

# 酸素燃焼技術を用いた CO<sub>2</sub> 回収型石炭火力発電ボイラの実証に向けた検討

## Study Results in Demonstration Operation of Oxyfuel Combustion Boiler for CO<sub>2</sub> Capture

山田 敏彦 エネルギー事業本部電力事業部開発部 課長  
石井 徹 エネルギー事業本部電力事業部開発部 課長  
高藤 誠 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部  
磯 良行 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士（工学）

酸素燃焼技術を利用した石炭火力発電からの CO<sub>2</sub> 回収システムは、大規模 CO<sub>2</sub> 排出削減方法の一つとして注目されており、世界各国で研究開発および実証が進められている。当社では、オーストラリアのカライド酸素燃焼プロジェクトに参画し、酸素燃焼ボイラによる発電システムの実証に向けて取り組んでいる。本稿では、酸素燃焼ボイラの特性予測と、安全で安定した運転技術を確認するための検討について紹介する。これらの検討結果は、実証運転のなかで評価・確認され、商用機設計のためのデータとして蓄積される。

The oxyfuel combustion boiler for CO<sub>2</sub> capture is one of candidates as a CCS ( CO<sub>2</sub> Capture and Storage ) system for the coal-fired boilers for electric power generation plants. Research and development activities and demonstration in this area have been conducted worldwide. IHI has participated in the Callide Oxyfuel Project in Australia as a main player and conducted various activities towards demonstration operation of the boiler plant. This report describes the study results, the prediction of combustion characteristics, and the stable and safe operation. These results will be applied to the demonstration plan and the design of the next commercial oxyfuel combustion boiler.

## 1. 緒 言

地球温暖化の主要因とされる CO<sub>2</sub> は、石炭火力発電所から大量に排出されており、その排出削減に向けた対策が注目されている。一方、世界的に見て石炭需要は増加傾向が続くと見込まれており、また、資源が世界中に分布する石炭は、エネルギーセキュリティの観点からも、今後も主要なエネルギー源であると予想される。そこで、石炭火力からのゼロエミッションを目指した技術として、経済的で高効率な CCS ( Carbon dioxide Capture and Storage : CO<sub>2</sub> 回収・貯留 ) 技術に大きな期待が寄せられており、現在、研究開発や実証が世界中で進められている。

本状況から、当社が参画しているカライド酸素燃焼プロジェクト<sup>(1)</sup>は世界に先駆けて実際の石炭火力発電設備に酸素燃焼を適用し、CCS を実証しようとするものである。酸素燃焼について、当社は 1990 年代から研究開発<sup>(2)~(4)</sup>を進めてきており、実証プロジェクトに取り組んでいる。

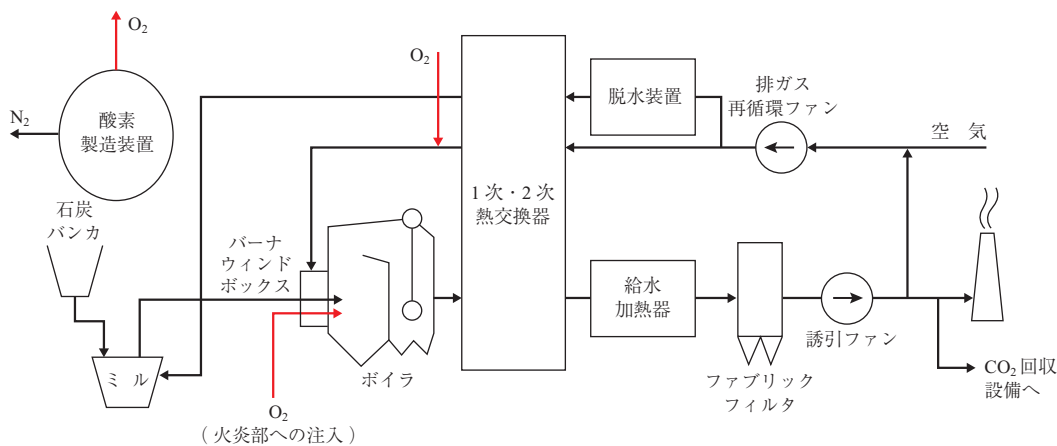
本稿では、今まで実証に向けて取り組んできた研究成果をとりまとめて報告する。酸素燃焼システムの詳細な説明については、既報<sup>(2)~(4)</sup>を参照されたい。

## 2. カライド A ボイラでの実証計画

現在参画しているカライド酸素燃焼プロジェクトの概要について紹介する。

オーストラリアのクイーンズランド州東岸に位置する CS Energy 社所有のカライド A 発電所 No. 4 ユニットが対象発電プラントである。本プラントは、30 MWe 容量の 2 ドラムタイプボイラであるが、実証プラントとして適正な容量であることと、休止していたプラントであり改造することが可能であることから選定された。本プロジェクトでは、既設発電プラントに酸素燃焼を適用して CO<sub>2</sub> 回収を実証し、その性能を確認することが主目的となっている。対象の既設発電プラントの主な仕様を次に示す、また、酸素燃焼適用後の概略プロセス（改造後）を第 1 図に示す。

