびに未利用炭を導入する際の精度の良い適性判定法の開発などを行ってきました。今後は、石炭の一層高度な利用技術の確立に向け、幅広く研究を推進していきたいと考えています。

1-1 石炭の賦存量と分布

石炭は、根源となる植物が地球の造山活動等により地中に埋められ、長い年月をかけて炭状に変化したものと考えられている。この過程を石炭化と呼び、その期間が長くなるほど、石炭中の炭素の比率が高くなるという傾向がある。エネルギーとして利用する場合に最も重要な発熱量は炭によって異なるが、現在我が国で用いられているもので約7000kcal/kg (29.5MJ/kg) と非常に高く、特に産業革命以後、燃料として幅広く使われてきた。

石炭の大きな特徴としては、他の化石燃料に比べて非常に賦存量が多いという事である。図1-1-1に様々な化石燃料の埋蔵量(石油換算)を示す。ここで、可採埋蔵量とは、技術的かつ経済的に採掘可能な量を示している。なお、確認埋蔵量とは、現状の技術では採掘するメリットはないが、存在は確認されている量を示すものである。石炭は、いずれの埋蔵量をとっても、他の燃料に比べて極端に多く、特に現在の主なエネルギー源である石油、天然ガスに比べて、数倍から10倍以上の埋蔵量を有することが明らかになっている。現在の可採埋蔵量を、年レベルの使用量と比較することでその燃料の残存年数が明らかになる。石炭については今後200年以上も利用できると推算されており、非常に長期的に供給可能な重要なエネルギーであることが言われている。

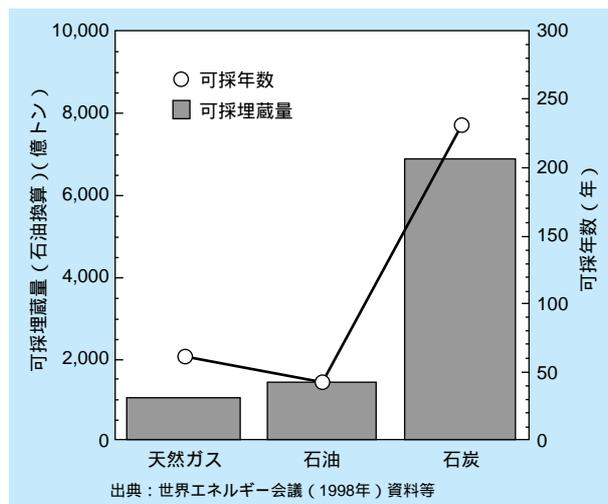


図1-1-1 化石燃料の可採埋蔵量と可採年数

石炭のもう一つの特徴は、世界的にあまり偏在することなく産出することである。図1-1-2には、石炭の地域別の賦存量(瀝青炭換算)を示している。アメリカ、アジア、ヨーロッパ、アフリカ、オーストラリアなど各大陸から、幅広く産出されていることが明らかである。これは即ち、石炭の賦存量が多いことに加えて供給源が多いことから、一層の安定供給が見込めることを示している。また、一部の国に政情不安が生じて供給がスト

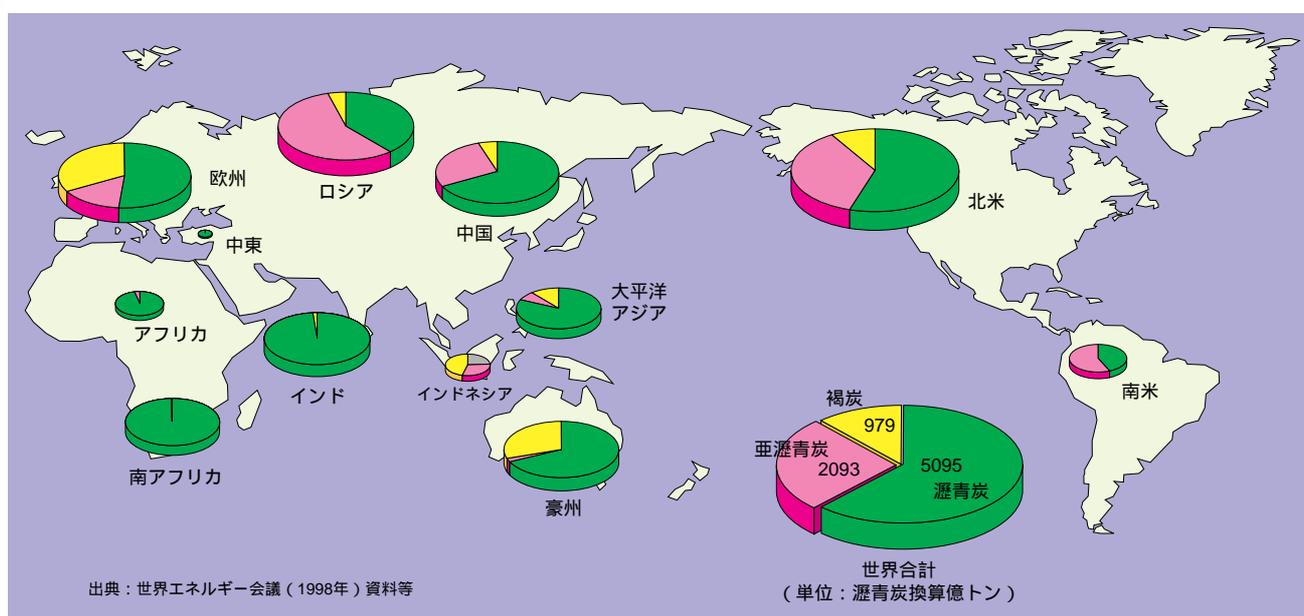


図1-1-2 世界の石炭可採埋蔵量分布図

ブしたとしても、他の国からの供給が可能であるため、我が国への影響はかなり緩和できることを示している。

石炭が世界的に幅広く分布していることは、一方で石炭の性状に大きく幅があることも意味している。産地が異なれば当然、気候、土質等も異なるため根源となる植物の種類が異なり、またその石炭化過程や混在する土壌等も異なることになり、性状に幅が出ることになる。さらに、これに加えて生成年代が異なることによる性状差も生じるため、

非常に多種多様の石炭種が存在する。特に、石炭は固体であるため、例えば石油のように精製過程を通すことにより簡単に性状を調節できる訳ではなく、基本的にはその性状に応じた最適な利用方法を採用していく必要がある。これは石炭利用時に最も重要となる項目の1つであり、そのような観点からは、石炭の性状を的確に把握し、体系的に分類することが非常に重要となる。

1 - 2 石炭の分類方法

植物から石炭に変化していく石炭化過程の進行度を基に分類する方法が通常用いられ、これを炭化度による分類と呼んでいる。

我が国では、表1-2-1のような2つの因子を組み合わせた分類法がとられており、石炭化が進んだ無煙炭と瀝青炭の一部では、燃焼のしやすさを示す因子である燃料比（燃焼性の悪い固定炭素の、燃焼性の良い揮発分に対する重量比率）により分類され、石炭化の進んでいない褐炭、亜瀝青炭と瀝青炭の一部では発熱量により分類されている。すなわち、石炭化が進んだ石炭は、燃料比と発熱量が高くなり、石炭化が進んでいない石炭は、燃料比、発熱量ともに低くなる。外国の事例としては、石炭化が進むことにより石炭中の揮発分が減少することを基にした表1-2-2に示すような揮発分含有率による分類法が、アメリカのASTM（American Society for

表1-2-2 我が国とアメリカの石炭分類法の対比

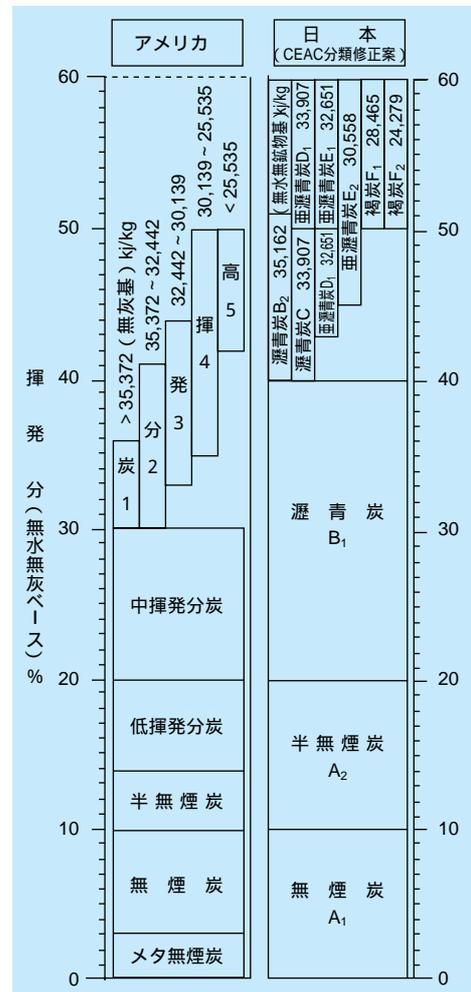


表1-2-1 JIS石炭分類 (JIS M1002)

分類		発熱量(注) (補正無水無灰基) kJ/kg (kcal/kg)	燃料比	粘結性
炭質	区分			
無煙炭 (A)	A ₁	35,160以上 (8,400以上)	4.0以上	非粘結
	A ₂			
瀝青炭 (B、C)	B ₁	33,910以上35,160未満 (8,100以上8,400未満)	1.5以上	強粘結
	B ₂		1.5未満	
	C			粘結
亜瀝青炭 (D、E)	D	32,650以上33,910未満 (7,800以上8,100未満)		弱粘結
	E			非粘結
褐炭 (F)	F ₁	29,470以上30,560未満 (6,800以上7,300未満)		非粘結
	F ₂			

Testing and Material) で用いられている。揮発分が増大すれば燃料比が低くなるため、本法は、我が国の分類法とも関連が深い。

1 - 3 石炭の性状

石炭の性状を評価する方法として様々な分析法が用いられるが、最も主なものとしては、工業分析と元素分析が挙げられる。

石炭類の工業分析とは、空气中で乾燥した試料について、水分、灰分、揮発分を定量し、あわせて固定炭素を算出することをいう。水分が多いと発熱量が低くなると共に着火が悪くなる。灰分は石炭中に存在する不燃の成分であり、石炭の起源となった植物中のミネラルや石炭化過程で混在した土壌などから構成される。灰分が多くなると発熱量が低くなるばかりでなく、石炭利用後に排出される廃棄物（石炭灰）量が多くなり、その処分法なども問題になる。揮発分と固定炭素分はいずれも可燃分であるが、揮発分は高温条件において容易に気化する成分であり、極めて燃焼しやすい特徴を持つ。一方、固定炭素は固体の炭素の集合体であり燃焼性が悪く、燃焼後に石炭灰の中に未燃分として残りやすい成分である。固定炭素の揮発分に対する比率を燃料比といい、一般に、石炭化が進むに従って固定炭素は増加し、揮発分は減少するので、燃料比は増加する。

石炭の元素分析とは、炭素、水素、酸素、全硫黄、燃焼性硫黄、窒素、リンなどを定量することをいう。ここで、すべての石炭においては炭素が可燃分の主成分であるが、炭化の進んでいない炭においては水素の割合も多

くなる。また、同様に酸素の割合も炭化の遅れに従い多くなる。全硫黄は石炭中に含まれる全部の硫黄を示し、燃焼性硫黄は石炭を電気炉で815 ± 10 で2時間熱した時に残る硫黄量を全硫黄から引いたものを示す。これらの値は、石炭の性質を知り、また、燃焼計算を行う場合にも必要であるが、炭素と水素との比あるいは、酸素と炭素の比などは、燃料比と同様に石炭化の指標の1つにも用いられる。炭素含有率が水素含有率に比べて多い石炭は、地球温暖化と関係の深い二酸化炭素発生量が多くなる。硫黄含有率が多い場合には硫酸化物が多く発生するため、装置の腐食や環境保全性など注意しなければならない。窒素含有率の多い場合も窒素酸化物が多く発生し易くなるので、環境保全に注意しなければならない。

石炭の炭質は極めて多岐にわたるが、通常は炭田別にまとめられる。表1-3-1には、各国の代表的な炭田から産出される石炭の性状例を示す。炭田によって石炭の性状にも大きな差異があることが分かる。

石炭の性状を知るための分析法としては、ここで説明した工業分析、元素分析の他に、石炭の起源となった植物の部位を元に分析するマセラル分析などもあるが、一般的な性状については、工業分析と元素分析で十分に把握することが可能である。

表1-3-1 各種石炭の分析例

国別	項目 銘柄	発熱量 [MJ/kg]	全水分 ^{*1} [%]	工業分析[%] ^{*2}				燃料比	工業分析[%] ^{*3}					
				水分	灰分	揮発分	固定炭素		炭素	水素	窒素	酸素	硫黄	全硫黄
豪州	ドレイトン	28.4	9.9	3.4	13.3	34.5	48.8	1.4	71.1	4.9	1.4	8.1	0.8	0.9
	ニューランズ	28.0	8.4	3.0	15.0	26.6	55.4	2.1	69.1	4.1	1.4	7.0	0.4	0.4
	ハンターバレー	29.6	8.0	3.5	11.2	34.0	51.3	1.5	72.7	4.5	1.6	9.3	0.3	0.6
	レミントン	28.4	9.9	3.7	13.0	32.3	51.0	1.6	71.9	4.5	1.5	8.2	0.4	0.4
	ワークワース	28.9	9.6	3.6	11.8	32.8	51.8	1.6	69.1	4.6	1.5	8.9	0.4	0.4
中国	大同	29.6	10.1	5.1	7.0	28.1	59.8	2.1	78.2	4.5	0.8	8.8	0.6	0.7
	南屯	28.4	8.0	4.0	16.0	36.2	43.8	1.2	83.0	5.2	1.6	9.8	0.5	0.8
カナダ	オーベットマーシュ	25.3	8.0	5.0	14.0	37.0	44.0	1.2	64.3	4.6	1.5	14.3	0.3	0.6
	コールバレー	26.1	11.3	6.4	10.7	33.5	49.3	1.5	69.7	4.7	0.9	13.1	0.1	0.3
インドネシア	サツイ	28.8	9.5	5.1	7.9	41.9	45.1	1.1	72.4	5.5	1.2	11.9	0.7	0.8
南アフリカ	エルメロ	27.8	7.6	3.5	12.9	31.4	52.2	1.7	72.0	4.4	1.7	7.9	0.6	0.8
	オブティナム	28.5	8.2	3.8	10.7	32.4	53.1	1.6	72.9	4.9	1.6	9.1	0.5	0.6
米国	ピナクル	27.2	8.3	4.6	13.4	40.9	41.1	1.0	68.2	5.6	1.4	0.3	0.6	0.7
	ブラトー	25.1	9.8	6.0	9.3	41.8	42.9	1.0	72.8	5.5	1.5	11.2	0.7	0.9

*1: 到着ベース
*2: 気乾ベース
*3: 無水ベース

第 2 章

2

石炭利用方式の概要



2 - 1 石炭を利用した各種発電方式 17

2 - 2 微粉炭火力発電方式の特徴 19



白井 裕三（1983年入所）

これまで、石炭ガス化乾式ガス精製における乾式脱硫に携わってきました。現在は、乾式ガス精製技術の実用化を目指すと共に、石炭の高度燃焼技術、高品位化技術に関する研究に力を入れて実施しています。特に、亜瀝青炭の高度燃焼技術、各種石炭の実機への適用性を事前に評価できる技術および、石炭脱灰・脱水技術の開発に力を入れて研究を進めたいと考えています。

2-1 石炭を利用した各種発電方式

石炭を利用した発電方式としては、石炭を燃焼した際に発生する熱を蒸気に伝えて発電する汽力発電方式と燃焼ガスを直接、ガスタービンに導入して発電した後、その排熱を蒸気に伝えて発電する複合発電方式とがある。また、これを用いる石炭の反応方式として、固定床、流動床、噴流床の三方式がある。

2.1.1 石炭の反応方式

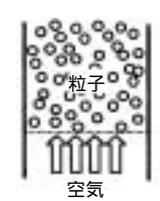
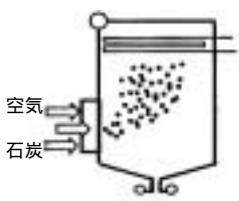
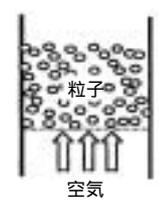
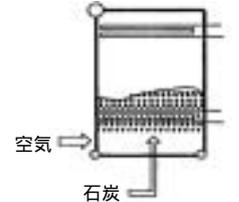
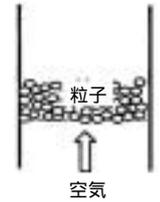
図2-1-1に示すように、石炭の燃焼あるいはガス化反応方式として、固定床方式、流動床方式および噴流床方式があり、この順に、利用する石炭の粒径が小さくなると共に装置内のガス流速も速くなる。固定床方式では、投入された塊状の石炭は、静止した状態で空気と反応し、燃焼あるいはガス化を行う。流動床方式では、投入された粒状の石炭が、空気により液体のような流動状態の層を形成し、この層内で燃焼・ガス化が行われる。噴流床方式においては、投入された微粉の石炭は空気と伴しつつ、燃焼あるいはガス化反応が進行する。

燃焼方式を例に具体的な内容を示すと、固定床燃焼方

式としては、塊状の石炭をコンベア型の燃焼器に載せて、移動させながら燃焼させるストーカー燃焼方式が最もよく用いられる方式として挙げられる。ストーカー燃焼方式では、塊状の石炭をそのまま利用できる利点を有するが、過剰空気を多く必要とし、ボイラ効率も低い。また、大型化が難しく、装置規模に限界がある。

流動床燃焼方式では、粒状の石炭を、気流により浮遊・流動化している石灰石や珪砂等の層に投入して燃焼させる。この方式は、流動床内の伝熱が良いため、ボイラを小さくできる。また、800～900程度の低温燃焼であるため、NOxの発生も少なく、さらに、炉内に石灰石を投入することにより、炉内脱硫が可能である。一方、流動化状態の粒子による、伝熱管や炉壁の磨耗に注意する必要があること、大きな通風動力を必要とすること、炉内脱硫を行うため石炭灰に石膏等が混入するので、その有効利用法を考慮する必要があることなどが、課題として挙げられる。

噴流床燃焼方式としては、バーナにより微粉炭を空気と共に噴出して燃焼させる微粉炭燃焼方式があげられる。この方式においては、中位径数十μmの微粉炭を使用

基本 原理			ボ イ ラ 概 略 構 造		
噴 流 層	大きい 小さい			石炭粒径 200メッシュ通過 70% 炉内流速 10～15m/s 炉内温度 1,400～1,500	微粉炭焚 ボイラ
流 動 層	空気流速 石炭粒径			石炭粒径 10mm以下 炉内流速 1.4～10m/s 炉内温度 800～900	流動床 ボイラ
固 定 層	小さい 大きい			石炭粒径 30mm以下 炉内流速 0.8～1.5m/s	ストーカ 焚ボイラ

(出典：火力原子力技術協会編、火力原子力便覧)

図2-1-1 各反応方式の概略と特徴

するため、燃焼性が良く、過剰空気が少なくすむ。さらに大型化も可能であるため、現在、電気事業においては、この微粉炭燃焼方式が主に用いられている。

ガス化方式としては、原理的には、燃焼方式と同様のものが用いられている。空気または酸素などをガス化剤にして、可燃性成分である一酸化炭素(CO)、水素(H₂)を多く含む可燃性ガスを製造する。現在、主に開発されているガス化炉方式は、燃焼方式と同様に、大型化が可能な噴流床方式となっている。

2-1-2 発電方式

汽力発電方式

図2-1-2に微粉炭燃焼方式を用いた、汽力発電システムを代表例として示す。この方式では、燃焼時に発生した熱を蒸気に変えて、蒸気タービンを用いて発電する。微粉炭の燃焼に伴い発生するNO_x、ばいじんおよびSO_xは、後流の脱硝装置、電気集じん機および脱硫装置により除去され、クリーンになった排ガスが煙突から排出される。流動床燃焼方式を用いた場合も、同様に蒸気タービンで発電するが、石灰石を用いて流動床炉内で脱硫を行うため、脱硫装置が不要となるなど、燃焼器、排煙処理システム等が、微粉炭燃焼方式とは異なる。

複合発電方式

発電効率の向上を目指して開発が進められている技術であり、図2-1-3に示すようにガス化炉で発生した可燃性のガスをクリーンにした後に燃焼させ、発生した高温・高圧のガスによりガスタービンを駆動するとともに、

排熱を蒸気タービンで利用して高い発電効率を得る石炭ガス化複合発電(IGCC)が代表的な発電方式である。また、石炭ガスを溶融炭酸塩形燃料電池(MCFC)や固体酸化物形燃料電池(SOFC)の燃料に用いて発電し、その排熱を蒸気タービンで利用して発電する石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)も検討されている。

一方、流動床燃焼発電方式を複合発電に発展させた発電システムとして、加圧流動床燃焼複合発電方式(PFBC)がある。このシステムでは、加圧下で燃焼させ、800以上の高温排ガスをガスタービンに送って発電し、さらにガスタービン出口の排熱および流動床内での燃焼熱を蒸気として回収し、蒸気タービンで発電する。また、このシステムに加圧流動床ガス化炉を組み合わせた高度加圧流動床燃焼複合発電方式(A-PFBC)も考案されている。

電気事業においては、主に微粉炭燃焼発電方式が採用されており、他には、流動床燃焼発電方式が1機、加圧流動床燃焼方式が3機稼動している程度である。

一方、石炭ガス化複合発電方式は、現在、実用化に向けて鋭意開発中の方式であり、国内においては、2007年には実証機(250MW)が運転を開始する計画となっている。石炭ガス化燃料電池発電、高度加圧流動床燃焼発電は、開発途上の技術である。

このような状況では、微粉炭火力発電方式は今後も重要な電源としての役割を担っていくと考えられ、さらなる低コスト化などを目指した技術の高度化が重要な課題となっている。

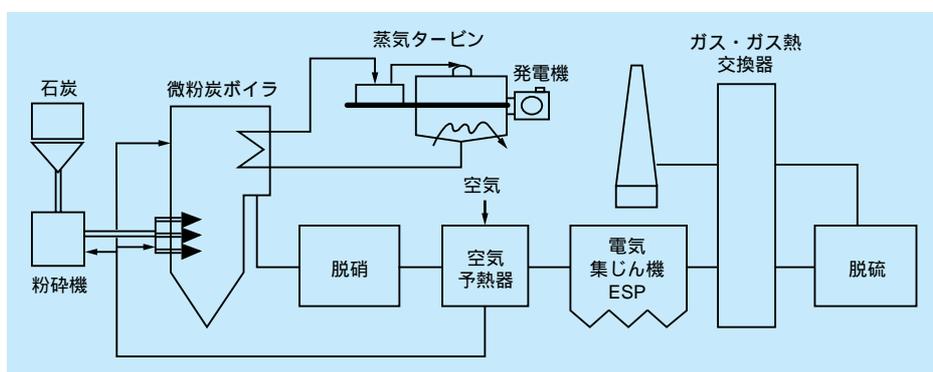


図2-1-2 微粉炭火力発電システム

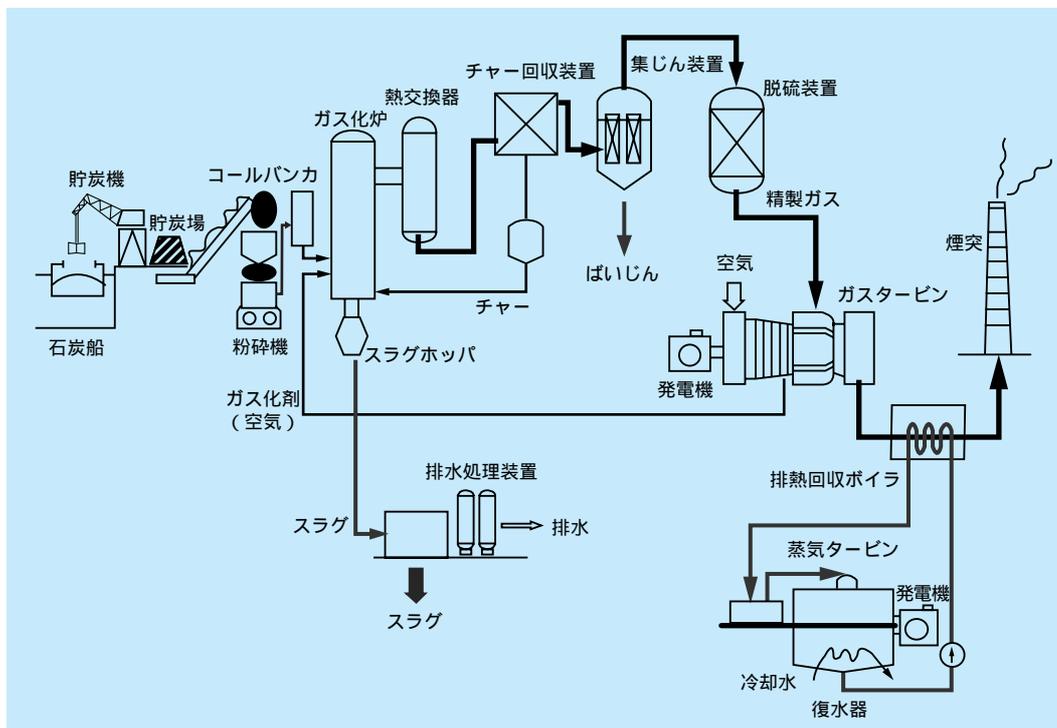


図2-1-3 石炭ガス化複合発電システム

2 - 2 微粉炭火力発電方式の特徴

微粉炭火力発電方式は、石炭を燃料とする発電において最も良く利用されている発電方式である。石炭は、天然ガス、重油等に比べ、発熱量が低く、それに加えて、灰分や硫黄分、窒素分を多く含むため、ガス焼きおよび油焼き火力発電に比べ、微粉炭火力の機器構成は、複雑となる。図2-2-1に微粉炭火力発電所の発電システムの詳細を示す。微粉炭火力発電所は、貯炭設備、粉砕設備、ボイラ、排煙処理設備、灰処理設備等の設備を有する。設備毎にその特徴を以下に述べる。

2-2-1 貯炭設備

海上輸送された石炭は、貯炭場あるいはサイロに貯蔵される。石炭の貯蔵においては、自然発火および炭じん飛散等の防止のため、貯炭場で、石炭に定期的に散水をする等の対策を講じている。また、サイロによる貯炭では、自然発火防止が重要である。自然発火は、揮発分の多い石炭に生じ易く、危険性のある石炭については、設

定期内に使い切るように運用している。また、サイロ内の温度が上昇する傾向がある場合には、サイロ下部より切り出し、再びサイロ上部に充填する循環操作を行うことにより放熱させる方法が用いられている。

2-2-2 粉砕設備

微粉炭火力では、石炭は貯炭設備より微粉炭機（粉砕機ミル）に送られ、微粉炭とした後、バーナに直接送られ、燃焼される。粉砕機としては、近年、図2-2-2に示すように石炭を乾燥させながら微粉砕する縦型ローラミルが主に使用されている。

この方式は鉢型の皿と複数のローラからなり、ローラで鉢形の皿を一定圧力で押さえ、皿を回転させることにより、その間で粉砕する方式である。石炭は上部より供給し、約200の空気で乾燥・粉砕され、70～80の空気と共にバーナに送られる。粉砕粒径は、皿の回転数、ローラ圧力およびミル出口部に設置されたプロペラ状の

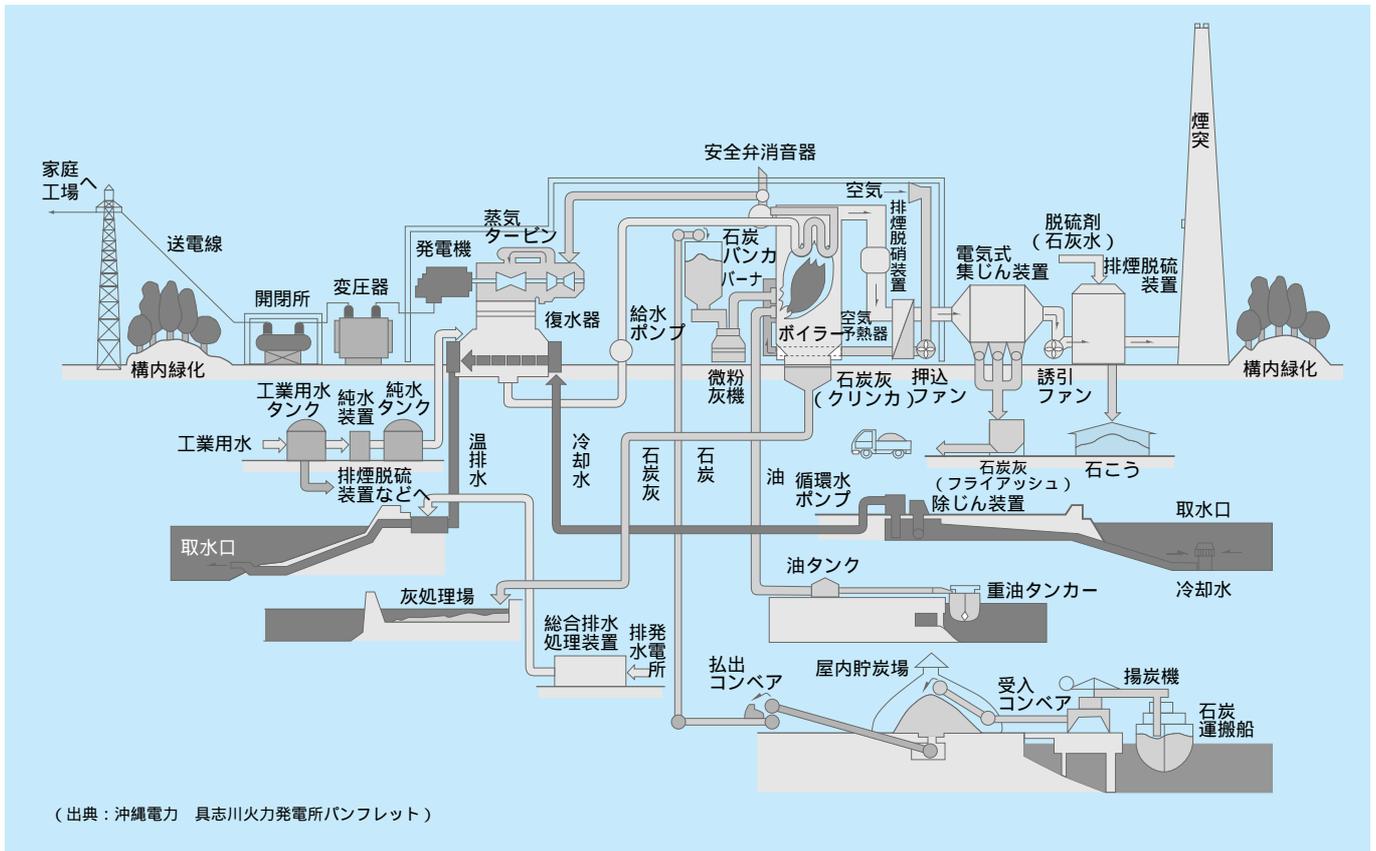


図2-2-1 微粉炭火力発電システム

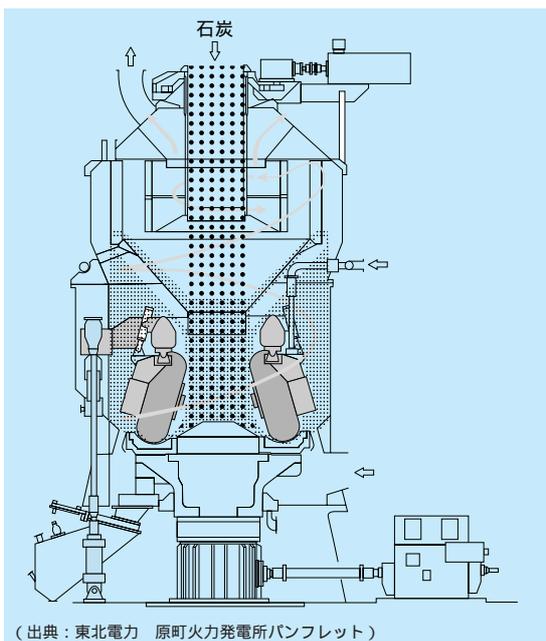


図2-2-2 堅型ローラミル

回転分級器の回転数で調整され、200メッシュ(75 μm)以下75～90%となる。この粉砕機の運転条件は、石炭の粉砕性から設定され、一般的には、硬い石炭ほど皿の

回転数やローラ圧力を高くする。

2-2-3 ボイラ

石炭を燃焼し、熱を蒸気にして回収する装置であり、ボイラは、同じ発電量の重油焚きボイラより1.5～2倍ほど大きい。これは、石炭は燃焼速度が遅いこと、燃焼後の灰が炉壁や蒸気過熱器に付着するのを防ぐため、容積あたりの発熱量を低減する必要があること、による。

粉砕された微粉炭は、搬送用一次空気と共にバーナ中央部より炉内に噴出し、その周りに二次・三次空気を噴出させ混合させることにより燃焼する。また、NOx低減のため、バーナへの供給空気を減らし、バーナ位置より後流に空気挿入口を設置した二段燃焼法が用いられている。

これらのバーナは、ボイラ容量により複数本設置されるが、その配置方法により、

ボイラ前面と後面にバーナを配置する方法(対向燃焼)

ボイラの四隅にバーナを配置する方法(コーナーフ

ファイリング)がある。

ボイラにおいては、燃焼により溶融した灰が炉壁や伝熱管に付着して収熱の低下、および炉内圧力損失を大きくする現象が生じることがあり、これをスラッシングと呼ぶ。また、灰中のナトリウム分等の揮発成分が蒸気過熱器などに、凝縮して付着することにより、伝熱の阻害や圧力損失の増大を引き起こすこともあり、この現象をファウリングと呼ぶ。スラッシング、ファウリングは、灰の性状に密接に関連するため、その防止策はボイラ毎に指針が定められている。

2-2-4 排煙処理設備

ボイラ出口ガスには、ばいじん、NOxおよびSOxが含まれているため、これらを除去するための排煙処理設備が設けられている。NOxを除去する脱硝装置には、350 程度で触媒上で吹き込まれたアンモニアと反応させ、窒素と水蒸気に分解する接触還元法（SCR法）が主に用いられる。脱硝後、電気集じん機によりフライアッシュが除去され、冷却後、脱硫装置でSOxが除去さ

れる。脱硫装置は、一般的に、石灰石スラリーを用いてSOxを吸収し、石膏として回収する石灰石-石膏法が用いられている。

2-2-5 排水処理設備

発電所の排水には、生活排水、含油排水、一般排水および脱硫排水がある。これらの排水は、石膏、フライアッシュ等の浮遊物質（SS：Suspended Solid）や油、重金属などそれぞれ含む物質が異なっているため、図2-2-3に示すように排水毎に個別に処理された後、濾過器および吸着器を経て放水するという複雑な排水処理システムで処理される。

排水処理規模の大きい一般排水および脱硫排水処理システムにおいては、先ず懸濁固体や重金属が、凝集沈殿槽で沈降分離される。分離後、濾過器で微細な粒子が除去され、さらに活性炭などを用いた吸着器で化学的酸素要求量（COD：Chemical Oxygen Demand）に関わる物質を取り除き、排出されている。また、フッ素を多く含む排水では、その除去のためカルシウム塩やアルミニウム塩が凝集沈殿槽に添加されている。

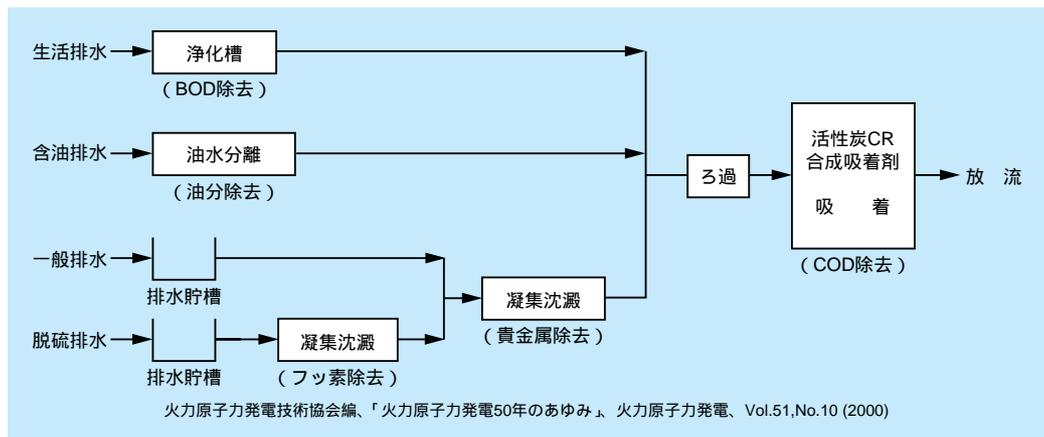


図2-2-3 排水処理フロー

第 3 章

3

微粉炭火力発電技術の
変遷と課題



第3章 微粉炭火力発電技術の変遷と課題 目次

横須賀研究所 研究コーディネーター 上席研究員 佐藤 幹夫
CS推進部 受託推進グループ 部長 牧野 尚夫

3 - 1 微粉炭火力の発電技術の変遷	25
3 - 2 微粉炭火力の高度化に向けた課題	26



佐藤 幹夫（1975年入所）

これまで、重・原油等の噴霧燃焼、微粉炭燃焼技術および石炭ガス化燃料のガスタ・ビン燃焼技術に関する研究に携わり、各種海外炭の燃焼特性評価や石炭ガス化複合発電用ガスタ・ビン燃焼器の開発等を行ってきました。今後とも石炭及び重質油等を用いる複合発電やガスタ・ビン技術など、火力発電技術の高効率化に貢献していきたいと思ひます。

（3-1執筆）

牧野 尚夫（10ページに掲載。）

（3-2執筆）

3 - 1 微粉炭火力発電技術の変遷

わが国の火力発電は、戦後、国内炭焼きボイラから再出発し、1950年代後半から石油焼き火力の大容量化が進められ、1973年の石油危機以降は、LNGおよび海外炭焼きの大容量火力が主流となった。表3-1-1に、戦後のわが国微粉炭火力の変遷と外部情勢を示す。

戦後の石炭火力の復興を振り返ってみると、1953年、中国電力(株)小野田5号(160t/h、6.7MPa、490)において初めて1機1缶ユニットシステムが採用された。小野田5、6号ボイラでは、国内炭の混炭が行われ、国内産低品位炭焼き新鋭火力のモデルとなった。1960年代後半には、新設火力発電燃料の主力は石炭から経済性に優れる石油へと移行した。この間、1962年には火力発

電総出力が水力を上回り、火主水従の電力構成となった。石油専焼火力が導入される一方で、国内炭産地振興のための低品位炭焼き火力も建設された。一例として挙げると、1963年に電源開発(株)若松1、2号(各75MW)は筑豊規格外低品位炭の消費を目的として建設された。

電気事業の創業期には主力の発電形態であった石炭火力発電は、経済的に競争力が弱かったことから、石油火力の登場により、その主役の座を石油火力発電に譲ることになった。しかも、石炭火力ではばいじん、SOx、NOx等の環境汚染物質の排出が多いことから、電源立地が困難になった。

これらの環境汚染物質に対する技術の変遷として、ま

表3-1-1 微粉炭火力の変遷と外部情勢

年度	微粉炭火力の変遷	外部情勢
1953	中国電力 小野田5号機で初めて1機1缶ユニットシステムを採用	
1962		火力発電総出力が水力を上回り、火主水従の電力構成に
1963	電源開発 若松1、2号機が筑豊規格外低品位炭の消費を目的に建設される	「ばい煙排出規制に関する法律」が制定
1966		電気集じん機の導入
1968		「大気汚染防止法」の制定
1973		石油危機 湿式石炭・石膏法による排煙脱硫装置の導入 「NOx排出規制法」の制定
1977		触媒を用いた選択式接触還元法による脱硝装置の導入
1979		IEAの石油火力新設禁止決議
1981	電源開発 松島1、2号機(538/538) わが国初の海外炭焼き臨界海圧火力	
1985	北海道電力 苫東厚真2号機(538/566) 海外炭焼き超臨界圧変圧運転を初めて採用	
1990	電源開発 松浦1号機(538/566) 石炭焼きとして初めての1,000MW機を採用	
1991	北陸電力 敦賀1号機で主蒸気温度566を採用	
1992		国連環境開発会議(リオ・サミット)開催
1993	中部電力 碧南3号機、国内で初めて最熱蒸気温度593を採用	
1995		第1回国連気候変動枠組条約締約国会議(COP1)がボンにて開催
1997		COP3が京都にて開催
1998	中国電力 三隅1号機、東北電力 原町2号機において600/600を採用	
2000	電源開発 橋湾1、2号機600/610を採用	
2002	電源開発 磯子新1号機、純変圧方式で600/610を採用	

ず、ばいじんに関して、1963年に制定された「ばい煙排出規制に関する法律」に基づき、1966年に非常に高い集じん効率を有する電気集じん機が導入されている。1968年には「大気汚染防止法」が制定され、SO_x対策として、低硫黄燃料の使用、高煙突や集合煙突の採用により環境影響抑制が図られるとともに、1973年には湿式の石灰・石膏法を用いた高性能な排煙脱硫装置が導入されるようになった。NO_x対策については、1973年に排出規制が制定され、低NO_x燃焼法の改良や低NO_xバ - ナの採用が進む一方、1977年には触媒を用いた選択式接触還元法による脱硝装置の導入が開始された。

このように環境対策技術が進展する一方で、1973年の石油危機と引き続き原油価格の高騰、さらには1979年のIEAの石油火力新設禁止決議により、新設が原則的になくなったこともあり、燃料多様化の方針が打ち出され、LNG、LPGなどの使用が増加する一方、オーストラリア炭、中国炭、南アフリカ炭等の海外炭を対象とした大容量火力の建設が計画された。また、環境汚染物質の抑制技術開発が進み、NO_x、SO_x等の発生が抑えられるようになり、発電所建設技術の改良によって経済性が向上したことから、脱石油の流れに後押しされる形で再び石炭火力発電が脚光をあびることとなった。

1981年には、わが国初の海外炭焚き超臨界圧力を採用した電源開発(株)松島1、2号(各500MW)が運開し、以降、大容量海外炭焚き火力の時代となり、北海道電力(株)苫東厚真2号600MW(1985年、538/566)において初めて変圧運転方式が採用された。それ以後、北陸電力(株)敦賀1号500MW(1991年、566/566)から蒸気条件の高温・高圧化が始まり、中部電力(株)碧南3号700MW(1993年、538/593)において再熱蒸気温度は593となった。さらに、中国電力(株)三隅1号1000MW(1998年、600/600)、東北電力(株)原町2号1000MW(1998年、600/600)において主蒸気温度、再熱蒸気温度ともに600の時代を迎えることになった。引き続き、2000年には電源開発(株)橘湾1、2号1050MWにおいて600/610が採用され、2002年に運開された電源開発(株)磯子新1号では純変圧方式が用いられており、主蒸気温度600、再熱蒸気温度610が採用されている。

以上述べたように、わが国の微粉炭火力は、戦後の復興期、火主水従への移行、石油危機および「大気汚染防止法」の制定などを経て、蒸気条件の高温・高圧化による高効率化が図られるとともに、ばいじん、SO_x、NO_xに対する環境対策技術など世界最高水準に達している。

3 - 2 微粉炭火力の高度化に向けた課題

既に述べたように微粉炭火力技術は、極めて信頼性の高い確立された技術であるが、その一層の高度化に向けた課題としては、「使用石炭種の多様化」、「発電効率の向上」、「環境性の向上」、「負荷運用性の向上」などに加え、「新たな高度計測技術」や「燃焼器内数値解析技術」などが必要となる。

使用石炭種の多様化に関しては、我が国は石炭の供給を、海外の様々な国からの輸入に頼っているため、大きく性状の異なる石炭を利用していかなければならない。そのような観点から、種々の石炭について既設発電所への適性を、事前に的確に評価できる手法の確立が重要である。特に、一層のエネルギー源の強化、燃料コスト低減のためには、これまで利用されることが少なかった、水分が多く発熱量の低い低品位炭や、難燃性の高燃料比

炭など、より幅広い性状の石炭を利用できるようにする必要がある。

発電効率の向上に対しては、これまで同様、蒸気条件の改善(高温・高圧化)が最も大きな課題となる。既に我が国では世界的に見ても最も高い蒸気条件で発電しており、今後の一層の向上には高温用材料の進歩が重要な課題の1つである。また、ファンやミルなど種々の補機類の動力低減も、発電効率向上の点から有効である。

環境性の向上に関しては、従来より注目されていた窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、粒子状物質(石炭灰)などの低減は、今後も益々重要となる。既に我が国では1960年代からの公害問題への対処により、図3-2-1に示すように、世界で最も環境汚染物質の排出レベルの低い環境対策技術を確立しているが、環境保全に対す

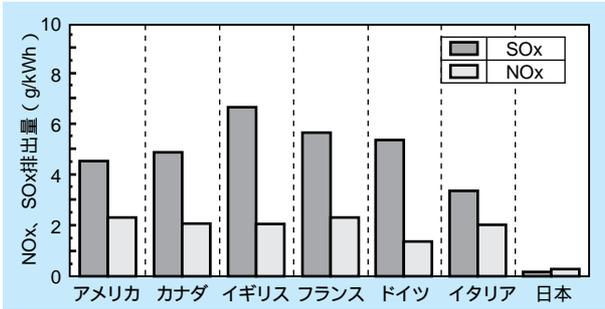


図3-2-1 各国のNOx、SOx排出量

る要求はますます厳しくなっている。このような状況から、脱硫・脱硝・集じんなどのこれまで用いられていた環境対策技術の高度化は、今後も重要となる。特にコスト低減との両立のための、低NOx燃焼技術の開発・高度化はますます重要な開発項目となると思われる。また最近では、石炭灰の処分も重要な課題であり、コスト低減にも有益な、有効利用しやすい石炭灰に性状調整するための灰中未燃分の低減技術なども鋭意開発が進められている。

近年では、微粉炭火力においても電力需給調整のための負荷変化を担う必要が高くなっており、負荷運用性の向上が注目されている。微粉炭バーナは、低負荷時に燃

焼安定性が悪くなるため、それを改善するための技術開発も重要となっている。本技術に加え、上述の環境性向上の観点から、低NOx燃焼法との両立も重要となっている。

一方、石炭の燃焼場は、極めて高温の乱流場になるため、制御や厳密な評価が難しく、これまで経験工学的手法に頼って設計・運転されることが多かった。しかし、低NOx燃焼や低負荷対応燃焼の高度化、非常に多様な石炭種の利用など、様々な高度技術の開発が必要になるに依じて、従来の手法では開発に大幅な期間を要するようになり、新たに効率的な手法の適用が望まれるようになってきた。その手法の1つとして、燃焼場を定量的に解明し、より高度な燃焼技術開発に反映することが可能な、レーザ光等を利用した高度計測技術や数値シミュレーションによる燃焼場の解析技術などが注目されている。今後は、これらの技術を実際の燃焼場に適用可能にすると共に精度を向上し、燃焼技術の改良・改善へとつなげる手法も重要になってくると思われる。

このように、今後の微粉炭火力の高度化に向けた課題として、非常に幅広い観点から数多くの技術開発テーマが挙げられている。

第 4 章

4

微粉炭火力用燃料の
適性評価



第4章 微粉炭火力用燃料の適性評価 目次

CS推進室 受託推進グループ 部長 牧野 尚夫
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 松田 裕光

4 - 1	研究の背景	31
4 - 2	発電用炭適性評価手法	31
4 - 3	適合炭種拡大化技術	37
4 - 4	今後の展開	43

牧野 尚夫（10ページに掲載）
（4-1、4-2、4-4執筆）



松田 裕光（1983年入所）
これまで石炭火力発電における微量物質の挙動および微粉炭燃焼や石炭ガス化における石炭中窒素化合物の反応特性について研究を行ってきました。現在、微粉炭火力における新規導入炭種の発電所への適性が精度良く評価できる手法の確立を図っています。今後は、未利用の石炭種やバイオマス燃料等の反応性評価に関する研究を行い、火力発電の燃料拡大、コスト低減に貢献していきたいと考えています。

（4-3執筆）

4 - 1 研究の背景

現在、我が国の微粉炭火力においては様々な国から輸入した石炭が利用されており、その内訳はオーストラリア炭が50%以上、中国、アメリカ、インドネシアなどの石炭が各10%程度を占めている。これらの国には数多くの炭田があり、石炭の性状もそれぞれ大きく異なる。また、新しい炭田も年々開発されているため、多様な石炭種を的確に導入していくことはエネルギー源強化、燃料コストの削減の観点から重要である。

新規石炭の導入にあたっては、その性状が各発電所の運転操作条件の調節範囲で問題なく運用できるものである必要がある。従来は微粉炭火力発電所の設計時に、適用可能範囲となる石炭性状を設定（設計炭と呼ぶ）し、基本的にはその性状範囲内の石炭を利用してきた。設計炭の性状範囲から外れる石炭種を利用する場合には、実機に近い規模の火炉を用いての燃焼試験等で、その特性を事前確認した後に導入するなどの方法を採用していたため、事前評価にも多くのコストと時間を必要としていた。

当研究所では、様々な新規炭種の実機への導入可能性を

簡易かつ的確に判定する手法を開発するため、石炭性状の分析値および発電所の運転操作条件に関する情報のみから、利用時の諸特性を推定する手法の開発に着手した。

本技術開発にあたっては、まず、1時間に約100kgの石炭を燃焼できる当研究所の石炭燃焼炉を用いて、石炭性状および燃焼条件から本試験炉でのNO_x・灰中未燃分の排出特性を推定する「発電用炭適性評価手法」を確立した。

