

第 2 章

2

石炭ガス化複合発電の
技術課題

第2章 石炭ガス化複合発電の技術課題 目次

株式会社クリーンコールパワー研究所 技術部 和田 潤

2 - 1 実証機における技術課題	29
横須賀研究所 研究コーディネーター 佐藤 幹夫	
横須賀研究所 エネルギー機械部 犬丸 淳	
2 - 2 当研究所が取り組む実用化に向けた研究課題	31
横須賀研究所 エネルギー機械部 原 三郎	
横須賀研究所 エネルギー機械部 芦沢 正美	
コラム：フラックス添加・混炭による高灰融点炭の高性能ガス化.....	34



和田 潤（昭和58年東京電力(株)入社）
平成3年度に勿来パイロットプラントの運転が始まって以来、火力部、エネルギー・環境研究所勤務を通じてIGCCに関与。平成13年6月、(株)クリーンコールパワー研究所設立とともに同社へ出向。研究開発グループ所属。

犬丸 淳（10ページに掲載）



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ー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ービン燃焼器の開発等を行ってきました。今後とも、石炭および重質油等を用いる複合発電やガスタービン技術など、火力発電技術の高効率化に貢献していきたいと思っております。

原 三郎（10ページに掲載）



芦沢 正美（1988年入所）
これまで石炭ならびに超重質油ガス化研究に携わってきました。石炭ガス化では、主に灰融点降下剤添加による高灰融点炭の高効率ガス化技術について、また、超重質油については、ガス化基本特性の評価を中心に研究を行ってきました。現在では、ガス化炉内現象の解明に向け、特に粒子のガス化反応速度解析について研究を進めています。今後は反応性の観点から燃料の評価が行える研究を実施していきたいと思っております。

2 - 1 実証機における技術課題

石炭ガス化複合発電（IGCC）開発は、250MW級実証機の建設計画の段階にきている。実証機試験の目的は、IGCC商用化の一手手前の最終ステップとして、商用機に近い規模のIGCCプラントを設計・建設・運転することにより、わが国の商用発電プラントとして求められる信頼性、環境性、高効率性、経済性等を総合的に検証することにある。本節では、それに向けた個別の技術課題について述べる。これらの技術課題については、**㈱クリーンコールパワー**研究所が主体となり、電力共同研究として取り組んでいる。

2-1-1 技術課題の分類

実証機に向けた技術課題は、次の4つに大別することができる。

(1) 発電システムとしての信頼性・安全性の確保

IGCCは、従来の火力プラントと異なり、化学プロセスを含み、機器点数が多く、複雑な物質・エネルギーのやり取りがあるため、故障確率が高く、また1つの機器の不具合が複雑に作用して予想外のトラブルに至る懸念がある。また、有害なガスを取り扱うということも従来プラントにない特徴である。そのため、トータル発電システムとしての信頼性・安全性をいかに確保するかが技術課題となっている。

(2) ガス化炉を中心としたスケールアップに伴う課題

ガス化炉は、化学反応・燃焼・流れ、伝熱等が複雑に作用する反応装置であり、スケールアップに伴い相似性が崩れて想定外の事象が発生する可能性があり、そのリスクはスケールアップ比率とともに増大する。今回の実証機は、その後の商用機へのスケールアップ比率を、ボイラ等で実績のある2倍以内に抑制する規模としたため、逆に勿来パイロットプラント（昭和61年度～平成8年度）からのスケールアップ比率は約8倍と大きい。いかに正確に挙動を予測し、かつ想定とのずれを吸収する設計を行うかが課題となる。

(3) 勿来パイロットプラント試験研究後、方式変更された要素技術

勿来パイロットプラント試験研究は、当時目標とされていた運転時間や環境性等は達成したが、現状でのニーズに対応するため、実証機では方式変更した箇所がある。ガス精製方式を乾式から湿式に変更したのを代表例として、要素技術レベルの方式変更も随所で行われている。これらの変更方式の中には信頼性の検証が必ずしも十分でないものがあり、実証機での信頼性向上が技術課題となっている。