名 称	カライド A 発電所 No.4 ユニット
定格発電機出力	30 MWe
使 用 石 炭	カライド炭
ボイラ蒸気条件	
主蒸気流量	123 410 kg/h
主蒸気圧力	4.1 MPa



第1図 カライド A ボイラ概略プロセス (改造後)  
 Fig. 1 Schematic process flow of Callide A boiler after applying oxyfuel technology

主蒸気温度 460℃

主要設備

ミル (ピータタイプ)	3 台
バーナ (前面)	6 本
押込ファン/誘引ファン	各 2 基
管型熱交換器	1 基
脱じん装置 (バグフィルタ)	1 基

本プロジェクトでは、酸素製造装置の新設およびボイラシステムへの酸素燃焼適用のための改造を行い、排ガス圧縮・冷却による CO<sub>2</sub> 回収設備が備えられる。現状では、2011 年からの実証運転に向けて順調に進行している。

現在、酸素燃焼システムの実証プロジェクトについては世界で多数実施されているが<sup>(5)</sup>、本プロジェクトは単なる試験設備ではなく、商用運転を経験した既設プラントを改造し、酸素燃焼を適用した世界初の発電プラントであること、機器としてはマルチバーナおよび粉碎機構がシステムに取り込まれ、将来の商用プラントと同じ機器構成プロセスであること、が特徴である。

3. 実証機での燃焼および伝熱特性予測

今までに、実際の燃焼システムを模擬した燃焼試験設備で、酸素燃焼排ガスからの CO<sub>2</sub> 回収<sup>(3)</sup>や基本的な燃焼特性<sup>(2),(4)</sup>などを確認してきた。本稿では、実証機へ適用するに当たり、利用が想定される石炭を用いて予測を必要とする特性について確認試験を行った。

3.1 試験装置および方法

第2図に、燃焼試験設備概略フローを示す。試験炉は、燃焼容量 1.2 MWt、内径 1.3 m、長さ 7.5 m の円筒炉で、

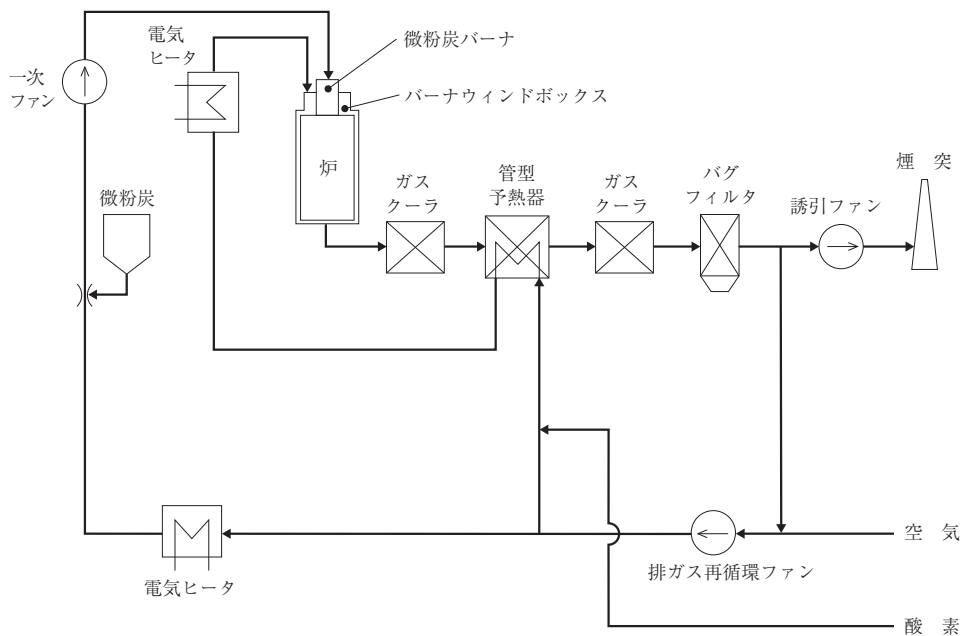
1本のバーナを炉頂に配置したものである。酸素燃焼システムの実施においては、脱じん後のバグフィルタ後流から取り出された排ガスが、排ガス再循環ファンで微粉炭搬送用(1次)ガス、燃焼用(2次)ガスに分岐されてバーナ部へ供給される。燃焼用ガスは酸素と混合され、バーナウインドボックス入口酸素濃度が任意に調整される。