本手法における石炭性状の影響評価は、燃焼条件一定の下で多様な石炭種を燃焼させ、そのNO_x・灰中未燃分排出特性と石炭性状との関係を明らかにすることで行った。一方、燃焼条件の影響については、数炭種について燃焼条件を変化させてNO_x・灰中未燃分排出特性を把握し、影響評価を行った。

次に、「発電用炭適性評価手法」で得られた石炭性状や燃焼条件の影響評価式を基に、様々な実火力発電所から収集されたデータを評価し、各発電所に対して利用石炭性状と燃焼条件から、NO_x・灰中未燃分などの排出量を推定する「適合炭種拡大化技術」として拡張した。

4 - 2 発電用炭適性評価手法

各種石炭の実機への導入の可否を判断する上で、燃焼技術の観点から最も大事な評価因子はNO_x、灰中未燃分の排出特性である。当研究所では、様々な石炭種を燃焼した場合におけるNO_xと灰中未燃分排出特性を推定するための発電用炭適性評価手法を、石炭燃焼試験炉を用いて開発した。

4-2-1 石炭性状の影響評価

NO_x 排出特性

燃焼条件一定の下での各炭種の発生NO_x濃度は、それぞれの供試炭中の窒素含有率（N含有率）に対して図4-2-1のような傾向を持つ。燃料中N含有率の増加に伴いNO_x濃度が上昇するが、明確な相関関係を示すまでには至っていない。これは燃料中N分のNO_xに

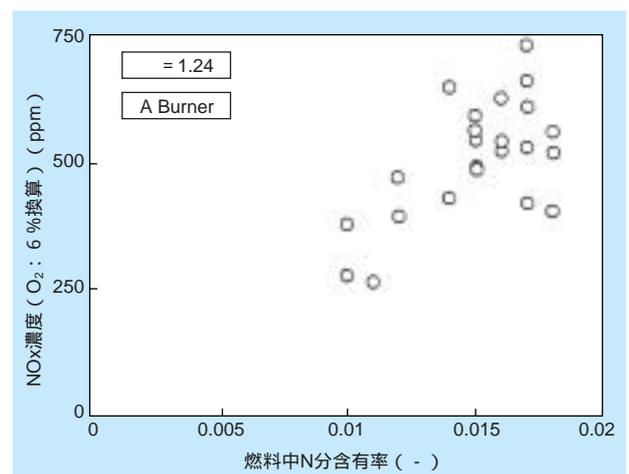


図4-2-1 燃料中N分含有率とNO_x濃度の関係

転換する割合（NO_x転換率）が石炭種によって大きく異なることに起因している。そこで、次式に定義する

NOx 転換率 (CR) を用いることにより、各種石炭について、NOx の生成しやすさを明らかにできる。

$$CR = NOx (\text{実測値}) / NOx (\text{計算値}) \quad (4-1)$$

ここで NOx (実測値) : 実測 NOx 濃度 (ppm)

NOx (計算値) : 石炭中の N 分が 100% NOx になった場合の NOx 濃度 (ppm)

図 4-2-2 は、転換率と石炭性状の関係を示したもので、燃料比 (FR) が低いほど転換率が低くなる傾向を持つ。燃料比が低い石炭種は、燃焼性の良い揮発分の含有率が高くなるため、バーナ近傍で急激な燃焼が起こり、速やかに還元雰囲気形成される。この還元炎により NOx が分解されるので、NOx 濃度が低くなると考えられている。また、同一燃料比であった場合には、燃料中窒素分含有率 (FN) が低いほど転換率は大きくなる傾向を有している。これは、FN が大きいほど NOx 濃度が高くなるため、それに伴って NOx への転換が抑制されることが原因とされている。

これらの関係を考慮すると、燃料比と燃料中窒素分含有率の比に対して NOx 転換率は、極めて良好な直線関係を持ち、図 4-2-3 のような傾向となる。図 4-2-3 の関係を表す実験式を、最小二乗法を用いて求めると、それぞれのバーナについて次式のような NOx 転換率推定式が決定される。

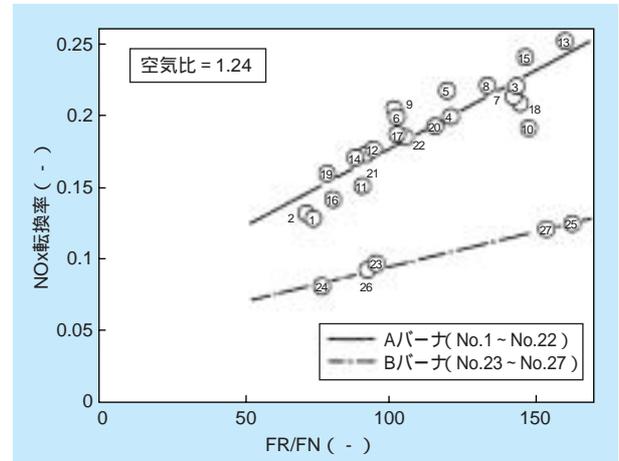


図4-2-3 燃料比、燃料中N分含有率とNOx転換率の関係

$$CR = a_1 \cdot FR/FN + a_2 \quad (4-2)$$

$$a_1 = 1.09 \times 10^{-3}, a_2 = 6.77 \times 10^{-3} \text{ (Aバーナ)}$$

$$a_1 = 4.89 \times 10^{-4}, a_2 = 4.57 \times 10^{-2} \text{ (Bバーナ)}$$

上式を利用すると、燃焼ガス中の NOx 濃度を次式から容易に推定することが可能となる。

$$NOx = \frac{1.60 \times 10^{-4}}{V_{dry}} (a_1 \cdot FR + a_2 \cdot FN) \quad (4-3)$$

ここで、 V_{dry} : 空気過剰率に対応した燃焼ガス

($m^3N//kg$)

図 4-2-4 は、(4-3) 式を用いて求めた NOx 濃度の推定値と、実測濃度を比較したものであるが、かなり良い一

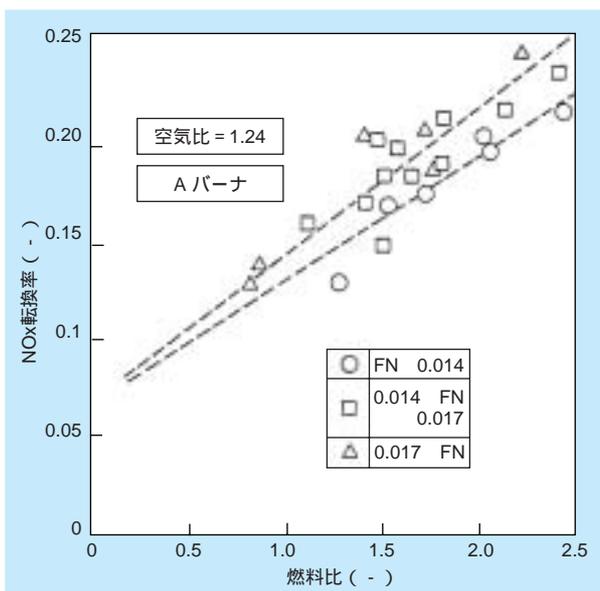


図4-2-2 燃料比とNOx転換率の関係

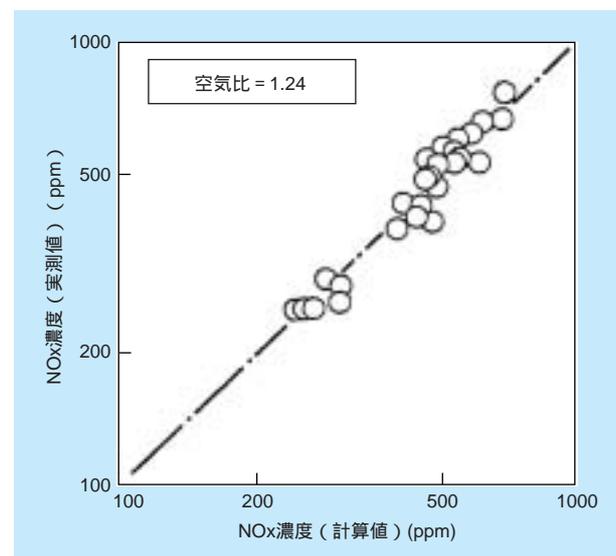


図4-2-4 NOx濃度の計算値と実測値の比較

致を示しており、NO_x発生量が、燃焼条件一定の下では石炭性状から精度良く推定できることが明らかとなっている。

灰中未燃分排出特性

石炭燃焼時に発生した石炭灰中に残存する可燃分の重量割合である灰中未燃分濃度（U_c）は、石炭の燃焼性だけでなく石炭中の灰分含有率にも影響されるため、この値からでは、石炭の燃焼性を直接的には評価することが難しい。そこで、まず灰中未燃分値から、次式により石炭中可燃分の未燃焼率（U_c^{*}）を計算し、この値を石炭の燃焼性の評価因子として用いることが多い。

$$U_c^* = \frac{A \cdot U_c}{(1 - A) \cdot (1 - U_c)} \quad (4-4)$$

ここで A : 石炭中の灰分含有率 (-)

U_c : 灰中未燃分 (-)

U_c^{*} : 未燃焼率 (-)

図4-2-5は、石炭の燃焼性を示す指標である燃料比と未燃焼率の関係を示したものである。炭種によって若干の差異があるが、A、B、いずれのタイプのバーナにおいても、未燃焼率は燃料比との間に比例関係が成立している。図4-2-5における燃料比と未燃焼率の関係を最小二乗法で求めると次の(4-5)式が得られる。

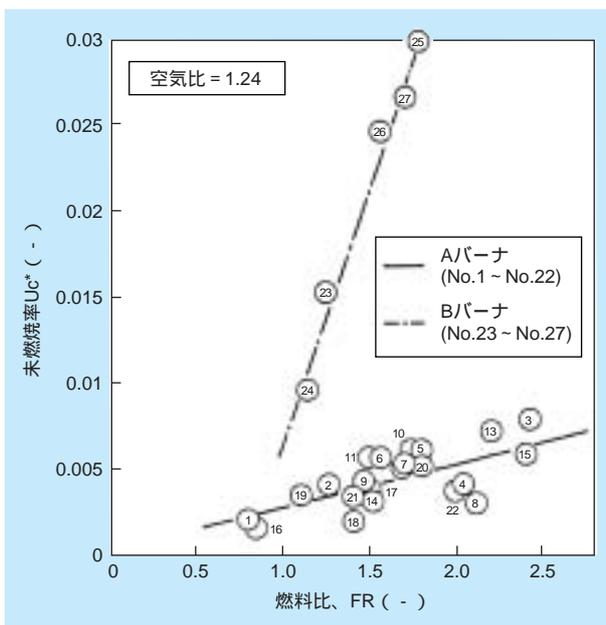


図4-2-5 燃料比と未燃焼率の関係

$$U_c^* = b_1 \cdot FR + b_2 \quad (4-5)$$

ここで、 $b_1 = 2.50 \times 10^{-3}$ 、 $b_2 = 2.20 \times 10^{-4}$ (Aバーナ)

$b_1 = 2.95 \times 10^{-2}$ 、 $b_2 = 2.29 \times 10^{-2}$ (Bバーナ)

上記、(4-5)式の関係より、石炭性状が判明すれば未燃焼率が推定でき、さらに灰分含有率と(4-4)式、(4-5)式を利用することにより、灰中未燃分濃度を求めることが可能となる。こうして計算した灰中未燃分濃度と実測値の関係を示したものが図4-2-6である。NO_x濃度の場合に比べて、若干ばらつきが大きい、これは粒径や石炭の微細構造など、当研究所が検討に用いている性状以外の影響因子が存在するためと考えられている、今後はこれらの影響をも詳細に検討し、一層精度を上げていくことが重要となる。

混炭燃焼時の排出特性

性状の異なる石炭種を混合して利用することで、それぞれの石炭種の持つ問題点を改善できる可能性がある。例えば、NO_x濃度の異なる2種類の石炭を各混合比で燃焼させた場合について、その混合比率から求めた石炭中の窒素含有率と、NO_xへの転換率との関係は、図4-2-7のように示される。混炭燃焼することにより連続的に窒素含有率が変化するため、そのNO_x転換率への影響が、数多くの石炭をそれぞれ燃焼させた場合以上に明確に現れている。例えばイップスイッチ炭とブル

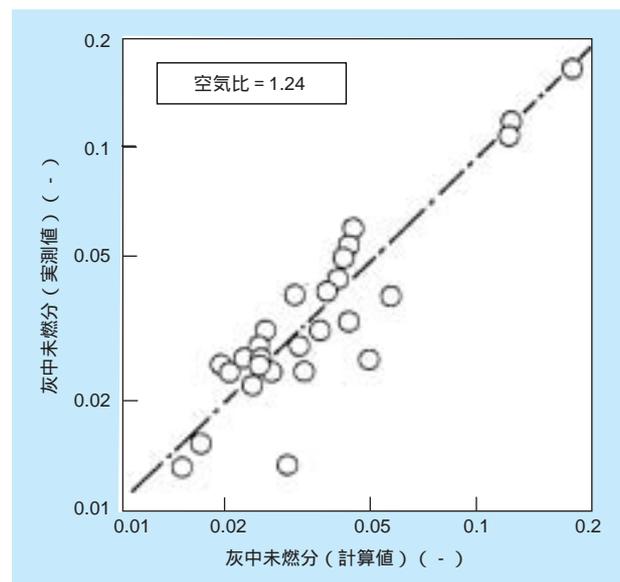


図4-2-6 灰中未燃分濃度の実測値と計算値の比較

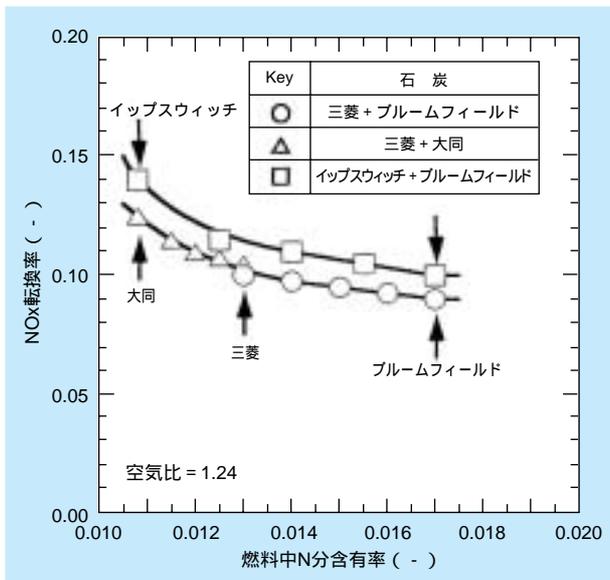


図4-2-7 混炭燃焼時のNOx転換率に及ぼす燃料中N分含有率の影響

ームフィールド炭に注目すると、各々の燃料比は1.7と1.6でほぼ同等であり、転換率への影響は単にN分含有率のみによるものと考えられる。本条件においても、単一石炭を燃焼させた場合の傾向と同様、窒素分含有率の増加に応じてNOx転換率が減少するという傾向が明確に示されている。

そこで、混炭燃焼時に対しても図4-2-3と同様に、混合した石炭の性状に対して、燃料比と燃料中窒素分含有率の比率と転換率との関係を把握すると図4-2-8のようになる。石炭を混炭燃焼した場合においても単一種の石炭燃焼時と同様に、燃料比と燃料中窒素分含有率の比はNOx転換率と良い直線関係を有し、このような条件に

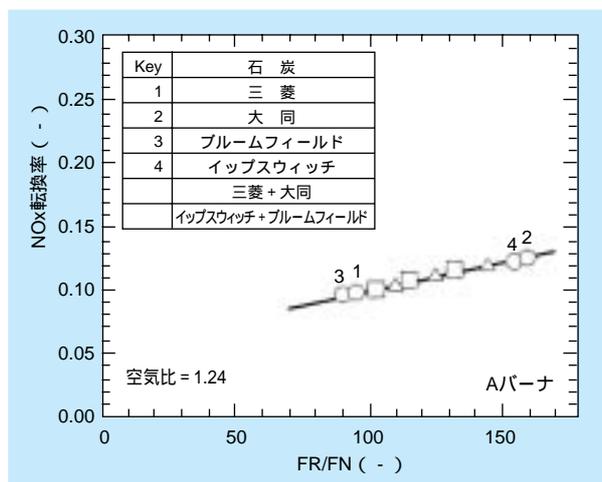


図4-2-8 NOx転換率に及ぼす石炭性状の影響

においても石炭性状からNOx濃度を推定できることが明らかになっている。

一方、混炭燃焼時の灰中未燃分濃度を検討するにあたっては、次のように考えて行ってきた。火炉熱負荷、空気過剰率などの燃焼条件が同一であるため、混炭したそれぞれの石炭種の燃焼過程も単一種の石炭燃焼時と同一であると仮定することにより、混炭燃焼時に排出される石炭灰は、単一種の石炭を燃焼した時に生成する石炭灰が混炭率に対応して混合したものから成り立つと考えることができる。この際、例えばn種の石炭を混炭率Xi(重量分率)で混炭燃焼した時の灰中未燃分は、次式で示される。

$$U_c = \sum_{i=1}^n \left(X_i \cdot A_i \frac{U_{c_i}}{1 - U_{c_i}} \right) / \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i \cdot A_i}{1 - U_{c_i}} \right) \quad (4-6)$$

ここで、Uc : 混炭燃焼時の灰中未燃分 (-)

Xi : 石炭(i)の混炭率(重量分率)(-)

Uci : 石炭(i)専焼時の灰中未燃分(-)

Ai : 石炭(i)の灰分含有率(-)

図4-2-9は、三菱炭と大同炭を混炭燃焼した場合の灰中未燃分濃度と未燃燃率を、(4-6)式を用いて単一石炭種燃焼時におけるそれぞれの炭種の灰中未燃分濃度から求めた推定線と比較して示したものである。推定線は若干の差異はあるものの、実測値の傾向を良く表している。

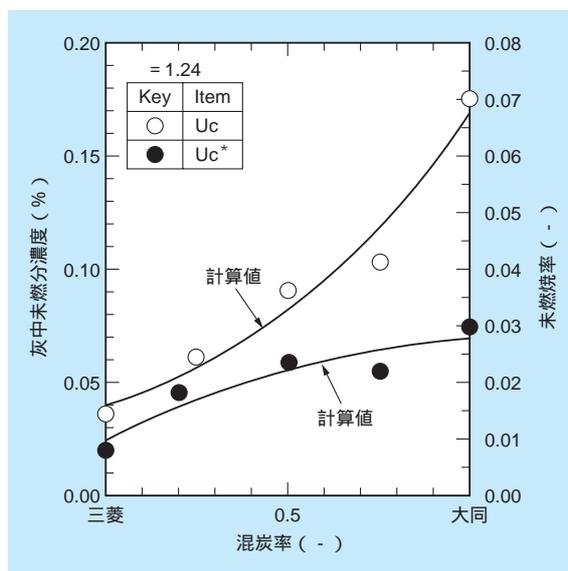


図4-2-9 混炭燃焼時の灰中未燃分濃度、未燃燃率に及ぼす混炭率の影響

これらの結果から、本発電用炭適性評価法は混炭時の灰中未燃分濃度の推定にも利用できることが明らかになり、当研究所の石炭燃焼炉において燃焼条件同一の下では、各種石炭を利用した場合のNOx・灰中未燃分排出特性の推定が可能になっている。

4-2-2 燃焼条件の影響評価

実際の火炉においては、空気比（火炉に投入する石炭を燃焼させるのに理論的に必要な空気量に対する、実際に投入した空気量の割合）や、二段燃焼率（バーナ部に全部の燃焼用空気を投入させず、火炉の中間に分割投入することによりNOxの急激な生成を抑制する二段燃焼法において、その分割した空気量の全投入空気量の割合）などを調整して、NOx・灰中未燃分を調整する。発電用炭適性評価にあたっては、これらの燃焼条件の影響評価も重要となる。

図4-2-10には、二段燃焼率を変化させた場合のNOx濃度と灰中未燃分濃度を示す。二段燃焼率の増加に伴いNOx濃度は低減できるが、灰中未燃分濃度は逆に増加している。これらの検討を様々な石炭について行い、二段燃焼条件を一定（注入位置：バーナより2.99m、注入率：20%と30%）とした場合の、各炭種毎のNOx転換率を基準燃焼時（4-2-1項の石炭種の影響を検討した場合の条件）のNOx転換率との関係として表すことにより、図4-2-11のような良い直線関係が得られる。また、同様に未燃焼率についても、基準燃焼時と二段燃焼時（注入位置：2.99m、注入率：30%）との関係は図4-2-12に示さ

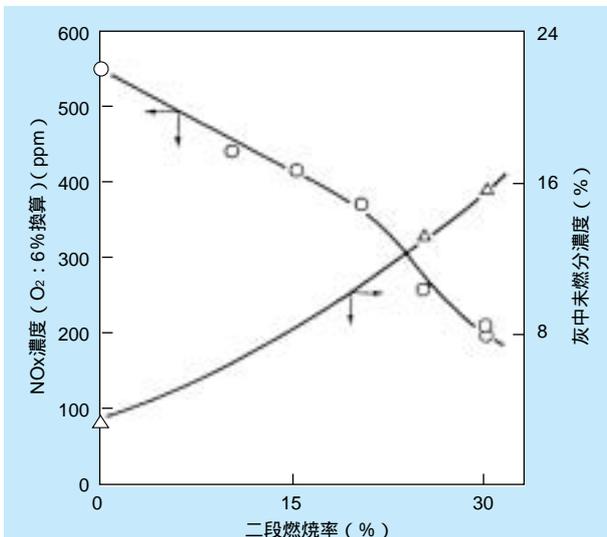


図4-2-10 二段燃焼率とNOx・灰中未燃分濃度の関係

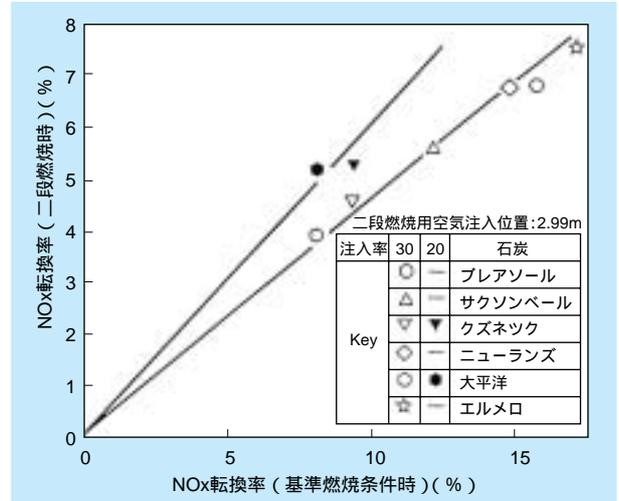


図4-2-11 基準燃焼時と二段燃焼時のNOx転換率の比較

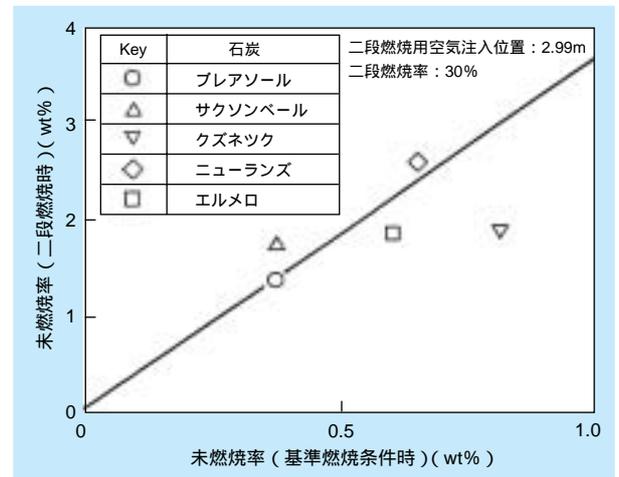


図4-2-12 基準燃焼時と二段燃焼時の未燃焼率の関係

れるように、NOx転換率の場合と同様に、直線関係を有している。これは、すなわち基準燃焼時においてNOx転換率、あるいは未燃焼率の高い供試炭は、二段燃焼時においても相対的にそれらが高くなることを意味している。

これより、NOxと灰中未燃分は図4-2-10のように二段燃焼条件によって大きく変化するが、二段燃焼条件を一定にした場合のNOx転換率の基準燃焼時からの低減割合や、未燃焼率の基準燃焼時からの増加比率は炭種によらず、ほぼ同一となることが明らかである。これらの関係を利用することにより、各種の二段燃焼条件におけるNOx転換率低減率と未燃焼率増加比の逆数との関係を、図4-2-13に示すように炭種、燃焼条件によらず一本の直線で表すことができるようになる。また、空気比を増加させ、過剰酸素濃度を3%から6%ま

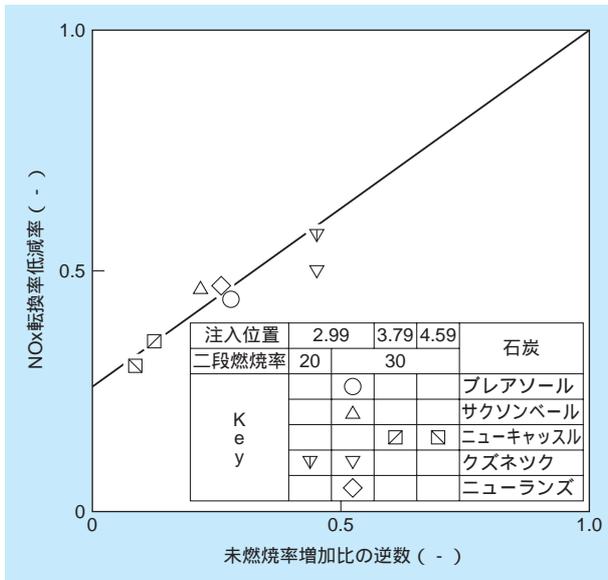


図4-2-13 NOx転換率低減率と未燃焼率増加比の関係

で変化させた場合についても、NOx 転換率低減率と未燃焼率増加比の逆数は、二段燃焼条件変化時と同一の直線上を変化することが明らかになっている。以上の結果より、燃焼条件を変化させた場合のNOx 転換率の低減率と、それに応じた未燃焼率の増加比は、供試炭性状によらず一定の関係を有することが明らかになった。図4-2-13を基にして、この関係を数式化すると、次式ようになる。

$$\frac{CR(\text{条件変化時})}{CRo(\text{各基準燃焼時})} = 0.77 \times \frac{Uco^*(\text{基準燃焼時})}{Uc^*(\text{条件変化時}) + 0.23} \quad (4-7)$$

上式に、各供試炭について基準燃焼時のNOx 転換率と未燃焼率の値を与えることにより、燃焼条件変化時のNOx 転換率と未燃焼率の関係を関数として得ることができる。この関係を用いれば、燃料中N分含有率、灰分含有率などの石炭性状が分かれば、図4-2-14のように石炭燃焼試験炉における各炭種毎の燃焼条件変化時のNOx と灰中未燃分の排出特性を推定することが可能となる。

図中には、比較のために実測値をも示しているが、推定した結果と非常に良く一致する。ここでの検討では基準燃焼時のNOx 転換率と未燃焼率として実測値を用いたが、4.2.1項で明らかにしている、石炭性状を基にした基準燃焼時のNOx・灰中未燃分排出特性推定手法を用いれば、燃焼実験を行わなくても、石炭の分析値のみから

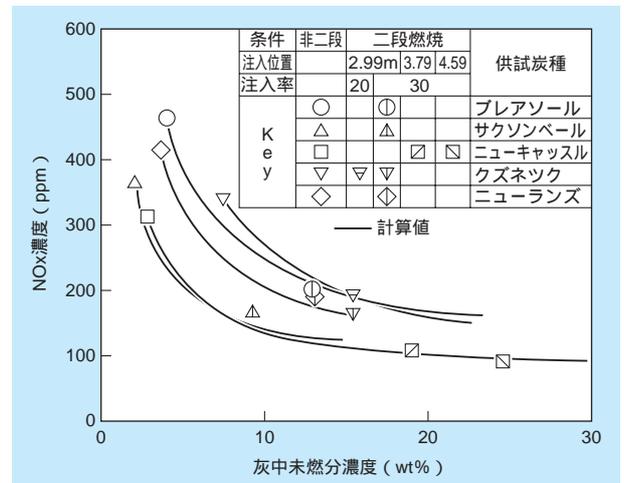


図4-2-14 燃焼条件変化時のNOx・灰中未燃分排出特性

図4-2-14の関係を求めることが可能となる。

ここまでは、1種類のバーナについて燃焼条件の影響を述べてきたが、微粉炭燃焼用のバーナには数多くのタイプがあり、それによりNOx と灰中未燃分の排出特性も異なる。図4-2-15には、NOx 転換率の低減率と未燃焼率の増加比との関係を、3種類のバーナについて把握した結果を示す。図示されるようにいずれのバーナについても、図4-2-13と同様の直線関係が得られているが、バーナによって若干傾きが異なっている。図4-2-15で求められた関係と、実測した基準燃焼条件時のNOx 転換率と未燃焼率を用いることにより、図4-2-14と同様に他のバーナについても燃焼条件変化時のNOx と灰中未燃

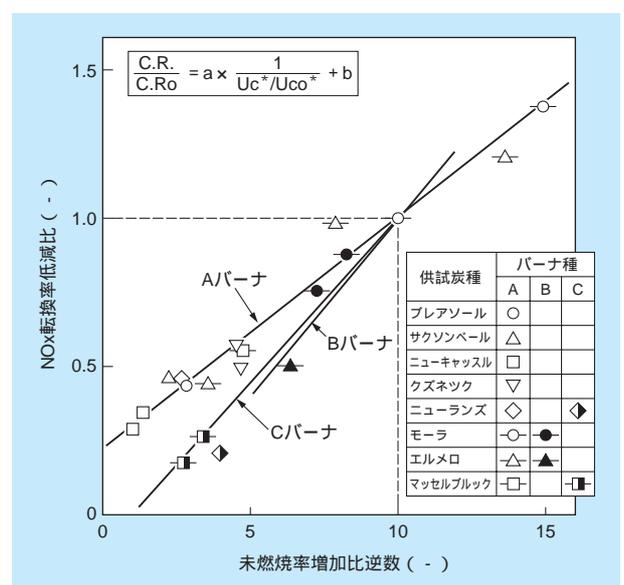


図4-2-15 バーナ形状変更時のNOx転換率低減率と未燃焼率増加比の関係

分の排出特性を求めることが可能となる。図4-2-16には、こうして求めたNOx・灰中未燃分排出特性を、燃焼条件変化時の実測値と比較して示しているが、3種類のバーナについて、いずれの炭種を使用した場合においても、推定値と実測値は良く一致していることが分かる。

本節で述べた手法により、当研究所石炭燃焼試験炉で各種石炭を燃焼した場合のNOx・灰中未燃分排出特性は、各バーナ毎に固有の、石炭性状とNOx転換率および未燃焼率の関係、ならびにNOx転換率低減率と未燃焼率増加比の関係を把握すれば、精度良く推定することが可能となっている。

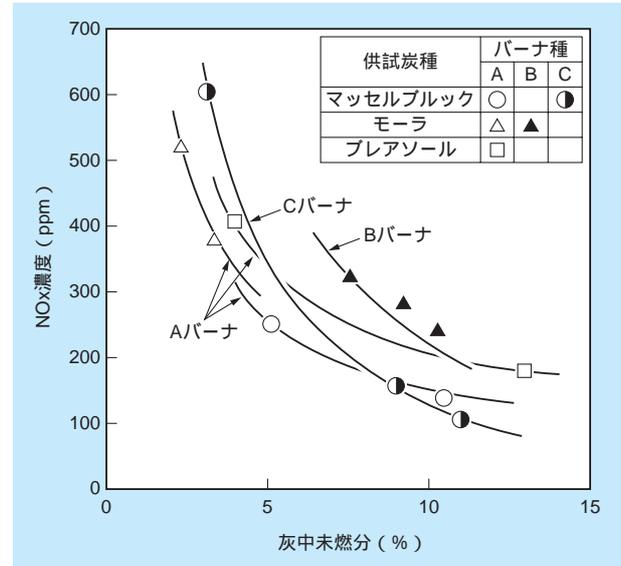


図4-2-16 バーナ形状変更時のNOx・灰中未燃分排出特性

4 - 3 適合炭種拡大化技術

これまでに利用経験のない幅広い性状の石炭も利用していくため、当研究所は、前節で述べた発電用炭適性評価法をもとに、新規炭種について石炭性状と運転条件から各発電所への適合性が評価できる「炭種適合性評価システム」を開発した。また、その開発にあたって、各発電所から収集した様々な石炭の性状や発電所での利用時の特性をデ-タベ-ス化することにより、「石炭利用事例検索システム」を作成した。各発電所での石炭運用は、混炭や部分負荷への対応等複雑であり、本システムの開発は、まず、定格負荷の単味燃焼について行ない、順次、混炭燃焼や部分負荷燃焼へとシステムの拡張を図っている。

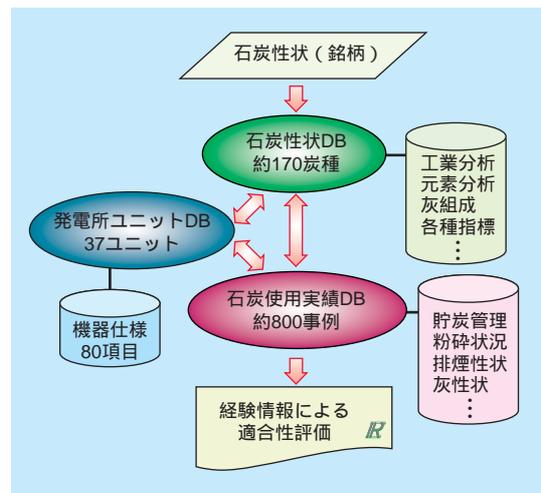


図4-3-1 石炭利用事例検索システム

4-3-1 実機使用炭のデ-タベ-ス化

デ-タベ-スの概要

当研究所が開発した「石炭利用事例検索システム」は、各発電所における石炭利用の実績をデ-タベ-ス(DB)化することにより、他の発電所での炭種毎の運転データを参考にして、利用経験のない石炭の利用時の特性を推定し、受け入れの可能性の判断に資するものである。図4-3-1に示すように、「発電所ユニット」、「石炭性状」、「石炭使用実績」の3つのDBから構成される。

発電所ユニットデ-タベ-ス

国内の石炭火力発電所37ユニットについて、貯炭設備、微粉炭機、ボイラ、脱硝装置、脱硫装置、集塵装置、排水処理設備およびフライアッシュ処理設備等の機器仕様約220項目についてDB化したものである。

石炭性状デ-タベ-ス

本DBは、主に1995年以降に各発電所で使用した石炭および新設発電所の設計炭について、工業分析、元素

分析等の一般分析を主体に約50項目についてまとめたものである。また、性状分析値から算出される灰アルカリ率、ファウリング指数、スラッキング指数、着火性指数についても表示されるシステムである。さらに、貯炭中の温度上昇や生成粒子の付着性等石炭使用時の留意事項もDB化した。石炭性状は同一銘柄であっても採掘位置等によって異なるため、できるだけロット（船）毎にデータを収集している。現在、本DBは、約170炭種、約2000ロットから構成されている。

石炭使用実績データベース

本DBは、1995年以降の各発電所における石炭燃焼時のボイラ運転条件や排ガス性状等の状態量を収録したものである。定格運転時の単味燃焼について約800事例、混炭燃焼について約450事例の石炭使用実績がデータとして収録されている。

計算機利用システム

石炭利用事例検索システムの主要画面を図4-3-2に示した。本システムは、データの検索、絞り込み、並べ替え、および表作成ファイルへの変換が容易に行える特徴を持つ。また、3つのDBはリンク構造となっており、

例えば石炭性状DBと石炭使用実績DBとをリンクさせることにより、石炭性状の情報と共に、単味および混炭燃焼を含めて、その石炭を使用した場合の特性が分かるようになっている。

さらに、本システムは、2000年に電力各社にCD-ROMで配布し、試用が開始されているが、ユーザーが利用する場合の利便性を考慮し、各発電所で継続的に取得されるデータをユーザーが自ら追加し、既存のDBと一体化して解析できると共に、「炭種適合性評価システム」において評価対象となる石炭種が、「石炭利用事例検索システム」に含まれている場合、その性状の入力は、DBより直接行える機能が付加されている。

4-3-2 炭種適合性評価技術

「炭種適合性評価システム」は、上記3DBを基に、発電所で一般的に分析している石炭性状値や通常計測している運転条件値から、各ボイラでの運転時の特性を推定することにより、各種石炭の各発電所ユニットへの適合性が判断できるシステムである。また、適合性の判断基準は、電力各社へのアンケート調査により、多くの発

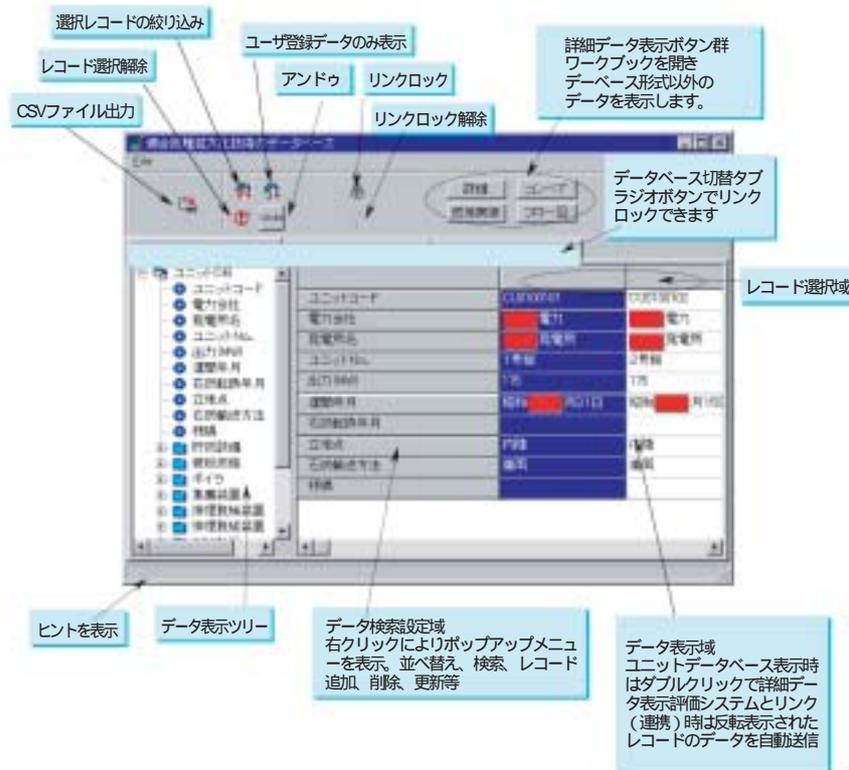


図4-3-2 石炭利用事例検索システムメインフォーム

電所で石炭の運用条件として重要視している、「NOx と灰中未燃分の排出特性」、「石炭灰性状」、「粉碎性」および「自然発火性」の4項目とした。本システムは、定格負荷の単味および混炭燃焼時の収集データに基づいて作成されている。

NOx と灰中未燃分の排出特性

本評価項目については、NOx および灰中未燃分の排出量を石炭性状と燃焼条件から予測できる手法を確立し、これにより石炭の適合性を評価すると共に、それらの排出量を抑制できる最適燃焼条件を石炭種毎に推定する手法を開発した。そのため、実機データおよび石炭燃焼炉での実験データを基に、ボイラ・パ・ナ形式、燃焼条件、石炭性状等の影響因子とNOx 排出量および灰中未燃分濃度との相関性を明らかにし、予測式の作成を行った。

NOx 排出特性評価における予測式は、まず、実機収集データおよび前節で述べた当研究所の微粉炭燃焼炉を用いた実験により得られたデータから、石炭中N分のNOx への転換率（NOx 転換率(CR)）と相関のある因子（影響因子）を抽出すると共に、各因子の影響が明らか

かになるよう、石炭性状や燃焼条件等を調整した試験を行ない、各々の相関関係から基本となる関数形を求めた。実際の発電所においては、これらの条件が同時に変化するため、各因子は、NOx 転換率に対して複合した影響として現れる。それらを体系的に整理して、それぞれのユニット毎の予測式を作成した。二段燃焼率が得られない場合は、ダンパ開度を関数形に加えた。評価式の作成フローを図4-3-3に示す。

こうして得られた評価式により、定格負荷の単味燃焼時および混炭燃焼時におけるNOx 転換率を評価した場合の予測値と実測値の関係を図4-3-4に示した。本図において、は単味燃焼時のデータのみから導出した評価式により単味燃焼時ならびに混炭燃焼時のNOx 転換率を予測した場合であり、は混炭燃焼時のデータも含めて評価式を再導出し、より高精度な評価式を用いて単味ならびに混炭燃焼時のNOx 排出特性を予測した場合である。混炭燃焼時のデータを加え、より多くの石炭性状と燃焼条件を基に評価式を導出することにより、評価精度を一層向上させることが可能になった。

灰中未燃分排出特性については、前節の式(4-4)に

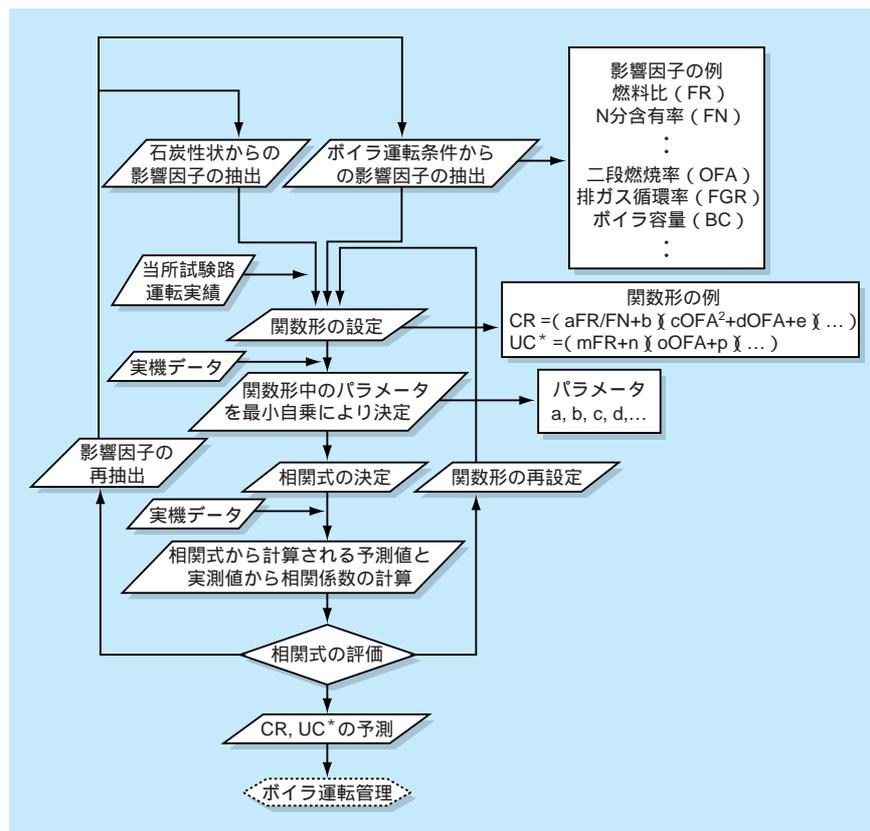


図4-3-3 NOx転換率 (CR) ・ 未燃焼率 (Uc*) 相関式作成フロー

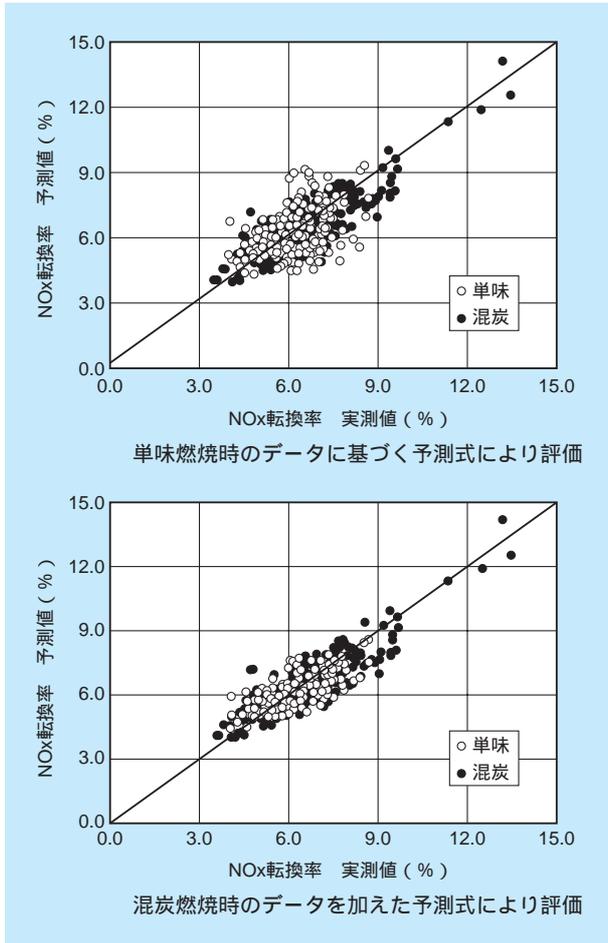


図4-3-4 NOx排出特性の実測値と予測値の比較

示した、石炭中可燃分の未燃焼率 (Uc^*) を評価因子として検討を行った。評価式は、NOx 排出特性と同様に石炭性状と燃焼条件を影響因子として作成した。

単味燃焼時における未燃焼率の予測値と実測値との関係を図4-3-5に示す。ボイラタイプにより未燃焼率に差があるものの、精度良く予測できることが明らかになった。

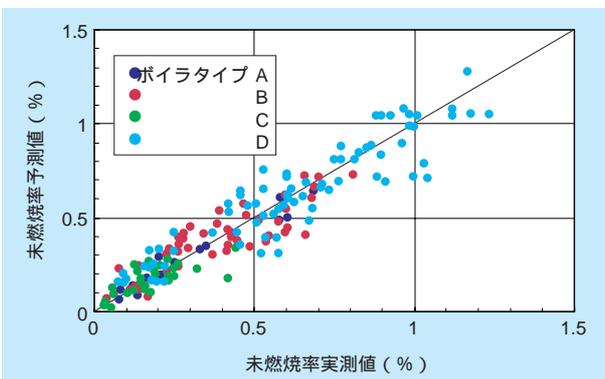


図4-3-5 単味燃焼時における灰中未燃分排出特性の評価精度

これに対し、混炭燃焼時の場合は、図4-3-6 に示したように、実測値が予測値に比べ大きくなっており、予測精度が低下することが明らかとなった。この原因としては、亜瀝青炭など比較的水分濃度の高い石炭が、混炭で運用される場合が多く、燃焼性に及ぼす水分の影響が強く現れるのに対して、本評価式ではその影響が考慮されていないことが考えられた。従って、混炭燃焼時の未燃焼率増大に及ぼす水分濃度の影響を加味するため、未燃焼率予測式の石炭性状の影響を評価する項に燃焼性を阻害する因子として水分濃度を加え、新たに予測式を作成した。その結果、図4-3-6 に示すように、混炭燃焼時の灰中未燃分濃度が、さらに精度良く評価できることが明らかになった。

粉 碎 性

微粉炭火力発電においては、石炭を粉砕し微粉にして用いる。各種石炭の粉砕性は、石炭性状によって大きな影響を受ける、ミルの運転条件やミル動力も石炭銘柄によって大きく異なってくる。このため、石炭の粉砕性指標からミルの動力等が推定できれば、運転実績のない銘柄

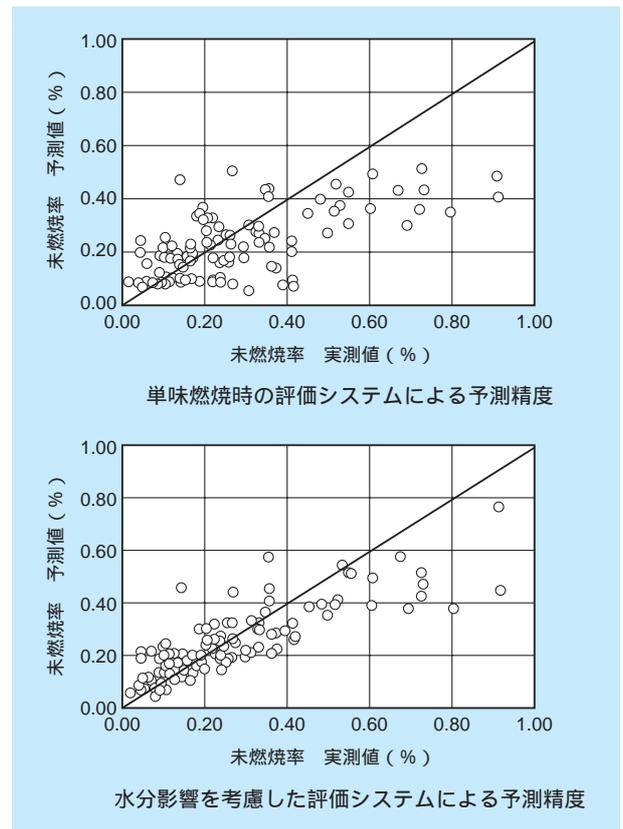


図4-3-6 混炭燃焼時における灰中未燃分排出特性の評価精度

柄におけるミルの運転条件の設定やミル動力の推定ならびにミル動力の少ない石炭の選定等が事前に可能となる。さらに、粉碎性指標を石炭性状から推定できれば、石炭の粉碎性を調べなくても速やかにミル動力を推定することが可能になる。