(4) コストダウン

電力自由化が進展するなかでIGCCを普及させるためには、次なる商用化時点では確実に他の発電方式に対する経済的優位性が確保されるよう、実証機段階からプラントコストや運転保守費の低減を視野に入れた取組が必要となる。

2-1-2 設計研究と事前検証試験

平成11年度から3年間、実証機開発の初期ステップとして「設計研究」および「事前検証試験」が行われている。

設計研究は、実証機の信頼性・安全性向上に資する設計手法を確立して、後の実証機設計に備えるものである。化学プロセスや航空宇宙技術等で実績のある信頼性評価手法「HAZOP(操業偏移解析)」などを導入して、潜在的危険性を未然に摘出し対策を施す手法を確立しつつある。また、万一の有害ガスの漏洩災害を想定しその影響を評価する「拡散シミュレーション」、プラントの負荷変化や緊急停止を模擬した動特性を解析する「ダイナミックシミュレーション」等に取り組んでいる。

事前検証試験は、方式変更技術のうち、適用実績がないなど特に信頼性に課題があるものを中心に試験装置で検証するもので、実証機でのトラブルを未然に解決するとともに、設計に必要な諸特性を取得するものである。**図2-1-1**にそのあらましを示す。

事前検証試験の対象はガス化炉、ガス精製、ガスター

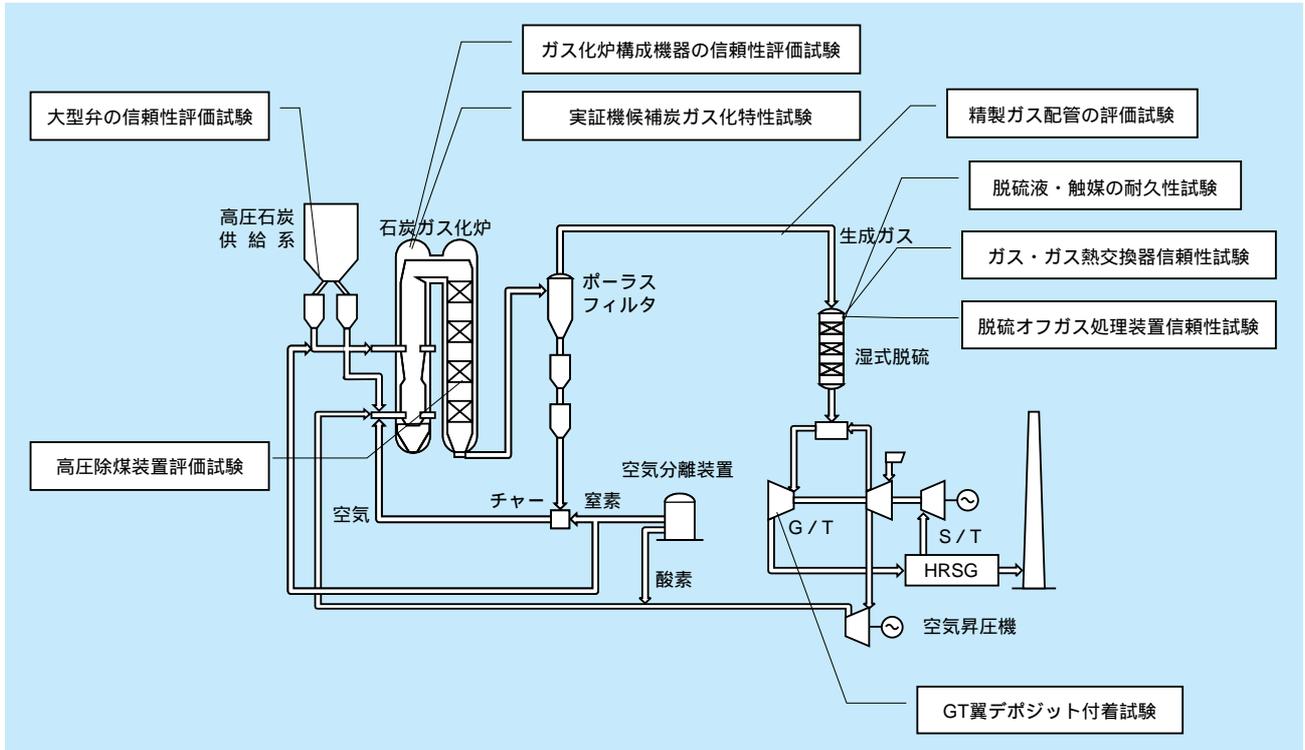


図2-1-1 事前検証試験項目

ピンに及んでいるが、特に重点的に実施しているのがガス化炉である。ガス化炉は、勿来パイロットプラント試験後、安全性や信頼性を確保するため、表2-1-1に示すように大幅な方式変更があり、あわせてガス化炉のスケールアップ手法についても見直しが行われたため、変更後のガス化炉の動作を検証することは最重要課題とされた。これを検証するため、平成10年度に三菱重工業(株)長崎研究所構内に24トン/日ガス化試験装置(図2-1-2)を設置して、平成13年にかけてガス化試験を実施中で