第1表に燃焼試験で用いた豪州炭 3 種類の性状を、第2表に試験条件を示す。

3.2 火炎状態

酸素燃焼状態では、燃焼雰囲気ガスが窒素ではなく、高濃度 CO<sub>2</sub> 雰囲気下での燃焼となる。燃焼雰囲気ガス中の酸素濃度が空気と同じ 21%では、火炎が赤暗く火炎の輝度が低下し、不明りょうなものとなる。そこで、酸素燃焼システムでは、通常の空気燃焼と同等のふく射伝熱特性を示す酸素濃度まで適正に燃焼雰囲気ガス中酸素濃度を上昇させ、火炎温度を調整し、燃焼させる必要がある。

そこで、空気燃焼および酸素燃焼条件の両方で、燃焼量に応じた火炎の安定性を確認した。第3図に火炎状態を示す。酸素燃焼では、微粉炭搬送用ガス量が空気燃焼とほぼ同等とすると、ボイラへ持ち込まれる総ガス量が空気燃焼に比べて減少する。このため、バーナの旋回羽根を通過する2次ガス量が減少し、第3図に示すように、60%の負荷においては、火炎が吹き出し口からより遠くに吹き飛び、火炎調整に必要な旋回流によらない火炎形状へと変わり、火炎が安定しにくくなることが確認されている。このため実証プラントでは、酸素の一部を火炎部に直接導入し、燃焼の安定性を改善している。



第2図 燃焼試験設備概略フロー  
Fig. 2 Schematic process flow of combustion test facilities

第1表 燃焼試験における石炭性状  
Table 1 Coal analysis data

項目	単位	A 炭	B 炭	C 炭	
発熱量	MJ/kg	23.7	27.9	30.0	
全水分	%, ar	11.5	6.0	18.3	
工業分析	固有水分	%, ad	8.8	4.1	14.0
	灰分	%, dry	19.3	18.2	6.9
	揮発分	%, dry	25.7	40.9	34.1
	固定炭素	%, dry	55.0	40.9	59.0
元素分析	C	%, dry	63.5	65.6	74.4
	H	%, dry	2.83	5.26	4.22
	N	%, dry	0.73	0.72	1.91
	O	%, dry	13.49	9.65	11.76
	S	%, dry	0.24	0.57	0.88
主要灰性状	Si	%	47.6	65.7	45.7
	Al	%	28.6	28.5	22.0
	Fe	%	16.0	1.1	19.4
	Ca	%	1.6	0.4	3.8

(注) ar : arrival base  
ad : air dry base  
dry : dry base

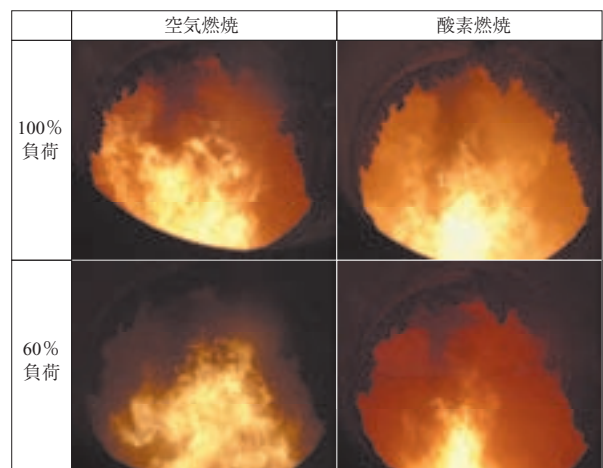
第2表 試験条件  
Table 2 Test condition

項目	単位	空気燃焼	酸素燃焼
投入熱量	% 負荷	60 ~ 100	60 ~ 100
排ガス酸素濃度	dry%	3.5 ~ 4.3	3.5 ~ 4.3
バーナウインドボックス酸素濃度	wet%	(21)	(35)
持込酸素濃度	wet% (at calc.*1)	21	27

(注) \*1: 計算値

### 3.3 燃焼特性

第4図～第7図には、空気燃焼と酸素燃焼状態での NO<sub>x</sub>, 未燃分, SO<sub>2</sub> および H<sub>2</sub>O の排出特性を示す。NO<sub>x</sub> については実証機プラントに合せ、二段燃焼を行わない条件で評価したものである。この結果、酸素燃焼時の NO<sub>x</sub>

