

酸素燃焼発電プラントの商用化への取組み

Efforts Aimed at the Commercialization of Oxyfuel Power Plants

山田敏彦	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	主査
小牧晃洋	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	
後藤隆弘	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	
内田輝俊	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	
藤原直樹	エネルギー・プラントセクターエンジニアリングセンター開発部	主幹
氣駕尚志	エネルギー・プラントセクター	技師長 博士(工学)

酸素燃焼技術を用いた発電プラントは、地球温暖化の主要因である CO₂ の大規模排出抑制方法の一つとして、商用化が待ち望まれている。現在、既設プラントに酸素燃焼を適用したカライド酸素燃焼プロジェクトに参画し、実証を推し進めている。この実証運転では酸素燃焼ボイラの特性に加え、発電プラントから CO₂ を回収し、プラント全体の運用性などを確認している。また、本実証技術をオーストラリアの 500 MWe 石炭火力発電所に適用した場合の性能や経済性について検討を実施し、商用化に向け取り組んでいる。

The oxyfuel power plant is one of the candidates for large-scale CO₂ capture as an economical measure to mitigate global climate change. IHI has been developing oxyfuel combustion technology since 1989, and is running the Callide Oxyfuel Project with partners in Australia and Japan. At present, results have been obtained for a 30 MWe plant and the operation characteristics of the oxyfuel boiler are confirmed. Almost pure CO₂ is produced in the power station and overall operation flexibility of the plant is also confirmed. At the same time, the feasibility of a 500 MWe oxyfuel power plant in Australia has also been studied, and the plant performance and costs have been evaluated in preparation for the commercialization of oxyfuel power plants.

1. 緒 言

酸素燃焼発電プラントは、石炭火力からの CO₂ 排出削減方法の一つとして、将来の切り札となることが期待されている。

地球温暖化あるいは気候変動などバランスの崩れた地球環境について、世界各地でさまざまな事象が発生しており、日常生活のなかに見いだされることが多々ある。この主要因として、温室効果ガスの主成分である大気中 CO₂ 濃度の増加が考えられている。現在、その濃度は年間約 2 ppm でコンスタントに上昇し、18 世紀産業革命以前の 280 ppm に比べ、2012 年には北半球で 400 ppm を初めて一時的に上回った。世界の平均気温を産業革命以前から 2℃ 上昇に抑えるには、大気中 CO₂ 濃度を 450 ppm 程度に抑える必要があるとの報告⁽¹⁾がある。そのためには、ここ 10～20 年のうちに大幅な CO₂ 排出削減を成し遂げなければならない。そして、1 ユニットで年間数百万 t と大規模に CO₂ を排出している石炭火力からの CO₂ 排出削減が急務であることは必然である。これに呼応するかのよう、アメリカやカナダでは、石炭火力から排出さ

れる CO₂ の原単位 (kg-CO₂/MW・h) を規制する動きがあり、石炭火力に対する強い CO₂ 排出抑制の社会的要求が始まろうとしている。

一方、石炭は世界的に埋蔵量も多く、経済的な燃料であるが、単位発電量当たりの CO₂ 排出量が多く、前述のとおり石炭燃焼後の CO₂ 排出が大きなマイナス要因となっている。

そこで、石炭火力からの CO₂ 排出抑制方法には、高効率化が有効な手段の一つであることに加え、さらなる CO₂ 排出削減のために、ニアゼロエミッション火力となる、CCS (CO₂ Capture and Storage) を付加した石炭火力の開発・実証が進められている。

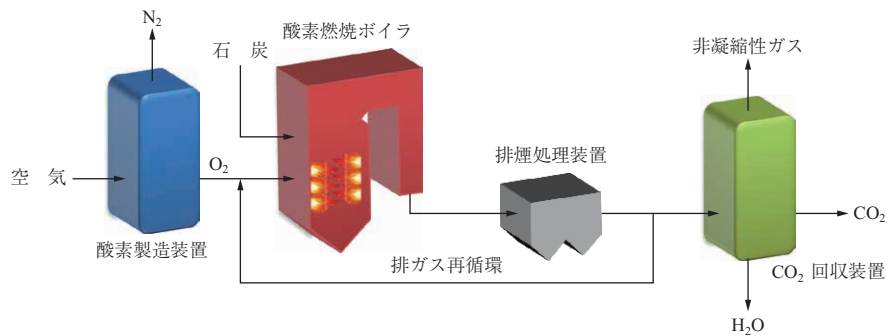
当社では、石炭火力からの CO₂ 回収方法の一つである酸素燃焼技術を用いた、オーストラリアでのカライド酸素燃焼プロジェクトに参画するとともに、実証運転データを積極的に取得している。さらに、オーストラリアと共同で、酸素燃焼を適用した 500 MW プラントの FS (Feasibility Study) を実施し、本技術の商用化に向けて取り組んでいる。本稿ではこれらの概要を紹介する。