ある。平成12年度末までに4炭種、のべ約700時間のガス化運転を行い、変更箇所の基本動作のほか、ガス化特性、各部の耐久性を検証してきた。一部大型弁やスタートブロワなどについては、実証機と実寸・実圧の条件での試験を実施している。

設計研究と事前検証試験は平成13年度で完了し、14年度以降は実証機の着工に向け、設計に専念することとなる。その設計を効率的に行えるよう、実りある成果を求めて取り組む所存である。

表2-1-1 ガス化炉における主な方式変更

	勿来パイロットプラント	実証機
微粉炭加圧	シリアルロックホッパ	パラレルロックホッパ
微粉炭搬送	空気/微粉炭濃度 低	窒素/微粉炭濃度 高
微粉炭計量	テーブルフィーダ	粉体流量計+絞り弁
チャー回収	サイクロン+EP	サイクロン+ポラスフィルタ
チャー搬送	リサイクルガス	窒素
シingasクレー除媒	ショットクリーニング	スタートフロア



図2-1-2 24トン/日ガス化試験装置

2-2 当研究所が取り組む実用化に向けた研究課題

当研究所では、2トン/日炉、200トン/日炉ならびに海外プラントにおける運転実績の分析結果を踏まえ実証機に向けた研究課題を設定し、実証機の設計・運転信頼性のより一層の向上を目的として実証機支援研究を進めている。本節では、当研究所が実証・商用機に向けて取り組む研究課題について、その概要を紹介する。

2-2-1 石炭ガス化技術

海外プラントの運転実績から見た実証機に向けた検討課題については、1-3節にて紹介した。ここでは、石炭ガス化技術について、2トン/日炉および200トン/日炉による成果、それらに基づく実証機に向けた課題を紹介する（表2-2-1）。200トン/日炉では、3炭種について