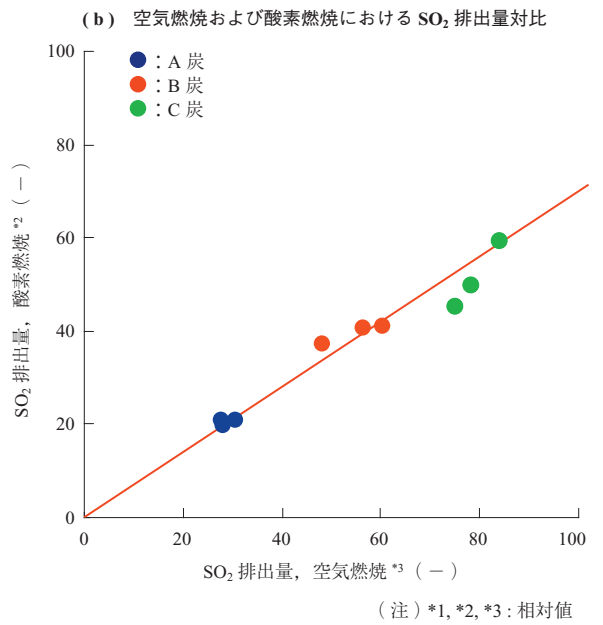
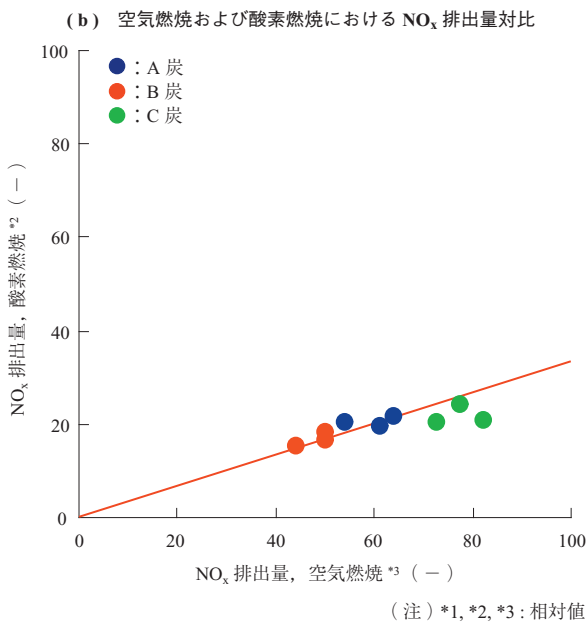
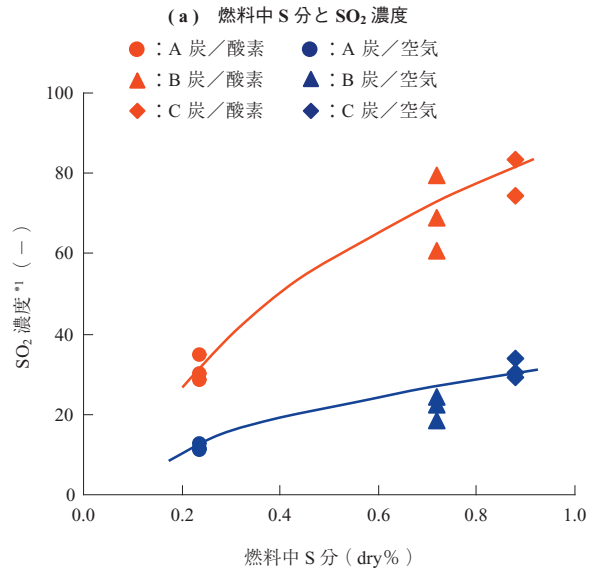
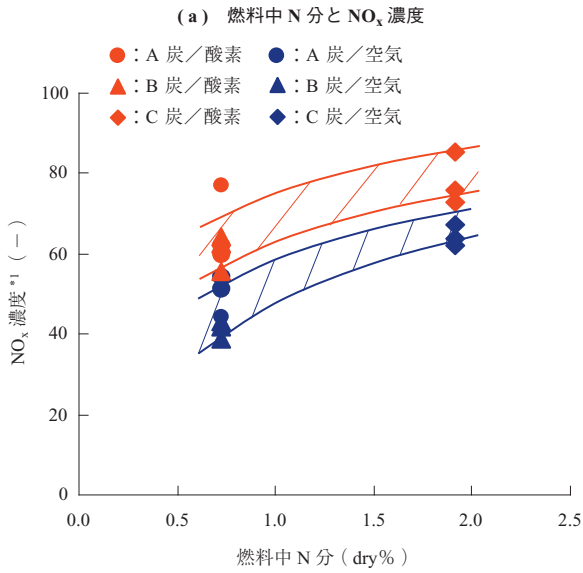


第3図 火炎状態  
Fig. 3 Photos of flame at combustion tests

濃度は空気燃焼時と比較して 20 ~ 30% 高い濃度となるが、煙突から系外へ排出される量は 60 ~ 70% 減少する。これは酸素燃焼において系外へ排出されるガス量が少なくなることで、再循環排ガスに含まれる NO<sub>x</sub> がバーナ部で分解したことが主要要因<sup>(6)</sup>である。