2. 酸素燃焼発電プラント

CCS は石炭火力から排出される CO_2 を回収して、地中に貯留するプロセスのことであり、酸素燃焼発電プラントはその有効な手法の一つとなっている。

第 1 図に酸素燃焼プロセス概念図を示す。酸素燃焼は、空気からあらかじめ N_2 を分離し、酸素で燃料（石炭）を燃焼させるもので、これによって、排ガス中 CO_2 濃度を理論的に 90%以上まで高めることができ、その排ガスを圧縮・冷却することで CO_2 を容易に回収しようとするシステムである。以下に主な特長を示す。

- (1) 本酸素燃焼は、新設のみならず既設プラントへの適用が可能である。
- (2) 局所的に高濃度 O_2 雰囲気形成可能であり、燃焼改善が図れる。
- (3) システムからの排ガス量が空気燃焼に比べ少なく、熱損失が小さくなるため、ボイラ効率の向上が望める。
- (4) 再循環ガス中の NO_x が炉内火炎で還元されるため、プロセス外への NO_x 排出量が減る。また、



第 1 図 酸素燃焼プロセス概念図
Fig. 1 Concept of oxyfuel process for CO_2 capture



第 2 図 カライド A 発電所 4 号機
Fig. 2 Callide-A Power Station No4 unit

CO_2 回収装置 (CPU) 内でも NO_x が回収される。

(5) 脱硫装置は排ガス量が減ることから、小型化が可能である。

(6) N_2 の有効利用が可能である。

3. カライド酸素燃焼プロジェクト

現在、オーストラリア・クイーンズランド州で、カライド酸素燃焼プロジェクトが実施されており、世界初かつ世界で唯一の酸素燃焼発電プラントが実証運転されている。本プロジェクトは、日豪両政府およびクイーンズランド州政府からの支援を得、オーストラリア石炭協会および日豪民間 6 社で実施しているものである。

3.1 プロジェクト概要

本プロジェクトは 2008 年 3 月に開始した、ステージ 1 では第 2 図に示す既設のカライド A 発電所 4 号機（カライド A）に対して、酸素燃焼を適用した CO_2 回収の実証、ステージ 2 では、カライド A で回収された CO_2 を貯留サイトまで輸送し、地中への CO_2 注入を実施するものである。

ステージ 1 において、2015 年 2 月 1 日の時点で、酸

素燃焼運転 10 000 h 以上を達成したところである。

3.2 カライド A 酸素燃焼プロセス

第 3 図に、カライド A に適用されている酸素燃焼プロセスフローを示す。また、CPU においては、ガス圧縮機前の脱硫装置で硫黄分はほぼ除去され、圧縮後、脱硝および脱水される。さらに、コールドボックス内で非凝縮性ガスである O₂ や N₂ が分離され、99%以上の CO₂ が回収されることになる。第 1 表には、酸素燃焼適用後のカライド A の概要を示す。以下に、特徴を示す。

- (1) 石炭の粉碎・乾燥を行うミルがプロセス内にある。
- (2) バーナは 6 本のうち 4 本が常用での運用となり、バーナパターンの違いによる特性を確認できる。
- (3) 排ガス冷却のため、ボイラ低圧給水との熱交換器が設置されている。
- (4) ミル出口などの低温部での腐食を避けるため、水分除去システムが導入されている。このシステムにはバイパスラインを設け、脱水運転と非脱水運転の両方を行える。
- (5) 押込通風機は空気燃焼時大気を吸い込む。また、酸素燃焼時は、排ガスを再循環する。
- (6) 酸素燃焼で酸素は再循環ガスと混合するが、供給酸素の一部は直接バーナ火炎部へ供給可能で、その特性を確認できる。
- (7) CPU には酸素燃焼時排ガスの約 10%が導かれ、ほぼ純粋な CO₂ を製造する。