表2-2-1 2T/日炉、200T/日炉による研究成果と実証機に向けた研究課題

	2T/日炉での主な成果	200T/日炉での主な成果	実証機に向けた研究課題
ガス化特性 (生成ガス発熱量、生成チャー量・性状等)	<ul style="list-style-type: none"> 約20炭種のガス化特性を取得 200T/日炉候補炭・実供試炭のガス化試験を行い、設計・運転条件の検討に反映 	<ul style="list-style-type: none"> 3炭種のガス化試験により各炭種のガス化特性を取得 酸素富化による生成ガス発熱量増大効果を確認 	<ul style="list-style-type: none"> 酸素富化率の影響、炭種の影響、運転条件の影響評価 スケールアップによる影響評価
微粉炭供給系、チャー回収・供給系の運転特性	<ul style="list-style-type: none"> ロックホッパーシステムによる乾式給炭技術に関するノウハウを蓄積 	<ul style="list-style-type: none"> テーブルフィーダ方式でオーバーフロー現象を経験 	<ul style="list-style-type: none"> 新しい搬送方式の運転特性、信頼性 大型粉体弁の長期信頼性 セラミックフィルターの耐久性・信頼性
炉内スラッキング特性	<ul style="list-style-type: none"> 200T/日炉スラッキング現象再現試験により現象解明、改造案に反映 伝熱管灰付着時の伝熱特性基礎データを取得 	<ul style="list-style-type: none"> 炉内スラッキング現象が発生、炉改造により解決 熱交部チャー堆積特性、付着時の伝熱性能を把握 除灰装置の効果を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ガス化炉内灰挙動からみたスケールアップ手法の評価 炭種による熱交伝熱性能低下の評価
溶融スラッグの排出特性	<ul style="list-style-type: none"> 高灰融点炭に対するフラックス添加及び混炭技術の有効性を確認 スラッグタップ形状のノウハウ取得、200T/日炉改造案に反映 	<ul style="list-style-type: none"> フラックス添加及び酸素富化によるスラッグ排出性改善効果を確認 スラッグタップ形状変更によりスラッグ排出性改善 	<ul style="list-style-type: none"> 炭種による排出性評価 スラッグタップの適正な設計検討 スラッグ排出監視の自動化 スラッグクラッシャーの耐久性・信頼性
運転特性	<ul style="list-style-type: none"> 空気吹き加圧二段噴流床方式ガス化炉の起動・停止要領を確立 	<ul style="list-style-type: none"> 789時間連続運転での安定運転性を確認 抽気連携状態でGT出力変化率10%/分の追従安定性を確認 	<ul style="list-style-type: none"> 発電プラント全体としての起動・停止要領の検討 プラント動特性解析 プラント安全性評価
材料	<ul style="list-style-type: none"> テストピースによる実ガス耐腐食性の基礎データを取得 	<ul style="list-style-type: none"> 解体研究により要部材質の減肉、腐食状況を把握 	<ul style="list-style-type: none"> 各部材料の適切な選定 腐食速度見積もりの高精度化
ガス化炉スラッグの有効利用	<ul style="list-style-type: none"> 約10炭種のスラッグについて、セメント製造原料等への適用性を確認 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート用細骨材等として利用可能であることを確認 	<ul style="list-style-type: none"> 低コスト有効利用指針の作成、JIS化の推進 高付加価値化

ガス化試験が行われ種々のトラブルを経験した。いくつかのトラブルについては、2トン/日炉から200トン/日炉へのスケールアップ手法に関する問題点が指摘されている。これら二つのガス化炉の運転実績より、実証機においては、スラッキングトラブル発生を防ぐための炉内ガス・粒子の流動解析、コンバスタにおける灰捕集率とチャー循環量の予測・評価、スラグホールまわりの伝熱流動解析による溶融スラグ排出性のチェック、炭種の違いによる熱交換器チャー堆積伝熱機構の解明等が特に重要であると考えられる。

海外プラントの運転実績および2トン/日炉および200トン/日炉の経験に基づき整理した、石炭ガス化技術を中心とした主要な研究課題を図2-2-1に示す。実証機の設計・運転において重要となる課題は、200トン/日炉からのスケールアップに関するもの、信頼性向上およびコストダウンに関するものに大別される。前述の課題の他に

も重要な課題として、プラント安全性評価、性能評価・安全確保のための監視計測項目の検討・提案、コストダウンに関する各種の研究課題が挙げられる。図2-2-1に示した課題のうち石炭ガス化技術に関するものについては、現在、実証機支援研究として積極的に取り組んでいる。

2-2-2 ガス精製技術

ガス精製技術は、ガスタービンの保護、環境保全の観点からIGCCプラントにおいて極めて重要な技術である。実証機のガス精製装置としては、セラミックフィルタによる集じん装置と湿式脱硫装置の組み合わせが計画されている。当研究所は、これまでにセラミックフィルタの開発を行うとともに、より一層の高効率化を目指した乾式ガス精製技術の開発を進めている。