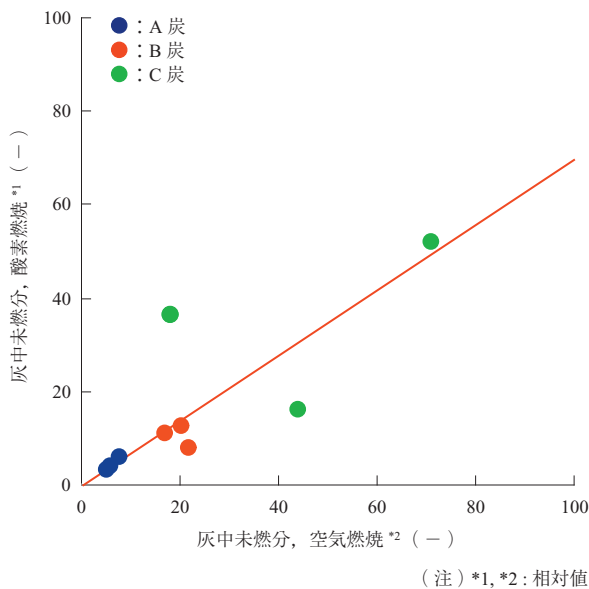
酸素燃焼では、未燃分は減少する傾向にある。これは同じ燃焼炉であれば、燃焼排ガス量の少ない酸素燃焼時の炉内滞留時間が長くなること、局所的に高酸素濃度雰囲気となり燃焼が改善したことが要因と考えられる。

第6図に各石炭燃焼における SO<sub>2</sub> 排出特性を示す。酸素燃焼では、排ガス中の濃度は約 2.5 倍になるが、系外

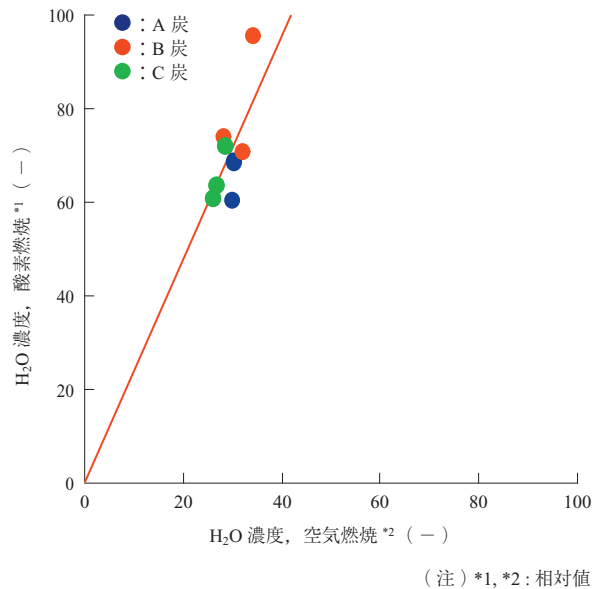


第4図 NO<sub>x</sub> 排出特性  
 Fig. 4 NO<sub>x</sub> emission characteristics

第6図 SO<sub>2</sub> 排出特性  
 Fig. 6 SO<sub>2</sub> emission characteristics



第5図 灰中未燃分  
 Fig. 5 Carbon in ash



第7図 H<sub>2</sub>O 排出特性  
 Fig. 7 H<sub>2</sub>O emission characteristics

への排出量は約 30%減少した。この要因としては、灰に取り込まれる硫黄分が増加したためと考えられる<sup>(7)</sup>。

酸素燃焼時の H<sub>2</sub>O 濃度についての結果を第 7 図に示す。H<sub>2</sub>O 濃度は、空気燃焼に比べて約 2.5 倍の濃度になっている。この H<sub>2</sub>O 濃度は酸露点に影響し、低温排ガス中の接ガス部の材料選定に必要な指標となる。

### 3.4 伝熱特性

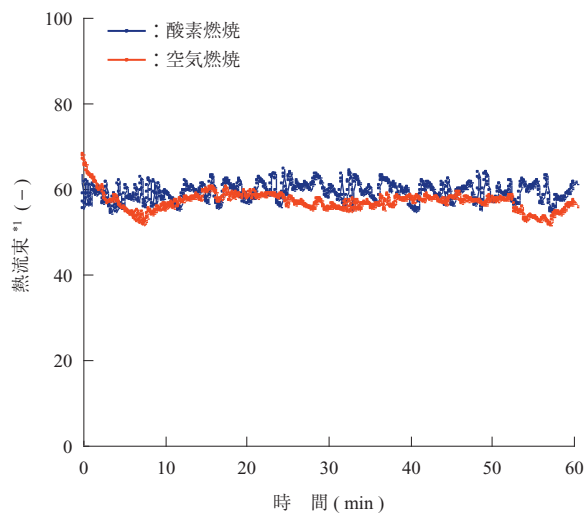
炉内のふく射伝熱部に模擬伝熱管を設置して、収熱量の計測を行い、空気燃焼時と酸素燃焼時を比較した結果を第 8 図に示す。本試験前にボイラ火炉の伝熱数値解析<sup>(8)</sup>を実施し、ボイラの燃焼ガス中の適正な酸素濃度を検討した。今回の燃焼試験において、数値解析で予想した燃焼ガス中の酸素濃度によって、空気燃焼と同等のふく射伝熱特性を示すことが確認できた。

## 4. 実証機安全性にかかわる検討

実証機を検討するに当たり、本プロセスにかかわる安全性の検討を実施した。この結果、フライアッシュ（飛灰）の再循環の可能性およびバーナ段ごとにおける燃焼ガス中の酸素濃度の違いの可能性が示唆された。これらは、プラントが安全で安定した運用をするため、確認が必要な項目であり、検討を実施した。以下、検討結果を示す。