カライド A は CO₂ 回収を念頭に置いたプラントでないにもかかわらず、酸素燃焼の適用、改造を実施し、酸素

第 1 表 カライド A 発電所 4 号機 概要
Table 1 Outline of Callide-A Power Station No4 unit

項 目	内 容	
名 称	カライド A 発電所 4 号機 ・1969 年 運転開始 ・1998 年 改造および運転再開	
出 力	30 MWe	
石 炭	カライド炭	
酸素製造 プロセス	方 式	深冷分離法
	仕 様	330 t/day × 2 基 O ₂ 製造純度：98%以上
ボイラ プロセス	ボイラタイプ	2 ドラムタイプ自然循環式
	蒸気条件 (蒸気ター ビン入口)	流量：136 t/h 圧力：4.1 MPa 温度：460℃
	燃焼システム	ピータタイプミル：3 台 バーナ：前面燃焼 6 本設置（内 2 本が IHI バーナ） O ₂ 供給ノズル設置
通風方式	平衡通風 押込通風機／誘引通風機：各 1 台	
CO ₂ 回収 プロセス	仕 様	75 t/day CO ₂ 製造純度：99 vol%以上

燃焼発電プラントからの CO₂ 回収を実現している。

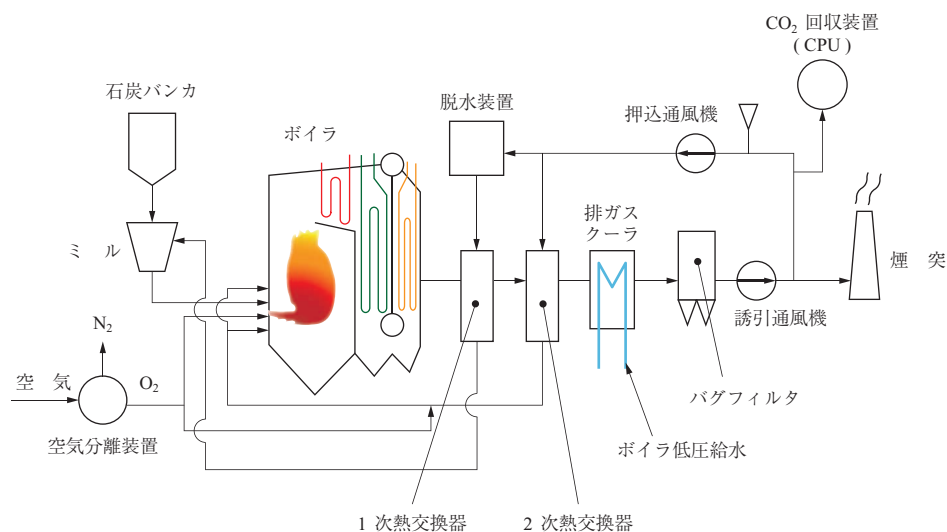
3.3 酸素燃焼運転状況

酸素燃焼運転は 2012 年 3 月から試運転を開始し、燃焼モード切替、トリップ時対応などの安全運転をまず確認した後、順調に運転が継続されている。

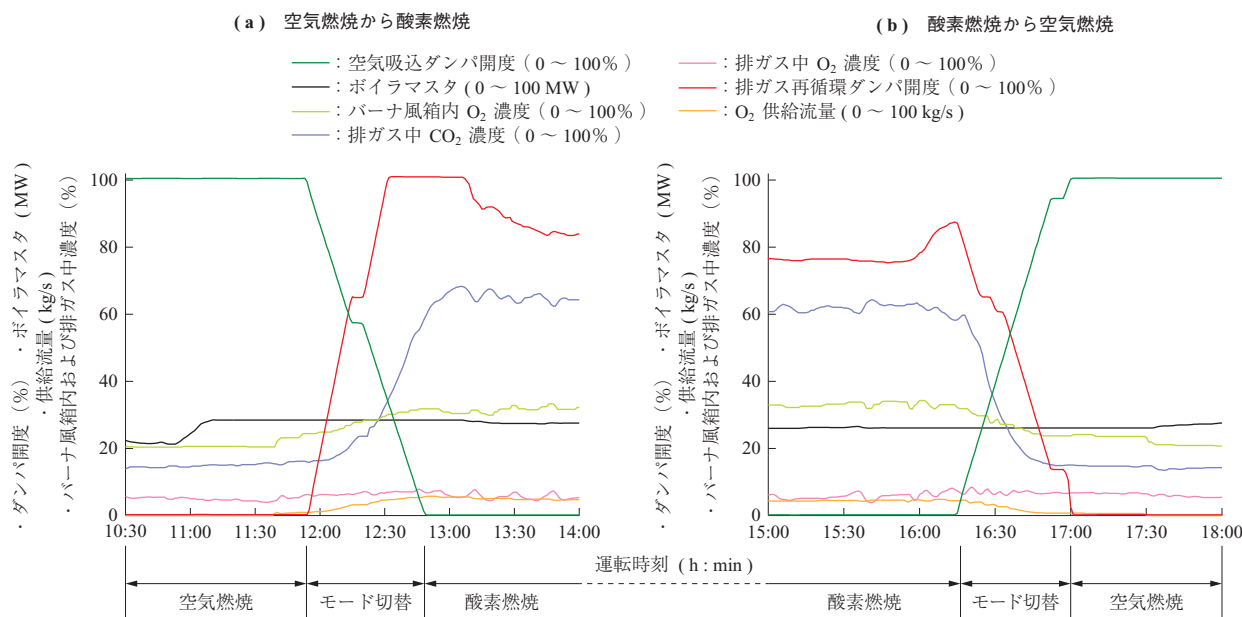
3.3.1 酸素燃焼発電プラント運転・安全性

(1) 燃焼モード切替

本プラントは起動時空気燃焼で起動し、ある一定負荷に到達後、酸素燃焼に切り替えられる。第 4 図に燃焼（空気燃焼 ⇒ 酸素燃焼 ⇒ 空気燃焼）モード切替運転時の挙動を示す。燃焼モード切替については、切替時間の短縮など今後のさらなる改善の余地