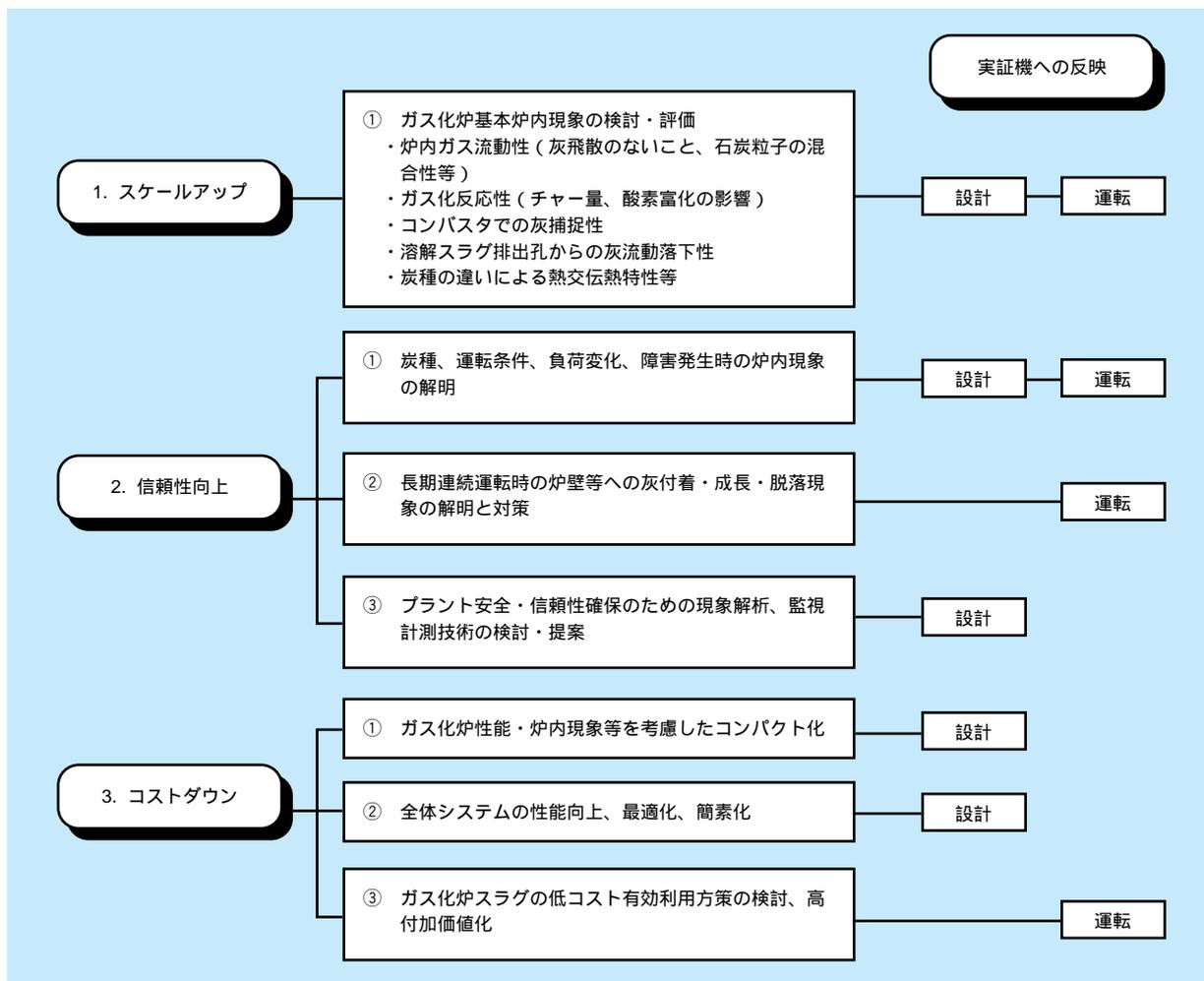


図2-2-1 当研究所が取り組む実証機に向けた研究課題

(1) セラミックフィルタ

セラミックフィルタの課題としては、以下があげられる。

- ・フィルタの素材の選定
- ・集じん性能の確保
- ・集じん装置構造の最適化
- ・ダスト性状と圧力損失の関係の解明
- ・逆洗手法の最適化
- ・フィルタの耐久性