当研究所では、一般に粉碎性の指標として用いられているハ・ドグロ・ブ指数（HGI）^{注1）}に着目し、単味の石炭のHGIとミル動力との相関を明らかにし（図4-3-7）、これによりミル動力を予測するシステムを構築した。また、石炭性状（燃料比）とHGIおよびミル動力との関係も明らかにし、HGIを測定しなくても燃料比から直接ミル動力を推定することも可能にした。さらに、混炭時のHGIの測定値は、各炭種のHGIと混炭率を基に計算した推定値とよく一致することを明らかにした。混炭利用時のミル動力は、このように推定された混炭時のHGIを用いて、単味利用時に得られたHGIとミル動力との相関式から予測できることを明らかにした。

生成灰性状

石炭灰については、各電力ともコスト低減の観点から、有価灰としての有効利用率を増大させることが、重要な課題となっている。現状の有価灰の利用先は、セメント混和剤が最も多くなっており、この場合に有効利用の可否を決める最も重要な石炭灰の品質として、コンクリー

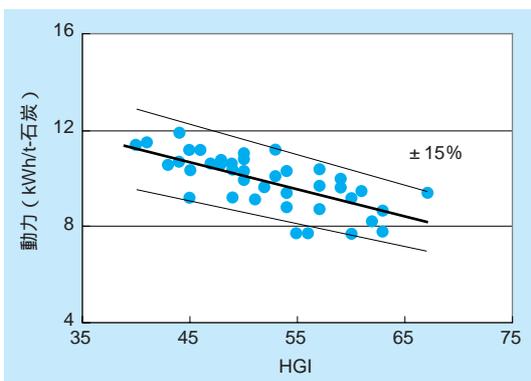


図4-3-7 ミル動力とHGIの関係

注1) ハ・ドグロ・ブ試験機を用いて、規定条件のもとで求めた、石炭の粉碎性を示す数値

注2) JIS規格には規定が無いものの、コンクリート混和剤（AE剤*）の使用量とほぼ直線的な関係があるため、コンクリート中の空気量を調節するに当たって品質管理上の重要な尺度となる。AE剤は、コンクリート等の中に多数の微小な空気泡を一緒に分布させるために用いる混和剤

ト混和剤（AE剤）の使用量と相関性の高い、メチレンブルー（MB）吸着量^{注2）}が広く用いられている。従って、当研究所では、生成灰性状の評価因子としてMB吸着量を選定し、実機データを基に石炭性状や燃焼条件とMB吸着量との関連性を明らかにし、石炭灰の有効利用可能性を判別できる評価システムの構築を行なった。MBは、灰中の未燃炭素に吸着することが推定されるため、実機における灰中未燃分濃度とMB吸着量との相関関係から評価式を求め、これにより、単味および混炭燃焼時のMB吸着量が精度良く推定できることを明らかにした。さらに、灰中未燃分濃度については、既述したように石炭の燃料比と二段燃焼率等の燃焼条件から予測可能であるため、実機におけるこれらの影響因子とMB吸着量との関係から評価式を求め、石炭性状と燃焼条件からMB吸着量を予測できるシステムを構築した。

自然発火性

石炭の自然発火は、長期に石炭を保存する場合に懸念される現象である。また、自然発火性が評価できることにより、貯炭管理において貯炭期間や散水方式や散水量の適正化など効果的な自然発火対策が可能となる。当研究所では、現在実発電所で利用されている各種石炭に対して、石炭の自然発火性と石炭性状および物性との関連性を明らかにし、自然発火性を推定する方法を検討した。

本方法では、石炭の酸化反応における見かけの活性化エネルギー - E[kJ/mol]を、自然発火性の指標として、石炭の性状分析値（燃料比、O/C、揮発分、酸素濃度および水分）との相関性を把握した。これらの分析項目の中では、O/Cが最も相関性が高く、これを評価因子として、自然発火性評価システムを構築した。

4-3-3 発電用炭適性評価システム

本システムが各発電所で利便性良く、機能的に活用できるよう、「石炭利用事例検索システム」と「炭種適合性評価システム」を組み合わせ、パソコン上で利用できる「発電用炭適性評価システム」（図4-3-8）を作成した。

NOx・灰中未燃分排出特性

図4-3-9に評価フォームを示したが、混炭燃焼時の評価も行なえるよう、石炭性状（工業分析および元素分析）

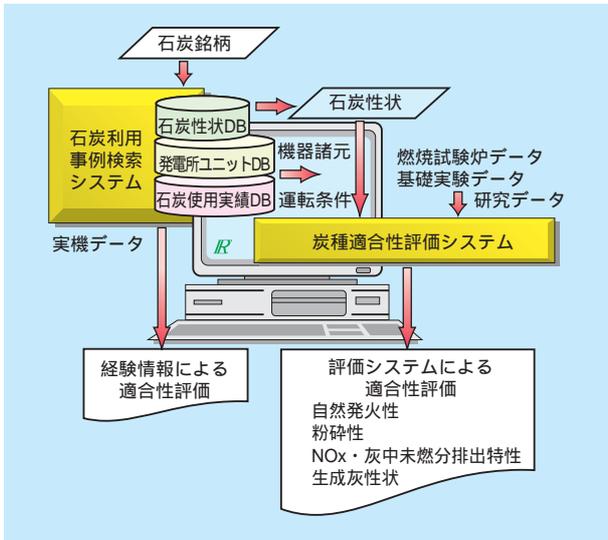


図4-3-8 発電用炭適性評価システム

の入力シ - トを複数対応とし、各炭種性状と混炭率から混炭時の石炭性状値を計算機で算出できるようになっている。各炭種に対しては燃焼条件（二段燃焼率、酸素濃度および排ガス再循環率等）を入力することにより、評

価式に基づいてNOx 転換率、NOx 濃度、未燃焼率、灰中未燃分濃度が計算、表示される。また、石炭性状と目標とするNOx 濃度ならびに灰中未燃分濃度を入力することにより、それぞれの目標濃度を達成できる二段燃焼率を提示すると共に、二段燃焼率に対するNOx・灰中未燃分濃度の変化特性をグラフ表示する機能を有している。

粉碎性

石炭性状として、燃料比またはHGIを入力する。混炭燃焼時のHGIは、各炭種のHGIと混炭率により算出し、混炭時のHGIからミル動力を求めるシステムとなっている。

生成灰性状

石炭灰性状として、灰中未燃分濃度を入力することによりMB吸着量が計算、表示される。灰中未燃分濃度の実測値が不明であっても、石炭性状と燃焼条件から直接MB吸着量を推定する手法も備えており、灰中未燃分排出特性と同様、水分濃度や揮発分含有率等の工業分析値が入力できる複数炭対応の石炭性状入力シ - トと二段燃焼率等の燃焼条件入力シ - トを用いて、評価される。

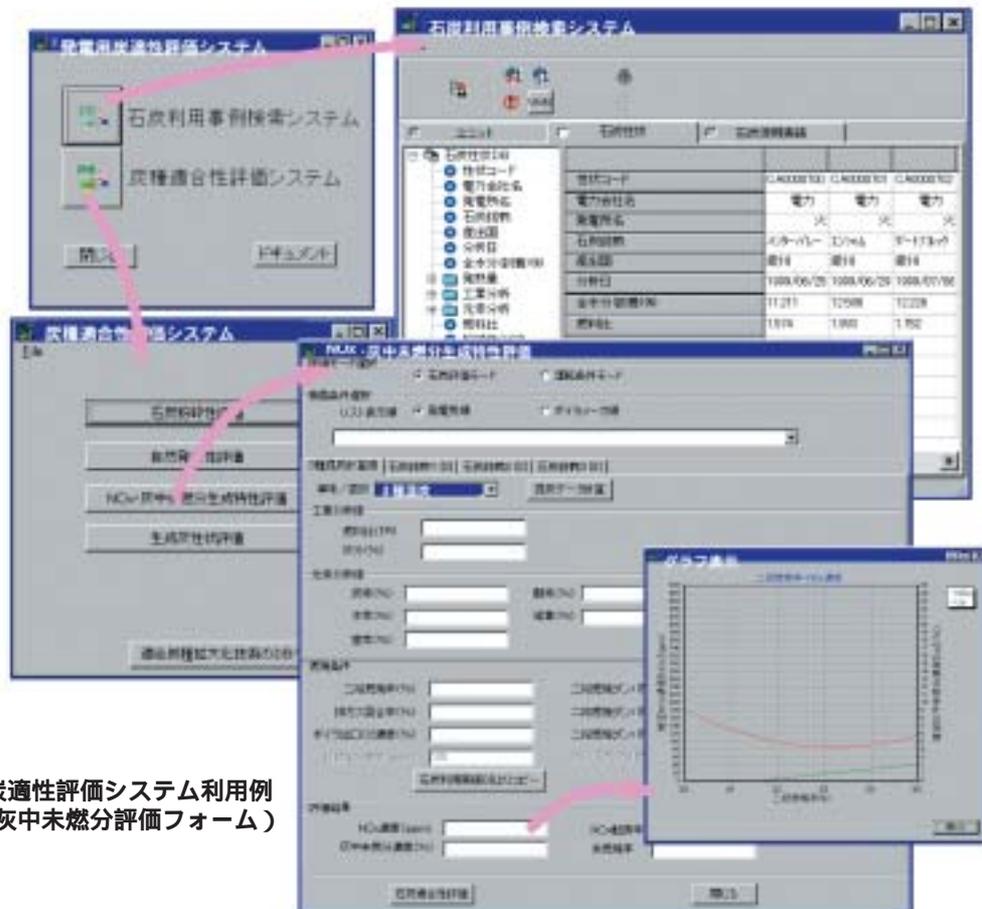


図4-3-9 発電用炭適性評価システム利用例 (NOx・灰中未燃分評価フォーム)

自然発火性

石炭性状として酸素含有率および炭素含有率を入力することにより自然発火性の起こりやすさを表示するシステムとした。

今後は、本システムを部分負荷時にも対応できるように改良を行う予定であり、併せて一層の精度向上を図っていく方針である。

4 - 4 今後の展開

エネルギー源強化、燃料コストの低減のため、様々な石炭種の導入拡大に対する要請は、近年益々強くなっている。これらの石炭について、発電所への適用可能性を的確かつ簡便に判定する手法の開発ならびに、その高精度化への要求は、今後も一層強くなっていくものと思われる。本章で述べた手法は、現在の微粉炭火力において最も重要と思われるNOxおよび灰中未燃分の排出特性を中心に開発したものであるが、微粉炭火力発電所の一層の信頼性向上、技術の高度化の上では、今後さらなる評価精度向上、ならびに幅広い利用条件に対する適応性拡大が望まれると共に、スラッキング性、ファウリング性など他の評価項目についても適性判定法を開発することが求められると考えられる。

今後は、まず、現在の炭種適合性評価システムを部分負荷運転に対しても適用できるようにすると共に、より幅広い石炭種についても適用できるように拡張する予定である。また、一層の判定精度向上のため、さらなる実機データの収集ならびに、それを基にした評価式の改良を行う。評価項目の拡張については、各発電所における炭種評価の際に必要な新たな判定項目の再抽出ならびに、それに対する判定手法の開発を行い、一層有益な

システムとして高度化していく予定である。

一方、試験炉を用いた石炭性状の評価手法は、実際に燃焼試験を行って評価するため、幅広い利用条件に対する特性など極めて詳細な評価が可能であると共に、実際の発電所では類似の石炭種の運転実績もないような極端に性状の異なる石炭種についても、特性を評価できるという利点がある。今後は、石炭燃焼試験炉において、より極端な性状を有する石炭種の評価を行い、発電用炭適性評価手法を拡張・高精度化すると共に、一層多くの評価項目に対して、さらに精度良く判定できる手法を開発する予定である。

本検討にあたっては、一層実機に近い場で詳細な評価を行うため、これまで主に用いていた石炭燃焼試験炉に加え、新たに実機と同様の複数バーナを有しかつ、実機と同じ方式の排煙処理装置を用いて環境対策技術の検討を行うことのできる「石炭燃焼特性実証試験装置」を設置する。本装置を、石炭燃焼試験炉や他の基礎的な研究設備を組み合わせ、新規石炭種の事前評価法の開発・高度化について、一層多角的な検討を効率的に行っていく予定である。

第 5 章

5

微粉炭火力の高効率化



第5章 微粉炭火力の高効率化 目次

横須賀研究所 研究コーディネーター 上席研究員 佐藤 幹夫
石川島播磨重工業株式会社 電力プロジェクト部 主機グループ 課長 岩崎 哲也
粕江研究所 上席研究員 新田 明人

5 - 1	研究の背景	47
5 - 2	蒸気条件の高温・高圧化の歩み	47
5 - 3	高温用材料の進歩	50
5 - 4	所内率低減による高効率化	55
5 - 5	今後の展開	56

佐藤 幹夫（24ページに掲載）
（5-1、5-5執筆）



岩崎 哲也（1984年入社）
入社以来、事業用および産業用・輸出ボイラの基本計画に従事。近年は高蒸気条件を適用した高効率ボイラの計画及び試運転における性能確認に注力。環境負荷を低減させた今後の発電設備計画が課題。
（5-2、5-4執筆）



新田 明人（1974年入所）
これまで主に火力発電プラントの高温機器材料の評価研究に行ってきました。そのなかで、超々臨界圧化のフェーズ1の材料評価研究にも従事しました。材料はあらゆる技術の基盤を為すものですので、これからも材料研究を通して電気事業、社会に貢献する所存です。

（5-3執筆）

5 - 1 研究の背景

戦後のわが国電気事業の復興とともに、火力発電プラントの蒸気条件は向上の一途をたどり、1967年には、東京電力(株)姉崎1号600MW(538/566)ボイラが運転に入り、超臨界圧24.1MPa、538/566の時代を迎えた。

微粉炭火力については、既に述べたように、1981年に電源開発(株)松島1、2号(各500MW)がわが国初の超臨界圧を採用して以来、北海道電力(株)苫東厚真2号600MW(1985年、538/566)、北陸電力(株)敦賀1号500MW(1991年、566/566)と蒸気条件の高温・高压化が始まり、中部電力(株)碧南3号700MW(1993年、538/593)において、再熱蒸気温度が593になった。その後、1998年には中国電力(株)三隅1号1000MW、東北電力(株)原町2号1000MWと主蒸気温度、再熱蒸気温度ともに600の時代を迎えた。さらに、2000年の電源開発(株)橘湾1、2号1050MW、2002年の電源開発(株)磯子新1号600MWでは主蒸気温度600、再熱蒸気温度610が採用されている。

一方、世界では米国で最初の超臨界圧(USC)プラントとして、1957年にPhilo 6号機125MWで31MPa、621/566/538の蒸気条件が採用され、USC時代を迎えている。その後世界最高蒸気条件のEddystone 1号機などが建設され、高温高压化による熱効率の改善が図られてきた。1950年代には、米国、ドイツ、英国で多くのUSCプラントが建設されたものの、蒸気条件の向上はその後近年に至るまで見られなかった。これは、初期のUSCプラントで多用されたオーステナイト系材料は、厚肉部に生じる熱応力によるクラックや経済性の問題などから、USC化の利点が見出されなかったことによる。

しかしながら、石油危機を契機として、エネルギー資源の有効利用、省エネ対策等への観点から火力発電の高効率化への要求が高まり、USC蒸気条件に適用可能な材料特性は無論、経済性にも優れた新材料の開発が材料メーカーによって行われ、再び熱効率向上に向けた高蒸気条件化が図られることになった。

わが国におけるUSC技術開発は、1980年度から電源開発(株)を中心にプラントメーカーとともに実施され、1982年度から2000年度までは経済産業省(旧通商産業省)による国家プロジェクトとして進められた。Phase-1(1980年度~1993年度)では、蒸気条件と主な使用材料により、STEP-1(31.4MPa、593/593/593、フェライト系材料)とSTEP-2(34.3MPa、649/593/593、オーステナイト系材料)に分けて実施された。また、Phase-2(1994年度~2000年度)では運用性や経済性に優れたフェライト系材料を採用してUSCプラントの早期導入を目的とする研究開発が行われた。

また、独立行政法人物質・材料研究機構では、超鉄鋼材料研究プロジェクトの一環として、1997年より36MPa、650のUSCボイラ厚肉耐圧部に用いるフェライト系耐熱鋼の開発を進めている。

以上述べたように、微粉炭火力の高効率化は、主にプラントの大容量化と蒸気条件の高温・高压化により図られてきたが、微粉炭火力では石油火力などと比較して、ミルなどの構成機器が多いことから所内率が高いため、その所用動力低減もプラントの効率向上に重要である。そのため、近年では所用動力の少ない型ミルや、軸流通風機の採用などにより、所内率の一層の低減に向けた検討が行われている。

5 - 2 蒸気条件の高温・高压化の歩み

1)(戦後)~1960年

火力プラントの効率向上の歴史は、蒸気条件の高温・高压化の歴史と言っても過言ではない。図5-2-1に、日本国内火力プラントの蒸気条件の変遷を示す。(以下、

蒸気条件は、タービン入口条件を示す。)第二次世界大戦以降、1950年までに13基の石炭焚火力設備が建設されたが、これらはいずれも戦前・戦中の技術に基づき設計・製造された。この時代の蒸気条件は最高で4.4MPa

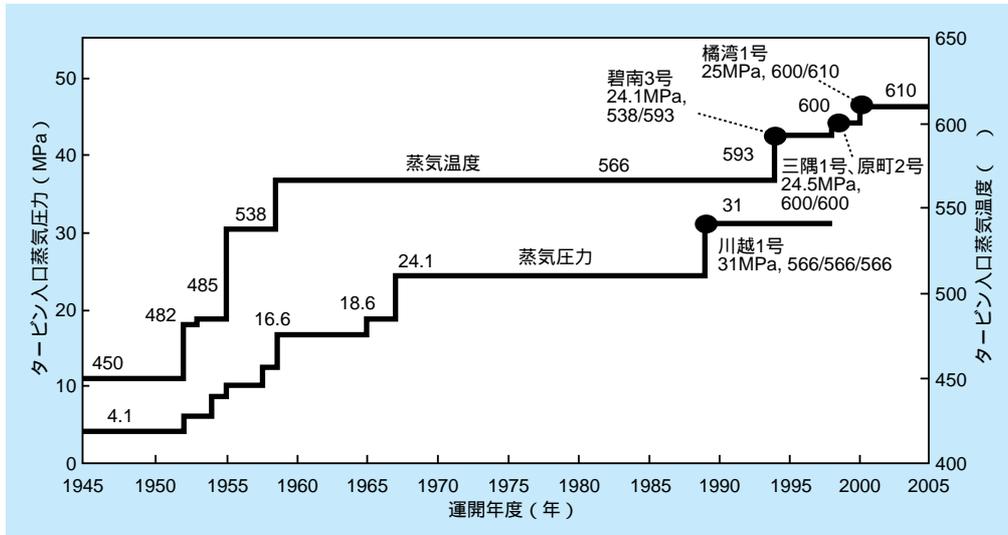


図5-2-1 蒸気条件の変遷

(45kg/cm²g) - 主蒸気温度 450 であり、蒸発量 200t/h、タービン 1 基に対し、ボイラ複数基を組み合わせる方式が採用された。1951年に電力再編成が行なわれ、新しい計画が発表されたが、これに対応し国内ボイラメーカーは欧米メーカーと技術提携を行い、蒸気条件の高温・高圧化に対応する体制を整えた。この結果、火力発電プラントの蒸気条件は、産業の拡充発展に伴って蒸気温度・圧力とも上昇の一途をたどり、1960年までに主蒸気圧力は 16.6MPa (169kg/cm²g) - 主蒸気温度 566 が採用された。この頃までは、国内炭焼き設備が火力発電の主流として建設されたが、この頃から石油火力が出現した。

2) ~ 1970年

この年代は、石炭を中心とする炭主油従の時代から石油主力となる油主炭従の時代に移行した時代であった。石炭火力の建設は減少したが、この時の主な石炭焼きボイラとしては、1967年に石炭焼き最大出力の電源開発(株)磯子 1号 265MW 機が自然循環ボイラとして建設された。また、中国電力(株)下関 1号 156MW 機は強制循環ボイラ、九州電力(株)唐津 1号 156MW 機はスルザ型貫流ボイラが採用された。

3) ~ 1990年

1973年の石油ショック、及びその後の石油価格の高騰、また第 2 次石油ショック後には IEA による石油火力新設禁止等の取り決めがなされた結果、燃料多様化の

方針が採用され、再び石炭火力の計画が開始された。但し、それまでの国内炭から世界各国の石炭を輸入・適用する海外炭焼きに移行した。1981年に、我が国初の海外炭焼き超臨界圧発電設備として電源開発(株)松島 1, 2号 500MW 機 (主蒸気温度 538 - 再熱蒸気温度 538) が運転を開始した。

1985年には、ユニット形式として現在においても主流である海外炭焼き超臨界圧変圧運転設備の初号機となる北海道電力(株)苫東厚真 2号 600 MW 機 (主蒸気圧力 24.1MPa (246kg/cm²g) - 主蒸気温度 538 - 再熱蒸気温度 566) が運転を開始した。それからしばらくの間、蒸気条件は変わらなかったが、これは、蒸気条件の高温・高圧化による熱効率の向上よりもプラントの大容量化によるプラント効率向上および建設費低減の方が経済性に優れているとの考えが支配的であったことによる。1990年には、石炭焼き設備として初の 1,000MW 機として電源開発(株)松浦 1号 機 (主蒸気圧力 24.1MPa (246kg/cm²g) - 主蒸気温度 538 - 再熱蒸気温度 566) が運転を開始した。

この時期においては省資源の観点から微粉炭火力の蒸気条件を向上させ、熱効率を改善するという要求が強くなってきた。そうした動きを受けて 1980年代半ばより従来の蒸気条件を一層高温・高圧化することで飛躍的に効率の改善を目指した超々臨界圧 (USC) 蒸気条件による発電プラントの技術開発が行なわれてきた。電源開発(株)では、表 5-2-1 に示す目標を掲げて、通産省 (現経済産業省) 資源エネルギー庁の支援を得て、1982年より

表5-2-1 USC開発目標（1,000MWベース）

	従来	Phase-1		Phase-2	次世代 (参考)
		STEP-1	STEP-2		
主な使用材料	フェライト系	フェライト系	オーステナイト系	フェライト系	Niベース
蒸気条件	圧力 (MPa)	24.1	31.4	30	約30
	温度 ()	538/566	593/593/593	630/630	700 (MST)
設計発電端効率 (%)	42.1	44.2	44.9	44.1	46
効率向上 (%)	Base	5.0	6.5	4.8	9.3
年間石炭節約量 (ton)	Base	96,000	125,000	95,000	170,000
年間CO ₂ 低減量 (10 ⁶ Nm ³)	Base	117	152	112	218

各ステップに区分し、本技術開発に取り組んできた。このうちSTEP-1の成果の一部は既に実プラントにおいて採用されている。

4) ~現在

この蒸気条件の高温・高圧化に対応した材料研究を中心とした技術を適用し、蒸気条件向上を果たしたプラントが、1990年頃から運転を開始している。図5-2-2に高蒸気条件に対応できる高温強度を改善した代表的な材料の特徴を示す。1991年に運開した北陸電力(株)敦賀1号500MW機では、主蒸気温度を566に向上させている。1993年に運開した中部電力(株)碧南3号700MW機においては、国内で初めて593が再熱蒸気温度に採用された。

この蒸気条件を達成したことから更なる高温化に拍車がかかり、1998年には中国電力(株)三隅1号1,000MW機、及び東北電力(株)原町2号1,000MW機において、主蒸気圧力24.5MPa - 主蒸気温度600 - 再熱蒸気温度600に到達した。さらに、2000年には、電源開発(株)橘湾1、2号1,050MW機において、主蒸気圧力25MPa - 主蒸気温度600 - 再熱蒸気温度610が採用された。これらの蒸気条件とプラント効率の向上(相対値)の関係について図5-2-3に示す。

なお、2002年に運開した電源開発(株)磯子新1号600MW機においては、純変圧方式を採用しており、最大蒸発量時の主蒸気圧力として26.6MPa(主蒸気温度600 - 再熱蒸気温度610)が採用されている。

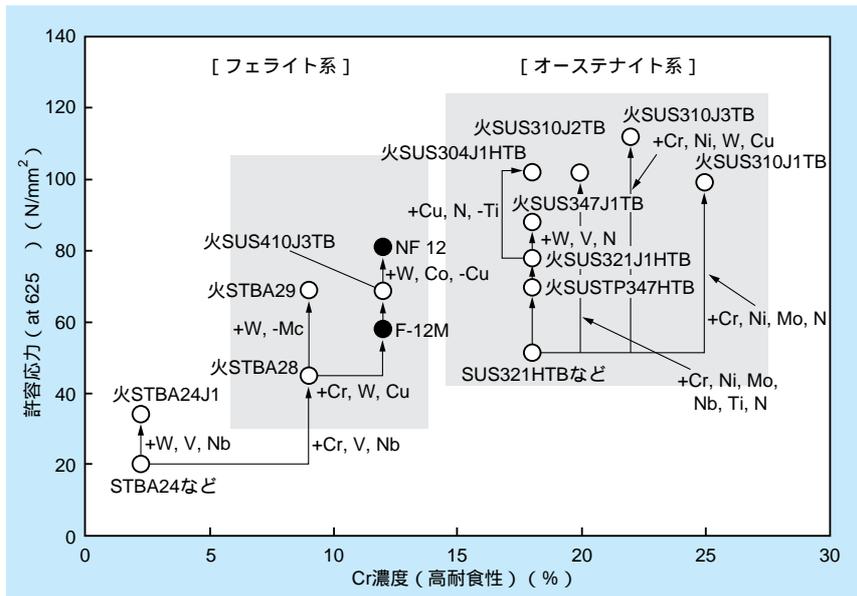


図5-2-2 代表的材料の高温強度特性

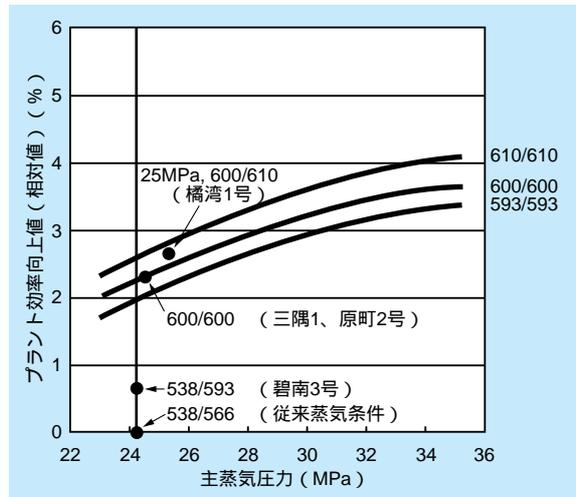


図5-2-3 蒸気条件とプラント効率向上

5 - 3 高温用材料の進歩

5-3-1 技術的背景

20世紀初頭の米国ではボイラの爆発事故が頻発したことから、米国内で統一的な設計方法の策定の気運が高まった。そのため、1914年に米国機械学会（ASME）にボイラ・圧力容器委員会が設置され、“ASME Boiler & Pressure Vessel Code : Section I, Power Boilers”が制定されるに至った。同コードはわが国の発電用火力設備の技術基準にも取り込まれており、同コードによって「公式による設計」の概念が構築された。この設計法では、材料毎に各温度の許容引張応力を定め、その値を満足する肉厚が計算式（容器、管等の径、使用圧力および許容引張応力から必要最小肉厚を計算する式）を介して算出される。許容引張応力は各温度における降伏強さ、引張強さとクリープ強さにそれぞれ所定の安全係数を掛けたなかの最小値が採用される。特にクリープ（定荷重下で時間とともに徐々に変形が進行し破壊に至る現象）が問題となる高温域（ほぼ400～500以上）では、ほとんどの材料の許容引張応力は10万時間のクリープ破断強度をベースに決められている。したがって、クリープ破断強度を高めた高温材料が実用化できれば、高温機器の設計上薄肉化や高温化が可能となり高効率化が図ら

れることから、クリープ破断強度を向上させた高温材料の開発が鋭意進められてきた。とりわけ蒸気条件の超々臨界圧化（USC：Ultra Super Critical）の動向と相俟って、高強度材料の開発が急速に進展してきた。

5-3-2 材料開発の推移と動向

表5-3-1は発電用火力設備の技術基準において許容引張応力が規定されている従来型ボイラ用の代表材料を該当するJIS規格とともに示したものである。また、図5-3-1⁽³⁾⁽⁴⁾には、これらの材料も含め、1900年以降に開発されたボイラ用材料の変遷を示している（図中の材料符号は表5-3-2を参照されたい）。同図の縦軸には、上述したように許容引張応力のベースとなる600での10万時間クリープ破断強度を示しており、年代とともにクリープ破断強度の向上が図られていることがわかる。また、同図の下方にある材料グループはフェライト系耐熱鋼であり、上方のグループはオーステナイト系耐熱鋼である。ここで、フェライトとは結晶構造が体心立方晶となる金属組織であり、オーステナイトの結晶構造は面心立方晶となる。一般に、フェライト系鋼は線膨張係数が小さく熱伝導率が大きいため、オーステナイト系鋼に比し、発生する熱応力が小さくなるという特長を有している。一

表5-3-1 従来型ボイラの主要な使用材料

用途	主要な使用材料
節炭器管	炭素鋼 (STB42、STB52)
蒸発管	炭素鋼 (STB42) 低合金鋼 (STBA20、STBA23)
過熱器、再熱器	低合金鋼 (STAB24、STBA26) ステンレス鋼 (SUS304HTB、SUS321HTB、SUS316HTB、SUS347HTB)
加熱器/再熱器管寄せ	低合金鋼 (STPA24)
主要配管類	低合金鋼 (STPA24)
給水器	炭素鋼 (STPT49)
ドラム、気水分離器	炭素鋼 (SB49) 低合金鋼 (SCMV3)

(備考)

STB：ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管 (JIS G3461)

STPT：高温配管用炭素鋼鋼管 (JIS G3456)

SB：ボイラおよび圧力容器用炭素鋼および

モリブデン鋼鋼板 (JIS G3103)

STBA：ボイラ・熱交換器用合金鋼鋼管 (JIS G3462)

STPA：配管用合金鋼鋼管 (JIS G3458)

SCMV：ボイラおよび圧力容器用クロムモリブデン

鋼鋼板 (JIS G4109)

SUS-TB：ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼鋼管

(JIS G3463)

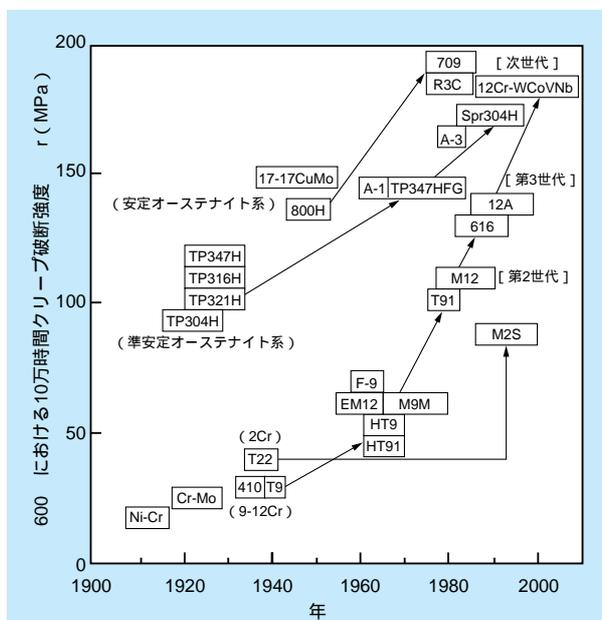


図5-3-1 ボイラ用耐熱鋼の高強度化の推移

方、フェライト系の自己拡散係数はオーステナイト系よりも大きいため、高温での拡散現象に支配されるクリープに対しては強度上不利となる。しかし、図5-3-1からわかるように、最近ではフェライト系の高強度化が急速に進展し、耐熱鋼としては強度面でオーステナイト系に匹敵するようになった。以下では、フェライト系耐熱鋼とオーステナイト系耐熱鋼それぞれの開発の推移と動向について述べる。

フェライト系耐熱鋼

図5-3-1からわかるように、フェライト系では低合金鋼 (STBA24, STPA24等) や9~12Cr系鋼 (STBA26,等) が長期間使用されてきた代表的な材料である。しかし、これらの600での10万時間クリープ破断強度 r は約40MPaであり、過熱器や再熱器の高温化への対応にはさらに高強度の材料が必要とされたが、 r が100MPaクラスの18Cr-8Ni系オーステナイトステンレス鋼 (SUS304HTB, SUS321HTB, SUS316HTB, SUS347HTB等) では高コストとなるため、9~12Cr系鋼の高強度化が進められた。その結果、1960年から1970年にかけて r が60MPaクラスの第1世代材料、次いで1980年代に r が100MPaクラスの第2世代材料、さらに1990年代には r が140MPaクラスの第3世代材料が開発された。その後の次世代材料として実験室的な段階ではあるが、 r が180MPaクラスの材料も開発されている。

特に、18Cr-8Ni系ステンレス鋼に匹敵する r が100MPaクラスの改良9Cr系鋼は世界中で過熱器管、管寄せ、蒸気配管等に幅広く使用されている。因みに、1989年に運開した、わが国初のUSCプラントである川越1号機 (31.0MPa, 566/566/566) の主蒸気管、最終過熱器出口管寄せ等には改良9Cr-1Mo鋼が採用されている⁽⁵⁾。

このようなボイラ用フェライト系耐熱鋼の発展経緯を図5-3-2⁽³⁾に示す。また、これらフェライト系耐熱鋼の代表的な材料と該当規格ならびに公称化学成分を、次項で述べるオーステナイト系耐熱鋼とともに、表5-3-2 (文献⁽³⁾(4)中の表を合成して作り変えたもの)に一覧する。

オーステナイト系耐熱鋼

フェライト系と同様にオーステナイト系耐熱鋼の発展経緯を図5-3-3⁽³⁾⁽⁴⁾に示す。なお、代表的な材料と該当規格ならびに公称化学成分は表5-3-2を参照されたい。

オーステナイト系耐熱鋼で代表的な18Cr-8Ni系ステンレス鋼は1940年代後半からボイラ材料として世界中で使用されるようになり、1960年に米国で運開した世界最高の蒸気条件のUSCプラントであるEddystone1号機 (325MW, 34MPa, 649/565/565) では管寄せや蒸気配管の厚肉耐圧部にTP316Hが採用された。また、過熱器、再熱器には17-14CuMoやTP321Hが使用された。

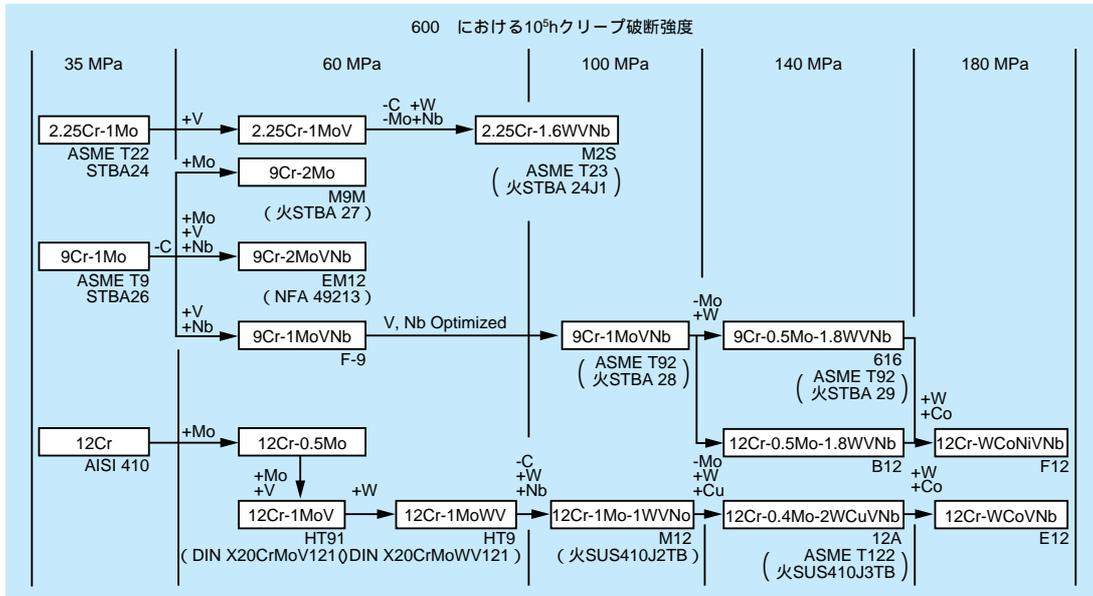


図5-3-2 ボイラ用フェライト系耐熱鋼の発展経緯

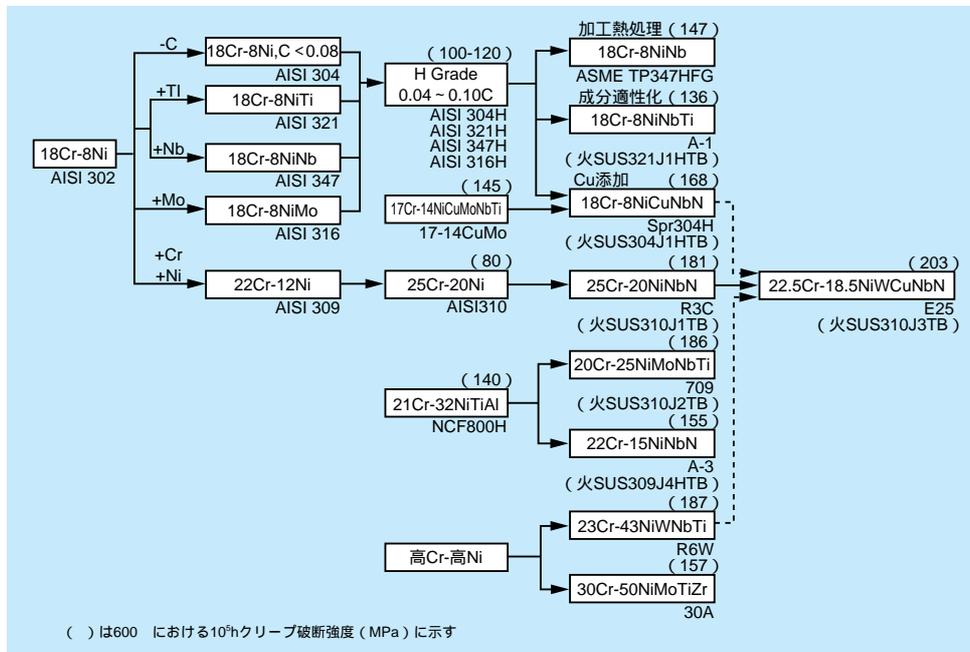


図5-3-3 ボイラ用オーステナイト系耐熱鋼の発展経緯

なお、同機はベースロード運用を想定し建設されたが、実際には起動停止が多く、厚肉耐圧部におけるクリープ損傷の発生等により、現在では主蒸気圧力・温度を29.3MPa,588 に下げて運用されている。

その後の高強度材料の開発は図5-3-1や図5-3-3に示すように推移してきたが、ボイラへの適用上強度に加えて要求される水蒸気酸化、高温腐食等に対する耐環境性や経済性も考慮に入れた新しい材料が開発されている。たと

えば、ASME規格材のTP347Hの結晶粒を細粒化して耐水蒸気酸化性を向上させるとともに、さらに高強度化を図ったASME規格材TP347HFGが開発された。この材料は川越1・2号機の最終過熱器等に採用されている⁵⁾。

5-3-3 超々臨界圧化(高効率化)と高温材料

前項でも述べたが、火力発電の高効率化に繋がる蒸気

表5-3-2 代表的なボイラ用耐熱鋼と該当規格ならびに公称化学成分

種別	材料符号 (公称組成)	規格		化学成分 (mass%)													
		JIS	ASME	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	Ti	B	N	その他
2Cr	T22 (2.25Cr-1Mo)	STBA24	T22	0.12	0.3	0.45	-	2.25	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	M2S (2.25Cr-1.6WVNb)	火 STBA24J1	T23	0.06	0.2	0.45	-	2.25	0.1	1.6	0.25	0.05	-	0.003	-	-	-
9Cr	T9 (9Cr-1Mo)	STBA26	T9	0.12	0.6	0.45	-	9.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	M9M (9Cr-2Mo)	火 STBA27	-	0.07	0.3	0.45	-	9.0	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-
12Cr	T91 (9Cr-1MoVNb)	火 STBA28	T91	0.10	0.4	0.45	-	9.0	1.0	-	0.20	0.08	-	-	-	0.05	-
	616 (9Cr-0.5Mo-2WVNb)	火 STBA29	T92	0.07	0.06	0.45	-	9.0	0.5	1.8	0.20	0.05	-	0.004	0.06	-	-
12Cr	F-9 (9Cr-1MoVNb)	-	-	0.06	0.5	0.60	-	9.0	1.0	-	0.25	0.40	-	0.005	-	-	-
	EM12 (9Cr-2MoVNb)	(NFA49213)	-	0.10	0.4	0.10	-	9.0	2.0	-	0.30	0.40	-	-	-	-	-
12Cr	HT91 (12Cr-1MoV)	(DINX20Cr1MoV121)	-	0.20	0.4	0.60	0.5	12.0	1.0	-	0.25	-	-	-	-	-	-
	HT9 (12Cr-MoWV)	(DINX20Cr1MoWV121)	-	0.20	0.4	0.60	0.5	12.0	1.0	0.5	0.25	-	-	-	-	-	-
12Cr	M12 (12Cr-1Mo-1WVNb)	火 SUS410J2TB	-	0.10	0.3	0.55	-	12.0	1.0	1.0	0.25	0.05	-	-	0.03	-	-
	12A (12Cr-0.4Mo-2WCuVNb)	火 SUS410J3TB	T122	0.11	0.1	0.60	-	12.0	0.4	2.0	0.20	0.05	-	0.003	0.06	1.0Cu	-
12Cr	F12 (11Cr-2.6W-2.5CoVNbB)	-	-	0.08	0.2	0.50	-	11.0	0.2	2.6	2.5	0.20	0.07	0.004	0.05	-	-
	E12 (11Cr-3W-3CoVNbTaNdN)	-	-	0.10	0.3	0.20	-	11.0	-	3.0	3.0	0.20	0.07	-	0.04	0.07Ta, 0.04Nd	-
18Cr-8Ni	SUS304HTB (18Cr8Ni)	SUS304HTB	TP304H	0.08	0.6	1.6	8.0	18.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Spr304 (18Cr9NiCuNbN)	火 SUS304J1HTB	TP304CuCbN	0.10	0.2	0.8	9.0	18.0	-	-	-	0.40	-	-	0.10	3.0Cu	-
18Cr-8Ni	SUS321HTB (18Cr10NiTi)	SUS321HTB	TP321H	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-
	A-1 (18Cr10NiNbTi)	火 SUS321J1HTB	-	0.12	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.10	0.08	-	-	-	-
18Cr-8Ni	SUS316HTB (16Cr12NiMo)	SUS316HTB	TP316H	0.08	0.6	1.6	12.0	16.0	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	SUS347HTB (18Cr10NiNb)	SUS347HTB	-	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.8	-	-	-	-	-
18Cr-8Ni	TP347H (18Cr10NiNb)	火 SUS TP347HTB	TP347H	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.8	-	-	-	-	-
	TP347HFG (18Cr10NiNb)	-	TP347HFG	0.08	0.6	1.6	10.0	18.0	-	-	-	0.8	-	-	-	-	-
15Cr-15Ni	17-14CuMo (17Cr14NiCuMoNbTi)	-	-	0.12	0.5	0.7	14.0	16.0	2.0	-	-	0.4	0.3	0.006	-	3.0Cu	-
	Esshete1250 (15Cr10Ni6MnVNbTi)	-	-	0.12	0.5	0.7	14.0	16.0	2.0	-	-	0.2	1.0	0.06	-	-	-
20-25Cr	SUS310TB (25Cr20Ni)	SUS310TB	TP310	0.08	0.6	1.6	20.0	25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	R3C (25Cr20NiNbN)	火 SUS310J1TB	TP310CbN	0.06	0.4	1.2	20.0	25.0	-	-	-	0.45	-	-	0.2	-	-
20-25Cr	Alloy 800H (21Cr32NiTiAl)	NCF800HTB	Alloy 800H	0.08	0.5	1.2	32.0	21.0	-	-	-	-	0.5	-	-	4.0Al	-
	A-3 (22Cr15NiNbN)	火 SUS309J4HTB	-	0.05	0.4	1.5	15.0	22.0	-	-	-	0.7	-	0.002	0.15	-	-
高Cr-高Ni	709 (20Cr25NiMoNbTi)	火 SUS310J2TB	-	0.05	0.5	1.0	25.0	20.0	1.5	-	-	-	0.2	0.1	-	-	-
	E25 (22.5Cr18.5NiWCuNbN)	火 SUS310J3TB	-	0.10	0.1	1.0	18.0	23.0	-	1.5	-	-	0.45	-	0.2	3.0Cu	-
高Cr-高Ni	R30A (30Cr50NiMoTiZr)	-	-	0.06	0.3	0.2	50.0	30.0	2.0	-	-	-	-	-	-	0.03Zr	-
	R6W (23Cr43NiWNbTi)	-	-	0.08	0.4	1.2	43.0	23.0	-	6.0	-	-	0.18	0.08	0.003	-	-

条件の高温高圧化において高温材料が果たしてきた貢献は大きい。1950年代後半に欧米で建設された初期の超々臨界圧 (USC) プラントには高級なオーステナイト系鋼が多用された。これはベースロード運用を前提としていたため厚肉部での熱応力を重視する必要がなかった

ことによるものである。しかし、最近の火力発電には負荷調整機能が要求されており、厚肉部に生じる熱応力を無視することはできない。そのため、オーステナイト系に比し発生する熱応力が小さくなるフェライト系で、オーステナイト系に匹敵する高強度を有する高温材料が必

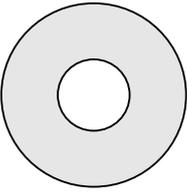
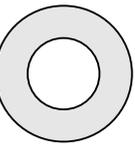
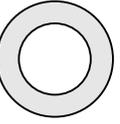
要になっている。このような状況のもと、独立行政法人物質・材料研究機構は、超鉄鋼材料研究プロジェクトの一環として、1997年より36MPa、650 のUSCボイラ厚肉耐圧部に用いるフェライト系耐熱鋼の開発を進めている⁽⁶⁾。

さて、わが国では、微粉炭火力のUSC化のための研究開発が1980年度から開始され、段階的に高温高压化が進められてきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この高温高压化は、基本的な設計は踏襲しながら、高強度高温材料の開発でもって実現が図られてきた。

まず、Phase-I（1980～1993年度）のSTEP-1（31.4MPa、593/593/593）では、ボイラには改良9Cr系鋼、タービンには改良12Cr鋼（12CrMoWVNb）など、その当時の最新フェライト系鋼が採用されたが、基本的には従来の超臨界圧プラント用材料の延長上に位置付けられる材料である。次のSTEP-2（34.3MPa、649/593/593）では、世界最高の蒸気条件を達成させるため、オーステナイト系が中心となり、たとえばタービンロータには鉄基超合金A286が候補材になった。当研究所においても、これらの候補材料の評価研究を分担し、ボイラ最終過熱器管用の17-14CuMo鋼クロマイズド管や17-14CuMo/SUS310二重管の内圧クリープ破断特性、タービンロータ用の改良12Cr鋼やA286合金のクリープ、熱疲労等の高温強度特性などを明らかにした⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

次のPhase-II（1994～2000年度）では、高効率化とともに経済性や運用性にも優れたUSCプラントの早期実現のため、蒸気条件として圧力30MPa、温度630/630を設定し、フェライト系新材料の積極的な採用が図られている。たとえば、ボイラ最終過熱器出口管寄せや主蒸気管には9Cr系の616（9Cr-0.5Mo-2WVNb）、12Cr系の12A（12Cr-0.4Mo-2WcuVNb）やF12（11Cr-2.6W-2.5CoVMbB）などが候補材となった。表5-3-3⁽⁸⁾は現用材（火STPA28）とこれらの候補材による最終過熱器出口管寄せモデルの寸法を比較したものであり、候補材の採用により重量比が現用材の約35～50%となる。したがって、候補材を採用すれば、大幅な薄肉化が可能となり、熱応力の低減とともに経済性の面でも有利となる。また、Phase-IのSTEP-2でタービンロータの候補材となったA286合金は高強度ではあるが、発生する熱応力が大きいこと、熱疲労特性に劣ること、大型インゴ

表5-3-3 現用材とフェライト系新材料による最終加熱器出口管寄せモデルの寸法比較

材料名	火STPA28 (現用材)	616, 12A	F12
形状			
100mm			
重量比	100	50	35

(1,000MW級モデル)

ット製造が困難なこと等々の問題があるため、Phase-IIのタービンロータ材には、593用12Cr鋼を630～650で使用できるように改良が進められている12CrWMoCoVNbB鋼が候補になっている。図5-3-4⁽¹²⁾にこれまでのロータ材の耐用温度の変遷を示す。

一方、わが国と同様、欧米でもUSCプラントの開発研究が進められてきた⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。特に、欧州では、最近になってさらに高い蒸気条件を目標としたプロジェクトが開始されている。その一つは1998年から17年計画で開始されたデンマークのTHERMIEプログラムであり、Ni基合金を用いる700級のプラント（目標：37.5MPa、700/720/720）開発を目指している。また、ドイツは独自に1999年から4年計画で700級USCの開発（MARCKO DE2）を進めている。また、650級のフェライト系鋼の材料開発に特化したCOST522（1998～2003年、目標：30MPa、620/650）プロジェクトも開始されている。