第 3 図 カライド A 発電所 4 号機 酸素燃焼プロセスフロー
Fig. 3 Callide-A oxyfuel process flow



第4図 燃焼モード切替運転時の挙動
 Fig. 4 Trend data during combustion mode transition

があるが、安定して実施できている。

(2) 燃料緊急遮断など安全停止

酸素燃焼発電プラントの運転は初の試みであり、緊急時に安全に停止することが必須であり、CPUを含めて試運転を通じ安全停止することを確認した。

(3) 空気および酸素燃焼の 30 MWe 運転比較

カライド A の酸素燃焼化改造の設計段階において、空気燃焼および酸素燃焼で、定格の 30 MWe 運転を実現することにしてきた。運転の結果、両条件で定格負荷での運転を実現しているとともに、酸素燃焼時の火炉取熱割合は、ほぼ空気燃焼時の火炉取熱と同割合であることを確認した。この結果から既存の空気燃焼ボイラ火炉を改造することなく、酸素燃焼運転ができることを実証した。

また、酸素燃焼時は排ガスの熱をボイラ低圧給水で回収していることから、蒸気タービン抽気量を減らせ、結果として発電端プラント効率が空気燃焼に比べ、向上していることも確認できた。

3.3.2 排ガス特性

(1) CO₂ の排出挙動

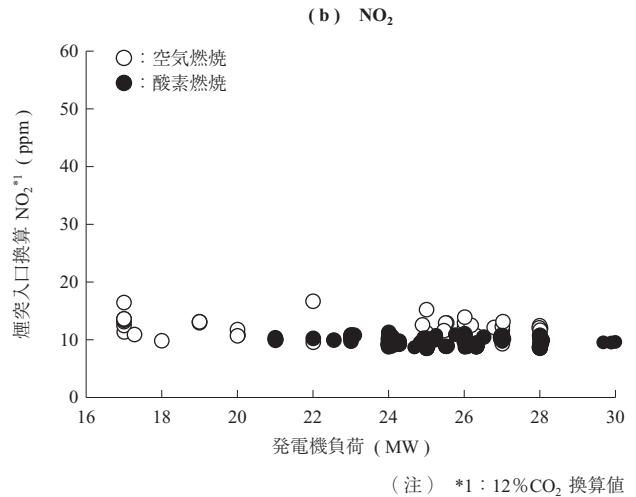
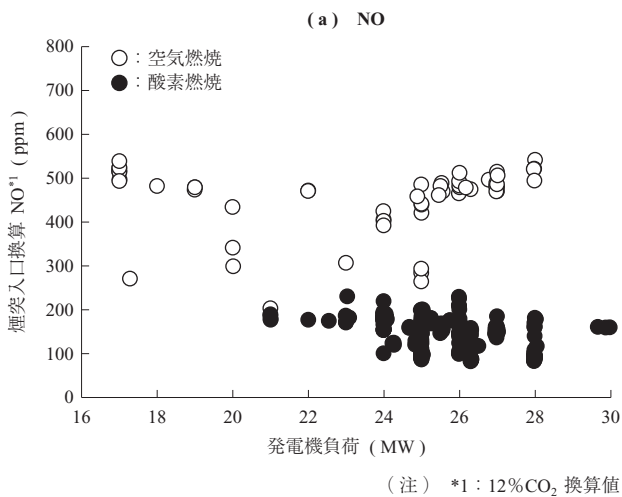
カライド A は 1960 年代に建設されたものであり、各所からのプロセス内への空気吸い込みが避けられない。そこで、カライド A での空気燃焼試験結果から、酸素燃焼での目標を CO₂ 濃度 55 wet% (約 70 dry% : CPU 入口) と設定した。