これまでの研究開発により、要素技術としてはほぼ開発の見通しが得られている。今後、実用化に向けて残された課題として、長期寿命化が最も重要と考えられる。

(2) 乾式脱硫

硫黄化合物を100ppm以下まで除去できる酸化鉄系ハニカム脱硫剤の性能は、勿来パイロットプラントにおける20トン/日固定床ガス精製装置において既に実証されている。現在、環境規制の強化および石炭ガス化燃料電池複合発電を視野に入れた、硫黄化合物を1ppm程度まで低減できる高性能な脱硫剤の開発を進めている。この脱硫剤の開発においては、①炭素析出による脱硫剤の崩壊防止、②目標脱硫性能の確保、③再生法の最適化、④長期信頼性の確保が課題となる。当研究所は、既に高性能な亜鉛フェライト脱硫剤の開発に成功しており、今後は長期信頼性の確保が最も重要な課題となっている。

(3) アンモニア、ハロゲン、重金属の乾式除去技術

将来、石炭火力の環境保全性に対する要求が厳しくなることが予想されるため、アンモニア、ハロゲン化物、微量重金属についても、乾式除去技術が必要となる可能性がある。当研究所では、先ず石炭ガス化燃料電池複合発電を視野に入れた、乾式脱ハロゲン技術の開発を進め、ハロゲン化物を1ppm程度まで除去できるアルミン酸ナトリウムハロゲン化物吸収剤を見出した。現在、再生・再利用法および反応方式（固定床、移動床等）の選定が重要な課題となっている。アンモニアについては分解・

除去技術の調査および基礎検討、微量重金属についてはプラント内での挙動解明を進めている。

2-2-3 ガスタービン燃焼器技術

当研究所は、ガスタービン燃焼器技術に関し、これまで石炭ガス化低カロリー燃料用1300級ガスタービン燃焼器の開発を進め、より一層の高温化による熱効率の向上と低NO_x化を目指し、1500級燃焼器の研究開発を実施した。また、海外では、酸素吹きガス化方式による様々な複合発電システムが開発されていることから、将来わが国の電気事業において導入が予想される各種ガス化複合発電方式のガスタービン燃焼器技術についても検討を進めてきた。

ガスタービン燃焼器技術の開発課題は、ガス化方式およびガス精製方式により異なる。ガス化炉におけるガス化剤が空気の場合は燃料発熱量が4.2MJ/m³_N（1000kcal/m³_N）程度の低カロリー燃料となり、燃焼安定性が課題となり、ガス精製に乾式法を用いる場合は、さらに、ガス化燃料中のアンモニアに起因して生成されるフュエルNO_xを低減する必要がある。一方、ガス化剤に酸素を用いる場合には、ガス化ガスは8.4～12.6MJ/m³_N（2000～3000kcal/m³_N）程度の中カロリー燃料となり、LNGよりも火炎温度が高くなり、サーマルNO_xの低減が重要になる。また、一層のプラント熱効率の向上には、乾式ガス精製が重要であり、その際、サーマルNO_xと同時にフュエルNO_xの低減が必要になる。

2-2-4 その他の重要な課題

当研究所では、IGCCプラントシステムの性能向上、最適化、簡素化を行うための汎用解析ツールとして、「発電システム熱効率解析用汎用プログラム」の開発を進めている。

また、コストダウンに向けてガス化炉スラグの有効利用方策の検討を実施中である。

コラム：フラックス添加・混炭による高灰融点炭の高性能ガス化

1. はじめに

石炭ガス化炉では、炉内に投入するガス化剤空気の量を少なくし、空気比（式1）を下げた運転を行えば、生成ガス発熱量や冷ガス効率といったガス化性能は高くなる。

噴流床方式石炭ガス化炉では、石炭中の灰分を溶融スラグとして排出させるため、炉内の温度を灰の融点以上になるよう運転しており、灰融点の高い石炭（高灰融点炭）をガス化する場合は、炉内温度を高温に保つためにガス化剤空気の投入量を多くし、高空気比で運転する必要がある。その結果、高灰融点炭では、ガス化性能が低下する傾向にある（図1）。