### 4.1 フライアッシュの発火特性

実証機プロセスでは、酸素は再循環排ガスと燃焼前に混

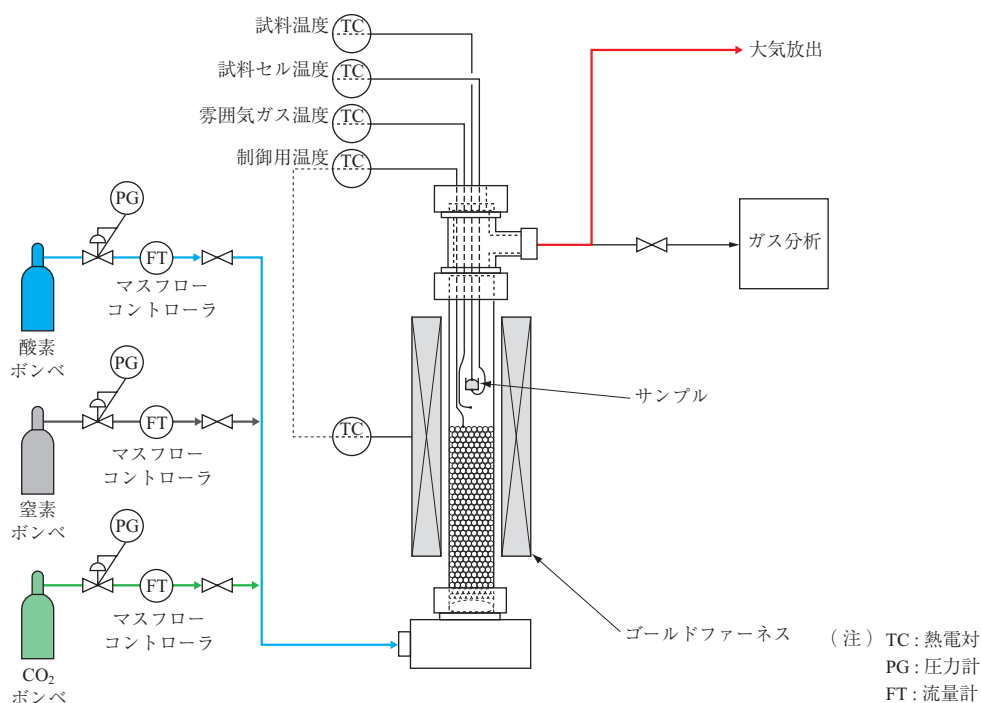


第 8 図 空気燃焼および酸素燃焼における炉内熱流束比較  
Fig. 8 Comparison of heat flux between air and oxyfuel

合される。再循環排ガスには、微量のフライアッシュが含まれており、その混合部で高温・高酸素濃度雰囲気になった場合、未燃物による発火が懸念される。また、長期連続運転の場合、ダクト内に灰がたい積する可能性があり、フライアッシュの炭素分と酸素濃度による発火特性を確認するため、フライアッシュに活性炭を混合させたサンプルで発火試験を実施した。

### (1) 試験装置

第 9 図に試験装置を示す。フライアッシュに活性



第 9 図 高温および高酸素濃度雰囲気におけるフライアッシュの発火確認試験装置  
Fig. 9 System configuration for confirmation tests on behavior of fly ash under high temperature and high O<sub>2</sub> concentration atmosphere



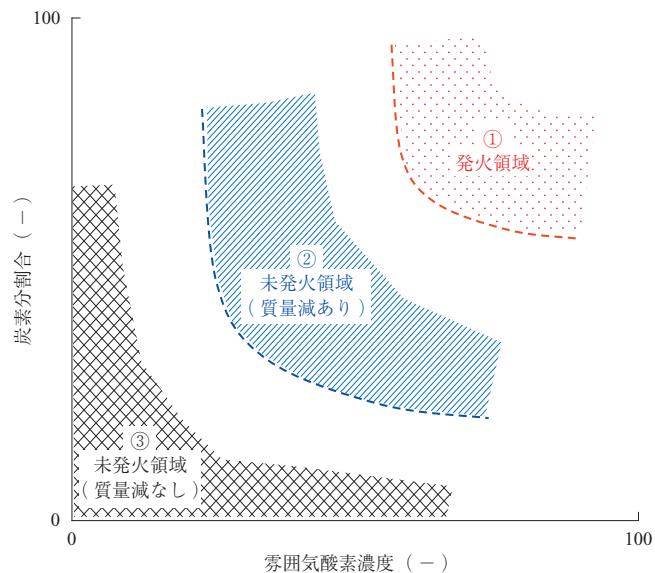
炭を混合することで、ある炭素分割合に調整されたサンプルをセル（約 1 cm<sup>3</sup>）に設置し、酸素濃度を調整したガスを炉下部から投入する。ガス温度を毎分 3℃で上昇させ、ある温度で一定時間保ち、発火の有無を評価する。