実証運転の結果、30 MWe 定格負荷において本目標を達成することを確認した。そして、CPU では、最終的に純度 99.9% 以上の CO₂ を製造していることを確認した。

(2) NO および NO₂ 排出挙動

ボイラプロセス内においては、当社 (相生工場) パイロットプラントでの試験結果⁽²⁾ から、NO_x 排出量が約 1/3 に減ることが知られている。第 5 図に NO_x 濃度 (12% CO₂ 換算) を示す。本図内では排出量を空気燃焼と酸素燃焼で比較するため、CO₂ 濃度を 12% に換算した場合の NO_x 濃度で示す。カライド A での NO_x 排出特性を確認した結果、当社 (相生工場) パイロットプラントでの試験結果と同様に、空気燃焼に比べ約 1/3 の換算 NO 濃度となることが確認された。一方、NO₂ については空気燃焼と同等の換算 NO₂ 濃度になっており、生成後の NO₂ は還元されていないことが確認された。

一方、CPU 内に流れる NO_x は、圧縮冷却の過程で、NO が NO₂ に酸化され、大部分はドレン水と一緒に回収されることが確認できている。また、圧縮後に残った NO₂ においても、圧縮下でのスクラバ (洗浄塔) および分離塔を通じて、製造 CO₂ 内の NO_x 濃度は ppm オーダとなっている。



第 5 図 NO_x 濃度
Fig. 5 NO_x concentration at stack inlet

(3) SO₂ および SO₃ の排出挙動

煙突入口（ボイラプロセス出口）における SO₂ 濃度（12% CO₂ 換算）、ボイラプロセス内の各所における SO₃ 濃度、SO₃ 挙動計測結果を第 6 図に示す。

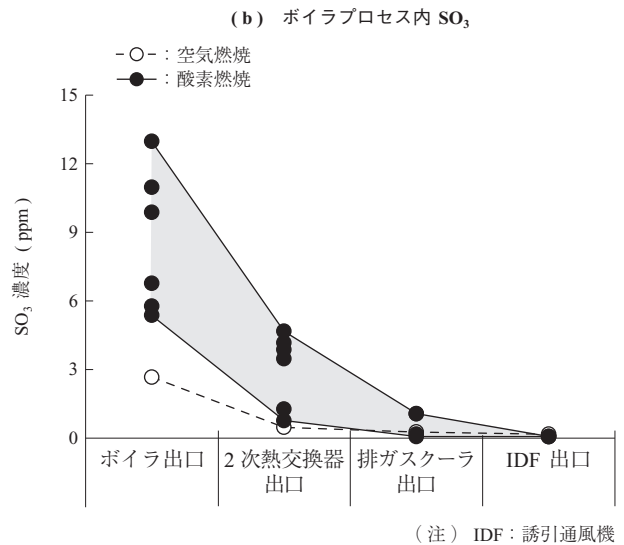
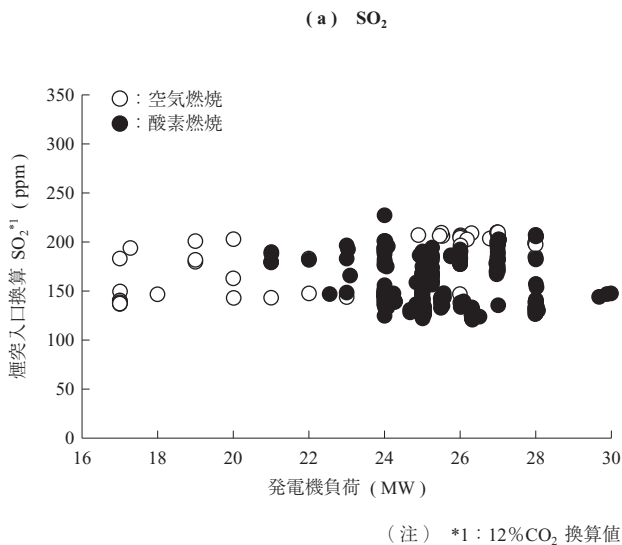
換算 SO₂ 濃度は、空気燃焼と酸素燃焼で大きな違いはない。SO₃ 濃度は酸素燃焼時ボイラ出口では空気燃焼時より高いものの、後流に進むに従い低下傾向にあり、誘引通風機出口では 1 ppm 以下となっており、ほぼ空気燃焼と同レベルとなっていることが確認できた。これは排ガス中 SO₃ が石炭灰中アルカリ分へ吸着されたものと考えられる。