従って、高灰融点炭を高性能でガス化するためには、灰融点を降下させる技術を開発し、ガス化剤空気の投入量を抑えた低空気比での運転を可能にする必要がある。

$$\text{(式1) 空気比} = \frac{\text{ガス化炉投入空気量}}{\text{ガス化炉投入石炭の理論燃焼空気量}}$$

2. 石炭灰の組成と灰融点の関係

石炭灰の融点は、灰分組成によって決まる。一般的に、石炭灰中の SiO_2 、 Al_2O_3 （酸性成分）は灰融点を高める作用があるのに対し、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O （塩基性成分）は灰融点を下げる作用がある。

当研究所の2トン/炉で使用した石炭について、灰融点を酸性成分と塩基性成分の比で表される酸性度（酸性成分/塩基性成分）で整理した結果を図2に示す⁽¹⁾⁽²⁾。灰融点と酸性度との間には良い相関が観られ、低灰融点炭は塩基性成分を、高灰融点

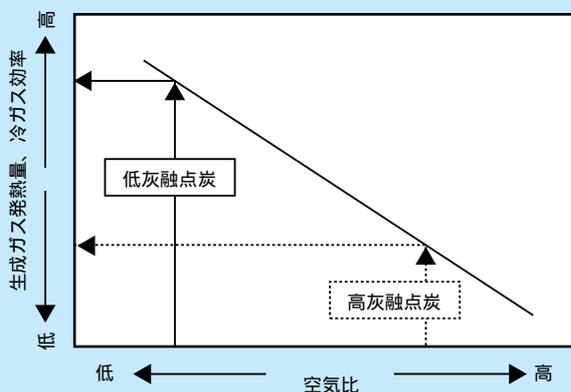


図1 空気比とガス化性能の関係

炭は酸性成分を多く含んでいることがわかる。

従って、高灰融点炭に灰融点を下げる作用のある塩基性成分を融点降下剤（フラックス）として添加するか、塩基性成分を多く含んだ低灰融点炭を混炭することにより、灰融点を降下させることが可能である。

3. フラックス添加・混炭による灰融点降下特性

塩基性成分であればフラックスとして使用可能と考えられるが、ガス化炉構成材料や後流設備への影響、入手の容易さ、価格などを考慮すると、 CaO を石灰石（ CaCO_3 ）の形で添加することが最も実用的と考えられる⁽¹⁾。

代表的な高灰融点炭である豪州炭にフラックスとして石灰石を添加した場合および CaO を多く含む低灰融点炭である中国炭を混合した場合の灰融点降下特性を図3に示す⁽²⁾⁽³⁾。

豪州炭の灰融点は、1673 と非常に高温であったのに対し、フラックス添加の場合、灰中 CaO 含有率（式2）が約30%で約1270 まで降下している。また、混炭の場合は、中国炭の混合率が20%で1405 まで降下している。このように、フラックス添加、混炭により、灰融点を大きく降下させることが可能である。