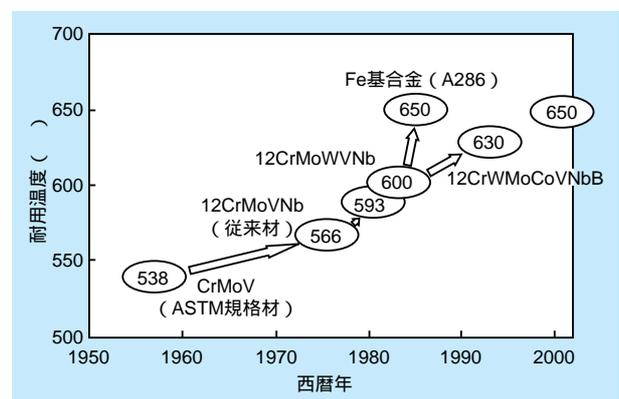


図5-3-4 蒸気タービンロータ材の耐用温度の変遷

5-3-4 ま と め

上述したように、わが国の USC プラントの開発研究はこれまで欧米より先行する状況にあったが、最近になって欧米の開発に凌駕されるようになった。新しい材料

の開発・評価・実証・実用化には少なくとも10年程度の長期間を要することから、わが国としてもこれまでの研究開発の努力を途切れさせることなく、技術革新をもたらし得る新材料の研究開発がさらに展開されることを期待したい。

5 - 4 所内率低減による高効率化

微粉炭火力プラントは、他の燃料を用いるプラントと比較して、構成機器が多いことから所内率が高いので、その低減はプラント効率向上に対し重要である。所内率低減のために近年のプラントが配慮している項目として、以下のものがある。

- 1) 空気過剰率の低減
- 2) 豎型ミルの採用
- 3) 軸流式一次通風機の採用
- 4) 排ガス混合ファン不設置
- 5) 超微粉ミルの採用
- 6) 低々温 EP システムの採用
- 7) 通風系統 1 系列化

1) 空気過剰率の低減

従来、微粉炭焚きボイラの空気過剰率は20%が標準であったが、近年の高性能バーナ開発に代表される、燃焼技術の発展により、空気過剰率を15%に低減することが可能となってきた。この5%の低減は、押込通風機(FDF)と誘引通風機(IDF)の風量低減に直接繋がることから、この動力を5%程度低減できることになる。

2) 豎型ミルの採用

ミル(微粉炭機)の形式には、大きく分けて横型ボールミルと豎型ローラミルの2種類がある。横型ボールミルは、ミル内に保有する石炭量が多く、急な負荷変化時における応答性に優れる利点があるが、近年は粉砕動力の低い豎型ローラミルが一般的に採用されている。一般に、豎型ローラミルを採用した場合、横型に比べ約60~70%のミル動力低減ができる。

3) 軸流式一次通風機の採用

一次通風機は、その必要とされる風量・揚程特性が、ボイラ低負荷でも高い揚程であることから、遠心式通風機が一般に採用された。しかし、遠心ファンのファン効率が60~70%であることにに対し、軸流ファンは80%以上であることから、所内動力低減の観点からは軸流ファンを採用することが好ましい。但し、軸流ファンを選定する場合には、ボイラ低負荷時においても、安定した運用を可能とするように、経時変化によるファン性能劣化に対する配慮を行なう必要がある。

4) 排ガス混合ファン不設置

微粉炭焚きボイラにおいても、従来はNOx低減対策として排ガス混合ファン(GMF)が設置されてきた。しかし、近年の拡大還元燃焼法等によるNOx低減技術の画期的な進歩により、微粉炭焚きボイラのNOx低減燃焼法が見直され、排ガス混合による効果は少ないことが確認されてきた。このため、近年のボイラでは、GMFを設置する必要がなくなったことから、それが所内動力の低減に寄与している。

5) 超微粉ミルの採用

豎型ミルの進化形として、粉砕能力を高めた超微粉ミルが実用化されている。従来型に対し、粉砕部を拡大するとともに、分級性能を高めた回転分級機を採用している。このミルの採用により、粉砕に必要な動力が数%低減できるとともに、空気過剰率の低減が可能であれば、灰中未燃分の低減とファン動力の低減も期待できる。

6) 低々温 EP システムの採用

近年の国内大型石炭焚きユニット用の排煙処理システ

ムとしては、より高効率な低々温 EP システムの採用を
採用することが多い。このシステムを採用することは、
所内動力の低減にも有効である。

従来の低温 EP システムでは、IDF 入口ガス温度は
130 ~ 140 程度で計画していたが、低々温 EP システ
ムでは、約 90 としている。このガス温度の降下分に
相当する IDF 動力が低減できる。

天然ガスや石油と比較して、単位発熱量当たりの CO₂
発生量が多い石炭を利用する発電プラントでは、地球環
境問題への対応の観点からも一層の高効率化が望まれて
いる。わが国においても石炭利用高効率発電として、加
圧流動床燃焼 (PFBC) 発電プラントが商用機の段階に
入り、また、石炭ガス化複合発電 (IGCC) も 250MW 級
の実証機計画が現在進められている。汽力発電としての
微粉炭火力の高効率化では、蒸気条件の高温・高圧化が
不可欠であり、2002 年に運開した電源開発[□] 磯子新 1 号
600MW 機においては、主蒸気圧力 26.6MPa、主蒸気温
度 600 / 再燃蒸気温度 610 が採用されている。

これは既に述べたように、1982 年度から 2000 年度に
わたり、経済産業省 (旧通商産業省) の支援のもと、電
源開発[□] を中心としたプラントメーカーによる国家プロジ
ェクトの成果である。しかしながら、2000 年度に USC
技術開発は Phase-2 が終了したが、電力需要の低迷も
あり、Phase-2 条件の微粉炭火力プラント計画は現在の
ところない。また、2000 年 3 月からは 20,000V、
2,000kW 以上の大口需要家に対する電力の小売り自由化
がスタートし、現在、自由化範囲の拡大に向けた検討が
進められている。このような状況のもと、電力各社はコ
スト低減に向けた経営努力を一層進めており、新技術の
導入にも強いコスト意識を持たざるを得ない状況にある。

一方、世界の USC 開発プロジェクトは 1980 年代に日
本、米国および欧州で行われてきた。米国 EPRI を中心
に東芝、GE が参加した EPRI-ICPP プロジェクトは 1991
年に終了し、その後も継続していたプロジェクトは、わ
が国の USC Phase-2 と欧州の COST501 (600 級 USC

7) 通風系統 1 系列化

通風系統を 1 系列化することで、通風系統を単純化し、
通風ロスを削減することができる。近年では、大型事業
用ボイラにおいても、1 系列化する事例が増えており、
600MW ユニットでも実績が出ている。

5 - 5 今後の展開

材料開発)のみであった。

しかし最近になって、火力発電プラントの蒸気温度の
主流が 566 の欧州において、650 ~ 700 級 USC プラ
ント開発を目指したプロジェクトが 1998 年頃から開始
された。欧州では英国を中心に実施してきた COST501
の終了に伴い、欧州 16 ヶ国の参加で新たに COST522
(650 級 USC 材料開発) が 1998 年にスタートした。ま
た、デンマークは USC を強く指向している国であり、
地域暖房を発電プラントに依存するケースが多く、コンバ
インドサイクルプラントにはあまり興味を持っていない
代わりに USC 技術への関心度は非常に高い。1998 年に
デンマークの ELSAMPROJEKT (現 WISE-TECH) を
中心とした欧州 40 社によって 17 年間計画で 700 級
USC 開発を目指した「THERMIE PROGRAM」がスタ
ートしている。また、ドイツでは 1999 年からの 4 年間
で独自に 700 級 USC 開発 (MARCKO DE 2) を開始
しており、現在では石炭焼き USC プラント (350MW、
29MPa、600/625) の建設が予定されている。

微粉炭火力の今後の高効率化に向けては、電力需要、
プラント経済性および運用性を踏まえた検討が必要であ
り、効率向上の余地が残されていると考えられる中小型
機を対象とした技術開発も重要であろう。また、構成機
器の多い微粉炭火力では、所内率の一層の低減が重要で
ある。

さらに、プラント経済性の上からは、蒸気条件の高
温・高圧化のための新材料の製造・加工コストの低減や、
コンパクト化やケーシング構造等の設計手法の高度化な
どが重要な課題であろう。

第 6 章

6

微粉炭火力の環境性の向上



第6章 微粉炭火力の環境性の向上 目次

CS推進部 受託推進グループ 部長 牧野 尚夫
横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 白井 裕三
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 野田 直希

6 - 1 研究の背景	59
6 - 2 排煙処理システムの特徴	60
6 - 3 低NO _x 燃焼技術	61
6 - 4 脱硝技術	67
6 - 5 集じん技術	69
6 - 6 脱硫技術	71
6 - 7 今後の展開	73
コラム1：排ガス中水銀の化学形態別連続分析手法	74

牧野 尚夫（10ページに掲載）
（6-1、6-3、6-5執筆）

白井 裕三（16ページに掲載）
（6-2、6-4、6-6、6-7執筆）



野田 直希（1998年入所）

入所以来、各種燃焼排ガスに含まれる水銀の分析手法の開発を実施してきました。現在は、石炭火力発電プラント内微量物質の挙動解明と排出抑制技術に関する研究を進めています。今後は、微量物質と窒素酸化物や硫黄酸化物等の環境汚染物質を同時に低減する燃焼技術や排煙処理技術に関する研究に力を入れて行きたいと思っています。

（コラム1執筆）

6 - 1 研究の背景

環境保全に対する要求が次第に強まる中、微粉炭火力発電所においても、様々な環境対策技術の開発が進められてきた。特に我が国では、大気汚染による公害問題が注目された1960年代後半以降、急速に環境対策が進み、環境汚染質の大幅な排出抑制が図られている。

環境汚染質の内、大気汚染物質としては、粒子状物質(ばいじん)、硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)が、主な対象となってきた。

1963年に制定された「ばい煙排出規制に関する法律」、1968年の「大気汚染防止法」に基づき、まず、ばいじん対策に関しては、1966年に非常に高い集じん率を有する電気集じん機が導入されている。硫黄酸化物(SO_x)対策に関しては、低硫黄燃料の使用、高煙突や集合煙突の採用により環境影響抑制が図られると共に、1973年には湿式の石灰・石膏法を用いた高性能な排煙脱硫装置が開発され、発電所への設置を開始した。また、1974年には一層の環境規制強化に向け、総量規制方式の導入が大気汚染防止法に盛り込まれている。

窒素酸化物(NO_x)については、1973年に排出規制が制定され、燃焼条件の調整によるNO_x低減法、いわゆる低NO_x燃焼法の改良、低NO_xバーナの採用が進む一方、1977年には触媒を用いた選択式接触還元法による脱硝装置も導入が開始されている。

石炭は、石油、天然ガスに比べ、窒素分、硫黄分、灰分などの含有率が高いため、これらから生成されるNO_x、SO_x、ばいじんの濃度が高くなり、その排出抑制技術が特に重要となっている。

図6-1-1には、微粉炭火力のフローを示すが、SO_xについては、湿式の排煙脱硫装置の利用により低減が図られ、ばいじんについては高性能電気集じん機の開発と、湿式排煙脱硫装置の除じん効果の併用により低減されており、現在では世界的に見ても最も低いレベルにまで排出濃度を抑制している。しかし、一層の環境性向上、低コスト化のために、脱硫技術、集じん技術のさらなる改善が鋭意進められている。

これに対してNO_xの低減は、現状では触媒式の脱硝装置と低NO_x燃焼技術(バーナおよび燃焼方式)の組み合わせで対処されている。脱硝装置については、既にほぼ確立した技術であり、低コスト化、触媒の長寿命化のためのさらなる改善が進められている程度である。一方、燃焼調整によりNO_x生成量を抑制する低NO_x燃焼技術は、大きな設備改造を伴わず、かつ所要コストも低くできるため、その一層の高性能化に向けた技術開発は、微粉炭火力技術の高度化の中でも最重要課題の一つであり、現在も精力的に研究開発が進められている。

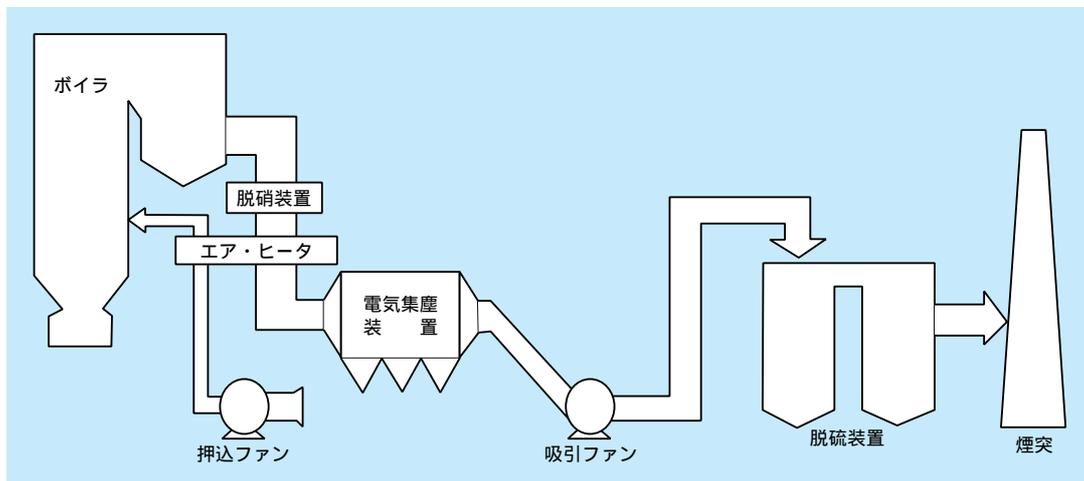


図6-1-1 微粉炭火力フロー概要

6 - 2 排煙処理システムの特徴

微粉炭火力の排煙処理装置は、ばいじんを除去する集じん装置、NO_xを除去する脱硝装置、硫黄酸化物を除去する脱硫装置からなる。現在、脱硝装置として、アンモニア(NH₃)を排ガスに吹き込み、触媒によりNH₃とNO_xを選択的に反応させ、水(H₂O)と窒素(N₂)に分解する選択還元法(SCR法:Selective Catalytic Reduction)が使われている。集じん装置としては、ばいじんを帯電させた電場内で分離・除去する電気集じん機が、脱硫装置としては、石灰と水のスラリーにSO_xを反応させて除去する石灰石・石膏法が主に利用されている。これらの装置の最適操作温度に合わせ、排煙処理システムの構成は決められる。

基本的には、脱硝装置の温度が350℃であり、脱硫装置では、数十℃であるため、脱硝装置が前段に設置されるが、電気集じん機(ESP)には350℃で運転する高温形、150℃の低温形および90℃の低低温形があり、それぞれに対応した3種の排煙処理システムが、現在稼働している。

6-2-1 低温電気集じん機を用いたシステム

既に稼働している微粉炭火力発電所において最も多く用いられているシステムが図6-2-1の130/150℃で操作する低温電気集じん機(低温ESP)を用いたシステムである。

ボイラからの排ガスは300～400℃で脱硝装置に入り、NO_xが除去された後、空気予熱器で燃焼用空気と熱交換され、130～150℃で低温電気集じん機に入り、ばいじんが取り除かれる。ばいじんが取り除かれた排ガスは、ガス-ガス熱交換器(GGH)において排煙処理後の排ガスと熱交換され、90℃程度まで冷却されて脱硫装置に入り、SO_xが除去される。この排煙処理後の排ガスはGGHで90～100℃に加熱されて煙突から排出する。また、GGHを設けず、脱硫後のガスをアフターバーナで過熱する方式もある。

低低温電気集じん機が開発されるまでは、このシステムが主流となっていたが、集じん性能の高い低低温電気

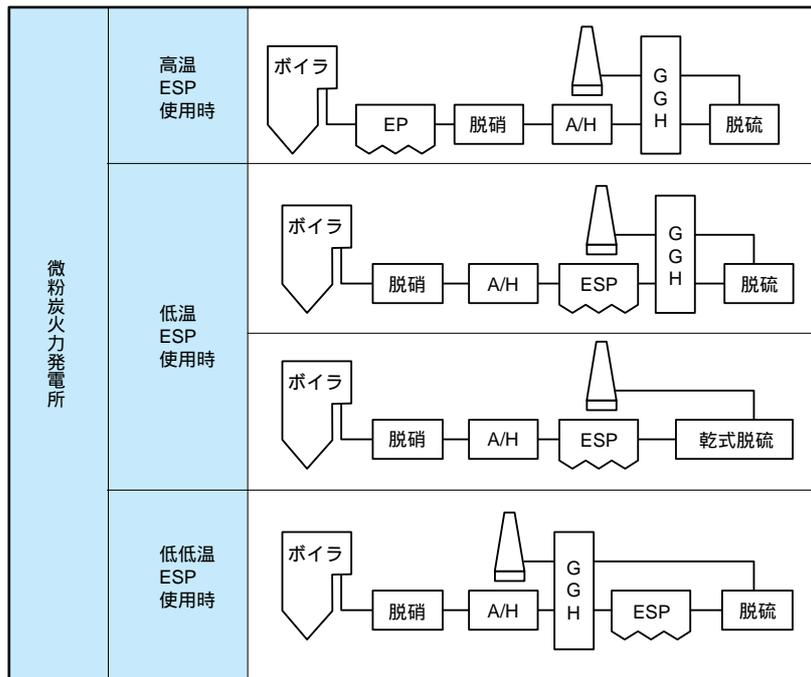


図6-2-1 微粉炭焼き火力の排煙処理システム

集じん機の開発後は、ほとんどが次に示すシステムを採用するようになっている。

6-2-2 低低温電気集じん機を用いたシステム

90 程度の低温で操作することにより、石炭灰の電気抵抗を下げ、集じん効率を向上させるものである。このシステムにおいては、低温電気集じん機を用いたシステムとGGHの設置位置が異なり、電気集じん装置の前に設置されている。脱硫・集じん後の排ガスは、集じん前の排ガスと熱交換されるため、ガスリークのないGGHが用いられている。また、脱硫装置の後流に湿式電気集じん装置を設置して、さらに集じん性能を向上さ

せたシステムもある。このシステムの、総合効率は、集じん効率99.9%以上、脱硝効率90%、脱硫効率97%と高効率なものとなっている。

6-2-3 高温電気集じん機を用いたシステム

石炭灰の電気抵抗は、高温においても低下する。この特性を利用したものが高温電気集じん機であり、脱硝装置の前に設置され、350 程度の高温でばいじんを除去する。ばいじん除去後のガスは、脱硝後、GGHで熱交換され、脱硫される。この高温電気集じん機は、排ガス容積が大きくなるため、装置も大きくなる問題があり、近年では建設がなされていない。

6 - 3 低 NO_x 燃烧技術

6-3-1 既存の低 NO_x 燃烧技術

燃料の燃焼により発生するNO_xは、燃料中の窒素分の酸化によるFuel NO_xと空気中の窒素の酸化によるThermal NO_xとに分類される。Thermal NO_xは高温下で生成し、石炭ではNO_x発生量の20%程度がThermal NO_xであると言われている。

従来の低NO_x燃焼の考えは、酸化雰囲気抑制し、初期から可能な限りNO_xが生成し難い条件に調節しようというもので、初期生成NO_xを抑える低NO_xバーナ、酸化雰囲気を弱めてNO_xの生成を抑制する低空気比燃焼法や二段燃焼法、さらに火炎温度を下げてNO_xの生成を抑制する排ガス再循環法などが低NO_x燃焼法の中心であった。

初期生成NO_xの抑制

火炉で生成するNO_xを低減するため、初期生成NO_xを抑制する方法が従来型の低NO_xバーナである。この方法の一例として、図6-3-1にSGR(Separate Gas Recirculation)バーナの構造を示す。このバーナは、中央から微粉炭とその搬送用の一次空気、その上下段からSGRと呼ばれる燃焼排ガス再循環ガス、さらにその上

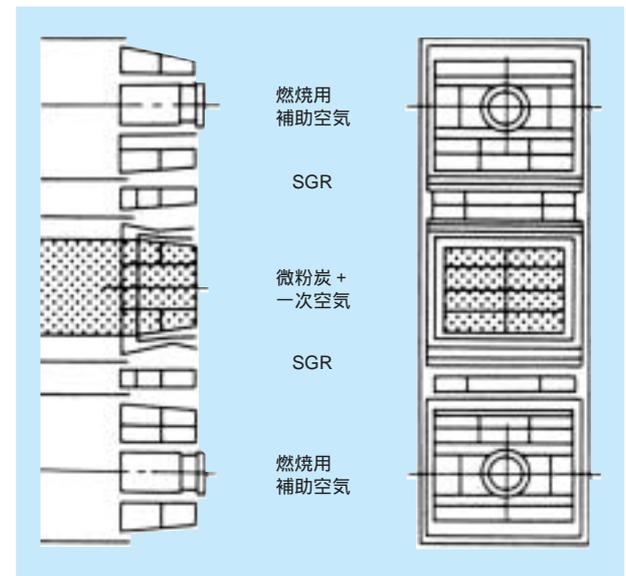


図6-3-1 微粉炭用バーナの構造例 (SGRバーナ)

下の段から燃焼用の補助空気を段階的に注入することで急激な酸化を抑制している、一次空気と補助空気の間燃焼排ガスを導入するSGRは、補助空気の早期混合を抑制し、NO_xの生成が盛んな揮発分燃焼域の酸化雰囲気の抑制、温度の低下を図るなどの工夫のために用いられている。

空気比の低下

空気比を低下させる方法として、まず挙げられたのは供給空気量を低下する方法（低空気比燃焼）である。

本法は排ガス量も減少するため、排ガスによる熱損失を少なくでき、図6-3-2に示すように、空気比（過剰O₂濃度）の低下とともにNO_x濃度も確実に低下する。しかし、同図中に示されるように、NO_xの低減に応じて灰中未燃分（U_c：燃焼時に生成される石炭灰中に残存する可燃分の割合）やCOの発生量が増加する欠点を持ち、特に、COの増加傾向は空気比の低い条件で顕著になるため、空気比には低減できる限界が存在する。現在では、これらを考慮した限界の低空気比での運転が既の実施されている。

次に、全体の空気比は極端に下げずに、NO_xの生成に影響が大きいバーナ回りの空気比のみを下げる方法として実施されている方法が二段燃焼法である。本方法は、バーナから供給する空気の一部を分割し、火炎の後流から注入する方法で、バーナ周りの空気比が低くなるためNO_xの生成は抑制され、残った未燃分は後流から注入した空気により再燃焼させることで低減できる。二段燃焼法によるNO_x低減効果は、図6-3-3に示される。二段燃焼率（R_s）は、二段燃焼用空気量（A_s）の全燃焼用空気量（A_T）に対する割合であり、 $R_s = A_s / A_T$ で定義される。

いずれの石炭種、火炉においても二段燃焼率が増加するとともにNO_xは低減されるが、NO_x低減に応じて灰中未燃分が増加する傾向は避けられない。

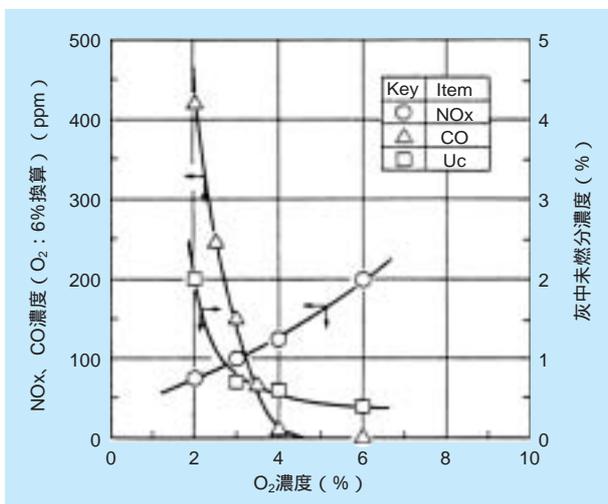


図6-3-2 O₂濃度とNO_x、CO、灰中未燃分濃度の関係

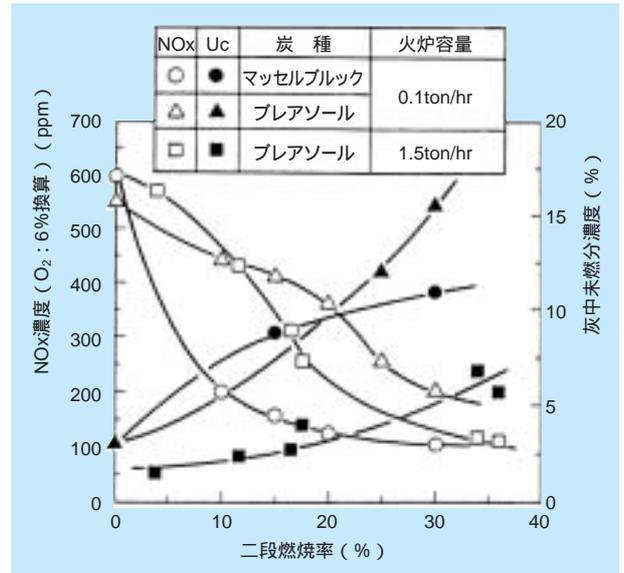


図6-3-3 二段燃焼率のNO_x・灰中未燃分濃度への影響

燃焼温度の低下

燃焼温度を低下することにより、NO_xの生成反応を抑制する方法であり、燃焼用空気に燃焼排ガスを混合する排ガス再循環法が最も良く用いられる。但し、本法はThermal NO_xの抑制には有効であるが、若干の温度低下程度ではFuel NO_xは低減しないため、Fuel NO_xの多い微粉炭火力にはあまり効果が無いと考えられている。以上のように、NO_xの生成を抑制することによる低NO_x燃焼技術は、これまでに数多く検討・実施されてきたが、本法だけでは十分なNO_x低減が図れず、また、NO_xの低減に伴い灰中未燃分濃度が増加する傾向を示すため、最近では、Fuel NO_xの多い微粉炭燃焼に特に適した方法として、一度発生したNO_xの還元・分解を促進することにより低NO_x化を図る燃焼法が検討され、主流になりつつある。

6-3-2 新しい低NO_x燃焼技術の概要

新しい低NO_x燃焼法としては、バーナ近傍で速やかなNO_x還元炎が形成できる新型の低NO_xバーナの開発と、火炉全体を利用したNO_x還元炎の強化などが検討されている。

微粉炭燃焼に伴うNO_xを灰中未燃分の増加を抑制しつつ低減するために当研究所が開発した超低NO_x燃焼技術の概念を、従来技術と比較して図6-3-4に示す。本

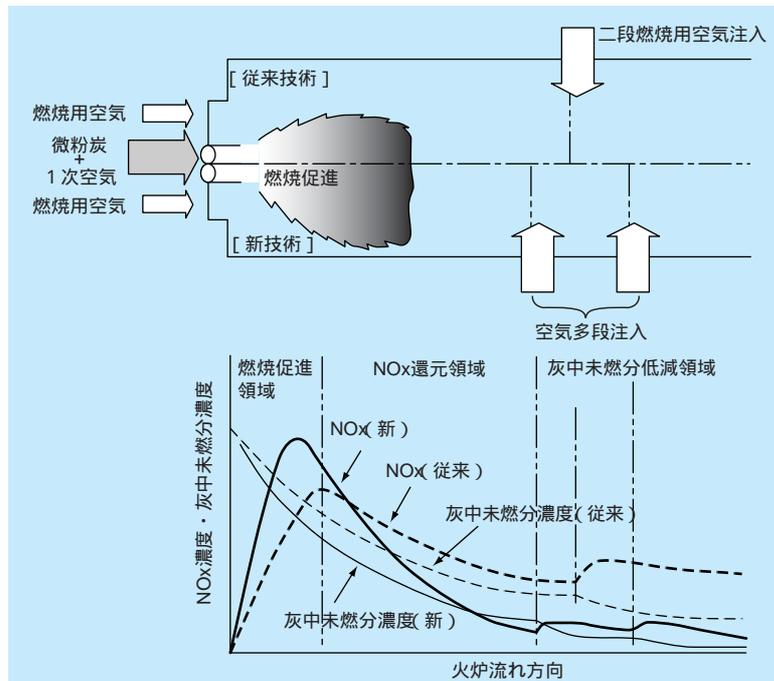


図6-3-4 超低NOx燃焼技術の概要

燃焼法においては、まずバーナ近傍の燃焼初期において低空気比の高温場を作り、石炭の熱分解を促進することで、窒素分の放出と残留する固体状の未燃炭素の低減を図る。燃焼初期に生成したNOxは、後流部に形成した還元雰囲気により分解・低減される。燃え残った未燃分は火炉の後流に二段燃焼用空気を注入することで再燃焼し低減する。この際、NOx濃度の大幅低減を図る上では、二段燃焼率を極端に増加させる必要があるが、二段燃焼用空気注入位置での再燃焼によるNOxの再発生量が増加するため、二段燃焼用空気を複数箇所から分割注入する空気多段注入法を採用し、激しい再燃焼が一度に起こらないようにすることで、効果的なNOxと灰中未燃分の低減が可能となる。

6-3-3 超低 NOx 燃焼技術の開発

新型低 NOx バーナの開発

上述のような低 NOx 燃焼法に適したバーナの機能としては、バーナ近傍で従来以上に石炭の熱分解促進と速やかな酸素の消費が図れる高温反応場を形成でき、さらに高温反応場において、微粉炭粒子の滞留時間が十分確保できることが必要である。当研究所は、石川島播磨重工業(株) (以下 IHI) と共同で、図 6-3-5 に示すような再

循環流を利用して微粉炭の着火を促進し、そこに形成される高温反応場での微粉炭の滞留時間を長くできるバーナの開発に着手し、以下の手順で実用化を行った。

a) コールドフロー試験によるバーナ形状の検討

バーナ形状が再循環流形成に及ぼす影響を解明するため、まず非燃焼場で流れの特性を把握した。実際のバーナにおいて微粉炭が搬送される一次空気管に、トレーサガスとして NO を注入し、噴出後の NO の等濃度線の形状により示される二次・三次空気との混合状況から、バーナ噴出後の流れが再循環流を形成するように拡がるか、直進流として流れるかを把握した。バーナ噴出口の形状としては、一次・二次・三次空気管それぞれを、絞り形状、ストレート形状、広がり形状の 3 種類作成して評価した。

図 6-3-6 は、二次・三次空気の噴出口形状は同一で、一次空気の噴出口形状だけが異なる場合についての流れ場の様子を示している。一次空気管の形状が直管の場合には、トレーサが炉内に噴出した直後から半径方向に拡がる形状を示し、トレーサ濃度の低い空気がバーナの中心軸部に流入する再循環流が形成されていることがわかる。これに対し、一次空気管が絞り管の場合には、直進流が強くトレーサが流れ方向に伸びる傾向を示しており、一次空気管形状により大きくフローパターンが変化する

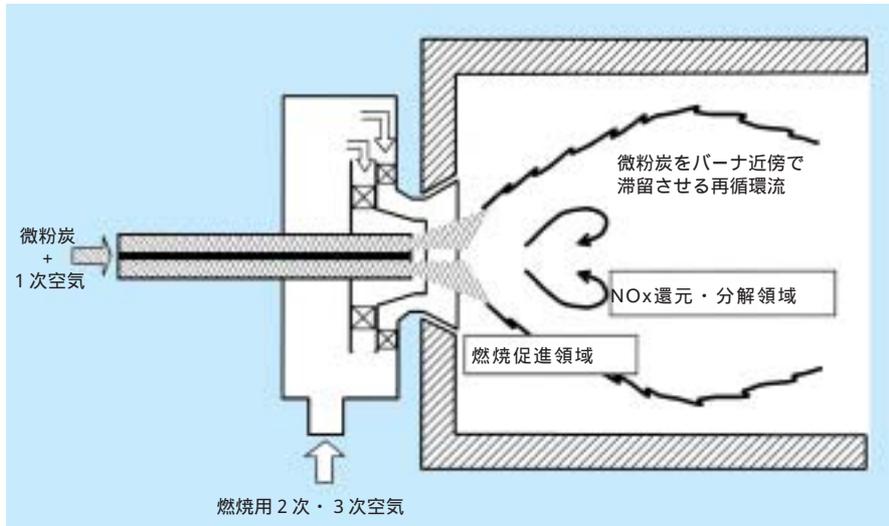


図6-3-5 微粉炭用超低NOx (CI-バーナ) の概念

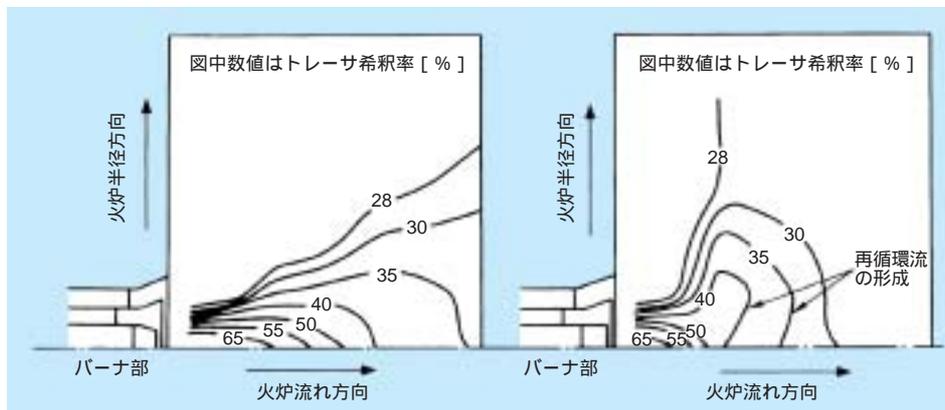


図6-3-6 バーナ噴出出口部形状が及ぼすバーナ付近の流れへの影響

ことが明らかになっている。これらの検討を基にして、再循環流を形成する広がり形状の火炎ができるのは、一次空気が直管の場合に限られること、特に二次空気が絞り形状で、かつ三次空気が広がり形状の場合に最も良好な再循環流が形成されることを明らかにした。

b) 燃焼試験によるバーナ操作条件の検討

コールドフロー試験で最適と評価されたバーナの、燃焼場における性能把握は、石炭燃焼量 100kg/h の当研究所石炭燃焼試験炉を用いて行った。

図6-3-7は、燃焼試験に用いた4種類のバーナを示している。これらのうち、タイプAがコールドフロー試験で最適とされた形状のバーナであり、タイプBは共同研究を行ったIHIの既存低NOxバーナ(DFバーナ)の形状である。タイプCとDでは、一次空気が直管と三次空気が絞り形状と異なっているのみである。そこで、一次

空気が直管と三次空気が絞り形状、各々の影響を個別に評価するため、タイプCとDの一次空気を交換した2種類のバーナについても特性を把握している。バーナから噴出される燃焼用空気流量、旋回条件のNOx・灰中未燃分排出特性に及ぼす影響を検討すると共に、4種類のバーナの性能比較試験を行うことにより、実際の燃焼場でNOx低減に最も有効なバーナを選定した。

図6-3-8は、燃焼用空気の注入条件のうち二次空気分配率(二次空気量、二次空気量と三次空気量の和に対する比率)のNOx濃度への影響を示したものである。タイプCからDのいずれのバーナにおいても20%程度の二次空気分配率でNOx濃度は極小値を持っている。この比率において、石炭搬送用の一次空気と、そのすぐ外周から注入される二次空気とを合わせたバーナ近傍の一次燃焼域の空気比は0.4程度となる。この空気比より

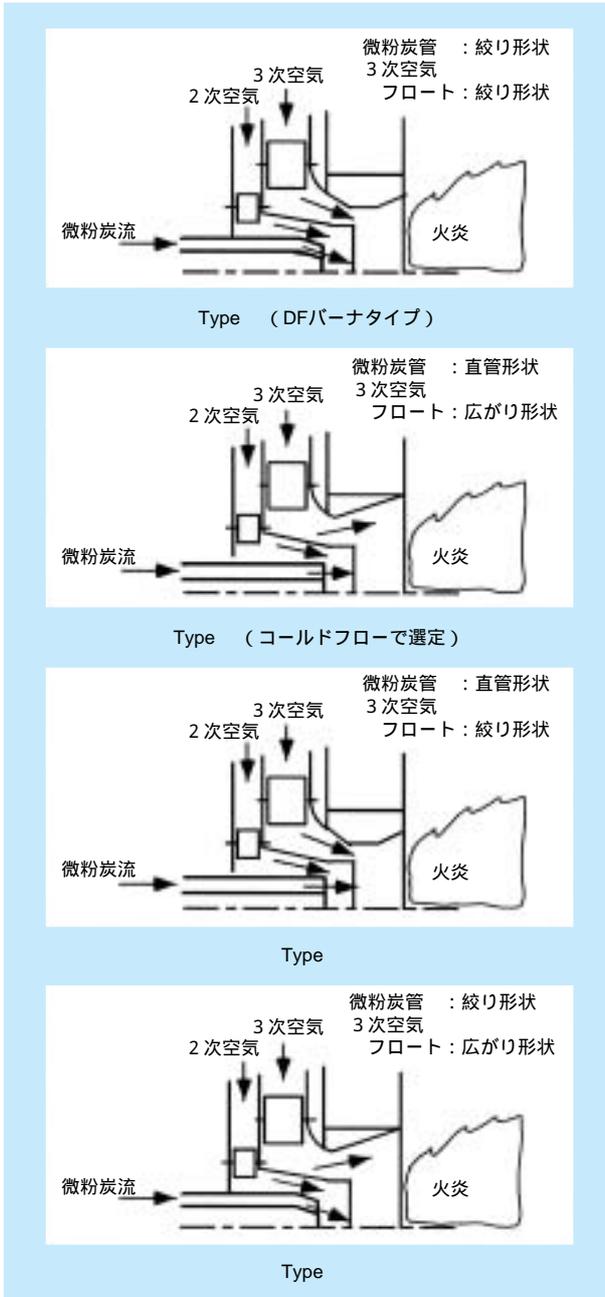


図6-3-7 バーナ形状

大きい条件では、NO_xの還元が不十分となるためNO_x濃度が高くなる。一方、この空気比より小さい場合は、一次燃焼域でのNO_x生成量は少なくなるが、NH_iやHCN等の他の窒素化合物の生成量が増加し、これらが外周から投入された三次空気あるいは二段燃焼用空気と反応して容易にNO_xに転換するため、結果的にNO_x濃度が増加することになると考えられている。図中の、二次空気分配率の高い条件でプロット点の無い領域では、火炎は吹き消えてしまう。タイプバーナは、最も幅広い条件で安定に火炎が存在でき、しかも、すべての実験

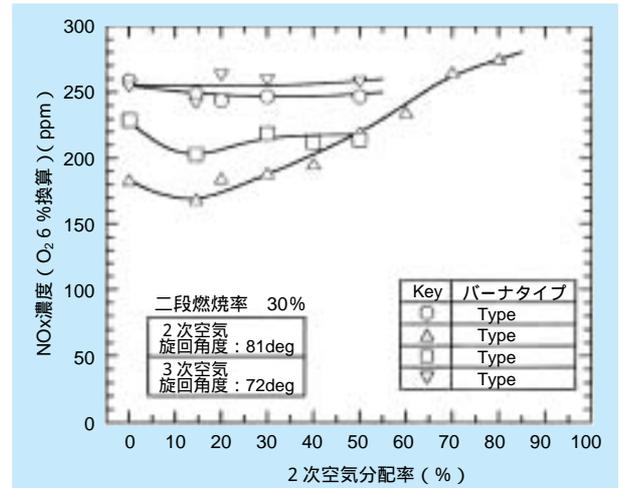


図6-3-8 2次空気分配率とNO_x濃度

条件でNO_x濃度が最も低くなっていることが分かる。タイプバーナのNO_x濃度が、その次に低くなり、タイプバーナとタイプバーナは、あまり大きな差異はなかった。これより、三次空気管形状よりも、微粉炭を噴出させる一次空気管形状の方がNO_x濃度に大きい影響を持つこともわかる。

これらの特性評価を、さらに一次・二次・三次空気の旋回角度を変化させた場合についても行い、実際の燃焼場においてもタイプバーナの形状が最適であることを明らかにすると共に、最適な空気注入条件（注入量、旋回角）も明確にした。これらの成果を受け、本タイプのバーナを新型低NO_xバーナ（CI-バーナ：CRIEPI-IHI Advanced Low Pollution High Abilityバーナ）として採用することにした。

c) CI-バーナのスケールアップ検討

前項に述べたように、まず石炭燃焼量100kg/hの単一バーナを用いて、速やかな石炭の熱分解と還元炎の形成が図れるCI-バーナを開発したが、実機においては、石炭燃焼量が数t/h以上の大容量バーナが複数本使用される。その際、バーナの再循環流も規模が大きくなり、火炎の相互干渉も生じるので、これらの影響を把握し、大容量バーナや複数バーナ使用時にも十分な低NO_x効果が発揮できるようにする必要がある。当研究所では、CI-バーナの実機への適用性を明らかにするため、IHIの大型試験炉を用いて、中規模複数バーナ（石炭燃焼量375kg/h × 4本）、大容量単一バーナ（1.5t/h × 1本）にスケールアップした場合の燃焼特性を評価した。

CI-バーナの中規模複数化時のNOx濃度と灰中未燃分濃度の関係を、従来型の低NOxバーナの結果とともに図6-3-9に示す。従来型バーナ使用時に比べ、NOx・灰中未燃分濃度ともに大きく低減されることが明らかになった。特に、その効果はNOx濃度の低い条件ほど大きくなり、CI-バーナは、低NOx燃焼時ほど高い性能を持つことが明らかになった。また、大容量バーナ使用時においても、ほぼ同様の傾向が現れ、CI-バーナは、スケールアップした場合にも十分なNOx・灰中未燃分低減効果が得られることが明確になっている。

これらの結果を受け、本バーナは、1999年4月より出力149MW相当の自家発電ボイラに採用され、既にその高い性能が実証されている。

空気多段注入法の開発

a) 二段燃焼法の最適化

これまでに、低NOx燃焼法として良く利用されてきた二段燃焼法では、注入位置によってNOx低減効果が大きく異なる。図6-3-10は、当研究所の石炭燃焼試験炉における二段燃焼用空気注入位置とNOx濃度、灰中未燃分濃度の関係を示したものである。注入位置を後流にするほど還元雰囲気領域が広がるため、NOx濃度は低下し、特にバーナより2~3mの位置で急激に低下する傾向を示す。これに対して灰中未燃分は、注入位置が後流になるほど増加し、その傾向はバーナから3m以上離れた位置で強くなる。この位置はNOx濃度が急激に低下する注入位置に比べ若干後流である。これらよ

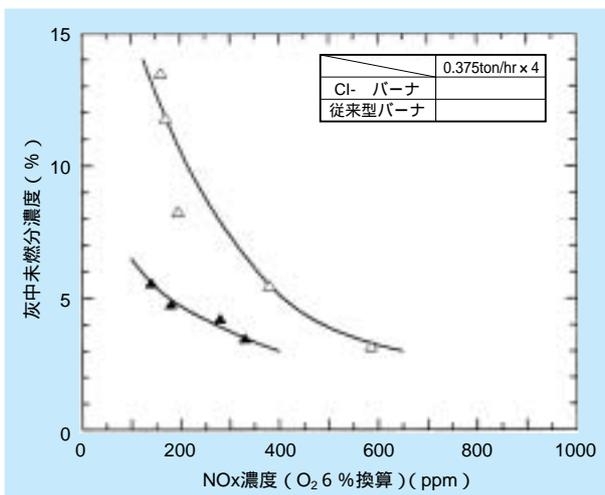


図6-3-9 CI-バーナと従来型バーナのNOx・灰中未燃分排出特性

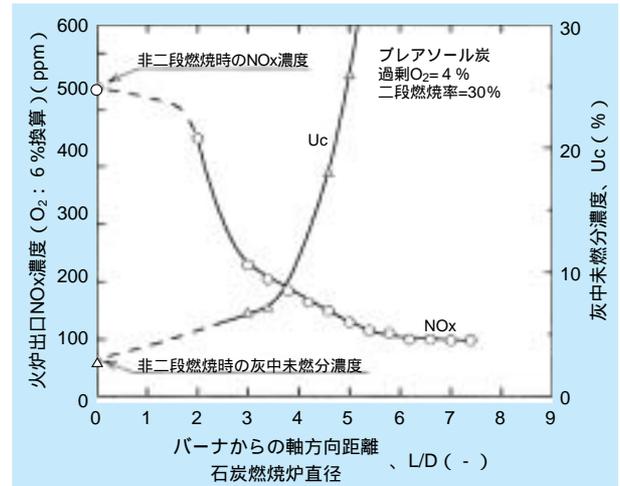


図6-3-10 二段燃焼用空気注入位置とNOx・灰中未燃分濃度の関係

り、NOxと灰中未燃分両方の効果的低減を考慮した場合、二段燃焼用空気の注入位置には最適位置が存在すると言え、それは石炭燃焼試験炉においては、バーナから約3m離れた位置になっている。

しかし、二段燃焼用空気注入位置を最適位置に設置したとしても、二段燃焼率を変化した場合においては、二段燃焼率の低い条件では、その増加とともにNOx濃度が低減する傾向を持つが、二段燃焼率30%付近で低減効果が弱まり、30%以上では逆にNOx濃度が上昇する特性を持った。二段燃焼率を極端に高めた場合は、二段燃焼用空気注入位置までにNOxの還元が十分に行われるが、未燃分も大量に残存するため、二段燃焼用空気注入位置での再燃焼が激しくなりNOxの再発生が生じ、火炉出口のNOx濃度は逆に上昇する傾向となっている。

b) 空気多段注入法による検討

二段燃焼用空気注入位置でのNOxの再発生を抑制するため、分割注入する空気多段注入法を考案した。二段燃焼率を40%とし、バーナから2.99mと4.99mの位置に分割注入した場合のバーナ中心軸上のNOx濃度分布は図6-3-11のようになる。バーナ近傍で生成されたNOxは二段燃焼用空気注入位置までに十分還元され、100ppm程度に減少する。しかし、第1段目の注入位置で全量の40%を注入した場合、再発生により250ppm程度まで上昇する。注入量の一部を2段目の注入位置に配分することによりNOxの再発生量は低減するが、極端に第1段目の二段燃焼用空気量を減少した場合は第2段目での空気注入量が増加し、そこでのNOxの再発生

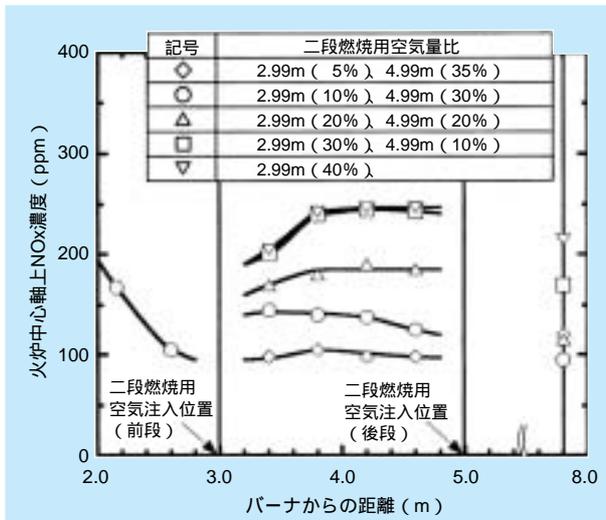


図6-3-11 多段燃焼用空気配分時の火炉中心軸上NOx濃度分布への影響

量が増加することになる。これより、二段燃焼用空気を多段に分割注入しNOxの再発生を抑制できる適性配分により、NOx濃度は効果的に低減できることが分かる。

図6-3-12には、灰中未燃分を3%にした場合のNOx

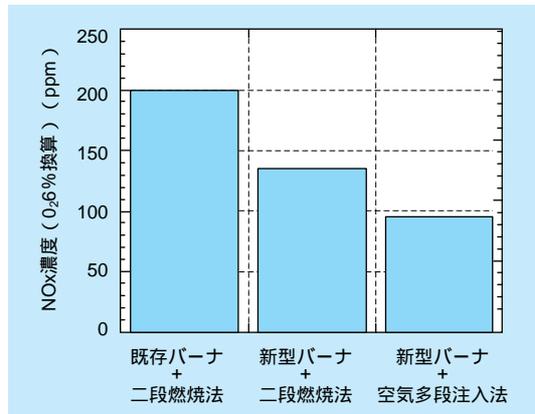


図6-3-12 超低NOx燃焼技術のNOx低減効果 (灰中未燃分：3%の際の比較)

濃度を、従来燃焼(既存バーナと二段燃焼の組み合わせ)、CI-バーナと二段燃焼法の組み合わせ、CI-バーナと空気多段注入法の組み合わせの3条件について示す。空気多段注入法はNOx濃度を約30%低減でき、CI-バーナと組み合わせることにより50%ものNOx低減を可能にすることが明らかになっている。

6 - 4 脱硝技術

6-4-1 選択還元式触媒脱硝装置概要

微粉炭焼き火力においては、アンモニア(NH₃)を排ガスに吹き込み、触媒によりNH₃とNOxを選択的に反応させ、水(H₂O)と窒素(N₂)に分解する選択還元法(SCR法:Selective Catalytic Reduction)が使われている。脱硝装置では、排ガス中にばいじんが同伴するため、図6-4-1に示す格子状および板状の触媒が主に利用されている。触媒は、図6-4-2に示すように反応器に充填され、触媒層入口部に吹き込んだNH₃により、6-4-1式および6-4-2式に示す反応でNOx(NO、NO₂)は水蒸気(H₂O)と窒素(N₂)に分解する。

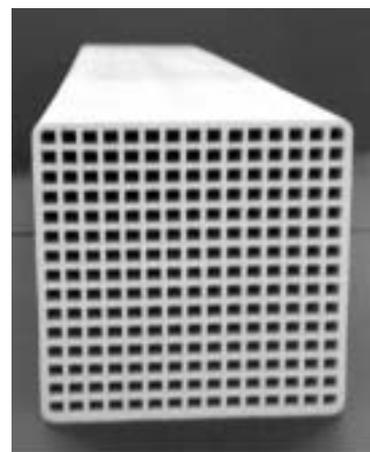
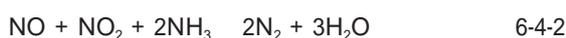
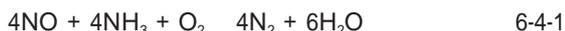