## (2) 発火挙動概念

発火挙動について、温度・酸素濃度雰囲気およびサンプルの炭素分割合による影響を考慮した試験を実施した。その発火挙動の概念を第 10 図に示す。発火の形態は 3 種類に分類され、① 顕著な温度上昇が見られサンプルが発火する場合 ② 発火はしないが試験後のサンプルの質量が減少する場合 ③ 発火も質量減少もみられない場合、となる。今までの結果から、実証機における温度レベルでは、発火の可能性は低いことを把握している。

## 4.2 再循環排ガスと酸素の混合

実証プロジェクトにおいて、酸素は予熱器を通過した再循環排ガスと混合され、そのままバーナへ導入される。バーナは、2 列 3 段に配置されており、炉内の安定燃焼を得るためには、バーナ流入前に良好な混合状態であることが要求される。そこで、数値解析を実施し、バーナ入口部における混合状態の確認と酸素の注入ノズルの最適化を



第 10 図 発火挙動の概念

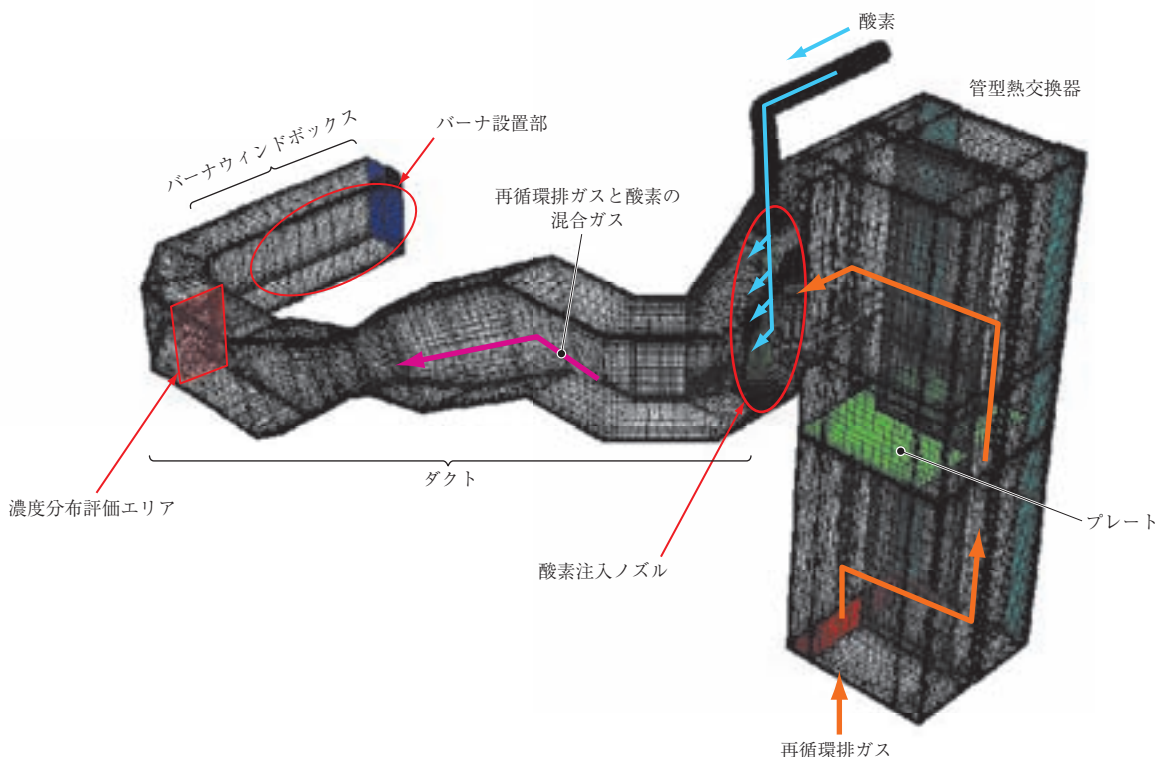
Fig. 10 Basic concept of the ignition behavior of fly ash

図った。

### (1) 解析条件

第 11 図に、混合解析モデルを示す。解析には、熱流体解析プログラム STAR-CD を用いた。

酸素と再循環排ガスの温度はそれぞれ常温および 300℃であり、また、酸素流量は、再循環排ガス流量



第 11 図 混合解析モデル

Fig. 11 Mixing simulation model

の約 1/4 とした。

酸素注入ノズル形状については、ノズルの長さ、注入孔部面積、配置と方向および圧力損失などの最適化を図った。

## (2) 解析結果

第 12 図に混合解析結果を示す。最適な酸素注入ノズルでの混合状態では、評価エリアであるバーナ入口部において、 $\pm 1.0\%$ 以下で混合していることが確認できる。また、ダクト壁面に沿って高酸素濃度ガスが接触していないことが確認され、4.1 項で懸念されたダクト面上に、たい積灰がある場合でも発火の可能性は低いことが示された。これらの結果は、実証プラントの設計に反映され、実証運転時に確認される。