最終的に SO₂ は CPU 内のガス圧縮機前に設置されている脱硫装置で、ほぼ完全に除去される。

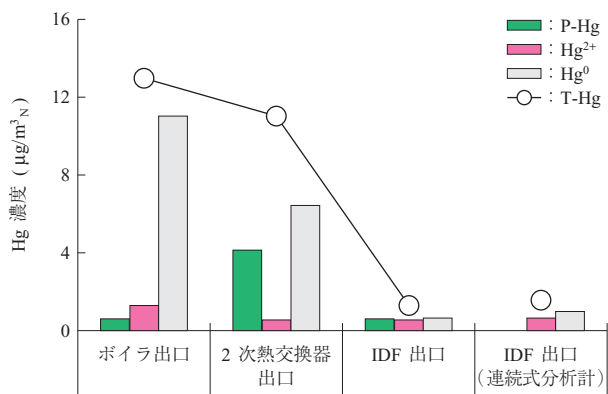
(4) 水銀の挙動

ボイラプロセス内の各所において、SO₃ および形態別水銀の計測を行った。第 7 図にボイラプロセス内水銀 (Hg) 挙動を示す。本図ではオンタリオハイドロ法で計測したものに加え、誘引通風機出口では連続式水銀分析計でも計測した値を示す。

水銀は酸素燃焼時ボイラ出口では、0 価水銀 (Hg⁰) が多く濃度が高いものの、後流に進むに従い、ガス温度の低下とともに低下傾向にあり、誘引通風機出口では全水銀 (T-Hg) が約 1 μg/m³_N となる。灰中の未燃炭素に吸着されたものと考えられる。また、CPU に流れた水銀は、圧縮・冷却の過程でほぼ完全にドレン中に除去されることが確認されている。



第 6 図 SO₂ 濃度と SO₃ 挙動
Fig. 6 SO₂ concentration at stack inlet & SO₃ behavior in boiler process



第7図 ボイラプロセス内水銀 (Hg) 挙動
Fig. 7 Hg behavior in boiler process

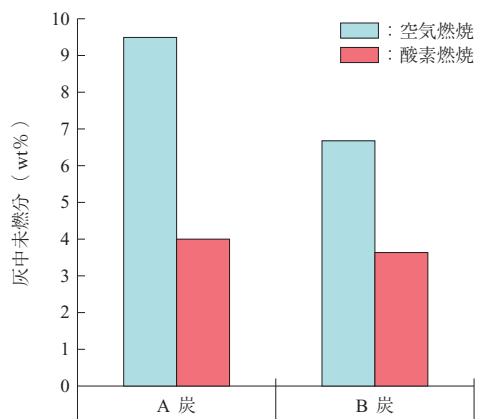
(5) 灰中未燃分

ボイラプロセス内にある計 13 個のホッパから灰をサンプルし、分析を行った。第 8 図に石炭ごとの灰中未燃分の質量平均した値を示す。その結果、当社（相生工場）パイロットプラントでの試験結果⁽²⁾と同様、酸素燃焼での灰中未燃分は空気燃焼に比べほぼ半減することが確認できた。

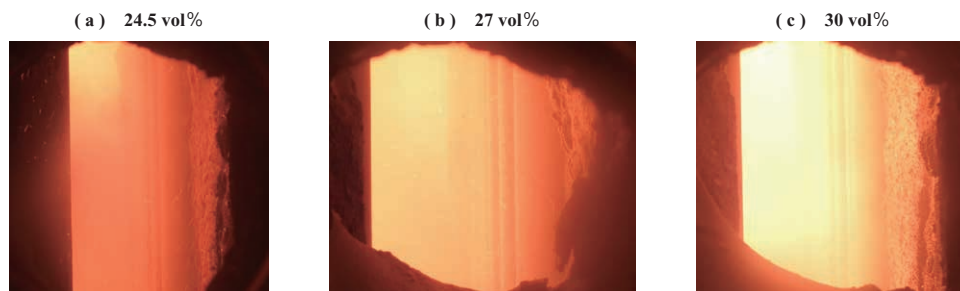
3.3.3 運用性の向上

(1) ボイラ入口 O₂ 濃度変化時の特性確認

酸素燃焼では再循環ガス流量を変化することで、



第8図 灰中未燃分
Fig. 8 Carbon residue in ash



第9図 ボイラ入口 O₂ 濃度変化時の火炎の様子
Fig. 9 Oxyfuel flame at various boiler inlet O₂ concentrations