$$\text{(式2) 灰中CaO含有率} = \frac{\text{灰中CaO量}}{\text{灰量(添加CaO量を含む)}} \times 100$$

4. ガス化性能の向上効果例

当研究所の2トン/日炉を用い、豪州炭のみのガス化試験、フラックス添加及び中国炭との混炭ガス化試験を実施し、ガス化性能の向上効果を確認

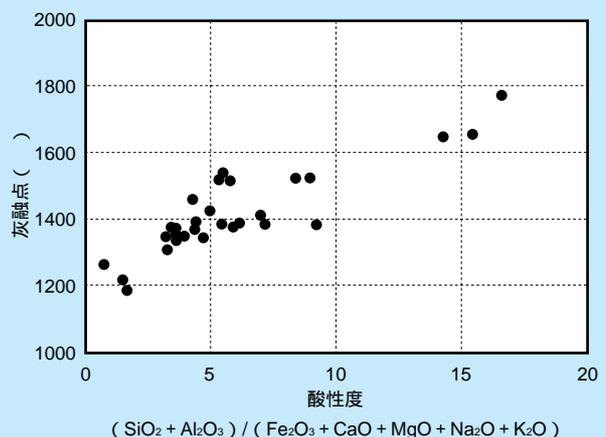


図2 灰融点と灰分組成の関係

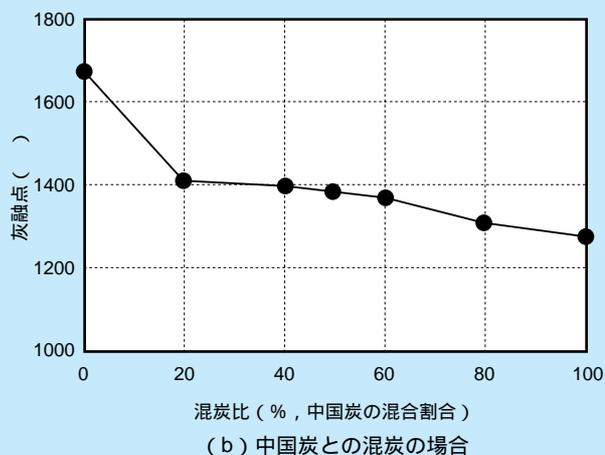
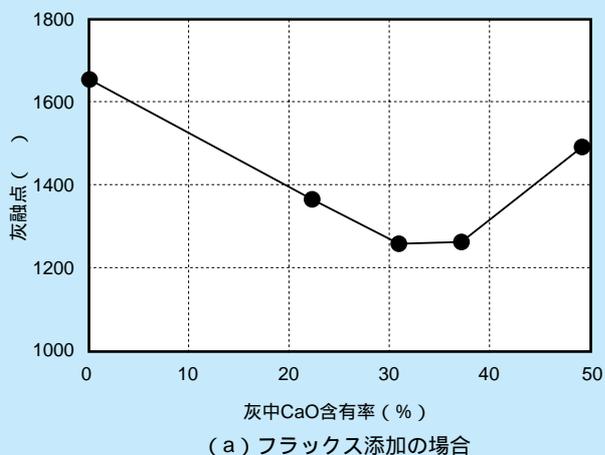


図3 豪州炭の灰融点降下特性

表1 フラックス添加・混炭によるガス化性能向上効果例

	下限空気比	生成ガス発熱量
豪州炭のみ	0.55	3.03MJ/m ³ _N
フラックス添加	0.48	3.38MJ/m ³ _N
中国炭との混炭	0.46	3.97MJ/m ³ _N

した。

豪州炭のみの場合は、溶融スラグを安定して排出させるために、空気比を0.55以上で運転する必要があった。これに対し、表1に示すようフラックス添加の場合には0.48まで、混炭の場合には0.46まで空気比を下げる事が可能であった。この結果、生成ガス発熱量は3.03MJ/m³_N（豪州炭のみ）から3.38MJ/m³_N（フラックス添加時）、3.97MJ/m³_N（混炭時）まで向上させることが出来た⁽²⁾⁽³⁾。

このように、石炭中灰分を溶融排出させる噴流床方式ガス化炉にとって不向きと考えられる高灰融点炭に対しても、フラックス添加や低灰融点炭との混炭を行うことにより、高性能でガス化を行うことが可能である。

参考文献

- (1) 芦澤ほか9名、「噴流床石炭ガス化炉のフラックス添加による高性能化 - 添加剤の評価と灰融点降下特性 -」、電中研報告 W89027、(1990)
- (2) 芦澤ほか5名、「高灰融点炭の高性能ガス化技術の開発 - フラックス添加法と混炭法の比較・検討 -」、電中研報告 W91034、(1992)
- (3) 犬丸ほか5名、「混炭による高灰融点炭高性能ガス化技術の開発 - 灰融点降下およびガス化基本特性に関する検討 -」、電中研報告 W90017、(1991)