図6-4-1 脱硝触媒

操作温度域は触媒が性能を発揮する300～400℃であり、また、脱硝装置からリークするNH₃は5ppm以下になるよう設計され、リークするNH₃が多いと排ガス中のSO₃



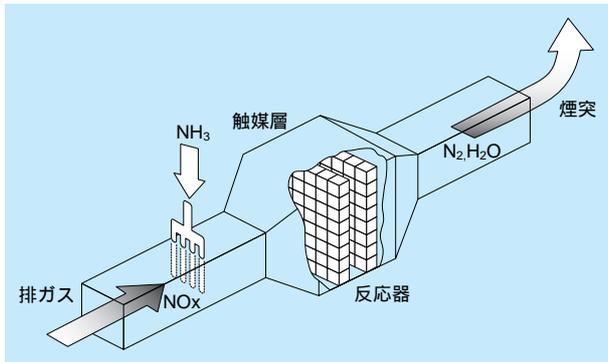


図6-4-2 脱硝装置の概要

と反応して、 NH_4HSO_4 が生成し、空気予熱器で析出することにより、配管の詰まりが生じる。

脱硝率は、微粉炭火力発電所で 80 ~ 90%、程度である。一方、ボイラの大型化に対応して、 NH_3 の排ガス中への均一な分散・混合および排ガス流れの均一化を図るため、ガス入口部におけるガイドベーンと呼ばれる整流板の設置やガス入口部を格子状に分割して、それぞれに NH_3 注入ノズルを配置するなどの工夫がされている。

6-4-2 脱硝性能

脱硝性能は、 NH_3 と NO_x のモル比 (NH_3/NO_x) と触媒充填体積に対するガス流量の割合を示す空間速度 [1/h] (SV: Space velocity) および触媒活性により決まる。図 6-4-3 に脱硝率と NH_3/NO_x の関係を示す。

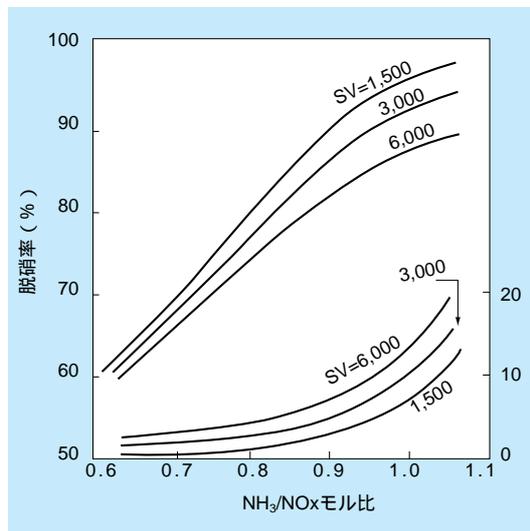


図6-4-3 脱硝率と NH_3/NO_x モル比の関係

NH_3/NO_x が高くなれば脱硝率も向上するが、後流に排出される未反応の NH_3 、いわゆるリーク NH_3 が増加する。この場合、触媒充填量を増やし、SV を下げれば、脱硝率は向上し、リーク NH_3 を減らせる。また、脱硝率は 6-4-3 式または 6-4-4 式の近似式で表され、リーク NH_3 濃度は 6-4-5 式で求められる。

$$= 100 \times [1 - \exp(-k/SV)] \quad 6-4-3$$

$$= 100 \times R_{\text{NH}_3/\text{NO}_x} \times [1 - \exp(-k/SV)] \quad 6-4-4$$

$$C_{\text{out, NH}_3} = C_{\text{in, NO}_x} \times (R_{\text{NH}_3/\text{NO}_x} - /100) \quad 6-4-5$$

: 脱硝率 [%]

$R_{\text{NH}_3/\text{NO}_x}$: NH_3 と NO_x のモル比 [-]

k: 反応速度定数 [1/h]

SV: 空間速度 [1/h]

$C_{\text{out, NH}_3}$: リーク NH_3 濃度 [ppm]

$C_{\text{in, NO}_x}$: 入口 NO_x 濃度 [ppm]

6-4-3 操作温度と脱硝性能

低温では、排ガス中の SO_3 が NH_3 と反応し、 NH_4HSO_4 を生成して触媒表面を覆い、脱硝性能を低下させる。350 以上になると、この NH_4HSO_4 は分解するため SO_3 濃度に関係なく、高い脱硝性能が得られる。しかし、400 以上の高温になると NH_3 が酸化され、それに伴い NH_3 が減少し、脱硝性能は低下する。

6-4-4 脱硝触媒の劣化

実際の運転においては、触媒の経時的な性能低下は避けられないため、性能管理が行われ、性能低下によりリーク NH_3 が増大した場合には、脱硝触媒の増設、取り替え、あるいは触媒の再生が必要となる。触媒の劣化の原因としては、シントリングなどの熱的劣化、触媒成分の被毒による化学的劣化および、ばいじんが触媒表面を覆ってしまう物理的劣化が上げられる。

微粉炭火力では、石炭灰に含まれる CaO が SO_3 と反応して生成した CaSO_4 の付着や、石炭灰を主成分とする微細なばいじんの付着が主な劣化要因として挙げられる。これについては、触媒表面を研磨して新しい表面を露出させて再生する方法などが対策として用いられている。

6 - 5 集じん技術

微粉炭燃焼で発生するフライアッシュ（石炭灰）を捕集する技術として集じん装置が用いられ、我が国では圧力損失が低く、メンテナンスが容易な電気集じん機が主に使用されている。

電気集じん装置の原理

図6-5-1に示す平板型電気集じん機を例に原理を説明する。電極は、針状の放電極（負極）と板状の集じん極（接地極）からなり、放電極は2枚の集じん極間の中央に設置される。この放電極に直流高電圧（通常は負電圧）を印加するとコロナ放電が生じる。発生した負イオンと自由電子は集じん極に向かって流れ、気流中の粒子にそのイオンが付着し、粒子も集じん極に向かって移動・捕集される。集じん極に堆積した粒子は、槌打ちにより集じん極に振動を与え、分離される。分離された粒子は、

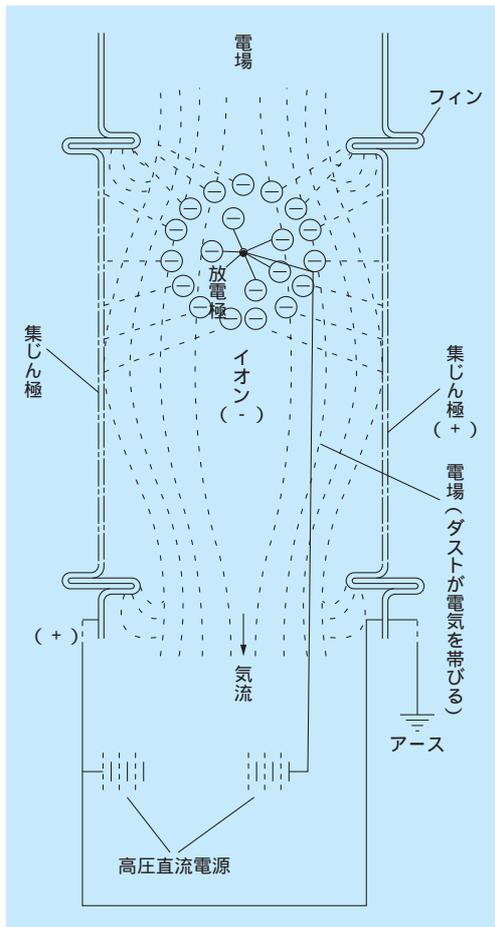


図6-5-1 電気集じん法の原理

集じん極下部のホッパーに集められる。

電気集じん装置の基本性能

電気集じんでは単極（通常はマイナス）イオンで充満した空間に粒子を通過させ、荷電して集じんするため、集じん性能は、粒子の荷電量、電界の強さなどによって大きく影響を受ける。

図6-5-2には電界の強さ（電界強度）と集じん効率の関係を示す。電界強度が強くなるほど集じん効率は増加するが、ある程度の大きさからは上昇傾向が弱まることが明らかである。一方荷電量は、粒子の粒径、誘電率、滞留時間および電界強度、電流密度などにより左右される。

一般に粒子の荷電には、イオンの熱運動を利用する拡散荷電と衝突を利用する電界（衝突）荷電がある。

拡散荷電は電界強度にほとんど影響されず、粒径にほぼ比例して増加する。これに対し、電界荷電では電界が強いほど荷電数が多くなり、また、粒径に対しては、ほぼその二乗に比例して増加する。すなわち、拡散荷電は直径 $1 \mu\text{m}$ 以下の小粒子で有効であり、電界荷電はそれ以上の粗大粒子に対して有効である。これは、粒径の大きな粒子ほど荷電しやすく、特にその傾向は大粒子ほど顕著であること示している。一方、電界内での移動速度は、粒径が小さくなるほど大きくなる。これより、大

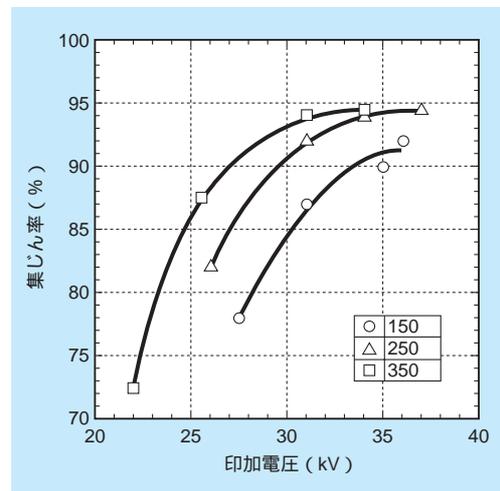


図6-5-2 電気集じん装置印加電圧と集じん率

大きな粒子は荷電しやすいが移動させ難く、小さい粒子は移動しやすいが荷電し難いため、電気集じん機では、どちらの作用もが弱くなる粒径 $0.5 \mu\text{m}$ 程度の中間領域の粒子が集じんし難いことになる。

図6-5-3には粒径毎の集じん率を示す。電気集じん機全体の集じん性能は99%以上と高いが、粒径 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ で集じん率が極小となり、電気集じん機では、前に述べたような最も集じん効率が低くなる粒径領域が存在することが明示されている。

電気集じん機の集じん効率が大きく影響を受ける粒子の物性としては、電気抵抗率 ρ が挙げられる。図6-5-4にその特性を示す。粒子の ρ が 10^4 cm 以下では、容易に荷電されて、集じん極まで到達するが、電極板上での荷電の脱離も容易であるため、すぐに集じん極と同じ極性に荷電され、電極上で反発すると共に、気流中に瞬時に引き戻され、捕集効率が低下する。

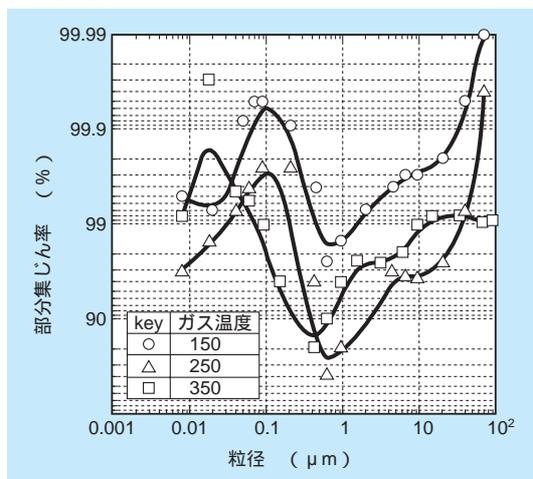


図6-5-3 電気集じん装置の部分分離効率（模型ESP）

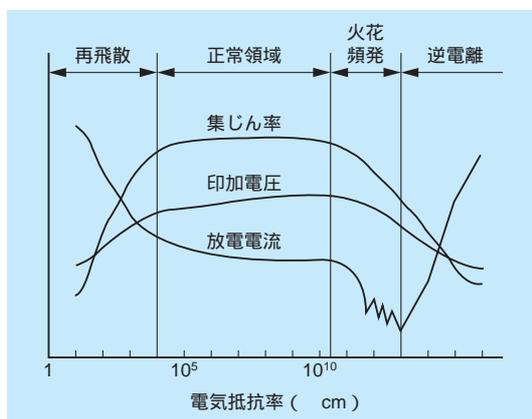


図6-5-4 集じん性能と電気抵抗率の関係

ρ が $5 \times 10^{10} \text{ cm}$ 以上、特に 10^{13} cm 以上では、粒子中の電荷が移動しにくいいため、集じん極板に堆積した粒子層の荷電の脱離が困難となり、層内に荷電の蓄積が生じる。この蓄積した荷電がある限界値を超えると、逆に集じん極よりこれらを放出する逆電離現象が生じて、集じん性能を極端に低下させる。すなわち電気集じん機は、 ρ が $10^4 \sim 5 \times 10^{10} \text{ cm}$ の範囲の粒子に対し、高い集じん性能を有することとなる。石炭燃焼灰の電気抵抗は石炭種によって異なるものの、ほとんどすべての石炭種で 10^{11} cm 以上であり、これらを安定に集じんするため、様々な技術開発がなされている。

高電気抵抗粒子の電気集じん

電気抵抗の高い石炭灰の捕集性能を向上させるため、電気集じん機操作温度条件の調整がなされている。すなわち、石炭灰の電気抵抗は温度によって図6-5-5のように変化する。これは高温になると粒子内部の電気抵抗が低くなり、一方、低温では粒子表面に液膜等ができるため、表面の電気抵抗が低下することによっている。1970年代には、高温（350 程度）にすることにより集じん機の性能を向上させる高温電気集じん機の開発がなされたが、ガス温度の上昇に伴い装置が大きくなること、高

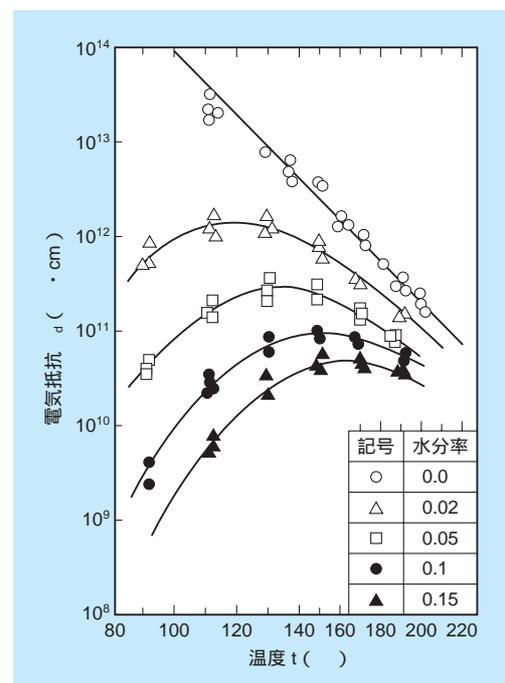


図6-5-5 フライアッシュの見掛け電気抵抗率の温度、水分率による変化

温条件では放電量が多くなり印加電圧が十分とれないこと等の問題が生じたため、近年では、逆に温度を下げて電気抵抗を下げる方式である低々温電気集じん機が注目されている。

図6-5-6には温度低下による集じん性能の改善効果を示している。露点より温度が下がると大きく集じん性能が改善されることが明らかである。電気集じんの低温化は、装置のコンパクト化が図れ、かつ集じん性能の大幅な向上も望めるため、近年、新設される石炭火力では、ほとんどがこの方式を採用するようになっている。

また、荷電方式の改善による対策も試みられ、パルス荷電方式と言われ、常時は放電をさせず、電界を形成するための低い電圧を印加しながら、放電極に短時間にパルス状の高電圧を印加することで荷電を効果的に行いつつ、逆電離を抑制する方式が実用化されている。

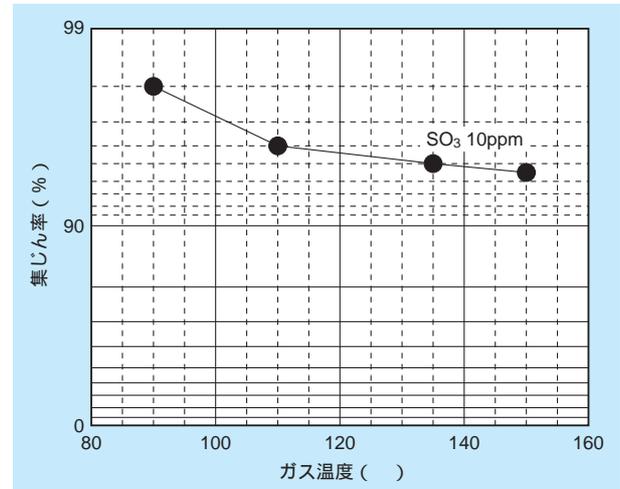


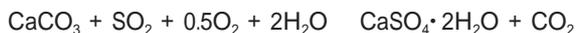
図6-5-6 ガス温度低下による集塵性能の改善

6 - 6 脱 硫 技 術

現在の代表的な脱硫装置は、湿式石灰石 - 石膏法である。本方式は高性能で信頼性の高い技術であり、ほとんどの微粉炭火力で用いられているが、排水処理の低減を狙った乾式脱硫法や同時脱硫・脱硝法なども開発されている。

6-6-1 石灰石-石膏法脱硫装置

国内で産出する安価でかつ取り扱いが容易な石灰石を用い、水と混ぜた石灰石スラリーと排ガス中のSO_xを反応させ、硫黄分を石膏 (CaSO₄·2H₂O) として回収する。総括反応は以下ようになる。



本方式には、図6-6-1に示すように酸化塔を別置にした方式と、一体化した内部酸化方式がある。酸化塔別置方式では、排ガス中のSO₂は、塔頂から噴霧された吸収液と反応して、亜硫酸水素イオン (HSO₃⁻) となって吸収される。SO₂を吸収した液は、塔底に集められ、供給される石灰石スラリーにより、亜硫酸カルシウム

項目	酸化塔別置方式	吸収塔内酸化方式
基本フロー		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 酸化塔 有り (別置き) 硫酸 要 CaCO₃ 過剰率 大 吸収性能に対する酸化の影響 小 	<ul style="list-style-type: none"> 酸化塔 無し 硫酸 不要 CaCO₃ 過剰率 小 吸収性能に対する酸化の影響 大

図6-6-1 石灰石-石膏法脱硫方式

(CaSO₃·0.5H₂O) に転化する。この液を別置きの酸化塔に供給し、硫酸 (H₂SO₄) により亜硫酸カルシウムを溶解させた後に、空気によって酸化して石膏を得る。

内部酸化方式は、石膏生成反応までも、一つの吸収塔で行う方式であり、SO₂は塔部で吸収液と接触し、亜硫酸イオン (HSO₃⁻) として溶け込む。HSO₃⁻は液溜部において空気で酸化されて、硫酸イオン (SO₄²⁻) とな

り、さらに液溜部に供給される石灰石スラリーと反応して石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) となる。

生成した石膏スラリーは、脱水され、建築材料として販売される。脱水後の排水は、脱硫装置に戻されると共に石灰石スラリーの製造に再利用されるが、循環利用すると排ガス中の塩素分、フッ素分等の様々な成分が吸収液中に蓄積し、石膏の品質の低下や、脱硫性能の低下を引き起こさせるため、一部抜き出して排水処理される。

また、石灰石-石膏法脱硫装置においては、前流にガスの集じんおよび冷却を行う除じん塔（冷却塔）を配したスト分離方式と除じん塔（冷却塔）を持たないスト混合方式がある。スト分離方式は、ばいじんなどを含まない純度の高い石膏を要求する場合に採用される。しかし、現在、低低温電気集じん装置のような高性能な集じん装置が開発され、ばいじん濃度が低くなっており、設備費の安いスト混合型の採用が多くなっている。

6-6-2 乾式脱硫法および同時脱硫脱硝法

湿式脱硫法では、多くの工業用水および高度な排水処理を必要とする。このため、水および排水処理を必要としない乾式法の開発が考案されている。特に、乾式法でしかも、同時に脱硝も行う乾式同時脱硫脱硝法が注目されている。しかし、湿式脱硫法に対するコスト面での優位性があまり見られず、一部の発電所で利用されているのみである。

石炭灰利用乾式脱硫法

石炭灰、水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) および使用済みの吸収剤から新規に吸収剤を製造して、この吸収剤を

用いて排ガス中の SO_x を除去する方式である。図6-6-2にそのプロセスの概要を示す。このプロセスは吸収剤の製造工程も含んでいる。脱硫反応としては、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ により SO_2 が除去される。脱硫効率も排ガス温度 $100 \sim 200$ で90%以上が得られる。

活性炭吸着法

活性炭吸着法は、脱硫と脱硝の両方でいける方式であり、まず脱硫塔では活性炭上で排ガス中の SO_x と吹き込んだ NH_3 とを $140 \sim 160$ で反応させ、 SO_x を硫酸水素アンモニウム (NH_4HSO_4) や硫酸アンモニウム ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) の形態に変換して吸着・除去し、次に脱硝塔では NH_3 を吹き込み、 NO_x を窒素と水に分解するものであり、脱硫効率97%以上、脱硝効率80%以上が得られている。図6-6-3には本プロセスの概要を示す。 NH_4HSO_4 等を吸収した活性炭は脱離塔で 350 以上に加熱することにより、 NH_4HSO_4 等が NH_3 と SO_2 に分解され、脱離できるため、活性炭を再生利用できる。放出した SO_2 は硫酸や単体硫黄として回収される。

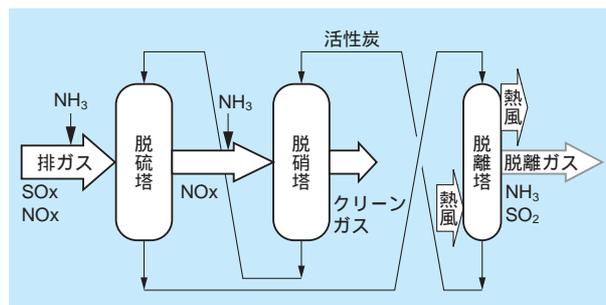


図6-6-3 活性炭吸着法同時脱硫・脱硝プロセス

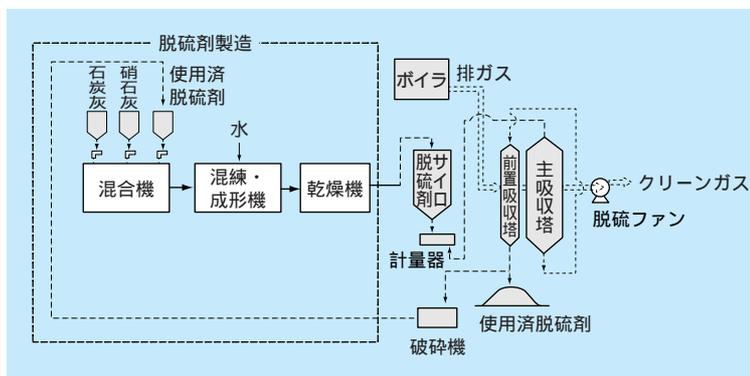


図6-6-2 石炭灰利用乾式脱硫法プロセス

6 - 7 今後の展開

NO_x、SO_xの総量規制の強化、フッ素、セレン、ホウ素に関する排水規制の強化、PRTR法の制定等、環境規制が厳しくなっており、今後、排煙処理技術の高度化が重要となってくると考えられる。

SO_x、NO_xおよびばいじん等の、従来より対策が進められていた物質については、既に高性能かつ信頼性の高い処理技術が開発されており、今後は、一層の排出抑制、処理コスト低減のための、さらなる改良が重要となる。特に、低NO_x燃焼については、使用石炭種が今後、ますます多様化していくため、幅広い石炭種に対応できる技術としての高度化が不可欠である。

一方、微量物質についても、注目が集まっているが、非常に低濃度で、かつ温度、雰囲気条件によって大きく

存在形態が異なるため、火力プラント内における挙動も未だ明確にされていないのが現状である。今後は、その正確なプラント内挙動把握を行うと共に、規制動向に応じて、除去技術の開発なども必要となると考えられる。

また、電気集じん機等で回収された石炭灰の処分法は、今後の大きな課題である。現在は60%以上の石炭灰がセメントの粘土代替材料等に有効利用されているが、一層の有効利用量の拡大、特に有価灰としての利用によるコスト低減を考える必要がある。そのため、新たな有効利用法の探索に加え、有価灰としての利用が可能な性状を持つ石炭灰を発生させる燃焼技術の開発が、今後の大きな課題の1つになると考えられる。

コラム1：排ガス中水銀の化学形態別連続分析手法

なぜ、水銀化学形態別連続分析が必要か？

近年、大気環境中の重金属類、特に水銀の挙動が注目され始めており、その発生源の一つとして、種々の燃焼施設が挙げられている。水銀は、水に不溶で大気に残留しやすい金属水銀 (Hg^0) と、可溶で、雨等により水域に移行しやすい二価水銀 (Hg^{2+}) の二つの化学形態で存在している。また、排ガス中水銀は、排ガスの性状や温度によって、化学形態が容易に変化する。そのため、燃焼施設などの発生源や大気中での水銀挙動を把握するためには、化学形態別の連続分析が不可欠である。

開発のポイント

水銀の化学形態別分析の公定法としては、現在、米国で規定されている化学形態別分析が唯一あるのみだが、本法は分析に時間を要し、短時間の化学形態変化を把握することができない等の問題点がある。当研究所では、水銀の詳細な挙動把握を行うため、水銀を Hg^0 と Hg^{2+} に分別する化学形態別分離部、および分離された水銀を連続分析する測定部からなる on-line の水銀化学形態別分析手法



図1 水銀化学形態別連続分析装置の外観

の開発を行った(図1)。ここで、水銀の化学形態別分析には、 Hg^0 は水に不溶で、 Hg^{2+} は水溶性である特性を利用した。

当研究所の分析手法の精度は？

燃焼排ガス中の水銀濃度として報告されている $1 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 程度の濃度を分析できる機能が必要である。そこで、それぞれの化学形態を持つ水銀の標準ガスを発生させ、本手法の測定範囲と測定精度を明らかにした。測定誤差は、低濃度の場合でも5%程度であり、かつ、それぞれの化学形態で $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ から数十 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ までの測定範囲を有しており、本手法が、排ガス中水銀を化学形態ごとに精度良く分析できることを明らかにした(図2)。

さらに、本手法を用い、実際の燃焼排ガスに含まれる水銀を化学形態別に連続分析し、JIS等で規定されている方法など種々の化学分析法と比較を行い、本分析手法が燃焼排ガス中の水銀の化学形態別分析に十分適用可能であることを明らかにした。

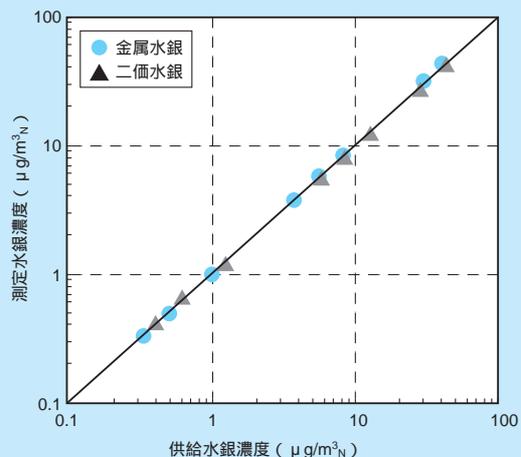


図2 測定精度と範囲

第 7 章

微粉炭火力の運用性の向上



第7章 微粉炭火力の運用性の向上 目次

CS推進室 受託推進グループ 部長 牧野 尚夫
横須賀研究所 エネルギー機械部 主任研究員 沖 裕壮
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 木本 政義
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 小野 哲夫

7 - 1 研究の背景	77
7 - 2 低負荷燃焼安定性の改善	77
7 - 3 低NO _x 燃焼との併用	81
7 - 4 今後の展開	85
コラム2：微粉炭濃度・粒度計測技術	86

牧野 尚夫（10ページに掲載）
（7-1、7-4執筆）



沖 裕壮（1989年入所）
これまで、微粉炭火力や石炭ガス化に関する研究に携わり、低負荷対応微粉炭バーナの開発や、事業用ボイラの伝熱・燃焼特性評価、ボイラおよびガス化炉で生成する灰の溶融特性評価などを行ってきました。現在は、石炭ガス化炉を対象に、炭種等による生成灰特性の違いを予測する技術の開発に従事しています。

（7-2執筆）



木本 政義（1988年入所）
これまで、微粉炭燃焼時のNO_x・灰中未燃分の同時低減技術や低負荷時の安定燃焼技術の開発を行うと共に、電気事業では未利用の低品位炭や高燃料比炭など多様な炭種の燃焼特性評価に従事してきました。現在は、石炭灰の有効利用量増大を図るための燃焼技術や灰物性評価に関連した研究に携わっています。今後も、微粉炭燃焼技術の高度化に取り組んでいきたいと考えています。

（7-3執筆）



小野 哲夫（1962年入所）
海外炭利用の初期には、貯炭場における石炭自然発火の発生機構の解明とその対策を検討しました。その後、微粉炭濃度・粒度の計測技術の開発、およびCWMの製造技術の開発と、一貫して石炭ハンドリングの問題を扱って来ています。

（コラム2執筆）

7 - 1 研究の背景

微粉炭火力は1980年代に入ると新設、あるいは石油火力からの燃料転換などにより再び増加し、その電源に占める割合は、現在では10%を超えるようになってきている。一方、1980年代以前に、火力のほとんどを占めていた石油火力の割合は急激に減少してきている。このような電源構成上の割合の変化は、微粉炭火力に要請される機能にも大きな変化をもたらしてきている。すなわち、従来、ベース電源として位置付けられていた微粉炭火力が、近年、ミドル・ピーク対応火力としての運用も要求されるようになってきており、負荷調整機能の向上が望まれている。

微粉炭火力で負荷調整を行う場合、従来は、各バーナへの微粉炭供給量を低下させて調整することに加え、大幅に負荷を低下させる場合は、一部のバーナを消火し、燃焼に用いるバーナ本数を減少させることで行ってきた。しかし、バーナの点消火操作に時間を要するため負荷変化が遅くなると共に、下げられる負荷範囲も狭いという問題点があった。これに対し、各バーナの点消火を伴わずに負荷調整を行う方法は高い負荷追従性を有するが、その場合の負荷調整においては、要求される発電電力量に応じて各バーナへの微粉炭供給量を減少させることになる。微粉炭は固体であるため搬送が困難であり、微粉炭火力では気流中に微粉炭粒子を浮遊させ、空気輸送の形態で搬送する。搬送された微粉炭はバーナよりボイラ内に吹き出し、燃焼させる。低負荷時において微粉炭供給量を減少させることは、搬送用空気中の微粉炭濃度を下げることになり、特に大きく負荷を下げる場合には、

燃料が希薄の状態になり、安定燃焼が難しくなるという問題点を引き起こす。勿論、石炭の供給量の低下に応じて搬送用空気量を減少すれば、この問題は解決できるが、その場合には搬送用空気の流速が低下するため、微粉炭が配管内に沈降しやすくなり、バーナへの微粉炭の安定供給が難しくなる。このような状況から、微粉炭火力においては、低負荷時に希薄となった微粉炭の燃焼を安定させるため、微粉炭流の一部を適切な濃度に濃縮する技術の開発が重要になっている。

電力需要に応じた負荷運用性の向上のためには、低負荷時に微粉炭を安定に燃焼させる技術だけでなく、負荷の上昇あるいは低下を行う、負荷変化時の変化速度（負荷追従性）を速くすることも重要である。負荷変化時には、微粉炭の濃度が変動しやすく安定燃焼が困難になるため、微粉炭火力においては、石油火力に比べてどうしても変化速度を低くせざるを得ず、負荷追従性が悪いという欠点があった。すなわち、負荷変化時においても、変動する微粉炭濃度を適切な濃度にまで調整できる機能を加えることにより負荷追従性の改善が可能になる。

これらの、低負荷時に微粉炭が希薄となって燃焼安定性が悪くなる点、負荷変化時に微粉炭濃度が変動することにより、負荷変化速度を大きくできない点を改善するため、当研究所では微粉炭の濃縮機能を持つワイドレンジバーナ¹ および、一層の低NO_x燃焼を可能にした超低NO_xワイドレンジバーナの開発を行った。本章では、これらの技術について紹介する。

7 - 2 低負荷燃焼安定性の改善

7-2-1 低負荷対応用バーナ概念

微粉炭バーナから噴出する微粉炭濃度は、通常、Air/Coal(微粉炭搬送用空気量と微粉炭供給量の重量比、以降A/Cと表記)と呼ばれる指標を基に調節されている。

図7-2-1に、ミル負荷とA/Cとの関係を示す。

低負荷条件では、微粉炭供給量を減らすことになるが、微粉炭の搬送性を維持するために、搬送用空気量の低減には限界がある。従って、負荷があるところまで低下するとA/Cは急激に増加する。微粉炭バーナが安定燃焼を維持できるA/Cは2.5～3.0程度までとされ、これに

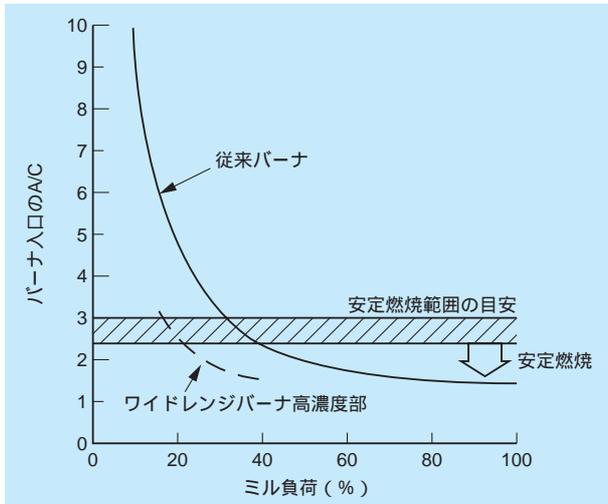


図7-2-1 ミル負荷とA/Cの関係

相当する負荷 35 ~ 40%が安定燃焼可能な最低負荷であった。

安定燃焼範囲を拡大し、微粉炭ボイラの運用性を向上させるためには、低負荷時の希薄微粉炭流を局部的に濃縮し、バーナ出口近傍の微粉炭濃度を局部的に高くすることが有効である。既に、図7-2-2に示すようなバーナ外部に微粉炭濃縮機構を有する低負荷対応用バーナが開発・実用化されているが、構造が複雑で、外部に大きな

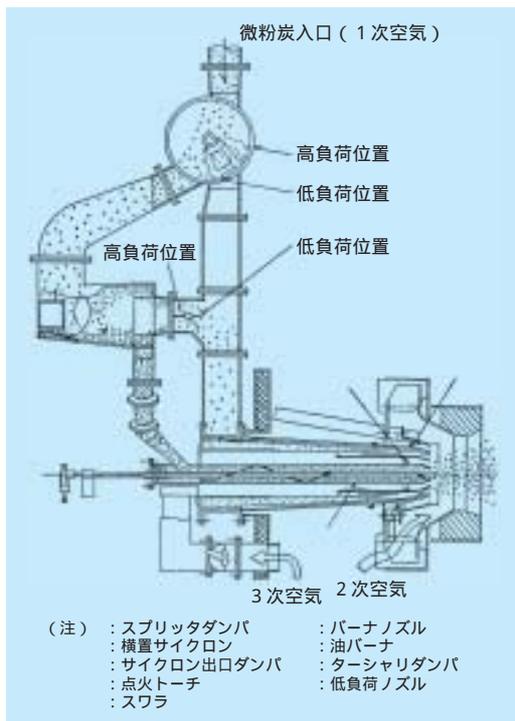


図7-2-2 従来の低負荷対応微粉炭バーナの一例

付帯機器を必要とすることなどから、新設火力に採用されることはあっても、既設火力の改造時に採用されることは少なかった。

そこで、当研究所と石川島播磨重工業㈱は、共同で、石油火力並の20%負荷までの安定燃焼を可能にするとともに、既設火力へのリプレースにも対応できるように、従来型バーナとほぼ同じ大きさのバーナの内部に微粉炭濃縮機構を設置したコンパクトな形式で安価な低負荷対応バーナの開発に着手した。

7-2-2 微粉炭濃縮機構の基本構造

微粉炭バーナ内部の限られた空間で希薄な微粉炭を濃縮するには、遠心力の利用が有効と考え、図7-2-3に示す内部セパレート型ワイドレンジバーナ（以降ワイドレンジバーナと表記）を考案した。

ワイドレンジバーナは、濃度調整リングと呼ばれる環状構造物を内蔵し、先端が三重管構造となっている。

接線方向から流入した旋回微粉炭流は、濃度調整リングを乗り越える際に外筒内面に集中する。濃度調整リングをノズル先端方向に押し込むと、外筒内面に濃縮された微粉炭が、そのまま外筒と中間筒の間から噴出され、濃度調整リングをノズル先端から離すと、いったん濃縮された微粉炭が再分散し、微粉炭は中間筒と内筒の間からも噴出される。このように、負荷に応じて濃度調整リングを移動することにより、低負荷時にもバーナ出口微粉炭濃度が局部的に高くなり、着火性が向上する。

濃縮した微粉炭を三重管構造のノズルの一部から噴出する場合、高濃度の微粉炭を、外周部、中間部、中心部のどこから噴出するのが、最も安定な燃焼を確保できるのかを検討した事例はない。そこで、燃焼量 150kg/hの

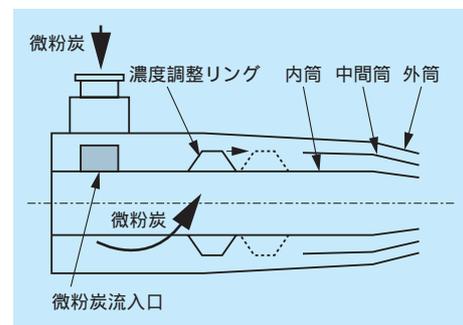
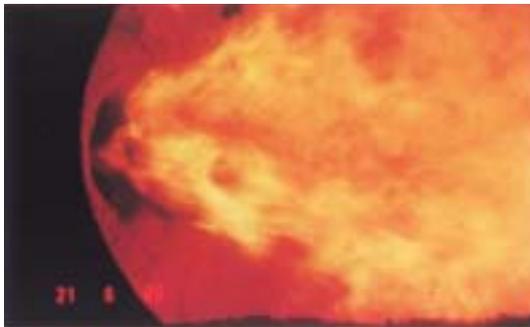


図7-2-3 内部セパレート型ワイドレンジバーナの概要

三重管バーナを製作し、高濃度微粉炭流を模擬した微粉炭流と、低濃度微粉炭流を模擬した空気の噴出位置の組み合わせを変えて試験を行った。各条件の燃焼状態を比較したところ図7-2-4に示すような結果が得られた。

すなわち、微粉炭の噴出位置の差異は、火炎形状に大きく影響し、微粉炭を外周部から噴出させた場合には火炎角度が大きく輝度の強い短炎が容易に形成され、良好な燃焼状態となった。一方、中間部から噴出した場合は火炎形状が安定せず、中心部から噴出した場合は細長い火炎形状で着火点が不安定であった。これらの結果から、微粉炭の濃縮流を外周側から噴出した条件が最も安定な火炎を形成できることが明らかとなった。遠心力により微粉炭を濃縮する場合、外周部から濃縮微粉炭を噴出す



外周部から微粉炭を噴出した場合



中間部から微粉炭を噴出した場合



中心部から微粉炭を噴出した場合

図7-2-4 三重管バーナの燃焼状況

ることは構造的にも容易であるため、この方式を採用することとした。

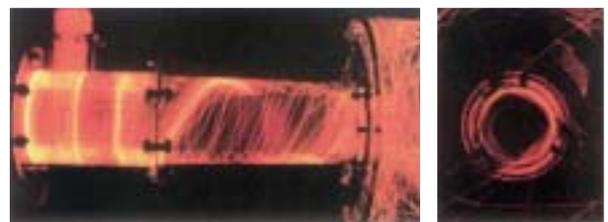
7-2-3 バーナ各部の最適化

微粉炭濃縮機構のポイントは、バーナに内蔵する濃度調整リングである。その形状により濃縮特性が大きく変わるため、形状および設置位置が濃縮特性に及ぼす影響の確認を行う必要がある。

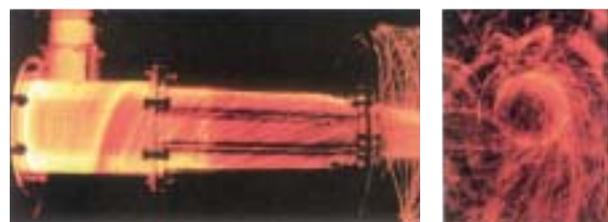
そこで、バーナの亚克力ルモデルを製作し、バーナ内部の可視化試験とバーナ出口における濃度測定試験を行い、最適なリング形状として台形型のリングを選定すると共に、負荷に応じたリング設置位置の推奨値を把握した。

こうしてコールドフロー試験で最適と判断された形状のバーナを、当研究所石炭燃焼試験炉(燃焼量120kg/h)用に製作し、燃焼試験を実施した。

その結果、燃料比1.6の海外炭を用いた燃焼試験で25%負荷まで安定燃焼が確保できることを確認した。さらに、目標の20%負荷まで安定燃焼を可能とするため、低負荷で燃焼が不安定に至る状況を詳細に観察したところ、微粉炭流の偏り(濃縮微粉炭流が、1~2本程度の筋状の流れとなり、バーナ出口のごく一部のみから噴出される現象。円周方向の微粉炭濃度分布が著しく不均一となったもの。)による火炎形状の崩れが一因であることが明らかとなった。そこで、図7-2-5に示すバーナ内



偏流の著しいバーナの例



均一な微粉炭流が得られたバーナの例

図7-2-5 バーナ内部構造最適化のための可視化試験

部流動状況の可視化試験を行い、バーナ内部に設置されたディフレクター・アングル（微粉炭流の円周方向濃度分布を均一化するためにバーナ外筒内面に取り付けられた微粉炭分散用仕切棒）の長さ、本数、形状を最適化した。

可視化試験による改造と燃焼試験による検証を繰り返した結果、ベンチスケール燃焼試験において、定格の20%負荷まで安定な燃焼を維持することに成功した。

7-2-4 バーナ容量のスケールアップ

ベンチスケール試験では良好な結果を得たが、実機に適用するにはバーナのスケールアップが不可欠である。そこで、バーナ容量2.35t/hのパイロットスケールバーナを製作し、燃焼試験を実施した。試験にあたっては、同容量の従来型バーナをあわせて製作し、その性能を比較した。図7-2-6が比較試験の結果である。

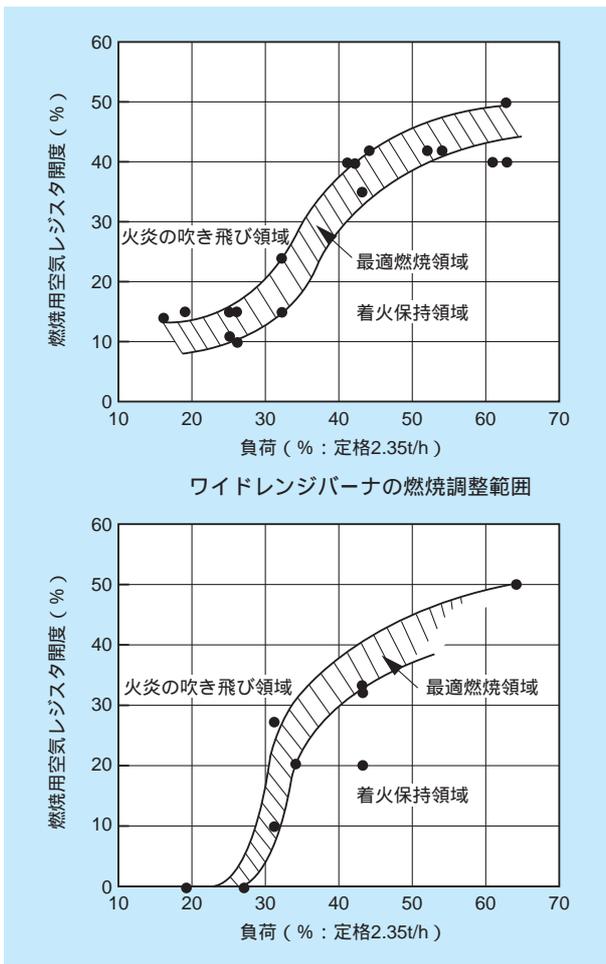


図7-2-6 パイロットスケールでの燃焼安定性の比較

この図は、横軸に負荷を、縦軸に二次空気の旋回力を調整するレジスタ開度を取り、各負荷において最適な燃焼状態を保持できる領域をハッチングで示したものである。

通常、負荷の低下に伴い微粉炭が希薄になると、着火点が離れ、火炎の吹き飛びが発生する。一般にこうした場合、レジスタ開度を減少させて二次空気の旋回力を強化し、着火点を保持する調整がなされる。この図からわかるように、従来型バーナでは、負荷30%までにレジスタを絞りきってしまうため、調整が不可能となっている。しかし、ワイドレンジバーナは20%以下の極低負荷条件においても、濃度調整リングの移動等により、安定な燃焼が維持でき、負荷16%程度までの安定燃焼が可能になった。

7-2-5 ワイドレンジバーナの実用化

スケールアップ試験の結果を受け、バーナ容量7.3t/hの実機用バーナを作成し、四国電力(株)西条発電所2号ボイラ（出力250MW）において、実証試験を行った。目的は、実機におけるバーナ最低負荷性能の確認とバーナ耐久性の検証（濃度調整リング等、直接微粉炭流にさらされ摩耗が懸念される部位を中心とした摩耗特性の把握と、耐摩耗鋼使用部位の選定）である。

本ボイラは3段4列対向燃焼のボイラで、最低負荷運転時には図7-2-7に示すBミル系統およびDミル系統の16バーナのうち、*印の8本のバーナが使用される。最低負荷時に使用されるこの8本のバーナのうち、Bミル系統の4本のバーナをワイドレンジバーナに改造した。なお、一部バーナでは微粉炭による摩耗を考慮し、バーナの一部に耐摩耗材を使用した。

試験中のバーナの燃焼状態は、常設の火炎検出器（ μ FR）および燃焼診断装置（FISS）に加え、応答速度の

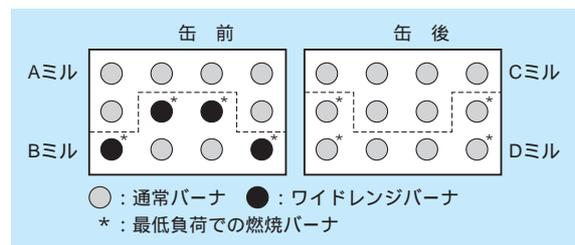


図7-2-7 供試ボイラのバーナ配置

速い特殊な2色式温度計を仮設し、複数の光学的燃焼診断装置により連続的に評価した。

その結果、最低負荷試験においては、プラントの運用最低負荷である50MWまで、負荷変化中を含め、一時的な燃焼状態の悪化もなく、安定した燃焼を維持できることが確認された。このように従来型バーナでは重油を燃焼していた最低負荷50MWまで、石炭専焼が可能となったため、図7-2-8に示すように、低負荷時の重油使用量が大幅に削減されるとともに、負荷変化に必要な時間が負荷降下時に100分、負荷上昇時に55分短縮され、迅速な負荷変化が可能となった。

また、ボイラ起動時には、ワイドレンジバーナの導入により、燃料を重油から石炭に切り替える時期が早くできるため、一回の起動あたり約5トンの起動用重油を削

減できることを確認した。

バーナの耐久性については、耐摩耗鋼を使用したバーナとステンレス製のバーナを約1年間運用した後に、それぞれの摩耗状況を比較することにより検討した。その結果、ごく一部の摩耗が顕著な箇所に硬化肉盛りおよび溶射加工を施せば、濃度調整リングを含むほとんど全てがステンレス製でよいことがわかり、コストダウンがはかれることを確認した。

実機実証試験の結果をうけ、ワイドレンジバーナは順調に導入が進められている。そのコンパクトな構造から、リプレース需要も多く、前述した西条発電所2号ボイラを含む国内外10基のボイラに合計190本が設置され、順調に運用されている。

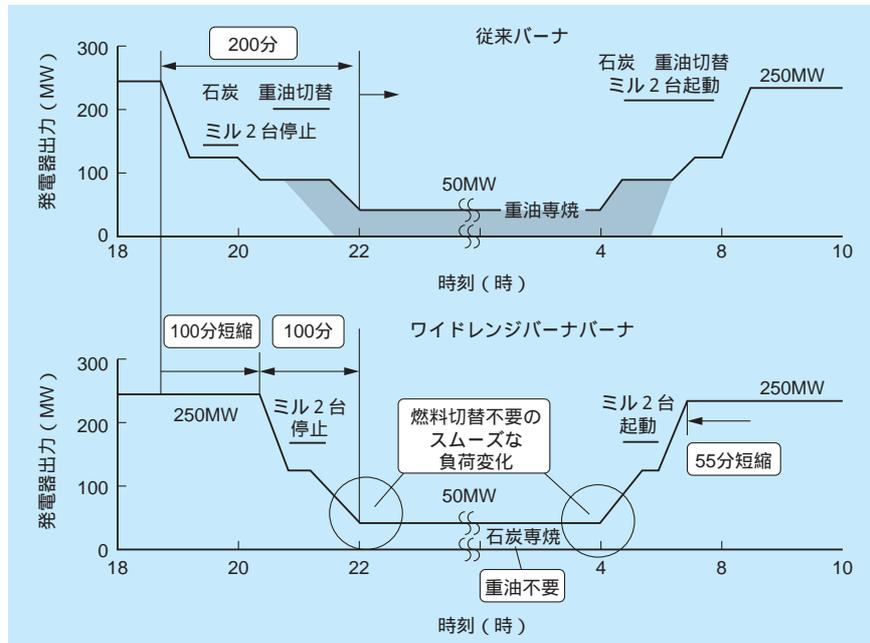


図7-2-8 バーナ導入による運用性改善

7-3 低NO_x燃焼との併用

7-3-1 超低NO_xバーナ用の微粉炭濃縮法の概念

前項のワイドレンジバーナの機能を、6-3節に示され

た超低NO_xバーナ(CI-バーナ)に組み込むことにより、幅広い負荷条件に対応でき、かつNO_x・灰中未燃分の大幅低減も可能な技術となる。当研究所では、石川島播磨重工業と共同で、これら二つの機能を一体化した超低NO_x・ワイドレンジバーナの開発を行った。