ボイラ入口 O₂ 濃度が変わり、結果として火炎温度およびボイラ特性が変化することが知られている。

カライド A において、ボイラ入口 O₂ 濃度を 24 ~ 30% の範囲で変化することによって、火炎形状の変化およびボイラ出口蒸気温度調整用スプレ流量の変化が予想どおり確認できた。そのときの火炎の様子を第 9 図に示す。本図からはボイラ入口 O₂ 濃度が増加するに連れ、火炎がバーナスロート部に近づいてきているのが確認できる。

(2) 最低負荷運用の拡大

当初の設計段階において、カライド A の低負荷での運用について火炎保持およびミル周り熱バランスの懸念があったことから、24 MWe をプラント運用の下限としていた。しかし、実証運転を進めていくなかで、これらの懸念が薄れてきたのと商用機の運用を考慮すれば、より低負荷への運転範囲拡大は不可避であることから、最低負荷確認試験を実施した。

その結果、酸素燃焼において 15 MWe (50% 負荷) の安定運転を確認することができ、運用範囲が大きく改善された。

3.4 今後の試験予定

カライド A は 2015 年 3 月初頭までの運転を予定しており、継続して商用機に必要な運転データの取得を行っているところである。以下に現在取り組んでいる主な試験項目を示す。

- (1) 炭種変化による特性確認
- (2) バーナ火炎への直接酸素供給による効果確認
- (3) 燃焼モード切替の最適化
- (4) 機器耐久性確認およびボイラ管材の酸素燃焼雰囲気下曝露試験

4. 500 MWe 酸素燃焼発電プラントの実現可能性検討

オーストラリア・クイーンズランド州のプラントを対象

に、本酸素燃焼を適用した場合の性能および経済性検討を実施した⁽³⁾。本検討は発電所内に新設の酸素燃焼発電プラントを建設し、CO₂を140 km 搬送した後、貯留することを想定したものである。

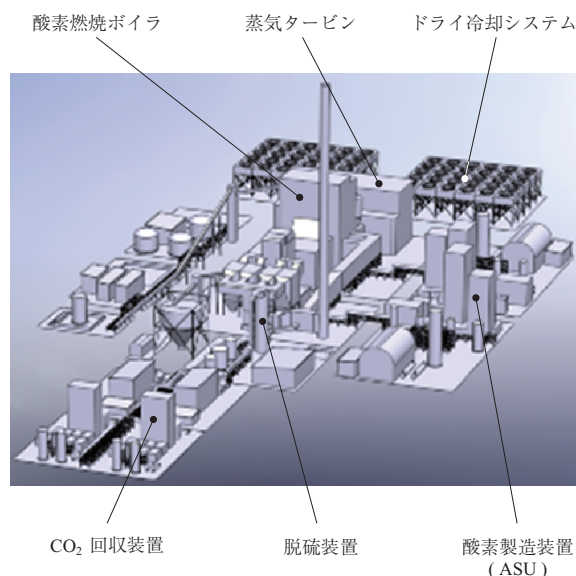
第2表にCO₂回収型500 MWe酸素燃焼発電プラントの検討条件を示す。出力500 MWeを空気燃焼および酸素燃焼の両方で維持すること、ボイラは最新鋭超々臨界圧プラントで使用されている600℃級蒸気条件、また、内陸部であるため発電用タービンなどに用いる冷却水の冷却にクローズ式のドライ冷却システムを採用している。

酸素製造装置は現状最大級の容量である200 t/hのものを2基、CPUも270 t/hのものを2基とし、回収率98%以上を条件とした。また、ボイラでの排煙処理システムは、カライドAプロセスと同様、脱硝および脱硫装置は設置しない。その結果、想定したエリア内にプラントが配置された。第10図に500 MWe酸素燃焼発電プラントの全体図を示す。

第3表に本プラントの性能検討結果を示す。酸素燃焼ではボイラプロセスでの熱損失が少なくなるのと、ボイラ給水による熱回収によって、空気燃焼に比べ発電端での効率は上昇し、燃料消費量は減ることになる。

また、CO₂排出量は20 g/kW-hとなる。酸素製造装置およびCO₂回収の動力が必要となり、送電端での出力は345 MWe、効率は31.5%まで低下する結果となった。