## 5. 結 言

本稿では、酸素燃焼に関する従来の知見を生かし、実証プロジェクト適用に際して、必要なデータおよび新たな検討事項について紹介した。今後も、実証運転および商用化に向けて、さらにデータおよびノウハウの蓄積を行うとともに、安全で安定した CO<sub>2</sub> 回収酸素燃焼発電プラントの早期実現に向けて取り組んでいく。

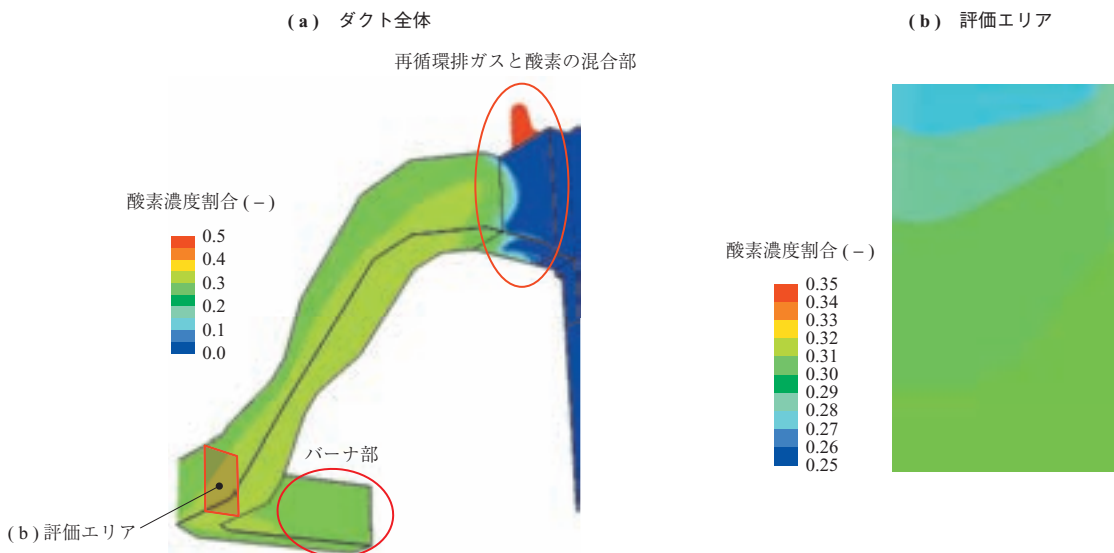
## — 謝 辞 —

本調査検討内容は、経済産業省資源エネルギー庁、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、カライドプロジェクトメンバである CS Energy 社、電源開発株式

会社および三井物産株式会社をはじめとする日本・オーストラリアの多数の関係者の協力を得て実施した。ここに記し、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Chris Spero : Callide Oxyfuel Project – Status & Development – Proc. 1st Oxyfuel Combustion Conference (2009.9)
- (2) 高野伸一, 氣駕尚志, 遠藤喜彦, 宮前茂広, 鈴木孝平 : O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 燃焼による微粉炭火力発電所からの CO<sub>2</sub> 回収技術 石川島播磨技報 第 34 巻 第 6 号 1994 年 11 月 pp.433 – 438
- (3) 山田敏彦, 氣駕尚志, 藤田直史, 井上敏男 : 酸素燃焼による CO<sub>2</sub> 回収型石炭燃焼火力発電プラント運用についての研究 石川島播磨技報 第 39 巻 第 1 号 1999 年 1 月 pp.29 – 34
- (4) 須田俊之, 小田幸男, 益子克己, 宮前茂広 : 微粉炭酸素燃焼場における石炭燃焼機構の基礎研究 石川島播磨技報 第 40 巻 第 3 号 2000 年 5 月 pp.119 – 123
- (5) Terry Wall : Coal Based Oxy-fuel Technology – Progress to Deployment – Proc. 1st Oxyfuel Combustion Conference (2009.9)
- (6) K. Okazaki and T. Ando : NO<sub>x</sub> Reduction Mechanism in Coal Combustion with Recycled CO<sub>2</sub> Energy Vol. 22 No.2/3 (1997) pp.207 – 215



第 12 図 混合解析結果  
Fig. 12 Mixing simulation results

- (7) Hao Liu, S. Katagiri and K. Okazaki : Drastic SO<sub>x</sub> Removal and Influences of Various Factors in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Pulverized Coal Combustion System Energy & Fuels 15 (2001) pp. 403 - 412
- (8) 山田敏彦, 三澤信博, 氣駕尚志 : 酸素燃焼技術

を利用した石炭火力発電所における CO<sub>2</sub> 排出削減 - カライド酸素燃焼プロジェクト - 日本ガスタービン学会誌 37 巻 2 号 2009 年 3 月 pp. 67 - 71