超低 NO_x バーナは、定格負荷時の NO_x・灰中未燃分の排出量が既存低 NO_x バーナに比べて低だけでなく、バーナ近傍の微粉炭の滞留時間を長くでき、燃焼を促進する構造であるため、既存低 NO_x バーナの安定燃焼限界の40%負荷よりも低い、30%負荷での安定燃焼が可能である。この負荷での微粉炭濃度が本バーナの安定燃焼限界として考えると、当研究所の低負荷燃焼の目標である負荷20%時には、管内平均濃度に対し、1.5倍以上の濃縮効果が必要であると考えられる。しかし、本バーナは、火炉へ噴出する際に微粉炭流に旋回があると、NO_xの低減に重要な還元炎が効果的に形成できないという問題点があるため、旋回を利用するワイドレンジバーナの微粉炭濃縮方式をそのまま適用することはできないと考えられる。超低 NO_x・ワイドレンジバーナの開発にあたっては、この点を考慮に入れ、以下の二つの微粉炭濃縮方式を考案した。

ワイドレンジバーナと同じく旋回流により微粉炭を濃縮した後に、管出口部に設置した整流板により旋回を抑制する方式（接線流入式濃縮法）

超低 NO_x バーナの1次空気の微粉炭流路に流線形状のリングを設置し、無旋回の流れ場で濃縮する方式（流線形リング式濃縮法）

これらの概念に基づき、小型バーナを用いたコールドフロー試験により、十分な濃縮特性を有することを明らかにした後に、バーナ容量をスケールアップした際の濃縮特性への影響を把握した。引き続き、微粉炭濃縮が燃焼特性に及ぼす影響を小型バーナおよび実規模級の大容量バーナを用いて明らかにした。

7-3-2 微粉炭濃縮装置の構造

接線流入式濃縮法

接線流入式濃縮法を用いるバーナの1次空気管構造を図7-3-1に示す。微粉炭の濃縮方式そのものは、前節に

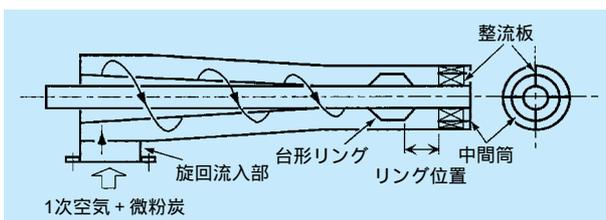


図7-3-1 接線流入式のバーナ1次空気管

示したワイドレンジバーナと同じであり、微粉炭流が接線方向から流入し、旋回が与えられるようになっている。微粉炭濃度の調節は、微粉炭通路に設置した移動可能な台形状リングにより行い、管出口部には、濃縮後の微粉炭濃度をバーナ出口まで維持するための中間筒が組み込まれている。1次空気管出口部の形状は、超低 NO_x バーナと同一の直管形状とし、微粉炭流入部から直管部まではテーパをつけた絞り形状となっている。濃縮後の微粉炭流の旋回抑制は、1次空気管の軸方向に沿って設置した整流板により行う形式となっている。

流線形リング式濃縮法

流線形リング式濃縮法を用いるバーナの1次空気管構造を図7-3-2に示す。この形式のバーナでは、超低 NO_x バーナの1次空気管に設置した流線形状のリングのみで微粉炭の濃縮を行っている。リングが移動可能であること、および管出口部に濃縮後の濃度維持のための中間筒が設置されていることは、接線流入式バーナと同様である。

リングの形状は、流れ場のシミュレーションにより、微粉炭粒子の濃縮特性を評価し、濃縮効果の最も大きな形状を選定した。リングを図7-3-2のような流線形にすると、リング後流の渦生成が抑制でき、リング通過後の気流は内周側に滑らかに広げることができる。一方、微粉炭は慣性によりリング通過後もしくは外周側を流れるため、リング後流の外周側微粉炭濃度を高くできる。また、リング上流側の傾斜角を緩やかにしているため、慣性力の大きな粗粒子の極端な衝突・反発が抑えられ、例えばリング表面に衝突した後に1次空気管外周部にも衝突し、再度反発して内周側に戻ってきて濃縮効果を阻害するような粒子挙動を防ぐことができる。

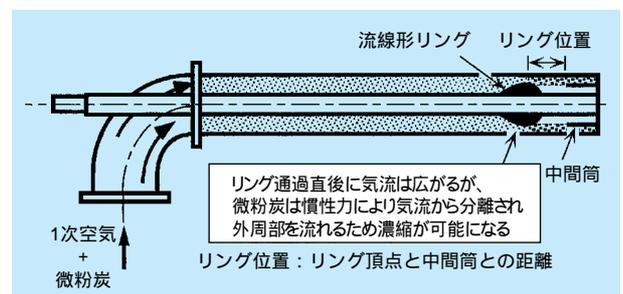


図7-3-2 流線形リング式のバーナ1次空気管

7-3-3 微粉炭の濃縮特性

接線流入式の小型バーナ（バーナ容量0.12t/h）を例に、微粉炭濃縮性能を示す。図7-3-3は、負荷20%相当の微粉炭をバーナに供給し、1次空気管出口における管内周側および管外周側の微粉炭濃度比（1次空気管内平均微粉炭濃度との比）とリング位置の関係を示している。

微粉炭濃縮効果は、リング位置をバーナ出口に近づけるほど大きくなり、目標とする1.5倍までの濃縮が可能であることが明らかとなった。濃縮の必要がない場合には、リング位置をバーナ出口から離すことで微粉炭濃度は管内平均濃度に近づけられる。すなわち、リング位置の調整により負荷に応じて最適濃度に設定できることが明らかになっている。

実機で使用される数t/h～10t/hの容量のバーナは、小型バーナに比べ、微粉炭通路が拡大され、気流や微粉炭粒子の挙動も小型バーナとは異なる。そこで、バーナ容量1.5t/hの大容量バーナにおいて、本接線流入式濃縮法の性能を評価し、小型バーナ同様、1.5倍以上の濃縮効果が得られること、ならびにリング位置により濃度調整が可能になることを明らかにした。

接線流入式濃縮法の場合、微粉炭の濃縮後に気流の旋回を抑制する必要がある。1次空気管出口に設置する整流板の長さおよび枚数を増加させると、旋回する気流に対して衝突する面積が増加するので、気流の旋回力は減

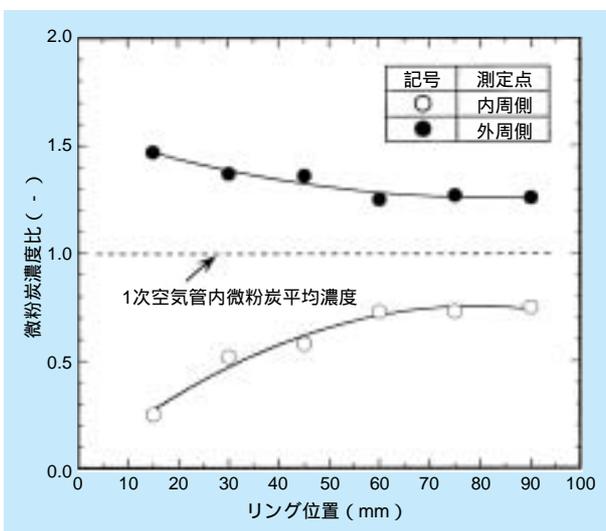


図7-3-3 リング位置と微粉炭濃度比の関係

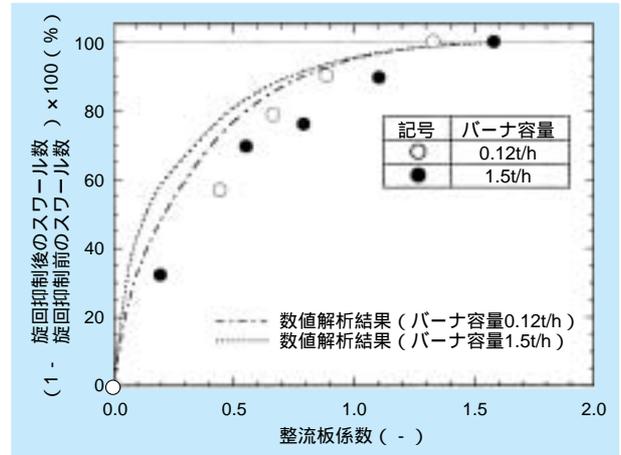


図7-3-4 整流板係数と旋回抑制率の関係

衰する。旋回抑制に最適な整流板設置条件を明らかにするため、これら整流板の条件を定量化して、旋回抑制効果との比較を行った。整流板条件の定量化指標として、1次空気通路断面積に対する整流板の面積の比で表される整流板係数を定義した。小型バーナを対象に、様々な整流板条件および初期旋回強度の影響を評価し、いずれの条件に対しても、整流板係数が1.2以上の条件で旋回をほぼ抑制できることが示された。また、この傾向は、1.5t/hの大容量バーナにおいても同様であり、バーナ容量に関わらず、整流板係数を1.2以上にすれば旋回が抑制できることが明らかになった。

なお、流線形リング式においても、接線流入式とほぼ同様の濃縮特性がバーナ容量に関わらず得られており、二種類の濃縮方式の性能は、ほぼ同程度であると考えられる。

7-3-4 実燃焼場での特性評価

微粉炭濃度調整による燃焼特性への影響

石炭燃焼試験炉において接線流入式濃縮法を用いた場合の、バーナ負荷と燃焼効率（石炭中可燃分の燃焼した割合）の関係を、濃縮機能を持たない超低NOxバーナの関係とともに図7-3-5に示す。微粉炭濃縮により低負荷時の燃焼安定性が改善され、目標とした石油火力並の最低負荷20%での安定燃焼が達成できた。また、微粉炭の濃縮は、中間負荷領域における燃焼改善効果も有し、50%以下の負荷帯で濃縮機能を持つバーナの方が燃焼効率が高くなった。

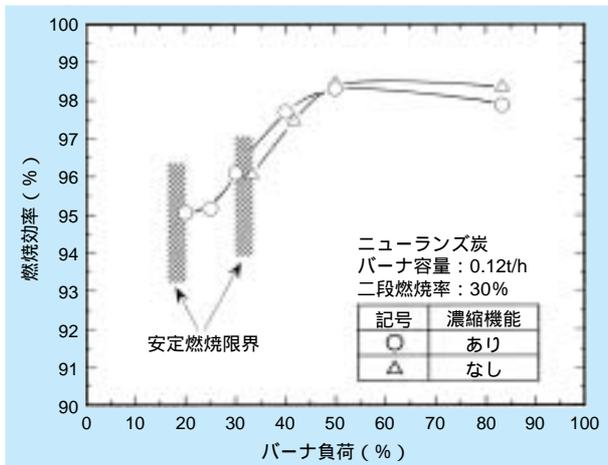


図7-3-5 濃縮機能の有無による燃焼効率の比較

各負荷に対してリング位置を変え、管出口の微粉炭濃度を变化させた際の燃焼効率およびNOx濃度を図7-3-6に示す。低負荷条件（50%および25%負荷）では、リング位置をバーナ出口に近づけ、外周部の微粉炭濃度を高めるほど燃焼効率は増大し、その効果は負荷が低い条件ほど顕著になる。この場合、NOx濃度は、着火性の向上に伴い、若干増加する。

一方、83%負荷の高負荷条件では、リングをバーナ出口に近づけ微粉炭を濃縮すると、微粉炭濃度が過濃になるため、燃焼効率は若干低下した。したがって、幅広い負荷帯で高い燃焼効率を維持するためには、負荷に応じてリング位置を調整することが望ましいと考えられる。なお、この傾向は、濃縮法を流線形リング式とした場合でも、最低負荷ならびに各負荷に対する燃焼効率とともに、接線流入式とほぼ同様であった。

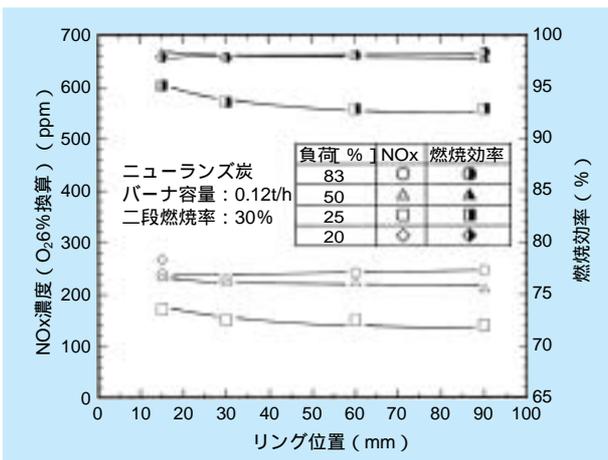


図7-3-6 リング位置とNOx濃度、燃焼効率の関係

スケールアップによる燃焼特性への影響

接線流入式バーナにおいて、バーナ容量を1.5t/hの大容量バーナまでスケールアップしても、低負荷時の燃焼安定性を、小型バーナの場合と同様、大きく改善できた。図7-3-7には、小型バーナと大容量バーナの、負荷変化時のNOx・灰中未燃分排出特性を示すが、最低負荷は、いずれにおいても目標とする20%を達成できることがわかる。空気比が同じとなる40%負荷以上で比較すると、バーナ容量をスケールアップした場合には、火炎が大きくなり、還元炎も拡大されるので、全ての条件で小型バーナよりもNOx濃度は減少する。また、火炉容量の増大に伴い、火炉壁からの熱損失が減少するため、灰中未燃分濃度も同様に減少した。また、負荷に対するNOx・灰中未燃分の変化傾向は、小型バーナと大容量バーナで共通の特性を持った。

図7-3-8は、大容量バーナにおける負荷変化時のNOx・灰中未燃分排出特性を、接線流入式および流線形リング式の濃縮装置を設置した超低NOxバーナと、濃縮機能を持たない超低NOxバーナとで比較したものの

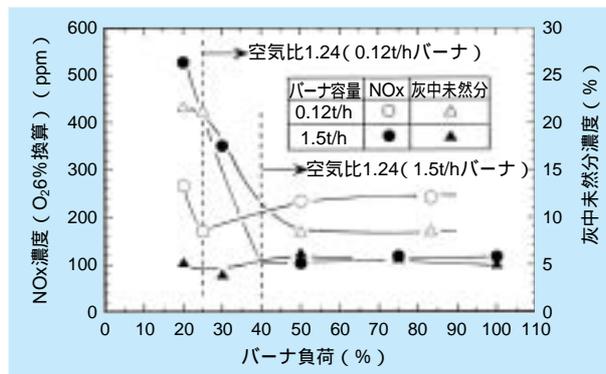


図7-3-7 バーナ容量の差異が燃焼特性に及ぼす影響

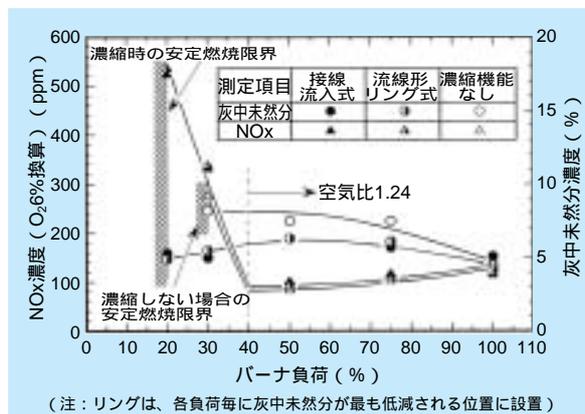


図7-3-8 大容量バーナにおける性能比較

である。

濃縮機能を持つ超低NO_xバーナは、いずれの濃縮形式でも目標とした20%負荷での安定燃焼が可能であり、また、100%負荷では濃縮機能を持たない超低NO_xバーナとほぼ同等のNO_x濃度、灰中未燃分濃度を維持している。負荷を減少させた中間負荷帯では、NO_x濃度は濃縮機能の有無によらずほぼ同等になるが、灰中未燃分濃度は濃縮機能を持つ場合の方が大幅に低減でき、その差は、低負荷になるほど大きくなった。これより、濃縮

機能を持つ超低NO_xバーナは、ワイドレンジバーナと超低NO_xバーナの両方の優れた機能を有すことに加え、中間負荷帯での灰中未燃分の低減にも大きな効果を有することが明らかになった。この特性は、濃縮方式によらずほぼ同一であるため、実機への適用に際しては、バーナの設置スペース、給炭管との接続、加工の容易さ等の要素も考慮して、設置しやすい方式を選定すれば良いと思われる。

7 - 4 今後の展開

今後も、微粉炭火力に対する負荷調整機能の要求は益々強くなっていくものと思われる。発電所によっては、毎日起動・停止操作を行うDSS運転なども要求されるようになると考えられている。

その場合に最も重要な機能としては、本章で述べた低負荷時の燃焼安定性の改善技術、NO_x・灰中未燃分排出量の抑制技術ならびに、負荷追従性の高い燃焼技術だと考えられる。これに対する方策としては、低負荷時あるいは負荷変化時において、微粉炭濃度を適性値に調整する機能が最も重要である。最低負荷に関しては、ワイドレンジバーナ、超低NO_x・ワイドレンジバーナのいずれもが、20%という極めて低いバーナ負荷においても安定燃焼可能であり、十分な機能を有していると言える。特に、超低NO_x・ワイドレンジバーナは、40%負荷までNO_xと灰中未燃分の濃度を定格負荷時とほぼ同等で維持できるなど、低負荷であっても一定負荷運転に対しては非常に高い性能を有している。今後は、一層のNO_x・

灰中未燃分の低減を図ると共に、負荷変化時の濃度変動に対して、如何に速やかにその変動を検知し、バーナ操作条件を追従させるかなど、さらなる機能向上が重要になるとと思われる。また、近年微粉炭火力の利用石炭種が多様化しているため、燃焼性の悪い石炭に対しても十分な低負荷運転、負荷追従運転が可能になるように技術を高度化する必要がある。

なお、低負荷時にはミルも低負荷運転を行わざるを得なくなるため、その粉碎部の摩耗等、周辺技術も問題になってくると考えられる。これらの課題は低負荷運転の比率が高くなり、運転時間が長くなるほど、一層重要になってくるものと思われるが、少なくとも運転の初期から生じるほど極端な問題ではないと思われ、長期間に亘っての全体コストを総合的に評価した時に、どういう対策を施すのが最適であるか、あるいは摩耗部の交換頻度を多くすることで対処できるのか、などの観点から判断すべき課題と考えられる。

コラム 2 : 微粉炭濃度・粒度計測技術

微粉炭火力発電所の中間負荷運用に当たっては、低負荷時にも安定燃焼できることが不可欠である。当研究所では、これに対応する技術として、低負荷時に濃度が低くなる微粉炭流を濃縮して安定かつ低NO_x燃焼が可能なワイドレンジバーナの開発を行なって来た。このバーナは、噴出する微粉炭を燃焼に最適な濃度に制御するものであり、負荷の低下に伴って低濃度となる微粉炭流の濃縮条件を把握することが必要となる。条件把握のためには、バーナに送られる微粉炭の濃度と共に、その粒度も必要であることから、これらのオンライン計測システムをワイドレンジバーナと共に開発した。

濃度・粒度オンライン計測システムは、図に示すように燃料管から微粉炭を管内流速と等しい速度でサンプリングし、濃度を検出した後、粒度検出器に導く構成とした。

濃度検出器は、微粉炭濃度の制御用として応答性が速く、連続かつ簡易に信号検出できる差圧式粉体流量計を採用することとした。採用に当たっては、ボイラ微粉炭用として低濃度領域まで測定できるように改良した。一方、粒度検出器としては、大きい粒子から小さい粒子をルーバ型分級器2段とサイクロン型分級器2段とで粒子径別に捕集して、その粒子径と捕集率とから粒度分布を求めめる方法を開発した。

これら改良・開発した計測機器をシステムアップして、当研究所の石炭燃焼試験炉で濃度検出器および粒度検出器の基礎特性評価を行い、精度良く測定できることを検証した。さらに、本計測システムを、微粉炭火力発電所のボイラの微粉炭計測に用い、実機の微粉炭濃度・粒度計測にも充分適用できることを明らかにした。

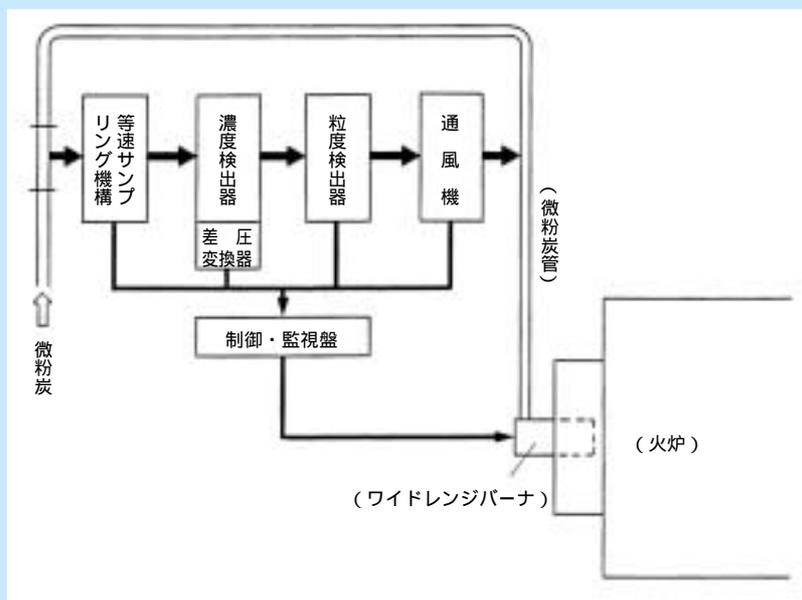


図 微粉炭濃度・粒度自動監視装置システムフロー

第 8 章

8

微粉炭火力用燃料の
多様化



CS推進室 受託推進グループ 部長 牧野 尚夫
 横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 池田 道隆
 横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 日恵井佳子
 横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 神田 英輝
 横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 小野 哲夫

8 - 1 研究の背景 89
 8 - 2 低発熱量炭の利用 89
 8 - 3 難燃性石炭の利用 95
 8 - 4 今後の展開 97
 コラム3：高灰分炭・高水分炭の改質技術 98
 コラム4：CWM乾式製造技術 99

牧野 尚夫（10ページに掲載）
 （8-1、8-3、8-4執筆）



池田 道隆（1994年入所）
 微粉炭の低 NO_x 燃焼技術および低負荷
 対応燃焼技術の開発に携わった後、高水分あ
 るいは高灰分の低品位炭や、高燃料比炭を対
 象に、それらに適した微粉炭燃焼技術の開発
 を行ってきました。現在は、亜瀝青炭の高度
 燃焼技術の開発に従事しています。
 （8-2執筆）



日恵井佳子（1996年入所）
 今まで石炭の高品位化研究や固体電解質形
 燃料電池部材の研究等を実施してきました。
 現在は、そのままでは直接利用できない高灰
 分炭なども、発電所で利用可能にする脱灰技
 術について検討を行っています。今後は、こ
 の脱灰技術開発を通して、火力発電技術にお
 ける利用可能炭種の拡大、ならびに発電コス
 トの低減に貢献していきたいと考えています。
 （コラム3執筆）



神田 英輝（2000年入所）
 入所以来、高灰分炭から簡易に脱灰する技
 術の開発に取り組んできました。現在は、低
 コストで省エネルギーな脱水プロセスを実現
 するため、亜瀝青炭・褐炭の脱水技術に取り
 組んでいます。また、石炭灰を輸送する過程
 で、石炭灰の流動性が悪化する「固着現象」
 を防止するための研究にも従事しています。
 （コラム3執筆）

小野 哲夫（76ページに掲載）
 （コラム4執筆）

8 - 1 研究の背景

現在、我が国の微粉炭火力においては、発熱量が6,500～7,000kcal/kgと高く、燃料比が1.0～2.5程度の適切な燃焼性を持ち、水分含有率が10%以下でかつ、不燃の灰分含有率が5～20wt%程度の瀝青炭が用いられている。しかし、今後の発展途上国のエネルギー需要の増大、石炭輸出国の供給能力の上限、などを考えた場合、現在使用している瀝青炭の供給が次第にタイトになってくる可能性も懸念されている。

このような状況の中で、一層の燃料供給力強化の観点から、現在の微粉炭火力で使用されている石炭の性状範囲を外れた石炭種についても、その利用を可能にするための技術開発が重要になってくると考えられている。既に4章で述べたように、当研究所では未利用の石炭種の適用可能性を判定する手法を開発しているが、今後は、さらに性状の大きく異なる石炭、すなわち低発熱量の低品位炭や、難燃性の高燃料比炭などの利用も考慮しなければならず、その場合には、それらに適した新たな燃焼技術の開発等も必要になる。

発熱量の低い低品位炭の中でも、褐炭・亜瀝青炭等の高水分炭は非常に埋蔵量が多く、また、一般的には灰分含有率が少ないことにより灰処理量が少なくなる、などのメリットもあるため、未利用の石炭種の中でも今後重

要な燃料として特に注目されている。

高水分炭の燃焼特性を検討する上では、石炭中の水分が、石炭中に含まれたまま液状の水分として火炉に注入される場合と、粉砕機で粉砕する際に石炭から分離・蒸発してガス状になって火炉に注入される場合とを区別して評価する方が現象を正確に捉えやすい。当研究所では、これらの燃焼特性への影響評価を詳細に行うと共に、その燃焼性を改善するための燃焼条件の開発ならびに、実機において最も容易な適用形態である瀝青炭との混炭燃焼時の特性解明を行っている。

高灰分炭は、高水分炭ほどの賦存量はないものの、アジアに多く産出するなど、我が国の燃料として有望な側面を有している。但し、その利用にあたっては、灰分量の増大に伴う、燃焼性の低下、石炭灰排出量の増大などの問題点がある。当研究所では、石炭中灰分のNO_x生成特性や燃焼効率への影響解明を行ってきている。

一方、難燃性の高燃料比炭は、着火性が悪くNO_xも生成しやすいなどの欠点を持つ反面、発熱量が高いため輸送コストが相対的に安くなるなどのメリットも有している。当研究所では、着火性、NO_x・灰中未燃分の生成特性を中心に高燃料比炭の燃焼特性を評価すると共に、瀝青炭との混炭燃焼時の特性を明らかにしている。

8 - 2 低発熱量炭の利用

今後のエネルギー源強化の上で、水分や灰分が多く発熱量の低い低品位炭を微粉炭火力で利用するためには、水分や灰分が微粉炭燃焼特性に及ぼす影響を把握しておく必要がある。

当研究所では、石炭燃焼量100kg/h（瀝青炭ベース）の石炭燃焼試験炉を用いて、高水分炭および高灰分炭の微粉炭燃焼特性について評価しており、中でも埋蔵量は瀝青炭に次いで多いが水分を多く含む亜瀝青炭については、その燃焼技術を開発している。

8 - 2 - 1 高水分炭の燃焼特性

高水分炭には、亜瀝青炭、褐炭などの炭化が進んでいない石炭が含まれる。特に、亜瀝青炭は埋蔵量が多く発熱量も約5,000kcal/kg（20MJ/kg）と比較的高いため有望な燃料として期待されているが、水分含有率が高いため着火性が悪いなどの問題点がある。当研究所では、亜瀝青炭の微粉炭燃焼特性を評価し、バーナ操作条件などの燃焼調整により、着火性の改善およびNO_xと灰中未燃分排出量の低減を図ると共に、最も利用しやすい形

態である瀝青炭との混炭燃焼時の特性も明らかにした。ただし、これらの評価にあたっては、亜瀝青炭中の水分がどういう状態で火炉に流入するかを明らかにする必要がある。すなわち、ミル内で蒸発して気体状でバーナから噴出するか、石炭中に水分として存在するかで、その影響は異なる。当研究所では、それぞれの影響を詳細に評価するため、水分の形態を変化させて検討を行っている。

亜瀝青炭専焼時の燃焼特性

瀝青炭に適したバーナ操作条件下における亜瀝青炭の燃焼特性

瀝青炭燃焼時と同様のバーナ操作条件で、亜瀝青炭を燃焼させ、微粉炭燃焼特性を評価した。図8-2-1に火炉内に投入する全水分濃度(火炉内水分供給量/無水基準石炭供給量)は0.67と一定で、微粉炭中水分濃度(微粉炭中水分供給量/無水基準石炭供給量)とガス状水分濃度(火炉内蒸気供給量/無水基準石炭供給量)が異なる場合の火炉内のO₂濃度分布を示す。亜瀝青炭は瀝青炭に比べ、着火が遅くなると共に、火炎が広がる特徴を持ち、特に、その傾向は、微粉炭中水分濃度が高くなるほど大きくなった。着火が遅れる原因としては、亜瀝青炭に多く含まれる水分が酸素分圧を下げると共に、液状の水分はバーナ直後で蒸発するためにバーナ近傍での温度が低下することが挙げられる。この温度低下は微粉炭中水分濃度が高いほど大きくなるので一層着火が遅れると考えられる。また、火炎が拡散した原因としては、亜瀝青炭は密度が小さいことに加え、火炉内で微粉炭粒子が水分の蒸発により膨張・破裂するために小さくなり易く、バーナから旋回しながら吹き出す空気により、粒子が拡散し易くなると考えられる。本条件における火炉内中心軸上のNO_x濃度分布は図8-2-2になり、微粉炭中水分濃度が高

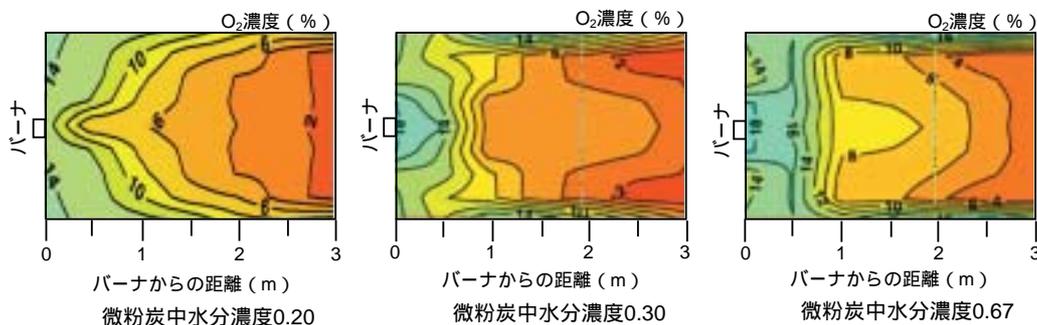


図8-2-1 亜瀝青炭燃焼時の火炉内O₂濃度分布(全水分濃度0.67)

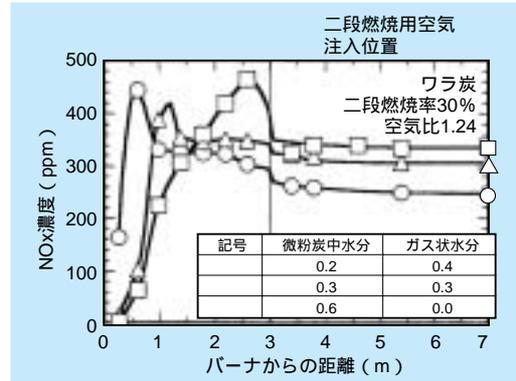


図8-2-2 微粉炭中水分濃度と火炉内中心軸上NO_x濃度の関係

くなるほど、着火が遅れるため、NO_xの生成が遅れると共にNO_xの還元が遅れるため、火炉出口でのNO_x排出量は増大する。すなわち、亜瀝青炭を瀝青炭と同じ条件で燃焼させると着火の遅れと共にNO_x濃度が高くなる問題点が明らかになった。

バーナ操作条件調節による亜瀝青炭燃焼特性の改善

亜瀝青炭燃焼時の問題点である火炎の広がりを抑制する方法としては、バーナから吹き出す空気の旋回を弱める方法が考えられる。そこで、2次空気、3次空気について検討を行い、2次空気の旋回角度を弱めた場合に、燃焼火炎の拡散が抑制されると共に、着火位置がバーナ近傍に近づくことを明らかにした。この際、バーナ近傍の火炎温度が高くなり、非常に安定した火炎が維持できた。図8-2-3には、2次空気旋回角度と火炉出口NO_x濃度との関係を示している。2次空気旋回角度が54degの場合に、火炎の広がりを抑制でき、火炉出口のNO_x濃度が抑制できることが明らかになった。

石炭中水分の粉碎時の蒸発状態が異なる三条件について、バーナ操作条件を最適化した際のNO_x・灰中未燃分排出特性を図8-2-4に示す。NO_xと灰中未燃分の排出

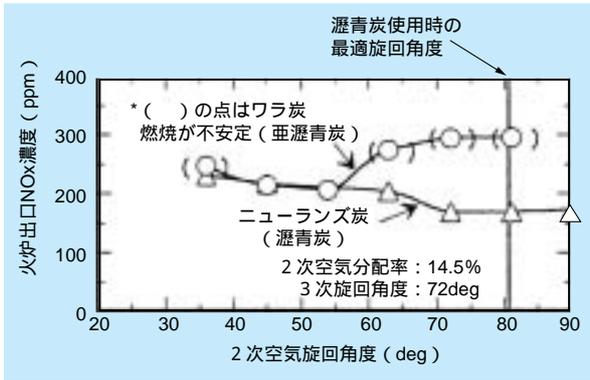


図8-2-3 2次空気回転角度と火炉出口NO_x濃度との関係

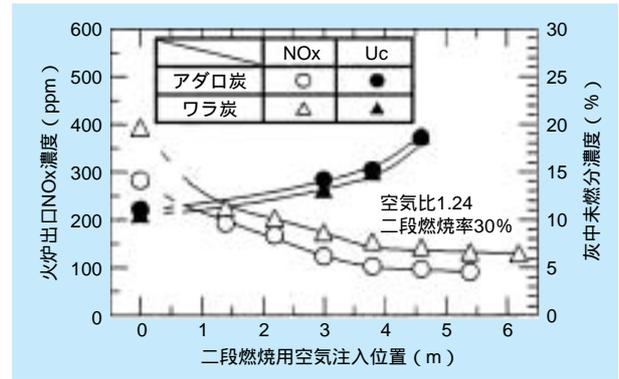


図8-2-5 二段燃焼用空気注入位置とNO_x、灰中未燃分濃度の関係

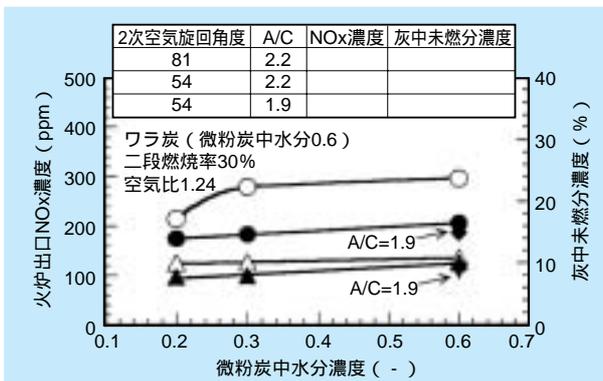


図8-2-4 バーナ操作条件とNO_x灰中未燃分濃度との関係

量は、2次空気回転角度の調整によって低減でき、さらに、1次空気量を低下することで、一層低減できることが明らかとなった。NO_x排出量の低減効果は、最も燃焼性の悪い条件である微粉炭中水分濃度の高い石炭において特に顕著であり、約40%低減できることがわかった。

二段燃焼用空気注入条件の最適化

亜瀝青炭は、瀝青炭と燃焼過程が大きく異なるため、NO_x還元炎の形成状態も異なる。そこで、二段燃焼用空気注入条件の影響も瀝青炭とは異なると思われる。図8-2-5には、二段燃焼率30%の条件で、二段燃焼用空気の注入位置を変化させた場合の火炉出口NO_x濃度と灰中未燃分濃度を示す。火炉出口のNO_x濃度は、瀝青炭燃焼時と同様、二段燃焼用空気の注入位置を後流にするほど、還元領域が広がるために低下するが、バーナから約3.8m離れた位置より後流にすると、その低下傾向は徐々に弱まる。一方、灰中未燃分濃度は、注入位置が後流になるほど増加し、特にその傾向はバーナから約3.8m離れた位置以降で特に顕著になる。これより、

亜瀝青炭燃焼時にNO_x・灰中未燃分の低減に適した二段燃焼用空気の注入位置は、バーナから約3.8mの位置と考えられる。これは、瀝青炭において最適となる位置であるバーナから3.0m離れた位置に比べ、若干、後方となる。亜瀝青炭は、水分の影響により着火が遅れ、NO_xの還元炎の形成なども遅くなるため、瀝青炭より最適注入位置が後方になったものと考えられる。

次に、二段燃焼用空気注入位置を最適値であるバーナから約3.8m離れた位置に固定し、二段燃焼用空気の注入割合がNO_x・灰中未燃分の排出特性に及ぼす影響を評価したものを図8-2-6に示す。NO_x濃度は、二段燃焼率の増加に応じて、低減するものの、その効果は二段燃焼率30%以上で飽和する。一方、灰中未燃分濃度は、逆に、二段燃焼率の増加に応じて上昇し、二段燃焼率が40%まで増加すると、着火が不安定となり、それ以上の二段燃焼率では急激に上昇する。また、二段燃焼率

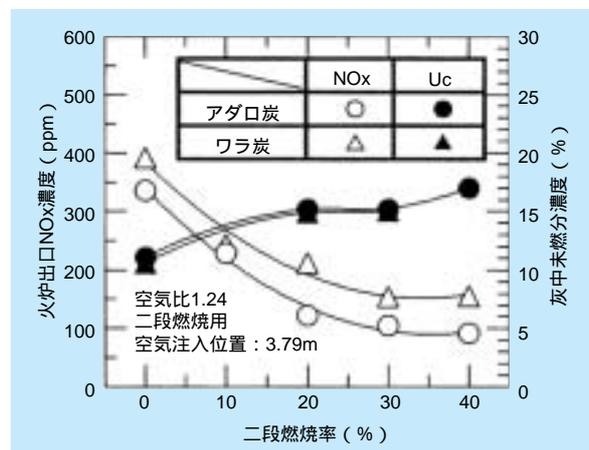


図8-2-6 二段燃焼率と火炉出口NO_x濃度、灰中未燃分濃度の関係

20%と30%では、灰中未燃分濃度はほぼ同一であった。これは、二段燃焼率20%の条件は、30%時に比べ、バーナからの空気供給量が多く、強い旋回流が形成され、微粉炭が火炉内の外周部側に拡散しやすくなるため、十分な燃焼促進が図れなかったと考えられる。これらの結果から、亜瀝青炭燃焼時に最適となる二段燃焼率は、瀝青炭燃焼時同様30%であることが明らかになった。

図8-2-7には、亜瀝青炭燃焼時にバーナ操作条件および二段燃焼用空気注入条件を最適化した際のNOx・灰中未燃分の排出特性を示す。亜瀝青炭に適した燃焼条件に設定することにより、NOxおよび灰中未燃分の濃度を大幅に低減でき、瀝青炭燃焼時とほぼ同等の水準にまで低減できる。

すなわち、亜瀝青炭に適した燃焼条件は、バーナ部において、2次空気の旋回角度を弱め、1次空気の供給量を低くすること、および、二段燃焼用空気の注入位置を瀝青炭燃焼時より後流に変更することであることが明らかになり、このような燃焼条件の調整により瀝青炭燃焼時とほぼ同等の水準までNOxと灰中未燃分を低減できる見通しが得られた。

瀝青炭との混炭燃焼時の特性

混炭燃焼時のNOx・灰中未燃分排出特性

亜瀝青炭の最適燃焼条件は明らかになったが、既設火力発電所において、亜瀝青炭を利用する場合は、当面、低水分の瀝青炭との混炭燃焼が行われる。

当研究所では、瀝青炭に亜瀝青炭を混炭して燃焼させた際のNOx・灰中未燃分排出特性評価を行っている。亜瀝青炭としては、インドネシア産で水分含有率が20%と比較的低いアダロ炭と、水分含有率が40%と高いワラ炭を用いた。

瀝青炭に亜瀝青炭を混炭燃焼した際の火炉出口のNOx濃度とNOx転換率に及ぼす混炭率の影響を図8-2-8に示す。混炭燃焼時のNOx濃度およびNOx転換率は、各炭種を単味で燃焼した時の値に対し、ほぼ混炭率に応じた中間値を示す。

混炭燃焼時の灰中未燃分濃度ならびに未燃焼率に及ぼす混炭率の影響を、図8-2-9に示す。亜瀝青炭を混炭すると、灰中未燃分濃度については瀝青炭燃焼時に比べて

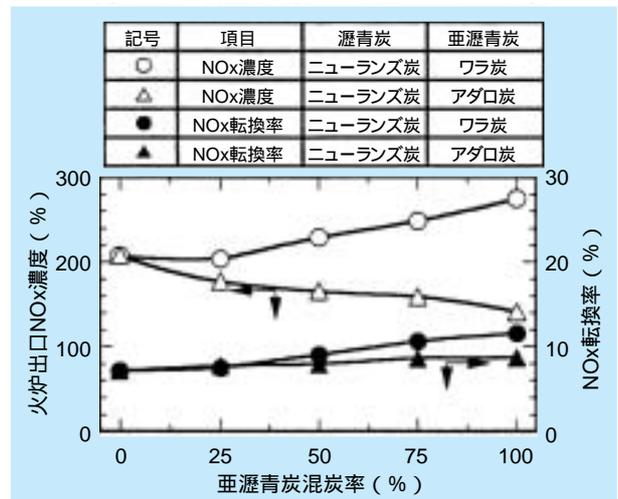


図8-2-8 亜瀝青炭混炭率とNOx濃度、NOx転換率の関係

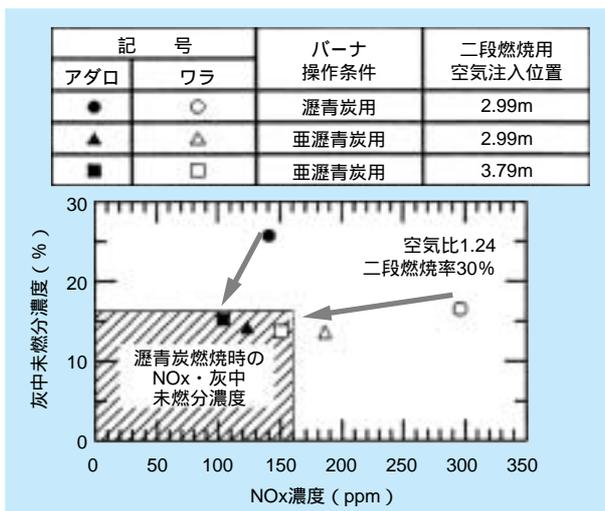


図8-2-7 バーナ操作条件および二段燃焼用空気注入条件を最適化した際のNOxと灰中未燃分の低減効果

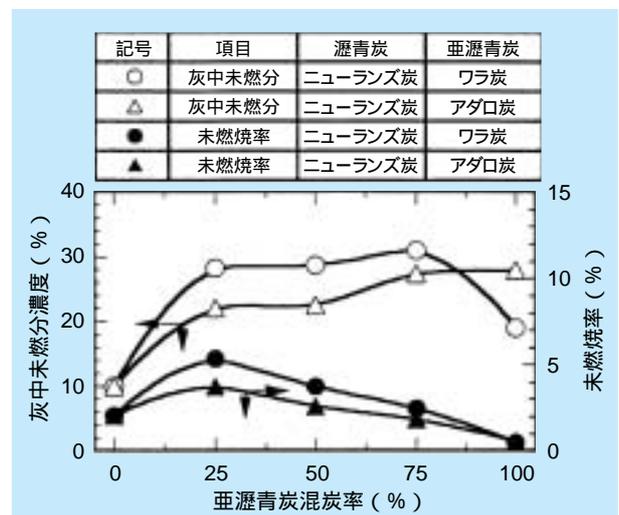


図8-2-9 亜瀝青炭混炭率と灰中未燃分濃度、未燃焼率の関係

大幅に増加し、その際の未燃焼率としては、それぞれの石炭の単味燃焼時のいずれの場合よりも高くなることが明らかとなった。その原因としては、亜瀝青炭中の水分が瀝青炭の燃焼を悪化させたことが挙げられる。すなわち、混炭燃焼時には、亜瀝青炭中の水分が蒸発し、火炎温度を低下させることに加えてO₂分圧が低くなることによって、瀝青炭の燃焼性が大きく悪化したためであると考えられる。

低い混炭率条件における灰中未燃分抑制技術

実機において亜瀝青炭を利用する上で最も多く用いられる条件である混炭率30%以下において、灰中未燃分の上昇を抑制する条件を明らかにするため、瀝青炭、亜瀝青炭それぞれの性状の影響を評価した。

瀝青炭に、水分含有率の異なる二種類の亜瀝青炭（アダロ炭またはワラ炭）を混炭燃焼した場合の灰中未燃分濃度を図8-2-10に示す。いずれの場合も、混炭率の増加に応じて、灰中未燃分が上昇した。これは、亜瀝青炭の混炭率の増加に伴い、火炉に流入する水分量が多くなり瀝青炭の燃焼を悪化させたためと考えられる。また、混炭に用いた亜瀝青炭性状の比較では、水分の多いワラ炭の方が、同じ混炭率では火炉内に持ち込む水分量が多いため、灰中未燃分の増加傾向が大きくなった。これらの結果を、火炉に流入する水分量との関係で示すと図8-2-11のようになる。混炭に用いた亜瀝青炭の性状が異なっても、その瀝青炭の燃焼悪化への影響は、ほぼ流入水分量を知ることで把握できることが、明らかになった。

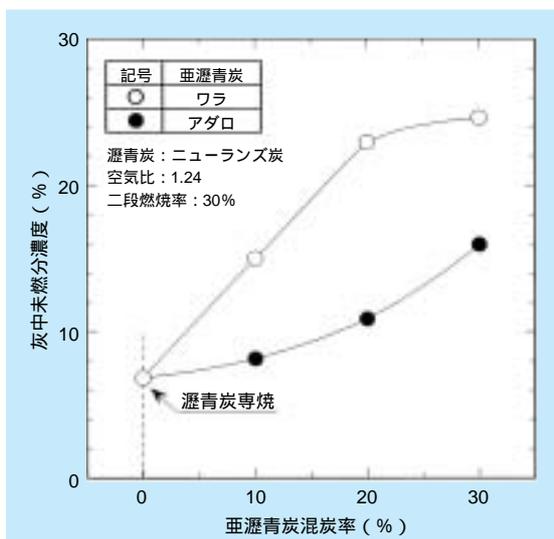


図8-2-10 亜瀝青炭混炭率の灰中未燃分濃度への影響

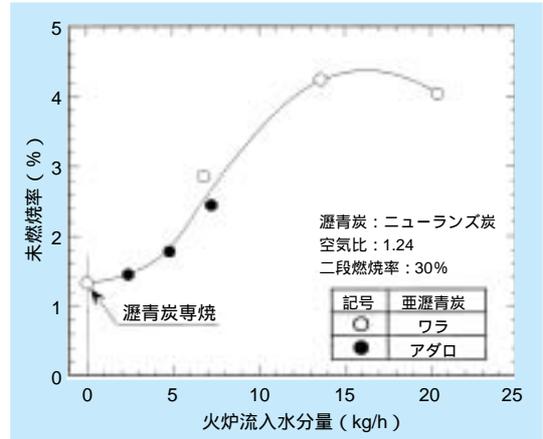


図8-2-11 火炉に流入する水分量と未燃焼率の関係

た。

図8-2-12は、燃料比の異なる三種の瀝青炭を亜瀝青炭と混炭燃焼した際の灰中未燃分濃度を示している。燃料比の高いニューランス炭を用いた場合は、亜瀝青炭を混炭したことによる灰中未燃分濃度の増加が顕著であり、瀝青炭の燃料比が低くなるのに応じてその傾向は弱まる。特に、燃料比が亜瀝青炭とほぼ同等の太平洋炭では、混炭燃焼時にも灰中未燃分はほとんど増加しない。すなわち、亜瀝青炭混焼による瀝青炭の燃焼効率低下への影響は、燃焼性の悪い瀝青炭ほど大きくなることが明らかになった。

亜瀝青炭の混炭率が30%までの瀝青炭との混炭燃焼時においては、図8-2-13に示すように亜瀝青炭の水分含有量が多くなるほど、あるいは瀝青炭の燃料比が高くなるほど、灰中未燃分濃度が高くなる傾向を持つため、