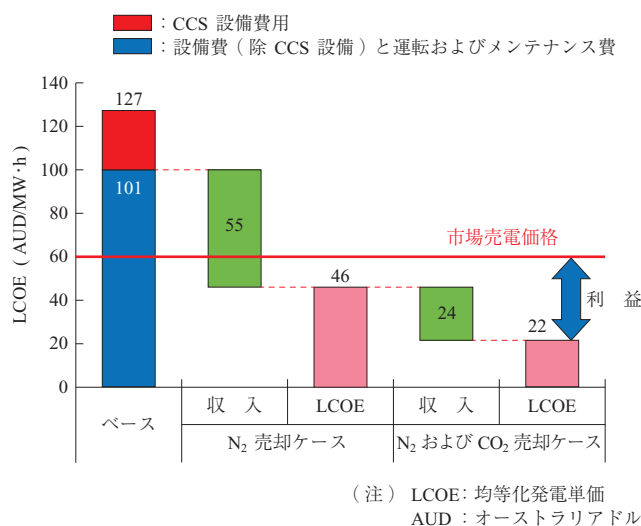
このときの経済性検討結果を第11図に示す。AUD127/MW-hが発電設備およびCCSを含めた設備の発電単価となる。このとき、もしCCS設備に対し補助金などを受け



第10図 500 MWe 酸素燃焼発電プラント
Fig. 10 500 MWe oxyfuel power plant

第3表 500 MWe 酸素燃焼発電プラント性能
Table 3 Plant performance of 500 MWe oxyfuel power plant

項目	仕様	
	酸素燃焼	空気燃焼
発電端/送電端出力 (MW)	500/345	500/473
発電端/送電端効率 (%)	45.7/31.5	42.1/39.9
所内必要動力 (MW)	155	27
正味CO ₂ 排出量 (g/kW-h)	20	740
石炭消費量 (t/h)	196	212



第11図 経済性検討結果
Fig. 11 Cost evaluation

た場合を想定すると、AUD101/MW-hまで減ぜられる。またここで、酸素燃焼プロセスではCO₂の売却に加え、N₂の売却が考えられ、単純にほぼ全量とともにAUD25/tで売却・利用可能であれば、発電単価はAUD22/MW-hまで減らせ、市場売電価格より安くなり経済的に成立する。

第2表 500 MWe 酸素燃焼発電プラント検討条件
Table 2 Study condition of 500 MWe oxyfuel power plant

項目		内容
サイト		オーストラリア・クイーンズランド州
発電プラント	発電端出力	500 MWe (空気燃焼, 酸素燃焼とも)
	石炭	瀝青炭
	水冷却方式	クローズ式ドライ冷却方式
	ボイラ蒸気条件	主蒸気圧力: 25.0 MPa 主蒸気温度: 600℃級
酸素製造装置	形式	深冷分離方式
	容量	200 t/h × 2 基
	製造O ₂ 純度	96.5%以上
	容量	270 t/h × 2 基
CO ₂ 回収装置	入口主ガス成分	H ₂ O 8.1 vol% / CO ₂ 72.8 vol%
	製造CO ₂	液体CO ₂ (16 MPa (abs) / 45℃) 純度 99.9 vol%以上
	CO ₂ 回収率	98%以上
貯留サイト	位置	発電所から140 kmを想定

以上のように、酸素燃焼プロセスでは CCS 設備を付加することで、高価となった発電単価を CO₂ に加え N₂ を売却することによって、相殺もしくはメリットに代えて建設できる可能性があることを示している。

5. 結 言

本稿では、カライド酸素燃焼プロジェクトの実証運転結果概要と 500 MWe 実現可能性検討結果を紹介した。本技術について、1989 年に酸素燃焼に関わる研究開発を開始してから約 25 年を経て、現在、酸素燃焼発電プラント (30 MWe) の実証運転完了が間近に控え、商用化 (200 MWe 以上) に向けた検討を開始しているところである。

発電方式は時代に合わせ、常に最新鋭のものを目指し発展してきたものであるが、近い将来石炭火力から CO₂ 排出の弱みをなくすことで、継続的な主燃料として使用され続けることであろう。そのなかで本酸素燃焼システムのメリットを創出し、経済的に成立させ早期商用化を目指していく。

— 謝 辞 —

本稿で述べたカライド A での実証および調査検討内容は、経済産業省資源エネルギー庁、オーストラリア連邦政府およびクイーンズランド州政府、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、カライド酸素燃焼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および一般財団法人石炭エネルギーセンター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ものである。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Summary for Policymakers : IPCC Fifth Assessment Synthesis Report IPCC (2014)
- (2) 山田敏彦, 石井 徹, 高藤 誠, 磯 良行: 酸素燃焼技術を用いた CO₂ 回収型石炭火力発電ボイラの実証に向けた検討 IHI 技報 第 49 卷 第 4 号 2009 年 12 月 pp.192 - 199
- (3) NEDO 成果報告書: 豪州における高効率石炭火力 CCS プロジェクトの案件発掘調査 2013 年 7 月