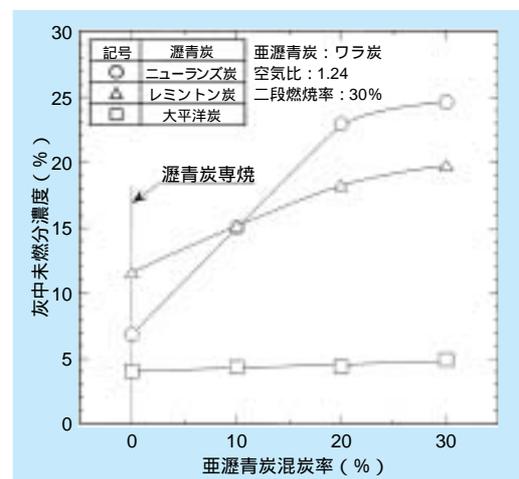


図8-2-12 燃料比の異なる3種の瀝青炭における亜瀝青炭混炭率と未燃焼率の関係

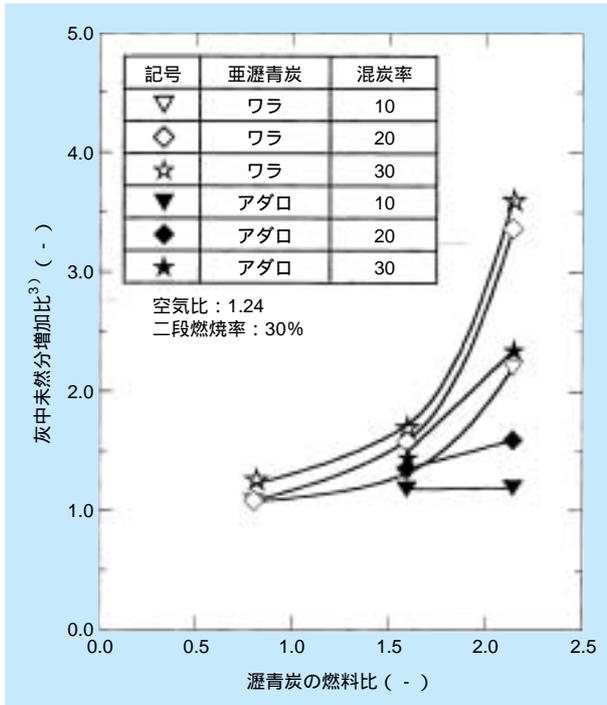


図8-2-13 瀝青炭の燃料比と灰中未燃分増加比の関係

亜瀝青炭中の水分濃度に応じて低燃料比の瀝青炭を組み合わせるなど適切な混炭対象を選定することで灰中未燃分濃度の増加を抑制できることが明らかになった。

8-2-2 高灰分炭の微粉炭燃焼特性

高灰分炭の微粉炭燃焼への適性を明らかにするために、灰分含有率が異なる高灰分炭を用いて、灰分含有率がNO_x・灰中未燃分排出特性に及ぼす影響および二段燃焼時のNO_x低減効果に及ぼす影響について評価した。

当研究所の石炭燃焼試験炉において、灰分含有率が36、44および53wt%と異なる三種の池島炭を使用した。この際、無水無灰ベースにおける可燃分の組成がほぼ同じである。

図8-2-14は、非二段燃焼時（二段燃焼率0%）の灰分含有率と火炉出口NO_x濃度、灰中未燃分濃度および石炭中の可燃分が燃え残った割合である未燃焼率との関係を示したものである。灰分含有率の増加に伴い、NO_x濃度は高くなり、一方、灰中未燃分濃度は減少するものの未燃焼率は増加する。これは、灰分含有率の増加に応じて、可燃分が灰分に覆われやすくなり、燃焼が遅れると共に、NO_xの還元炎形成も不十分となったことによると思われる。なお、灰中未燃分濃度は、灰の重

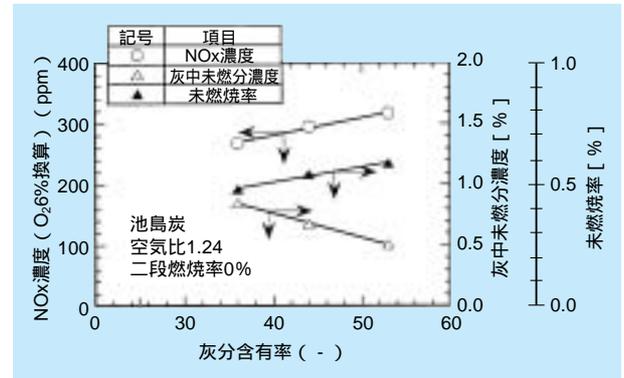


図8-2-14 灰分含有率とNO_x・灰中未燃分濃度および未燃焼率の関係

量に対する未燃炭素分の割合であるため、灰分含有率が上昇すれば、未燃焼率が増加し、未燃炭素分が多くなっても、その増加分は灰分量の増加に比べて少なく、見かけ上は減少する。このため、灰中未燃分濃度は減少する。図8-2-15に火炉中心軸上のO₂およびNO_xの濃度分布を示すが、灰分含有率の増加に応じて、O₂の消費が遅れると共に、NO_xの生成・分解は遅くなっていることが明らかである。

図8-2-16に二段燃焼率30%時のNO_x低減率および未燃焼率増加比を示す。灰分含有率の増加に応じて、燃焼が遅れ、二段燃焼用空気注入位置までの還元領域が減少するため、NO_x低減率が減少し、二段燃焼によるNO_xの低減効果は弱まる。一方、未燃焼率増加比は、二段燃焼時の方が非二段燃焼時に比べ、バーナ近傍での酸化雰囲気弱まり、熱分解反応が抑制されるため、灰分含有

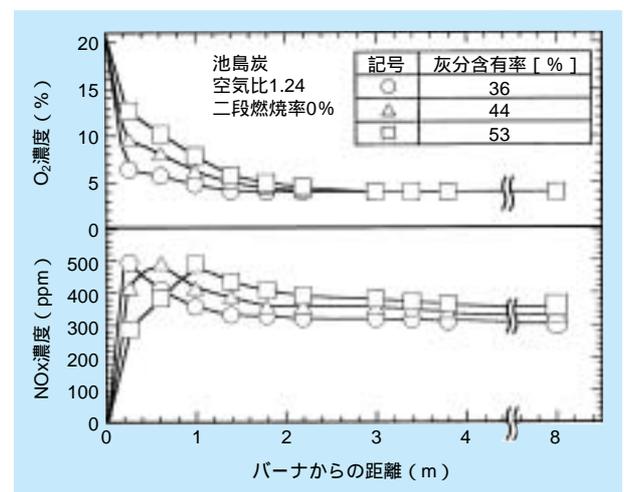


図8-2-15 火炉中心軸上のO₂およびNO_x濃度分布

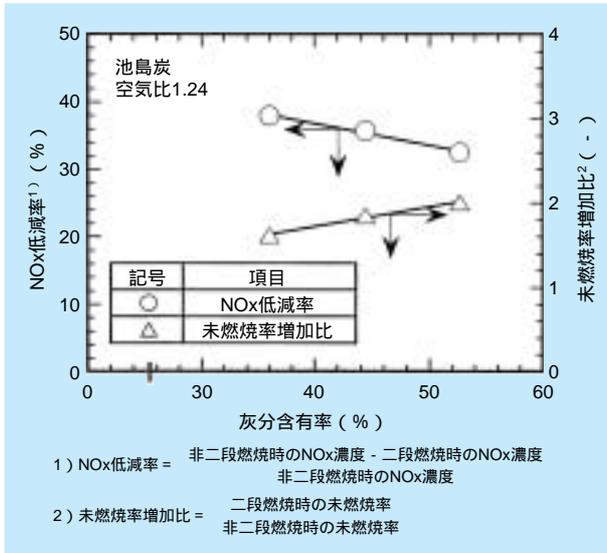


図8-2-16 二段燃焼率30%時のNOx低減率および未燃焼率増加比に及ぼす灰分含有率の影響

率の増加に伴い高くなる。

以上のことから、高灰分炭燃焼時のNOx濃度および未燃焼率は、灰分含有率の増加に応じて高くなり、二段燃焼時にはNOxの低減効果が弱まると共に、未燃焼率の増加傾向は強くなるのがわかる。

8 - 3 難燃性石炭の利用

高燃料比炭は、揮発分が少なく燃料比が高いために、着火性、燃焼性が悪いことが大きな課題である。高燃料比炭の特性を評価するにあたっては、まず着火性を明らかにした。

図8-3-1には、安定燃焼範囲に及ぼす燃料比の影響を示す。本図では、火炎が吹き飛び、着火位置がバーナ口

から離れた場合を安定燃焼限界と定義している。バーナタイプとしては、既存の低NOxバーナと、6-3節で特性を紹介した、当研究所が微粉炭燃焼時のNOx生成量を大幅に低減させるために、石川島播磨重工業㈱と共同で開発した新型低NOxバーナ(CI-バーナ)の二種類を用いた。いずれのバーナにおいても、燃料比が高くなるほど着火性は悪くなり、燃料比5以上の高燃料比炭では既存低NOxバーナ使用時は、バーナ負荷を定格から若干下げただけで失火した。これに対し、CI-バーナは、バーナ近傍に再循環流を形成し、微粉炭粒子の高温場での滞留時間を長くできる構造であるため、既存低NOxバーナに比べ、着火を大幅に改善でき、安定燃焼範囲の拡大が図れることが明らかになっている。

高燃料比炭燃焼時のNOx転換率を、瀝青炭との比較として図8-3-2に示す。瀝青炭の場合と同様、燃料比が大きく窒素含有率が少ない石炭種ほどNOx転換率は増加するが、高燃料比炭になるほどその上昇傾向は弱まっている。これは燃料比の定義(固定炭素/揮発分)から見て、揮発分含有率(固定炭素含有率に対しても同様)の若干の変化で燃料比に大きな差異が生じてしまうため、その影響が小さく見える傾向を持つことによる。

本図は、非二段燃焼条件について示しているため、バ

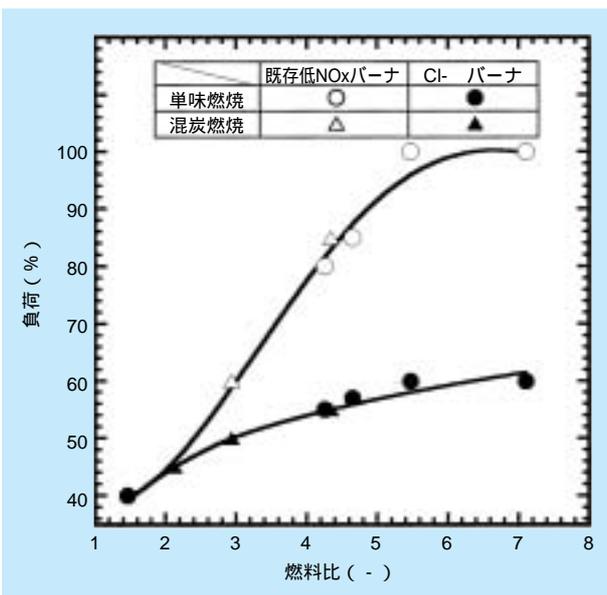


図8-3-1 安定燃焼範囲に及ぼす燃料比の影響

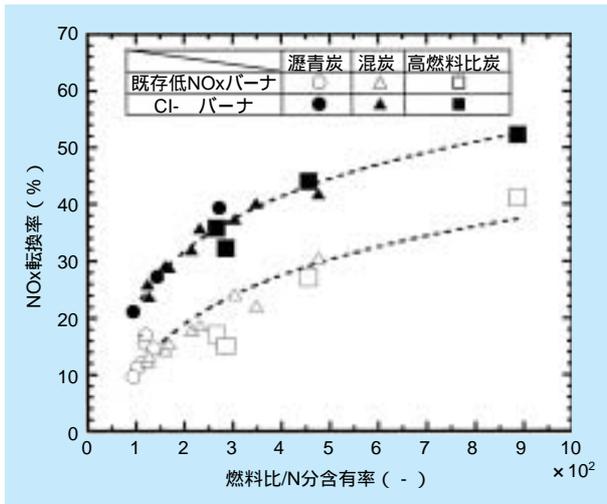


図8-3-2 高燃料比炭燃焼時のNOx転換率

バーナ近傍での燃焼を促進させるCI-バーナの方がNOx転換率が高くなっているが、本バーナは二段燃焼時のNOx低減効果が大きいため、実機の運転条件である二段燃焼時のNOx転換率は既存バーナより低くなる傾向が明らかになっている。また、未燃焼率は瀝青炭と同様、図8-3-3に示すように燃料比が高いほど増大する傾向を

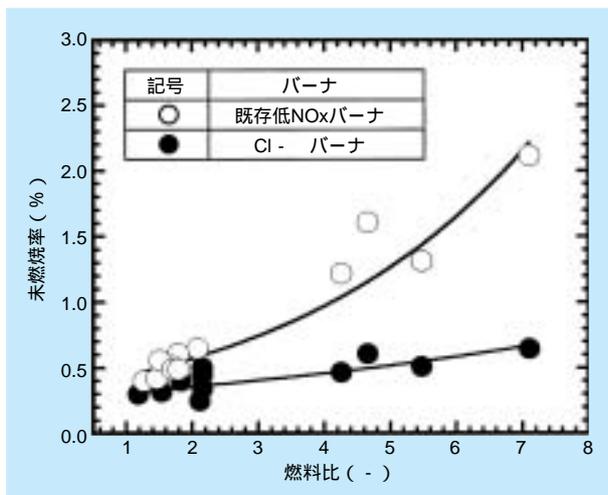
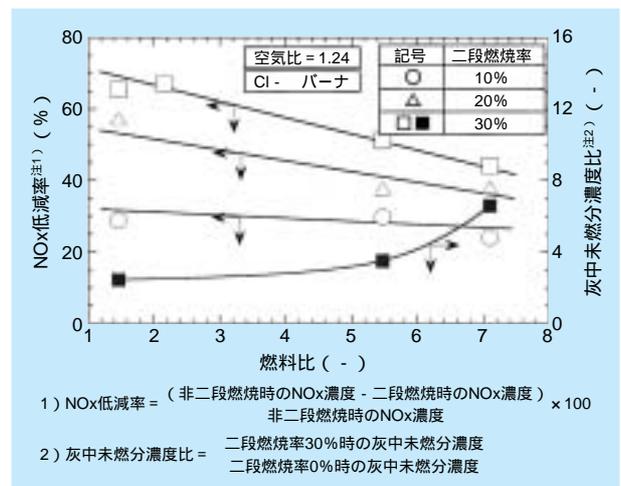


図8-3-3 高燃料比炭燃焼時の未燃焼率

持っている。

低NOx燃焼のため二段燃焼を適用した場合には、図8-3-4に示すように、燃料比が高くなるほどバーナ近傍での酸素消費が遅れることに起因して還元領域が小さくなると共に、NH₃、HCN等のNOxを還元する物質の発生量が少なくなるため、二段燃焼によるNOxの低減効果は瀝青炭に比べ低下する傾向となる。さらに、非二段燃焼条件時に比べ、二段燃焼時の方が、燃料比の増加による未燃焼率ならびに灰中未燃分濃度の増加傾向が顕著になっている。この原因は、上述のように燃料比の増加による燃焼場での酸素消費の遅れが、バーナ回りの空気比の低い二段燃焼時に、一層大きく燃焼性の悪化に影響したものと考えられている。

高燃料比炭の利用にあたっては、バーナ近傍の燃焼が促進できるバーナを用いることにより着火性が改善でき、また、NOx還元炎も速やかに形成できるためNOxを抑制できる。混炭時においては、燃料比の低い石炭を混炭相手に用いることにより、NOxと灰中未燃分の低減が図れると思われる。



- NOx低減率 = $\frac{\text{非二段燃焼時のNOx濃度} - \text{二段燃焼時のNOx濃度}}{\text{非二段燃焼時のNOx濃度}} \times 100$
- 灰中未燃分濃度比 = $\frac{\text{二段燃焼率30\%時の灰中未燃分濃度}}{\text{二段燃焼率0\%時の灰中未燃分濃度}}$

図8-3-4 二段燃焼時の燃焼特性に及ぼす燃料比の影響

8 - 4 今後の展開

石炭火力の、エネルギー源の一層の強化の観点からは、未利用炭を活用できる技術の確立が非常に重要である。

最も賦存量の多い高水分、低発熱量の亜瀝青炭は、含有される水分による燃焼効率低下、NO_x生成量の増大など、微粉炭燃焼場への適用にあたって若干の難点は有しているものの、その燃焼特性を明らかにすることにより、NO_x・灰中未燃分を低減できる燃焼条件が解明されつつある。また、当面の利用形態と目される瀝青炭との混炭燃焼時には、既に、実機で最も良く利用される混炭率30%までの条件では、ほぼ瀝青炭専焼時のNO_x・灰中未燃分排出特性レベルに調整できる炭種選定方法を明らかにした。今後は、より質の悪い亜瀝青炭を用いた場合や、混炭率が高くなった場合にも、同等のNO_x・灰中未燃分排出特性を達成できる燃焼技術を開発する必要があると思われる。

高灰分炭、高燃料比炭についても、その燃焼時の特性はほぼ明らかにされており、今後の利用拡大にあたって解決すべき課題等も明確になっている。利用可能性が高いのは高灰分炭よりも高燃料比炭であると思われるが、

瀝青炭との混炭燃焼を有効に用いることにより、その適用は十分可能になると思われ、混炭時の炭種選定方法や燃焼条件調整法の確立などが重要になる。

微粉炭火力の燃料多様化における、当研究所の今後の計画としては、特に賦存量の多い亜瀝青炭を主な対象とし、その燃焼特性を一層詳細に解明することにより、利用可能な石炭性状範囲の拡大や、より高い混炭率あるいは亜瀝青炭専焼時の、NO_x・灰中未燃分を大幅低減可能な燃焼技術を開発する予定である。一方、近年、低品位炭などを使い易くするための脱灰・脱水技術を中心とする改質技術開発が進められており、直接利用できないほど品位の低い石炭も、これらの技術の採用により利用可能となっている。このような改質炭の燃焼技術の開発を行うことにより、一層、燃料源の多様化も図れるようになると思われる。

また、バイオマス、廃棄物など化石燃料以外の可燃性の固体を利用することも重要になってくると思われ、今後は、これらについても燃焼特性を明らかにすると共に、燃料としての利用可能性を拓げていく予定である。

コラム3：高灰分炭・高水分炭の改質技術

なぜ、低品位炭の改質なのか？

将来の石炭の安定供給やコストの低減を一層進めるためには、これまで山元でしか利用されなかった高灰分炭や高水分炭などの発熱量の低い低品位炭の利用を拡大する必要がある。一般に、低品位炭は安価だが、燃焼性や輸送性が悪く、ハンドリングが難しい等、我が国で利用するには課題が多い。このため、低品位炭を本格的に導入するには、山元で安価に灰分や水分を取り除き、高品位な瀝青炭並みの性状に改質する手法の開発が有益である。

高効率脱灰の可能性を探る

石炭の一般的な脱灰法として、灰分の比重が可燃分よりも大きいことを利用し、溶液の上に浮かぶ軽い可燃分を回収し、溶液中に沈む灰分を分離・除去する“比重分離法”や、空気の泡をバブリングさせた溶液に石炭を投入後、泡に付着した可燃分を回収し、水中に留まる灰分を除去する“浮選法”などがある。これらの物理的方法は、多量の石炭を処理することは可能であるが、脱灰性能や可燃分の回収性能が低い点に難がある。一方、灰分を薬品等で溶かして除去する化学的方法は、高い脱灰率が得られるものの、薬品コストや排液処理の負担が大きいことが課題である。

高灰分炭を高品位な瀝青炭程度まで簡易かつ低コストに脱灰するためには、粉碎方法を工夫し、石炭を効率よく可燃分と灰分に分離（単体分離）する手法を開発する必要がある。単体分離の性能は、石炭中に分布する灰分の分布状態に関係する。当研究所では、石炭中灰分分布は、粒状a、筋状b、あるいは雲状（細かい灰分の集合）cに大別されることを明らかにし（図1）、粒子径が大きく、粒状の灰分を多く含む石炭ほど脱灰し易いことを解明している。今後は、石炭中灰分の分布状態に適した粉碎方法を明らかにし、脱灰性能を向上して行く予定である。

新たな省エネ脱水法を考案！

石炭中の水分を除去する方法としては、石炭を加熱して、水分を単純に蒸発させる“蒸発法”（スチームチューブドライヤー等）が最も簡単であるが、水の蒸発にエネルギーを要することが大きな問題である。この蒸発法の中で、石炭と油の混合スラリーを加熱して、石炭の水分を蒸発させた後、水の蒸発潜熱を効率的に回収する“油中改質法”

が、所要エネルギーが最も少ないと考えられているが、本格的な実用に至るまでの低動力化は図られていない。

当研究所では、水分の加熱や蒸発を不要とし、所要エネルギーの節約が可能な新たな石炭脱水法の開発を試みている。これは、わずかな加圧で液化できる有機溶剤に石炭中の水分を溶かして分離し、その後減圧して、有機溶剤を蒸発させることで、有機溶剤と水分とを分離する溶剤置換法である。

水の溶解度が高い液化DME（ジメチルエーテル）を有機溶剤として用いた場合の、プロセスの評価（図2）を行い、脱水エネルギーを大幅に低減できることを明らかにした。今後は、石炭から分離された排水の処理方法の開発や、脱水と排水処理に伴うエネルギー低減について検討を行い、本技術の実用化に向けた課題の解決を行う予定である。

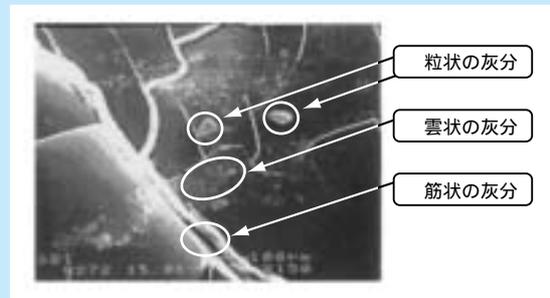


図1 石炭中灰分の分布状態（ラマグンダム炭）

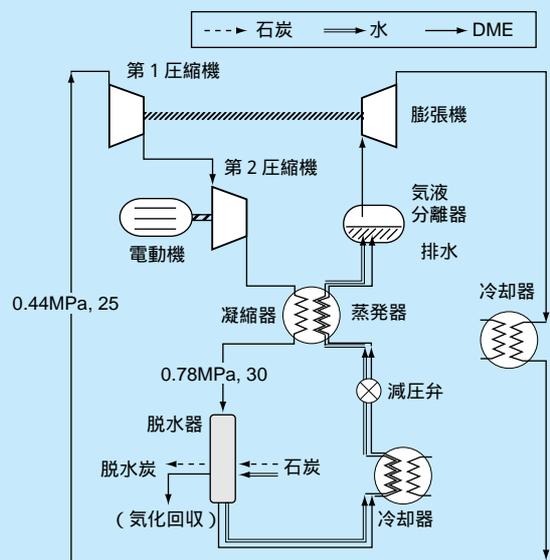


図2 液化DMEを用いた脱水プロセスの概要

コラム4：CWM乾式製造技術

石炭の流体化による利用

ハンドリングが比較的困難な微粉炭を擬似流体化し、パイプライン輸送やタンク貯蔵を可能とする技術の一つに、高濃度石炭水スラリー（Coal Water Mixture；CWM）がある。このCWMは石炭と水を7：3の比率で混合したもので、高濃度で流動性を得るために石炭粒子の幅広い粒子径分布への調整が必要なことと、界面活性剤の利用による石炭の親水性改善が主要技術となっている。しかし、既に開発されている湿式製造法では、

の粒子径分布の調整を湿式ボールミルの長時間粉砕によって行なうため効率が悪いこと、また、の界面活性剤は使用量が4～10kg/t-coalにもかかわらず単価が比較的高いこと等が、コストを押し上げる要因となっている。したがって、CWMコスト削減のためには、これらの課題の解決が必要である。

当研究所では、低コストCWM製造の実現のため、乾式粉砕した微粉炭から製造する乾式製造法の開発に着手した。しかし、乾式粉砕した微粉炭の粒子径分布では細かな微粒子が不足して流動性が悪いことから、微粉炭の角取り球状化による幅広い粒子径分布への調整技術を開発した。さらに、界面活性剤使用量の削減については、保護コロイド利用によって使用量を半減する技術を開発した。

これらの技術開発によって乾式製造法を確立し、CWMコストの大幅低減を可能とした。

角取り球状化による細かな微粒子の生成

微粉炭の幅広い粒子径への調整は、微粉炭が角

張った多角形となっている形状に注目して、この角を削り取って、細かな微粒子を生成させる方法を考案した。この角取り球状化を、粒子同士あるいは粒子と粉砕機の粉砕歯とが擦り合う磨砕によって行なうための、図に示すような角取り球状化装置を新たに開発した。

微粉炭は同装置での角取り球状化時にスラリー用水を供給することによって、粒子径分布の調整がなされると共に水との混練がなされ、効率的にCWMが製造される。

コロイド科学による界面活性剤使用量の削減

CWMにおける界面活性剤の役割は、a疎水性の石炭の親水化、およびb石炭粒子の分散・凝集防止であることから、この内の前者を極く微量の保護コロイド（1ppt～ppm）に担わすことによって、その使用量を削減した。

この保護コロイドをスラリー用水に添加することにより、角取り球状化によって粒子径調整された石炭粒子はゲルを形成する。これに、界面活性剤を滴下して攪拌によってゾル化を図り、流動性のあるCWMとする。このとき、用いる界面活性剤の量は湿式製造法の半分以下でよいことが明らかになり、使用量の削減が可能となった。

CWMコストの削減が可能に

乾式製造技術の開発によって、粉砕動力の低減と界面活性剤の使用量の削減が可能となり、CWMコストが容易に低減できる。

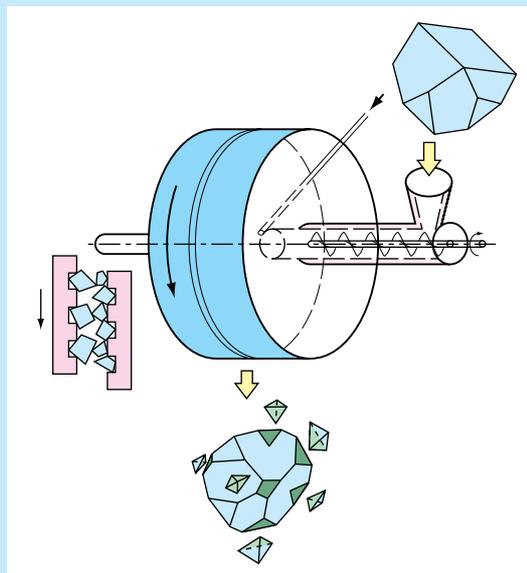


図 CWM製造技術

第 9 章

9

微粉炭燃焼場の高度計測・
数値解析技術



第9章 微粉炭燃焼場の高度計測・数値解析技術 目次

横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 辻 博文
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 黒瀬 良一

9 - 1	研究の背景	103
9 - 2	レーザ計測を用いた燃焼火災内の非接触計測	103
9 - 3	数値解析技術	107
9 - 4	今後の展開	111



辻 博文（1992年入所）

入所以来、微粉炭燃焼および気流中粒子計測に関する研究に従事してきました。微粉炭燃焼技術については、低NO_xバーナおよび低負荷対応燃焼技術の研究開発、ならびに光学計測を用いた火炎構造の解明研究を行ってきました。今後は、燃料種の拡大化技術や一層の環境負荷低減技術などの研究に携わり、微粉炭火力の一層の高度化に向けて努力していきたいと思ひます。

（9-1、9-2、9-4執筆）



黒瀬 良一（1998年入所）

入所以来、数値シミュレーションや光学計測による微粉炭燃焼火災の構造解明およびそのモデリングに関する研究に従事してきました。現在は、主に、微粉炭燃焼場を理論的に精度良く解明するためのラージ・エディ・シミュレーションコードの開発に取り組んでいます。

（9-3、9-4執筆）

9 - 1 研究の背景

今後の微粉炭火力においてはこれまで以上の、環境性・運用性の向上および燃料の多様化などが求められており、燃焼技術の一層の高度化が重要となっている。微粉炭燃焼場は、最高火炎温度が1500℃以上にも達する高温の流れ場であると共に、生成・消滅が早く、かつ環境汚染物質の生成・分解等に影響の大きい活性化学種（ラジカル）や反応性の固体粒子など、測定が難しい物質が存在し、反応場と流れ場が複雑であるため、理論的な取り扱いが困難であった。したがって、現状では燃焼装置やバーナなどの開発は経験工学的に行われることが多く、その手順は極めて煩雑であるため、多大なコストや期間が必要であった。今後の高度燃焼技術の開発においては、燃料種や燃焼条件の多種・多様化に対応するため、効率的な推進が不可欠である。そこで、微粉炭燃焼場を詳細に測定し、メカニズムを解明することによって、流れ場や反応場ならびに環境汚染物質の生成・消滅プロセスをモデル化し、燃焼場を高精度に再現できる数値解析技術を開発することが必要となっている。

従来の燃焼場の測定は、例えば温度に関しては熱電対

を用い、ガス分析にはサンプリングプローブを燃焼場に挿入して行われてきた。これらの方法は、比較的容易に計測が行えるという利点を有しているものの、接触計測であるため測定対象場を乱すこと、時間・空間分解能が低いこと、ラジカルなど測定が困難なものがあること、等の問題を有している。このような状況の中、近年、燃焼場を乱すことなく非接触でラジカル等の化学種の濃度や粒子の挙動を測定することができるレーザ計測が注目されている。

一方、微粉炭燃焼場の数値解析技術については、昨今の計算機性能の著しい進歩に伴い、内外で活発な開発が実施されており、その高度化が進められている。

以上の観点から、当所では、微粉炭燃焼場のレーザ計測に関しては火炎内に存在するラジカルの挙動を把握する研究^①、および微粉炭粒子の挙動を把握する研究^②を実施している。また、数値解析に関しては、当所が所有する石炭燃焼試験炉を対象とした研究、ならびに燃焼場の解析精度の向上を図るための研究^{①-④}を進めている。

9 - 2 レーザ計測を用いた燃焼火炎内の非接触計測

微粉炭火炎の構造を明らかにするためには、火炎内の温度場、流れ場、化学種の濃度分布に加え、燃焼場内の粒子の挙動や粒子の温度などを測定する必要がある。レーザを用いてこれらの物理量を測定する様々な方法が、現在研究開発されている。当所では、燃焼場に存在する化学種の中でもNO_xなどの環境汚染物質の生成・消滅に関わりの深いラジカル（OH、CHなど）、ならびに微粉炭等の粒子挙動を計測する手法の開発を図っている。

レーザを用いる、燃焼場内のラジカルの測定については、ラマン散乱法、CARS（Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy）法およびレーザ誘起蛍光（LIF）法などがある。これらのうち、ラマン散乱法および

CARS法は得られる信号強度が極めて弱いため点計測に限られること、装置構成が複雑になるなどの欠点を有している。これに対して、LIF法は信号強度が強く2次元計測が可能であるなど、ラジカルの計測を行う上で多くの利点を持っている。当所では、このLIF法の微粉炭燃焼場への適用を目指し、検討を行っている。これまでに、比較的測定が容易なメタン・空気予混合火炎を用いて、OHやCHなどの可視化手法についての検討を行った。

一方、粒子の挙動については、レーザ・ドップラ流速計（LDV）の活用が図られてきた。LDVは、気流に追従する微小粒子を流れ場に混入させ、その粒子の速度を検出することにより流れ場の測定を行うために、開発さ

れたものである。しかしLDVは本来、粒子の速度を測定するものであるため、近年粒子計測用として活用される例も多くなってきた。特に現在、LDVの光学系を改良し、粒子の速度と粒子形状や粒径を同時に計測する幾つかの手法が開発されている。これらの手法の内、平均粒径が40～50 μmの不定形粒子である微粉炭の粒子速度と粒子形状・粒径を同時に計測できる手法として、シャドウ・ドップラ流速計（SDV）がある。当所では、このSDVを実験室規模の小型の微粉炭燃焼火炎に適用し、粒子の挙動を計測している。

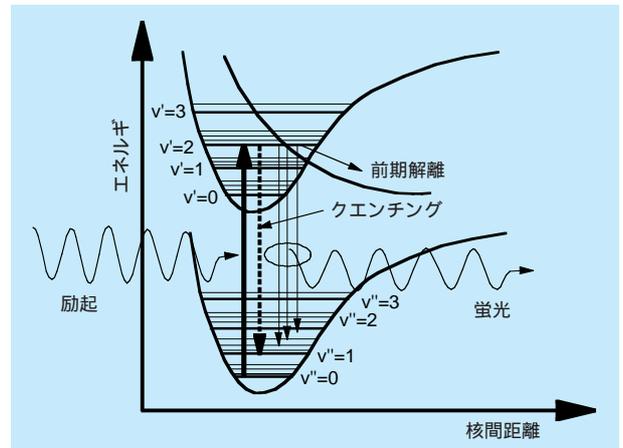


図9-2-1 分子のエネルギー準位

9-2-1 レーザ誘起蛍光（LIF）によるガス状ラジカルの計測

測定法の概要

図9-2-1は、ラジカルの蛍光計測法の概念を示したものである。原子・分子の持つ電子エネルギー準位において、準位間の遷移に必要なエネルギー差に対応する波長の光を原子・分子に照射すると、原子・分子はその光をエネルギーとして吸収し、上位の準位へ遷移した後、吸収した光を再び光の形で放出しながら下位の準位へ戻る。この時に発せられた光が蛍光であり、照射光源にレーザを使用した場合には、レーザ誘起蛍光（LIF：Laser Induced Fluorescence）と呼ばれる。特に、励起レーザ光をシート状にして測定対象場を導入することにより、2次元の蛍光強度分布を同時に測定することが可能となる。

図9-2-2は、LIFシステムの概略を示したものである。システムは大きく、レーザ光源、レーザ光を測定場まで導入する光学系、蛍光を受光する検出装置、レーザ光強度分布補正装置、およびこれらの機器のコントロールやデータの送受を行う同期制御装置からなる。

レーザ光源は、Nd：YAGレーザ、OPO（オプティカル・パラメトリック・オシレータ）および波長校正装置からなる。波長校正装置は、フォトマルによりミニトーチで形成される火炎中のラジカルの蛍光スペクトルを計測し、レーザ光源の波長を校正するものである。光学系は、レーザ光を高さ約3.5cm、厚さ約0.5mmのシート状にするものでシンドリカル・レンズなどから構成されている。検出装置は、主にイメージ・インテンシファ

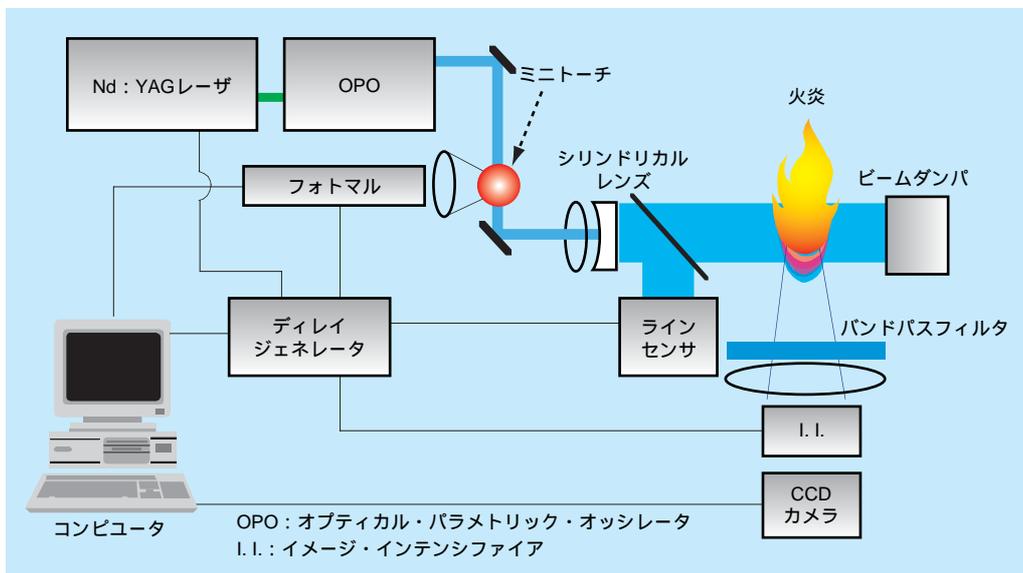


図9-2-2 LIFシステムの基本構成

エアを内蔵した CCD カメラシステムからなっている。シリンジカル・レンズ等によってシート状にされたレーザ光は、強度分布を有している。レーザ光強度分布補正装置は、レーザ光が測定場に導入される前にレーザ光を一部分離し、その強度分布を検知するものである。

(2) ガス火炎におけるラジカル分布計測

LIF によるラジカルの計測には、計測が容易に行えることを考慮し、メタンと空気の層流予混合火炎を用いた。計測に使用したバーナは内径 6 mm のブンゼンタイプであり、メタンと空気の当量比を燃料過濃から燃料希薄となる種々の条件に設定して実験を行った。その火炎の直接写真を疑似カラー表示したものを、**図9-2-3**に示す。なお本図は、 ϕ が 1.59 と 0.98 の場合のものであり、火炎の発光が強い領域ほど白色で表される。 ϕ が大きいほど内炎の高さは高くなるが、発光強度は ϕ が小さいほど強くなるなど火炎の特徴が表されている。

計測対象ラジカルとして、燃焼時に排出される最も重要な環境汚染物質の 1 つである NO の生成診断を可能にするため、OH、NO、CH、CN および NH を選択した。OH の計測については、OH が高い濃度で火炎内に存在するため、容易に行うことができる。蛍光の受光は、励起波長として 281.258nm を使用し、320nm センタで半値幅 15nm のフィルタを用いて行われた。**図9-2-4**に計測結果を示す。 ϕ が 1.59 の場合には、内炎の外側に OH のピークが見られるのに対し、 $\phi = 0.98$ の場合には内炎の近傍で急速に OH の生成が見られ、その後下流に行くに従い濃度が減少していることが示されている。NO の計測は、励起波長として 225.208nm を用い、半値幅 20nm の中心波長 254nm のバンドパスフィルタを使用して行われた。**図9-2-5**に得られた蛍光画像を示す。いずれの当量比条件においても、NO は内炎のすぐ下流領域における急激な生成によるものと、火炎後流部の緩やかな生成によるものとに大別できることが明らかにされた。内炎のすぐ下流域における NO は、主に火炎帯内部において HCN や NH などを経て生成されるプロンプト NO であると考えられる。一方、火炎後流部における NO は、拡大ゼルドビッチ機構と呼ばれる反応経路により生成されるサーマル NO である。また、 ϕ の違いによる蛍光画像の変化については、分布形状については ϕ による差が少ないが、 ϕ が大きいほど濃度が高くなることが示され

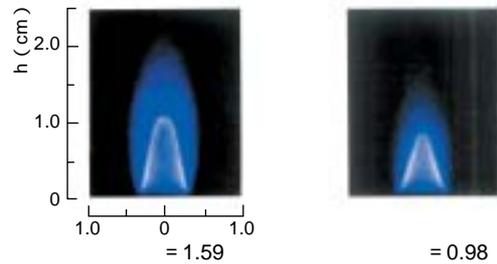


図9-2-3 メタン・空気予混合層流火炎の直接写真

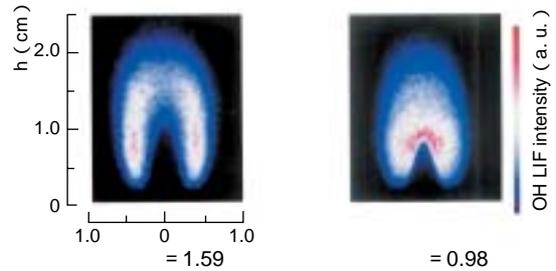


図9-2-4 OHの蛍光強度分布

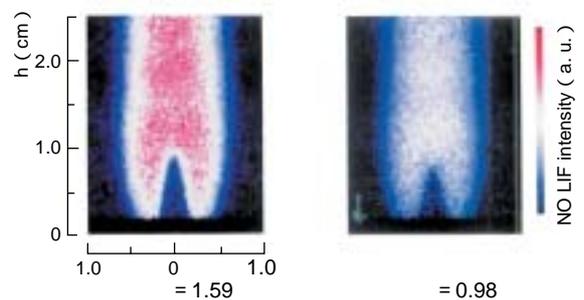


図9-2-5 NOの蛍光強度分布

ている。これは、 ϕ が高いほどプロンプト NO の生成量が多いためであると考えられる。

9-2-2 シャドウドップラ流速計 (SDV) による粒子挙動の計測

(1) 測定法の概要

図9-2-6は、シャドウドップラ流速計 (SDV) の光学系の概略図を示したものである。2本のレーザ光がレンズによって集光され、測定点において交差する。その交差部に光強度の明暗を持つ干渉縞が形成される。測定点に到達した粒子は、干渉縞の光の明暗に対応する光を散乱する。この様子を模式的に表したのが、**図9-2-7**である。散乱光強度の山の部分が、干渉縞の明に対応する。干渉縞の間隔は、レーザ光の波長ならびに光学系によって決定されるため、**図9-2-7**の散乱光強度分布において、明の時間間隔を計測することにより、粒子の速度が測定される。

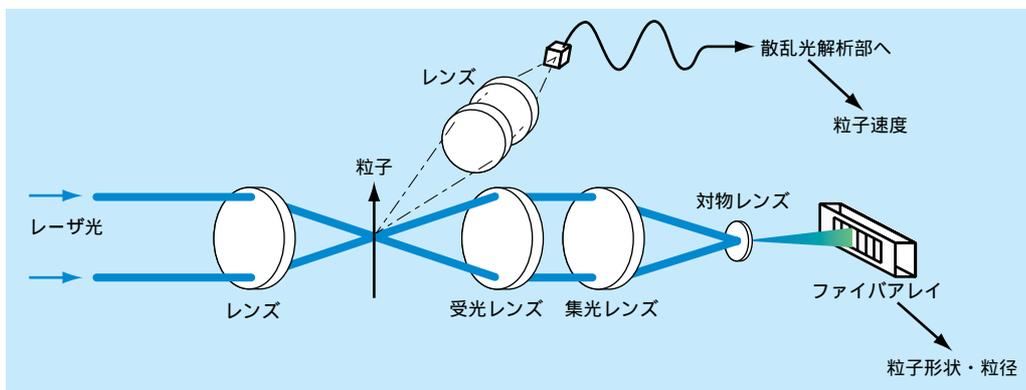


図9-2-6 シャドウ・ドップラ流速計の光学系概略図

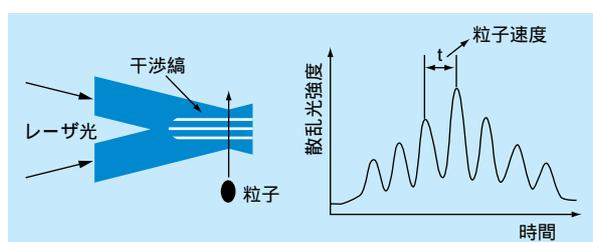


図9-2-7 測定部の詳細および散乱光強度分布

一方、粒子の形状および粒径の計測は、以下のように行われる。図9-2-6に示したように、測定点で交差したレーザー光は、受光レンズおよび焦点レンズなどを介した後、水平方向に64個の素子を持つファイバアレイ上に導かれる。このファイバアレイ上に、測定点における粒子の投影像が結像される。ファイバアレイ上の素子の信号強度は、測定点に粒子が存在しないと、レーザー光を検出するため高くなる。これに対し、測定点に粒子が存在する間は、粒子によってレーザー光が遮られるため、ファイバアレイ上の素子の信号強度は低下する。この信号強度が低下している時間を計測することにより、粒子形状が求められ、粒径は粒子形状から算出される。

(2) 小型の微粉炭燃焼火炎における粒子計測

シャドウドップラ流速計による粒子速度と粒子形状・粒径の同時測定は、ここでは実験室規模の小型の微粉炭燃焼火炎を対象に実施した。この火炎は、垂直上向きに設置されたバーナから噴出された微粉炭（供給量約10g/min）とその搬送用空気により形成されるもので、長さは30cm程度である。計測は、この火炎を形成させる燃焼時と、比較のため、火炎を形成させない非燃焼時の2条件で行った。

図9-2-8は、燃焼時に計測した粒子形状を示したものである。本図は、微粉炭粒子は粉碎性粒子の特徴である、形状が粒子毎に異なる不定形粒子であることを示しており、SDVによって微粉炭粒子の詳細な形状を把握できることが明らかになった。

次に、図9-2-9にバーナ中心軸上における粒子の速度の分布を示す。なお本図においては、粒子速度の粒径による変化を明らかにするため、粒径を15 μm 以下、15 μm から30 μm の間、ならびに30 μm 以上の3つの領域に分割し示す。なお、速度はバーナ出口の気流の流速 U_0 によって無次元化し、また軸方向距離についてはバーナ内径 D によって無次元化してある。この図には、別途計測した非燃焼時の気流流速も示す。本図より、気流流速と粒子速度の差違や、火炎の存在が粒子速度に与える影響などの、火炎内の粒子挙動を明らかにすることができる。また本図は、非燃焼時の場合には粒径が小さいほど粒子速度は低くなること、燃焼時には粒径の違いが粒子速度に与える影響は小さく、粒径によらず粒子速度はほとんど変化しないことなどを示しており、粒径の差異による粒子挙動の変化が明らかにされている。

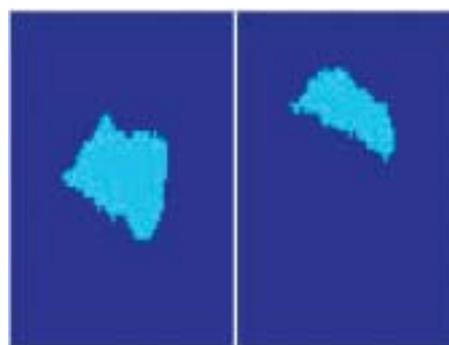


図9-2-8 粒子形状の測定例

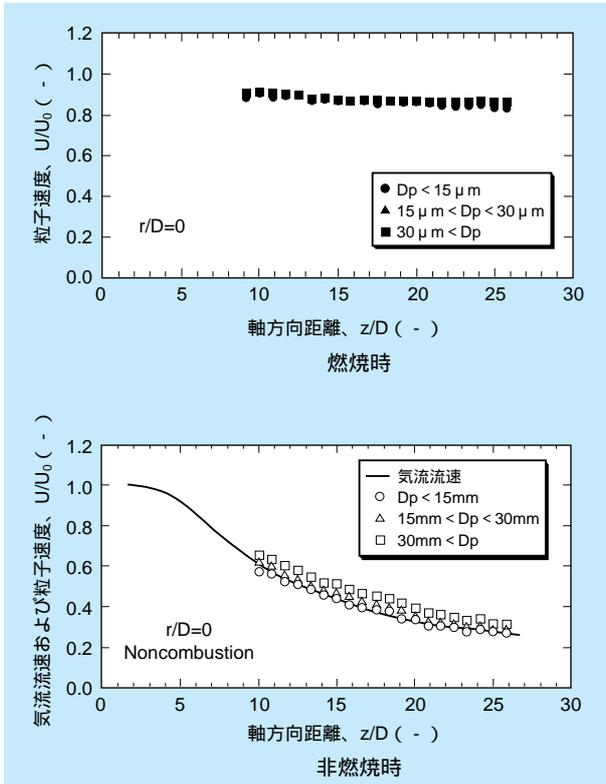


図9-2-9 粒径の差異による粒子速度の違い

次に、非燃焼時および燃焼時の粒径の変化を明らかにするため、バーナ中心軸上における粒径の平均値を計算した結果を図9-2-10に示す。本図に示されるように、非燃焼時には、粒径は軸方向距離の増加に対して大きな変化は見られない。これに対し燃焼時には、粒子加熱時の膨潤などの影響により、粒径が軸方向距離の増加と共に大きくなることが示されている。これらより、SDVは燃焼時の石炭粒子の粒径が変化する過程を把握できる手法であることが分かる。

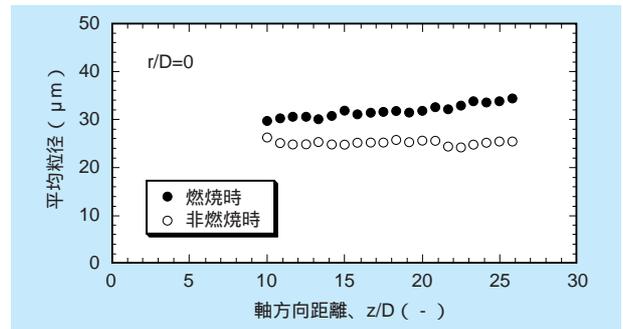


図9-2-10 バーナ中心軸上における平均粒径の変化

9 - 3 数値解析技術

微粉炭燃焼の数値解析は、連続相である燃焼場の支配方程式 [流れの方程式 (連続の式と Navier-Stokes 式) 混合物 (化学種) の連続の式、およびエネルギー方程式] と、分散相である微粉炭粒子の運動方程式を連立して計算機で解く方法であり、燃焼場全体の温度や化学種の濃度分布、さらには微粉炭粒子の挙動等に関して実験では得られないような詳細な情報までも得ることができるといった利点を持つ。また、微粉炭性状や流れ場等の条件を任意に変えて比較的容易かつ低コストで繰り返し検討ができるため、燃焼炉の開発、設計支援ツールとしての利用が期待されている。

連続相である燃焼場の数値解法としては、DNS (Direct Numerical Simulation)、LES (Large Eddy Simulation) および RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) の3つが挙げられる。この中で最も計算精度が高いのは、計算格子間隔を流れ場、濃度場、温度場の最小渦塊以下に設定してそれらの支配方程式を直接解く DNS である

が、これは膨大な計算格子点数が要求されるため計算機の負荷が高く、基礎研究には適しているものの、実用レベルの燃焼場への利用は極めて難しい。これに対して、現在、実用分野において最もよく用いられているのは、RANS である。本法は、支配方程式を時間平均化し、現れる乱流変動項を応力方程式モデルや渦粘性モデルなどの乱流モデルに置き換えて解く方法であり、計算格子点数を大幅に減らすことができるため、計算機の負荷を軽減することができる。しかし、RANS は、乱流モデルの選定およびその中に含まれるパラメータ値の決定が難しく、さらに、非定常性を評価することができない、といった問題を有する。そこで、最近では、比較的大きな渦塊については支配方程式を直接解き、残りの小さな乱れをモデルにより計算する LES が注目されている。これは、一種の空間平均法であるが、非定常計算が可能で、モデル中にもパラメータをほとんど含まないという利点がある。また、LES は、計算機の負荷という点では

RANSに比べると高いが、計算機性能の進歩を考えれば近い将来の実用分野への適用も十分実現する可能性を有する方法である。

以上のことから、当所では、特に、RANSとLESの研究を進めている。

9-3-1 RANS

当所が所有する石炭燃焼試験炉（長さ8.0m、内径0.85mの横置円筒型）内の微粉炭燃焼場^{[1]-[3]}に対して、RANSを適用した研究例について概説する。本研究は、5種類の瀝青炭を対象に計算を実施し、得られた燃焼諸特性量を実験値^{[1]-[3]}と比較することによって、RANSの適用性を評価したものである。

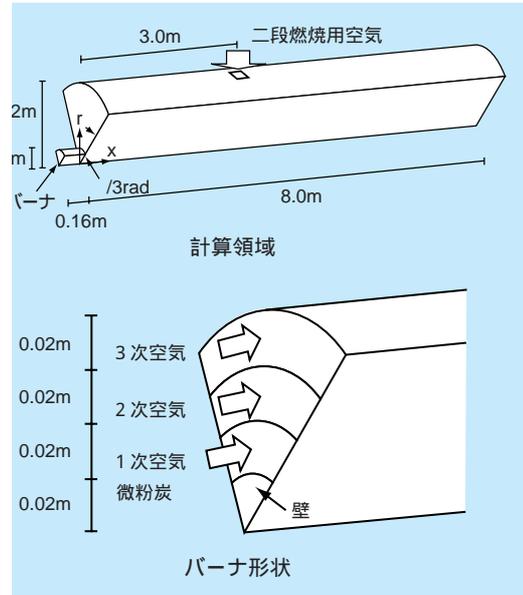
計算方法

使用した5種類の瀝青炭の性状を表9-3-1に、また、計算領域およびバーナ形状の概略を図9-3-1に示す。計算領域は円筒の一部（ $x = -0.16 \sim 3.0$ / $r = 0 \sim 0.425$ ）としている。微粉炭はバーナの1次空気口から搬送用の1次空気と共に炉内へ供給され、1次空気口の周りから2、3次空気が、 $x=3.0\text{m}$ の位置における側面から二段燃焼用空気がそれぞれ注入されている。1～3次空気口から注入された空気の流入速度は、実際の実験^{[1]-[3]}と合うように与えられる。石炭の投入熱量は $6.54 \times 10^6 \text{kcal/h}$ とし、燃焼用空気の総流量は、出口における完全燃焼時の過剰酸素濃度が4%（空気比=1.24）となるように決定している。二段燃焼率（=二段燃焼用空気体積流量 / 総燃焼用空気体積流量）は30%である。計算格子点数は $61(x) \times 58$

表9-3-1 石炭性状

用途	ニューランズ	ワンボ	プラトー	ワークウース	ブレアゾール	
工業分析	水分*1 (%)	(2.2)	(3.5)	(5.9)	(4.5)	(7.9)
	揮発分*2	28.4	35.7	41.3	31.4	29.6
	固定炭素*2	56.4	54.6	48.8	57.5	62.7
	灰分*2	15.2	9.7	9.9	11.1	7.9
	発熱量*2 (kcal/kg)	6730	7080	6870	6770	6710
元素分析	C*2 (%)	71.8	74.2	71.9	73.6	74.6
	H*2	4.45	5.62	5.47	5.10	4.52
	N*2	1.59	1.82	1.30	1.59	1.54
	O*2	6.44	8.27	11.8	8.36	11.2
	S*2	0.48	0.42	0.41	0.35	0.23
FR*3 (-)	1.99	1.53	1.18	1.83	2.11	
FR/FN*4 (-)	1.25	0.84	0.91	1.15	1.37	

*1: 恒湿ベース、*2: 無水ベース、*3: 燃料比（固定炭素と揮発分の比）、*4: 燃料比と行炭中N含有率の比



3-1 RANSで対象とした計算領域およびバーナ形状の概略

(r) $\times 11$ ()点（バーナ近傍領域における x 、 r 方向の格子分割を細かく設定）とし、乱流モデルには $k-\epsilon$ 2方程式モデル^[4]を用いている。なお、本計算には、ワークステーションを用いて、1ケース当たり約60時間のCPU時間を要した。

瀝青炭燃焼特性の実験値との比較

ニューランズ炭燃焼時における時間平均の火炎温度、および O_2 、 NO 濃度の主流(x)方向軸上分布を、実験値^{[1]-[3]}と比較したものを図9-3-2に示す。また、参考までに、主流方向の気流速度、火炎温度、および O_2 、 NO 濃度の炉内分布を図9-3-3に示す（図中の色は、青から赤になるにつれて各特性量の値が高くなることを示している）。いずれの分布においても計算値は実験値と定性的に良く一致しており、現実的な微粉炭燃焼場が再現できていることがわかる。ただ、定量的には、計算値は実験値に比べて、火炎温度のピーク値が高く下流での減衰が大きい傾向をもつ。また、 $x < 3 \text{ m}$ の領域で O_2 濃度が高く、 NO 濃度のピーク値が低い等の点で差異も見られる。このような差異が生じる理由としては、設定した炉やバーナの形状が実験とは完全に一致していないことや、乱流モデルとして用いた $k-\epsilon$ 2方程式モデルがせん断の強いバーナ近傍領域では十分な精度をもたないことが挙げられる。

計算を実施した全5炭種について、未燃焼率 U_c^* （石炭中可燃分に対する未燃分の割合）ならびに燃焼効率

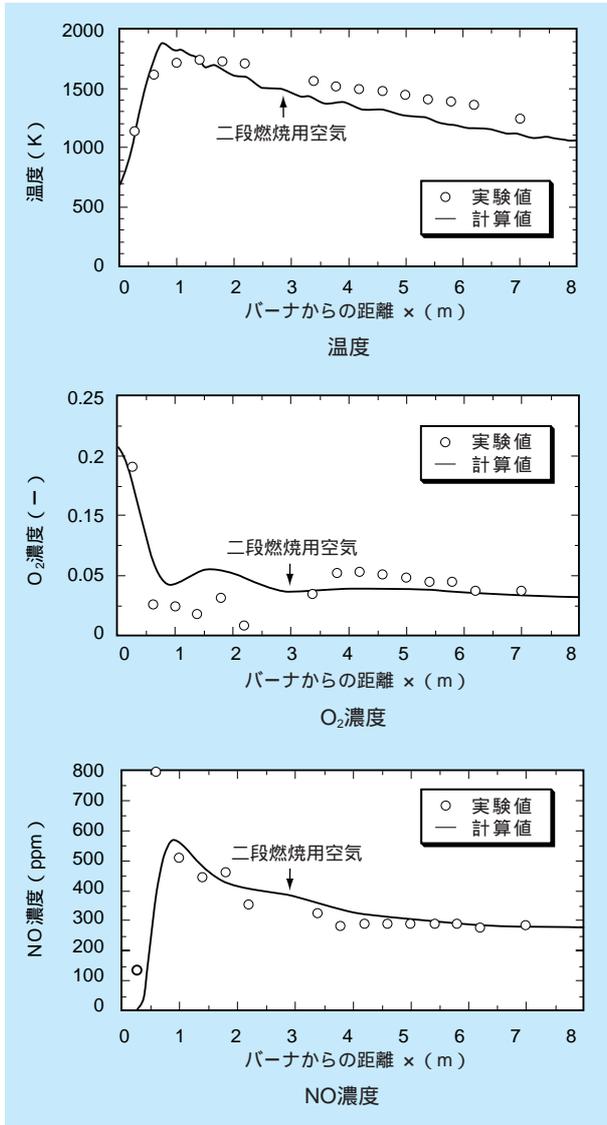


図9-3-2 温度およびO₂、NO濃度の主流(x)方向軸上分布の実験値との比較 (ニュー・ランズ炭)

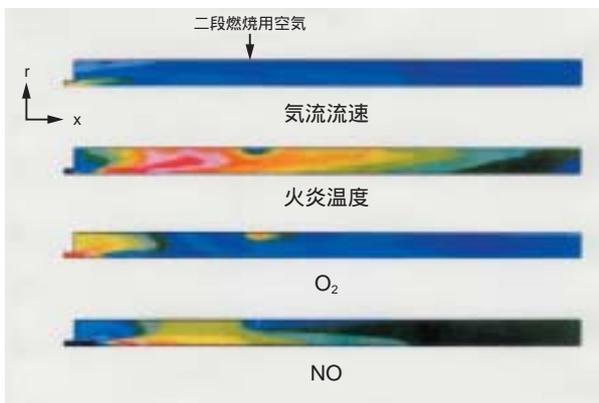


図9-3-3 主流方向気流流速、火炎温度およびO₂、NO濃度の炉内分布 (ニューランズ炭)

$Ef (= 1 - Uc^*)$ と燃料比 $FR (= \text{石炭中固定炭素の割合} / \text{石炭中揮発分の割合})$ の関係、およびNO転換率 CR (石炭中N分に対するNOに転換したN分の割合) FR/FN との関係をそれぞれの実験値^{(11)~(13)}と比較したものを図9-3-4、9-3-5に示す。4章でも述べられているように、今回計算対象とした試験炉においては、未燃焼率 Uc^* は燃料比 FR に対して、また、NO転換率 CR は燃料比 FR とN分含有率 FN の比に対して増加傾向を示すことが実験的に知られている^{(11)~(13)}。図から、両計算値は、定量的な差異は見られるものの、実験値と同様の増加傾向を示し、燃料比 FR やN分含有率 FN の影響を矛盾なく再現していることが確認できる。

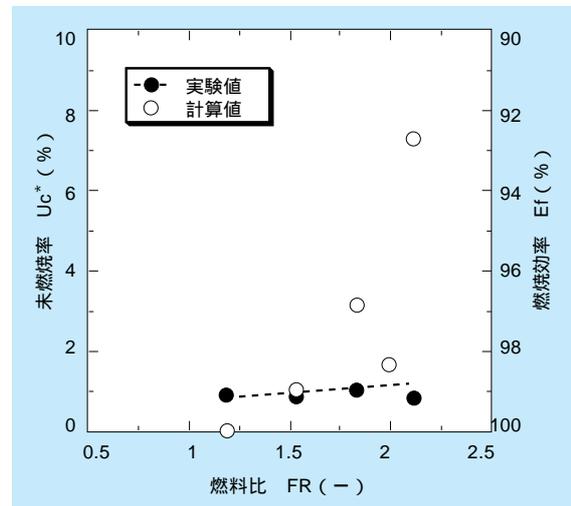


図9-3-4 Uc^* (未燃焼率) と FR (燃料比) の関係

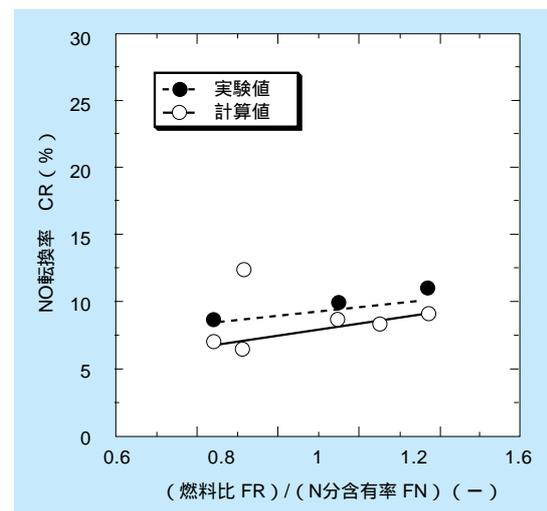


図9-3-5 CR (NO転換率) と FR/FN (燃料比/N分含有率) の関係

9-3-2 LES

LESについては、まず、実験室規模の小型微粉炭燃焼火炎に対して適用を行った。本LESコードは現在開発段階であるため、現状のコードにはラジカル反応を含む詳細反応機構や複雑な石炭性状は考慮されていない。しかし、前述したように、LESは上述したRANSとは異なり、微粉炭燃焼火炎の非定常性を評価できるという利点がある。ここでは、その一例を簡単に示す⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

計算方法

計算領域の概略を図9-3-6に示す。計算領域は0.48m(x)×0.24m(y)×0.24m(z)の直方体である。バーナの噴流出口直径を 6×10^{-3} m、流速を13m/sとし、この噴流によって固体燃料粒子は計算領域内へと送り込まれる。なお、ここで、“微粉炭粒子”と書かず、“固体燃料粒子”と書いたのは、ここでの計算では、固体燃料粒子を簡易的にメタンの塊とみなしているためである。この固体燃料粒子は、周囲の気体温度に依存して揮発し、気相において空気と反応するものと仮定している。計算格子点数は240(x)×150(y)×150(z)とし、LESの乱流モデルとしては圧縮型のスマゴリンスキーモデル⁽⁵⁾を採用した。なお、本計算には、上記のRANSで使用したワークステーションよりも計算速度が10倍程度速い当所が所有するスーパーコンピュータを用いて、1ケース当たり約1000時間のCPU時間を要した。

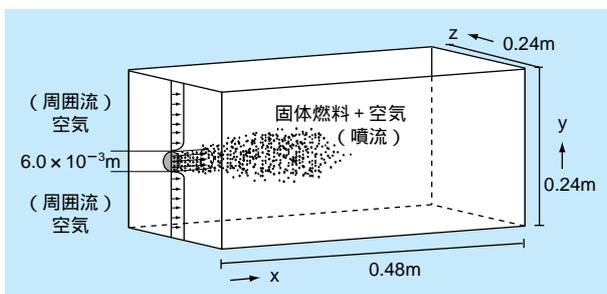


図9-3-6 LESで対象とした計算領域の概略

微粉炭燃焼火炎の非定常性評価

噴流により送り込まれた固体燃料粒子群のx-y断面(z=0付近)における質量減少率を図9-3-7に、また、x-y断面(z=0)の瞬間火炎温度分布を図9-3-8にそれぞれ示す。図9-3-7中の色は、赤から青になるにつれて粒子の質量減少率が増加することを、また、図9-3-8中の色は、青から赤になるにつれて火炎温度が高くなることを示している。RANSで得られた図9-3-3の分布と比較しても分かるように、本LESでは、粒子群や火炎温度の三次元的な非定常挙動が捉えられている。固体燃料粒子群は、上流域ではほとんど広がらず直進するが、揮発による質量の減少が始まる中流域から半径方向に分散する傾向が見られる。また、固体燃料粒子の質量減少率が高い部分は、火炎温度が高い部分と一致するなど、リーズナブルな結果が得られている。

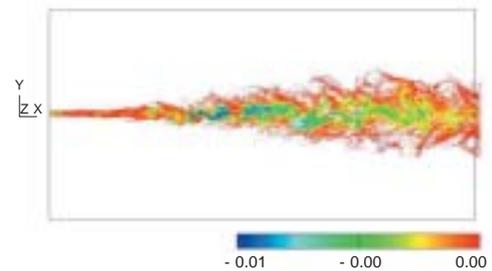


図9-3-7 固体燃料粒子の質量減少率 (x-y断面、z=0付近)

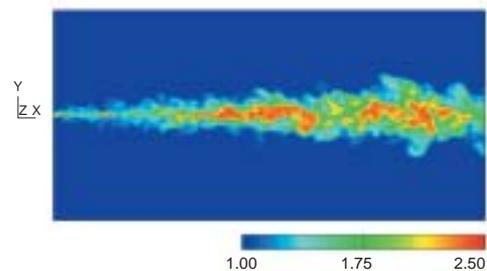


図9-3-8 瞬間火炎温度分布 (x-y断面)

9 - 4 今後の展開

微粉炭燃焼は、微粉炭粒子の気流中の分散挙動に加え、微粉炭粒子の揮発および揮発分の燃焼、さらに粒子表面での燃焼といった様々な過程が、同時にかつ相互に作用する複雑な現象であるため、その詳細が完全に明らかにされていないのが実状である。本章では、このような微粉炭燃焼場をより高い精度で評価、予測することを目的に、当所が進めてきたレーザ計測技術と数値解析技術の高度化に関する研究成果について紹介した。

今後、レーザ計測に関しては、上述した二つの計測技術を亜瀝青炭等の幅広い性状の石炭種に適用することや、実際の燃焼場に近い、より複雑な燃焼場へ適用することによって、微粉炭燃焼火炎の構造を詳細に明らかにしていく予定である。また、これらの計測技術だけでなく、近年噴霧燃焼場等の非接触計測技術として注目されている自発光計測や温度計測、粒子挙動の2次元計測などの微粉炭燃焼場への適用性の検討を行い、可能であればこれらの計測技術を用いた測定を実施していく。さらに、複数の計測手法を同時に用いた、例えばラジカル挙動と粒子挙動の同時計測技術などについても検討を行ってい

く方針である。また将来的には、これらの技術の試験炉や実ボイラへの適用を図り、非接触計測を用いた、バーナやボイラの高度管理手法の確立を目指す予定である。

一方、数値解析に関しては、引き続きLESコードの高度化を進めていく予定である。現状のコードでは、ラジカル反応を含む詳細反応機構や複雑な石炭性状は考慮されていない。そこで、これらを考慮し、本コードのNOx等の汚染物質予測が高精度で行えるものへの発展を考えている。

レーザ計測による研究と数値解析による研究は、全く別の独立した手法のように思われる。しかし、実際は、数値解析の精度を検証するためにはレーザ計測で得た信頼性の高いデータが不可欠であり、逆に、数値解析で得られた新たな現象を実験で検証することがレーザ計測の次の目標になる場合も多々ある。当所では、双方の利点を生かしつつ、それらの高度化および相互比較を効率的に進め、微粉炭燃焼場の解明さらには高度燃焼技術の開発へと発展させていきたいと考えている。

第 10 章

微粉炭火力技術高度化 のための将来課題

第10章 微粉炭火力技術高度化のための将来課題 目次

CS推進部 受託推進グループ 部長 牧野 尚夫
横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 白井 裕三

10 - 1	今後の微粉炭火力の役割と運用	115
10 - 2	微粉炭火力の将来課題	115
10 - 3	石炭燃焼特性実証試験装置の役割と機能	116

牧野 尚夫 (10ページに掲載)
(10-1、10-2執筆)

白井 裕三 (16ページに掲載)
(10-3執筆)

10 - 1 今後の微粉炭火力の役割と運用

石炭は、他の化石燃料に比べ相対的にCO₂排出量が多いなどの問題点はあるものの、可採埋蔵量が多く、政情的に安定した国で多く産出するため、供給安定性が高いなどの特徴を持ち、将来的にも重要なエネルギー源のひとつであると考えられる。

石炭利用時の問題点である、CO₂排出量の抑制の観点からは、石炭ガス化複合発電や石炭ガス化燃料電池複合発電など、現在開発中の新型高効率火力の重要性が徐々に高まっていくものと考えられるが、技術的信頼性の高さ、柔軟な運用性、様々な燃料に対する利用可能性、ならびに低い発電コストなどを考えると、微粉炭火力の重要性は今後も低下することはないと思われる。

今後の微粉炭火力においては、これまで以上に需給バランスを調整するための、例えば毎日起動・停止を行う

DSS火力としての役割などが益々強く要求されるものと思われる。また、発展途上国の経済成長などを考えた場合、現在使用している高品位な瀝青炭の供給は徐々にタイトになると考えられ、今まで以上の燃料の多様化、特に低品位燃料の利用が期待されるようになってくることに加え、これまであまり燃料として考えられなかったバイオマスなども使用されるようになってくると思われる。さらに、環境保全の観点からは、環境汚染質の一層の排出抑制が可能なクリーンな火力としての環境保全技術の高度化が望まれるものと思われる。特に、廃棄物のリサイクル、リユースが要求されている現在の状況から考え、微粉炭火力から排出される廃棄物の有効利用、中でも発生量の最も多い石炭灰を有効利用する技術が強く望まれると考えられる。

10 - 2 微粉炭火力の将来課題

微粉炭火力の将来課題としては、まず第1に、石炭灰の有効利用量の増大が挙げられる。これまで石炭灰は60%程度がセメント等に有効利用され、残りを埋立処分してきたが、近年、埋立場所が徐々に少なくなっており、一層の有効利用量の増大が望まれている。また、現在の有効利用の実態としては、必ずしも性状の良い石炭灰だけが排出されるわけではないため、コスト的にメリットのあるセメント混和材などでの利用は限られており、コストの低い粘土代替材料としての利用が主となっている。これらの石炭灰のほとんどが有価灰として利用できるようなれば、発電コストの低減と共に、石炭灰の有効利用量の増大が図れるようになる。このような観点から、今後は、有効利用しやすい性状の石炭灰を排出する技術の確立が極めて重要となる。石炭灰をセメント混和材等に有効利用するためには、灰中未燃分濃度やメチレンブルー吸着量が低く、かつ性状が変動せず均質な石炭灰を供給する必要がある。そこで、様々な石炭種、使用条件に対しても、常に石炭灰性状を制約条件範囲内に調整できる技術を開発しなければならない。また、一層の

有効利用量拡大のためには、新たな石炭灰の有効利用先の探索ならびに、それに応じた石炭灰性状の調整技術が重要となる。

燃料の多様化、コスト低減の観点からは、これまで以上に幅広い燃料の利用が期待される。既に亜瀝青炭については、一部の微粉炭火力で導入が始まっているが、今後は、一層大量の導入あるいは、より品質の悪い石炭の導入も期待される。特に質の悪い石炭については、改質・高品位化しての利用も考えられ、これらの改質炭の燃焼技術、排煙処理技術の開発も重要となると思われる。また、バイオマスなど、これまであまり利用されなかったが、再生可能エネルギーとして今後その有効な利用が重要と考えられているものもあり、これらについても、幅広く利用できるようにする技術が不可欠となると思われる。

環境性の向上の観点からは、益々、厳しくなる環境保全に対する要求に応えるため、さらなる高性能な排煙処理技術の開発が望まれるようになってくると思われる。特に、近年の低コスト、省エネ化の観点からは、性能が良いだ

けでなく、所要動力やコストの低減が同時に達成できる方式の開発が期待される。また、これまで環境汚染質として主な対象となっていたSO_x、NO_x、ばいじんに加えて、様々な微量物質などの影響も注目され始めており、これらの正確なプラント内挙動把握、排出抑制にも配慮した技術開発の重要性が高まってくると思われる。一方、地球温暖化物質として重要なCO₂の排出抑制に向けては、発電効率の向上が最も重要であり、蒸気条件改善に不可欠な高温用材料の開発、信頼性向上などは今後も重要であると考えられる。

これらの課題のうち、特に重要な燃焼技術に関しては、従来は経験工学的手法で改良が進められてきた。しかし、近年の環境汚染質の排出抑制、燃料多様化の厳しい要求に対して、より斬新な高度技術の開発で応えていくためには、高度計測を用いた燃焼火炎の構造評価や、数値計算を用いた燃焼場の理論的解明、ならびにこれらの技術の実用燃焼場への適用が一層重要になると思われる。今後は、これらの技術の高度化ならびに信頼性向上を図り、新たな燃焼技術開発へと有効に反映させていく必要があると考えられる。

10 - 3 石炭燃焼特性実証試験装置の役割と機能

10-3-1 設置目的

微粉炭火力の燃料多様化、環境性向上、コスト低減のため、様々な燃料の燃焼および排煙処理を実機と同様の過程で行うことにより、最適な操作条件の解明、未利用燃料の事前総合評価法、微量物質の挙動解明および新たな高度燃焼装置、排煙処理装置の開発を進めて行く必要がある。

当研究所は、2002年10月に燃焼から排煙処理までを実機と同過程で試験できる「石炭燃焼特性実証試験装置」を設置した。

本装置を用いた当面の主な課題としては、石炭灰処分問題の解決に向け、排出される石炭灰のすべてを有効利用可能とするための、「石炭灰高品質化・均質化燃焼技術の開発」、さらに多炭種対応のための、「低品位炭（亜瀝青炭など）の最適燃焼技術の開発」、および未利用炭の燃焼から排煙処理までの特性を事前に評価する、「石炭の総合評価システムの開発」を進めている。また、将来的には、サーマルリサイクルおよびエネルギー源の強化のため、廃棄物等（RDF等）、バイオマス、重質油などの、「難燃性燃料の燃焼性把握および最適燃焼技術の開発」へと展開していく計画である。

一方、一層の環境性向上に向け、「微量物質排出抑制技術および高度排煙処理技術の開発」も進めていく。本装置は、これらの各研究に有効に利用できるものとして設計している。

10-3-2 特徴と機能

本装置は、微粉炭火力の高度化に関する様々な技術開発に用いるため、以下の特徴を有する。

3段のバーナを有する壁型炉を採用することにより実機と同様の燃焼履歴を実現する。

廃棄物等（RDF等）、バイオマス、重質油などの難燃性燃料に対応でき、その燃焼特性を評価可能にする。

石炭やバイオマス等の混焼時において複数段バーナの注入位置、注入比率、各段バーナに投入する石炭種などを変化し、バーナシステム全体の調整により燃焼技術の最適化を図ることを可能にする。

実機と同様の脱硝装置、電気集塵機および脱硫装置を有することにより、各種燃料の燃焼特性から排煙処理性能までの総合的な評価を可能にする。

実発電所を模擬できる煙道内の温度履歴調整機能ならびに各種排煙処理装置を備えており、実機を容易に模擬でき、微量物質の挙動評価を可能にする。また、新型の排煙処理技術の開発にあたっては実ガスを用い

て検証できるように、任意に排ガス温度を設定できるようにする。

本装置の構成は、燃料供給装置、**縦型マルチバーナ炉**、排煙処理装置からなる。**図10-3-1**にプロセスフローを示す。燃料供給装置において粉碎された微粉炭は、3本のバーナに送られ、縦型燃焼炉で燃焼され、燃焼用空気と熱交換された後、脱硝装置（SCR法）に入り、発生したNOxは分解される。その後、燃焼試験のみの場合は、全量の排ガスが、バグフィルタに送られ、フライアッシュが除去された後、アルカリスクラバーでSOxが除去され排出される。排煙処理装置の試験時は、脱硝装置において3分の1の排ガスを分岐して、排煙処理装置に送られ、電気集塵機および排煙脱硫装置の性能が評価される。また、同時に微量物質等の測定も実施する。以下に、各装置の主な機能を示す。

燃料供給装置

- ・石炭、重質油の貯蔵、供給設備を有し、多種燃料の燃焼特性評価が可能である。
- ・石炭においては3本のバーナに各100kg/hで石炭供給が可能であり、重質油燃料は、3本のバーナに各60リットル/hで供給が可能である。
- ・各バーナに個別の燃料供給ラインを有し、さらにバーナ毎に石炭供給ピン2器を有するため、バーナ毎に燃料の種類、混炭率、供給量が調整できる

縦型マルチバーナ炉

- ・**図10-3-2**に示すように3段のバーナを有し、実機と同様、火炎の相互干渉のある燃焼場が形成可能である。
- ・各バーナの角度、バーナ間距離および熱輻射強度の調整機能を有し、難燃性燃料の着火の維持、および安定燃焼が可能である。
- ・縦型炉の採用で炉底灰の連続排出・採取が行え、炉底灰の詳細評価および長時間連続運転が可能である。

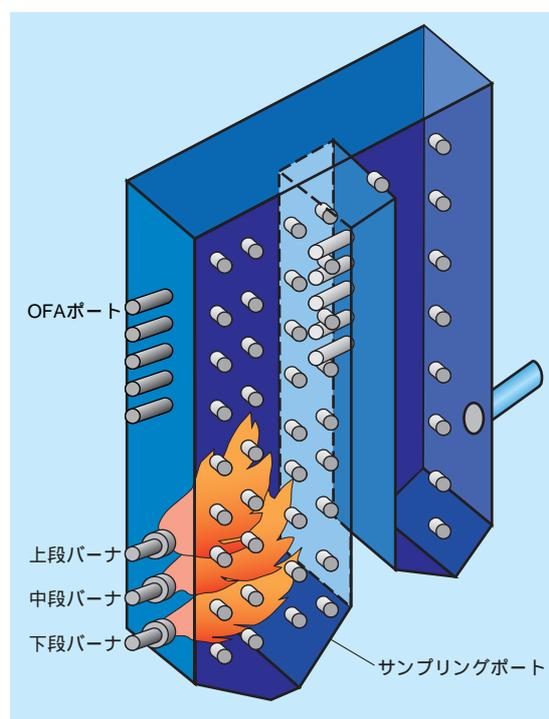


図10-3-2 縦型マルチバーナ炉

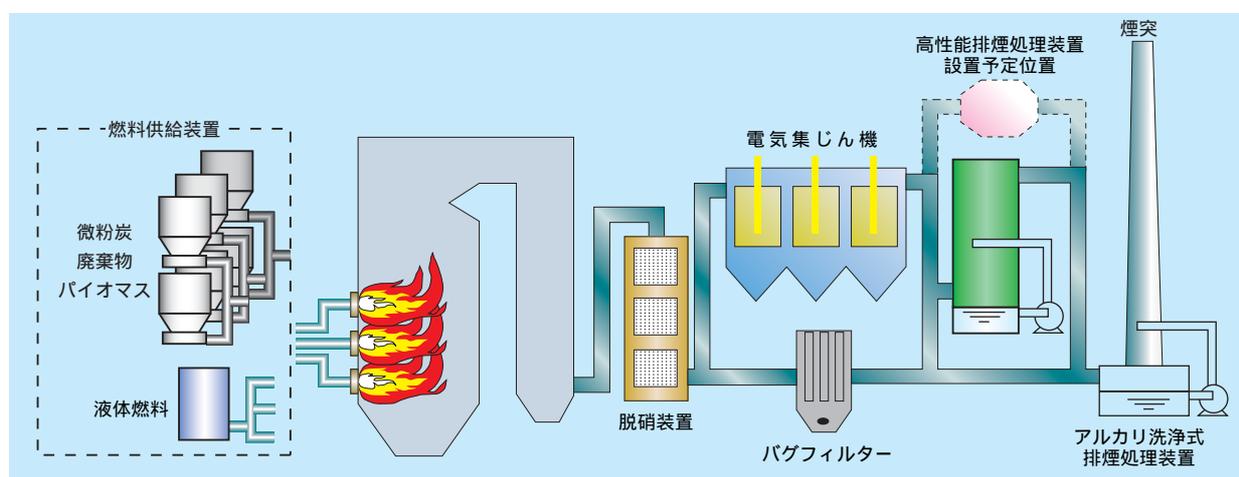


図10-3-1 石炭燃焼特性実証試験装置プロセスフロー

- ・バーナ周りの灰付着状態の監視および火炉内に蒸気管を挿入して、伝熱特性を評価することにより、灰のスラッキング・ファウリング特性の評価が可能である。

排煙処理装置

- ・実機煙道を模擬し、全量の排ガスを処理できる脱硝装置（SCR法）および排ガスの3分の1の処理量を有する電気集塵機および石灰石-石膏法を用いた排煙処理装置を有する。
- ・バイパスラインとガスクーラの適正配置により、実機煙道の温度履歴を模擬できると共に、排ガス冷却過程を任意に設定できる。
- ・任意の温度条件に設定可能な新設の排煙処理設備設置用スタンドを有し、微量物質除去技術、高性能脱硫・脱硝技術等について幅広い温度条件での実ガス実証が可能である。
- ・電気集塵機の温度を90～200℃まで制御でき、操作温度の影響評価が可能である。

お わ り に

理事 横須賀研究所長 瀬間 徹



石炭は、供給安定性に優れ、かつ長期に亘って利用することが可能な燃料として、今後も重要なエネルギー源であり続けると考えられています。このような状況の中、温室効果ガスの排出量低減のための発電効率向上の観点から、石炭ガス化複合発電や石炭ガス化燃料電池複合発電などの新型高効率火力の開発に大きな期待が集まっていますが、高信頼性、低コスト性などの利点を考えますと、微粉炭火力は今後も重要な発電技術としての立場を維持していくものと考えられています。

当研究所では、石炭利用技術をエネルギー安定供給のキーテクノロジーの一つとして位置付け、様々な技術開発を行ってきており、さらなる技術の高度化に向け、新たな技術開発課題に戦略的に取り組むと共に、常に世界最高レベルの技術開発の拠点として、時代のニーズに合致した成果を発信し続ける所存です。このような状況に鑑み、一層の研究力強化の観点から、これまで用いられてきた設備に加え、より実機に近い研究設備である「石炭燃焼特性実証試験装置（MARINE炉）」を新設するなど、微粉炭火力のさらなる高度化に向けた今後の技術開発のため、研究体制の充実を図っています。

本レビューは、微粉炭火力技術に関する当所のこれまでの成果を中心に、今後の技術開発の展望も含めてまとめたものです。地球環境保全、燃料多様化など、微粉炭火力を巡る課題は益々多くなっています。今後も、一層有益な研究を実施していくため、是非ご一読頂き、様々なご意見、ご要望を賜われれば幸いです。

引用文献・資料等

第1章

Survey of Energy Resources 1998, 第18回世界エネルギー会議(1998)
JIS M1002
ASTM D388
JIS M8810
JIS M8811
JIS M8812
JIS M8813

第4章

中田俊彦、牧野尚夫、他、「微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分の排出特性」電力中央研究所研究報告W86012(2000)
佐藤幹夫、牧野尚夫、他、「混炭燃焼時におけるNO_x濃度と灰中未燃分濃度」電力中央研究所研究報告285032(1986)
松田裕光、牧野尚夫、他、「炭種適合性評価技術の開発」電力中央研究所研究報告W99302(2000)
松田裕光、牧野尚夫、他、「炭種適合性評価技術の開発(その2)」電力中央研究所研究報告W01036(2002)
牧野尚夫、佐藤幹夫、木本政義、日本エネルギー学会誌、Vol. 73, No. 10(1994)
牧野尚夫、木本政義、辻博文 他、電力中央研究所研究報告、総合報告W13(1999)

第5章

高取静雄、「石炭火力発電の変遷」火力原子力発電誌、第337号、Vol. 35, No. 10
小川孝之、「地球温暖化問題に 대응する高効率石炭火力発電技術開発の動向」
増山不二光、「環境対応材料の開発動向 - 超々臨界圧ボイラ用耐熱材料の開発動向 - 」、溶接学会誌、第70巻(2001) pp. 750-755
F. Masuyama, "History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels," ISIJ International, Vol. 41(2001) pp. 612-625
中村裕交、「超々臨界圧プラント川越火力発電所700MWの建設計画」、火力原子力発電、第38巻(1987)、pp. 803-811
榎木義淳、阿部富士雄、「超々臨界圧エネルギー機器と極長時間強度」、材料、第51巻(2002)、pp. 701-706
阿部博行、「超高温高圧火力プラント(USC)の開発」、火力原子力発電、第38巻(1987) pp. 239-250
新井康夫、「石炭火力発電技術の動向」、日本機械学会21世紀の発電事業に対応した蒸気タービン技術に関する調

査研究分科会成果報告書(2002) pp. 11-29

伊東正道、他8名、「超々臨界圧発電プラント用ボイラチューブおよびタービンロータの開発」、火力原子力発電、第37巻(1986) pp. 727-740

新田明人、他2名、「超々臨界圧蒸気タービンロータ用改良12Cr鋼の高温強度特性評価」、電力中央研究所研究報告:T87007(1987)

緒方隆志、新田明人、「超々臨界圧タービンロータ改良12Cr鋼およびA286鋼の強度特性評価」、電力中央研究所研究報告:T88082(1989)

新井将彦、「蒸気タービン用ロータ材料及びブレード材料」、日本機械学会21世紀の発電事業に対応した蒸気タービン技術に関する調査研究分科会成果報告書(2002) pp. 169-176

第6章

牧野尚夫、木本政義、他、「空気多段注入法による微粉炭燃焼時のNO_x低減」、燃料協会誌、Vol. 69, No. 9, pp. 856-862(1990)

牧野尚夫、木本政義、氣鷲尚志、遠藤喜彦、「微粉炭用新型低NO_xバーナの開発」、火力原子力発電、48、6、702-710(1997)

牧野尚夫、木本政義、他、「微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技術の開発(その1)」、電力中央研究所研究報告:W88010(1988)

牧野尚夫、木本政義、他、「微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技術の開発(その2)」、電力中央研究所研究報告:W88025(1989)

牧野尚夫、木本政義、他、「微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技術の開発(その3)」、電力中央研究所研究報告:W88031(1989)

西田真二、牧野尚夫、他、「微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分同時低減燃焼技術の開発(その4)」、電力中央研究所研究報告:W89006(1989)

牧野尚夫、佐藤幹夫、他、「石炭燃焼試験炉における微粉炭の燃焼(その2)」、電力中央研究所研究報告:282056(1983)

牧野尚夫、佐藤幹夫、他、「石炭および石炭灰性状が集じん性能におよぼす影響(その1)」、電力中央研究所研究報告:283023(1983)

小澤政弘、他、「排煙脱硝装置の最新技術」、石川島播磨技報、Vol. 39, No. 6, 356, pp. 357(1999)

電中研レビュー「環境に優しい石炭利用技術」、No. 3(1994)

火力原子力発電、「入門講座 火力発電所の環境保全技術・設備 脱硫設備」、Vol. 41, No. 7, 91, pp. 916(1990)

永島正明、他、「石炭灰利用乾式脱硫装置の除じん性能」、火力原子力発電、Vol. 45, No. 12, 76, pp. 77(1994)

花田剛、他、「石炭火力発電所における乾式脱硫脱硝技術 乾式活性炭法硫黄回収式」、火力原子力発電、Vol. 40, No. 3, 37, pp. 40 (1989)
青木慎治、「電子ビーム排ガス処理技術」、燃料協会誌、Vol. 69, No. 3 (1990)
火力原子力発電、「入門講座 [火力発電所 (全体計画と付帯設備)] 環境対策」、Vol. 51, No. 2, pp. 72 (2000)

第7章

小谷田一男、牧野尚夫、木本政義、小野哲夫、「微粉炭用ワイドレンジバーナの開発 (その1)」、電中研報告 W88009、(1988)
沖裕壮、小谷田一男、安部新一、小笠原一、桧垣和司、氣鷲尚志、高野伸一、「微粉炭用内部セパレート型ワイドレンジバーナの開発」、電中研報告 W94019、(1995)
安部新一、小笠原一、桧垣和司、小谷田一男、沖裕壮、氣鷲尚志、「微粉炭焚ボイラ用新型ワイドレンジバーナの実証試験」、火力原子力発電、Vol. 47, No. 7、(1996)
小谷田一男、沖裕壮、安部新一、小笠原一、桧垣和司、氣鷲尚志、高野伸一、「微粉炭燃焼ボイラ用内部セパレート型ワイドレンジバーナの開発」、エネルギー・資源、Vol. 17, No. 4、(1996)
沖裕壮、小谷田一男、安部新一、小笠原一、氣鷲尚志、「微粉炭用内部セパレート型ワイドレンジバーナの開発」、動力、No. 237、(1996)
辻博文、牧野尚夫、木本政義、池田道隆、大場克巳、「微粉炭用新型低 NOx バーナの開発 (その6)」、電中研研究報告 W94014、(1995)
池田道隆、辻博文、木本政義、牧野尚夫、「微粉炭用新型低 NOx バーナの低負荷燃焼安定性の向上 (その1)」、電中研研究報告 W95001、(1995)
大場克巳、木本政義、池田道隆、辻博文、牧野尚夫、「微粉炭用新型低 NOx バーナの低負荷燃焼安定性の向上 (その4)」、電中研研究報告 W95034、(1996)
木本政義、牧野尚夫、大場克巳、氣鷲尚志、「微粉炭用低 NOx バーナの低負荷燃焼安定性の向上」、日本エネルギー学会誌、77巻、3号、pp. 223-233、(1998)
池田道隆、木本政義、辻博文、牧野尚夫、氣鷲尚志、遠藤喜彦、「低負荷対応用新型低 NOx バーナのスケールアップ検討 (その2)」、電中研研究報告 W96005、(1997)
木本政義、辻博文、牧野尚夫、氣鷲尚志、「低負荷対応用低 NOx バーナのスケールアップ検討」、日本エネルギー学会誌、78巻、6号、pp. 404-415、(1999)
池田道隆、辻博文、木本政義、牧野尚夫、「低負荷対応用新型低 NOx バーナのスケールアップ検討 (その1) 数値計算による微粉炭濃縮機能の検討」、電中研研究報告 W95035、(1996)
木本政義、池田道隆、辻博文、牧野尚夫、「低負荷対応用新型低 NOx バーナのスケールアップ検討 (その3)

流線形リングによる検討」、電中研研究報告 W96014、(1997)

M. Kimoto, M. Ikeda, H. Makino, T. Kiga and Y. Endo, "Improvement of Low Load Combustion Stability for Advanced Low NOx Burner", JSME International Journal, vol. 41, 4, (1998)

M. Kimoto, M. Ikeda, H. Makino and T. Kiga, "Development of Advanced Low NOx and High Turndown Burner for Pulverized Coal Combustion", Proceedings of IJPGC (International Joint Power Generation Conference and Exposition) -ICOPE (International Conference on Power Engineering) 99, (1999)

牧野尚夫、木本政義、他、「微粉炭用超低 NOx・ワイドレンジバーナの開発」、火力原子力発電、Vol. 50, No. 7, pp. 790-798 (1999)

木本政義、大場克巳、辻博文、池田道隆、牧野尚夫、宮前茂広、「微粉炭用新型低 NOx バーナの低負荷燃焼安定性の向上 (その2)」、電中研研究報告 W95002、(1995)

木本政義、池田道隆、大場克巳、牧野尚夫、「微粉炭用新型低 NOx バーナの低負荷燃焼安定性の向上 (その3)」、電中研研究報告 W95016、(1996)

第8章

石炭プロジェクト2001年度版、プロジェクトニュース社 (2001)

World Energy Outlook 2001 Insights, International Energy Agency (2001)

牧野尚夫、木本政義、他、「微粉炭燃焼における利用石炭種の拡大 - 低品位炭・高燃料比炭の燃焼特性 -」、電気評論、Vol. 84, No. 12, pp. 47-50 (1999)

池田道隆、木本政義、小材幸稔、牧野尚夫、「亜瀝靑炭燃焼時の NOx・灰中未燃分低減方法の検討 (その1)」、電中研研究報告、W99014、2000-3

M. Ikeda, Y. Kozai, H. Makino, "Emission Characteristics of NOx and Unburned Carbon in Fly Ash of Sub-bituminous Coal Combustion" JSME International Journal Series B, Vol. 45, No. 3, pp. 506-511 2002-8

池田道隆、森永英揮、東山浩一、牧野尚夫、「亜瀝靑炭燃焼時の NOx・灰中未燃分低減方法の検討 (その2)」、電中研研究報告、W00018、2001-3

池田道隆、森永英揮、東山浩一、小材幸稔、牧野尚夫、「亜瀝靑炭燃焼時の NOx・灰中未燃分排出特性」、電中研研究報告、W00017、2001-3

池田道隆、森永英揮、東山浩一、牧野尚夫、「亜瀝靑炭混焼燃焼時の灰中未燃分排出特性」、電中研研究報告、W01034、2002-3

池田道隆、木本政義、宮崎哲夫、牧野尚夫、「石炭中灰分が微粉炭燃焼特性に及ぼす影響」、電中研研究報告、

W97023、1998-5

宮崎哲夫、木本政義、池田道隆、牧野尚夫、「高燃料比炭の微粉炭燃焼特性」電中研研究報告、W97016、1998-4

牧野尚夫、木本政義、化学工学論文集、20、6、747-575 (1994)

牧野尚夫、木本政義、氣鷲尚志、遠藤喜彦、火力原子力発電、48、6、702-710 (1997)

第9章

辻博文、宮崎哲夫、1998、レーザ誘起蛍光 (LIF) による燃焼火炎内ラジカルの可視化、電力中央研究所報告：W97007

辻博文、黒瀬良一、2000、シャドウドブブラ流速計による微粉炭火炎内の粒子速度と粒径の同時計測、電力中央研究所報告：W00002

辻博文、黒瀬良一、牧野尚夫、2002、シャドウドブブラ流速計を用いた微粉炭火炎内の粒子速度と粒子形状・粒径の同時計測、日本機械学会論文集B編、68：596-602

黒瀬良一、辻博文、牧野尚夫、1999、火炉内における微粉炭燃焼場の数値シミュレーション (その1)、電力中央研究所報告W99006

黒瀬良一、辻博文、牧野尚夫、2001、火炉内における微粉炭燃焼場の数値シミュレーション - 燃焼特性に及ぼす石炭中水分の影響 -、日本機械学会論文集B編、67、210-218

Kurose, R., Tsuji, H. and Makino, H., 2001, Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion quantities, Fuel, 80, 1457-1465

Kurose, R., Ikeda, M. and Makino, H., 2001, Combustion characteristics of high ash coal in a pulverized coal combustion, Fuel, 80, 1447-1455

Kurose, R., Makino, H. Michioka, T. and Komori, S., 2001, Large eddy simulation of a nonpremixed turbulent reacting mixing layer: effects of heat release and spanwise fluid shear, Combustion and Flame, 127, 2159-2165

Kurose, R. and Makino, H., 2002, Large eddy simulation of a solid-fuel jet flame, Proceedings of Ninth International Conference on Numerical Combustion, 33-34

Kurose, R. and Makino, H., Large eddy simulation of a solid-fuel jet flame, Combustion and Flame (submitted)
牧野尚夫、1995、微粉炭燃焼に伴うNO_x・灰中未燃分の排出特性とその低減技術、博士論文

池田道隆、木本政義、宮崎哲夫、牧野尚夫、1997、石炭中灰分が微粉炭燃焼特性に及ぼす影響、電力中央研究所報告W97023

木本政義、池田道隆、宮崎哲夫、牧野尚夫、1998、微粉炭燃焼特性に及ぼす石炭中水分の影響、電力中央研究所報告W98002

Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, The numerical computation of turbulent flows, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 3, 269-289

Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equation. . The basic experiment, Mon. Weather Rev., 91, 99-164

既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 32 「人間と技術の調和に向けて ヒューマンファクター研究 」1995. 3
NO. 33 「放射線ホルミシス 研究の意義と取り組み 」1996. 3
NO. 34 「ガスタービン研究 高効率発電の主角を担う 」1997. 1
NO. 35 「地下の探査・可視化技術」1997. 5
NO. 36 「送電線コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用 」1998. 3
NO. 37 「乾式リサイクル技術・金属燃料FBRの実現に向けて」2000. 1
NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える
需要家の特性解明と省エネ技術 」2000. 11
NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1
NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2
NO. 44 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて
実証機開発の支援と将来への研究展開 」2001. 10
NO. 45 「地球温暖化の解明と抑制」2001. 11

編集後記

電中研レビュー第46号「微粉炭火力技術の高度化」をお届け致します。

世界のエネルギー消費が、発展途上国を中心に急増している中で、エネルギー資源の約8割近くを海外に依存している日本にとって、エネルギーの安定供給は非常に重要な問題であります。

現在、主要資源の確認可採埋蔵量と可採年数は、電気事業連合会発行の「電気事業の現状(2001-2002)」によると、石油で1兆464億バレル/39.9年、天然ガスで150兆m³/61年、ウランで395万トン/64年、ならびに石炭で9,842億トン/227年となっており、石炭がエネルギー安定供給の観点で、最も安定性に優れ、長期に亘って利用可能であることが分かります。すなわち、石炭を有効活用していくことは、日本にとって非常に重要な課題であるといえます。(ウランは1999年1月現在、その他は2000年末現在)

本書でも、ご紹介致しておりますが、わが国の微粉炭火力技術は、戦後の復興期から、火主水従への移行、石油危機および「大気汚染防止法」の制定などを経て、現在では、蒸気条件の高温・高圧化による発電高効率の向上が図られるとともに、ばいじん、SO_x、NO_xに対する環境対策技術も成熟し、世界の最高水準に達しております。当研究所も昭和56年1月に石炭燃焼量100kg/hrの単一バーナを持

つ石炭燃焼試験炉(BEACH炉)を設置以来、現在まで微粉炭火力技術に関する様々な課題の解決に取り組んでまいりました。そして、そこでの成果は、ワイドレンジバーナーやCI-aバーナとして実用化されると共に、発電所での利用炭種の拡大とコスト低減を目指した発電用炭適正評価システムが電力各社で試用されるといった形で活用されてきております。今後、微粉炭火力技術を一層高度化させる上で、これまで主に取り組んできた使用石炭種の多様化、発電効率の向上、環境性の向上、負荷運用性の向上に加え、新たな高度計測技術や燃焼器内数値解析技術などについても、その技術の確立に向けての研究が必要となっております。当研究所では、これまで用いてきた様々な設備に加えて、より実機を正確に模擬できるマルチバーナ方式の研究設備である「石炭燃焼特性実証試験装置(MARINE炉)」を本年度に新設し、さらなる微粉炭火力技術の高度化に向けた研究を進めて行く所存であります。

本書を通じまして、現在、世界の最高水準に達している我が国の微粉炭火力技術について、これまでの当所を中心にした研究経緯と、今後の動向に対する皆様のご理解の一助になれば幸いです。最後になりましたが、ご多忙の中、本レビューの巻頭言を快くお引き受け頂きました九州大学機能物質科学研究所教授/持田 勲様には、心より御礼申し上げます。



電中研レビュー NO.46

平成14年11月14日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]
(03) 3201-6601 (代表)
E-mail : www-pc-ml@criepi.denken.or.jp
<http://criepi.denken.or.jp/>
印刷・株式会社 電友社

本部 / 経済社会研究所	100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1	(03) 3201-6601	我孫子研究所	270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646	(04) 7182-1181
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター			横須賀研究所	240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1	(0468) 56-2121
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター			赤城試験センター	371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567	(027) 283-2721
	201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1	(03) 3480-2111	塩原実験場	329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033	(0287) 35-2048
