

第3章

実証試験結果の評価

3-1	ガス化炉設備	38
3-1-1	空気吹き噴流床ガス化炉の概要	38
3-1-2	空気吹き噴流床ガス化炉の開発ステップ	38
3-1-3	実証機ガス化炉の設計段階におけるスケールアップ評価	39
3-1-4	運転試験の実績とガス化炉の評価	43
3-2	ガス精製設備	46
3-2-1	ガス精製設備の役割	46
3-2-2	実証機のガス精製設備構成	46
3-2-3	ガス精製設備運転特性の評価	48
3-3	複合発電設備	49
3-3-1	低カロリーガスへの対応	50
3-3-2	石炭性状の変動への対応	50
3-3-3	ホッパ供給方式への対応	52
3-4	設備間の関係	53
3-4-1	ガス化炉・SGCとHRSG間での蒸気の関係	53
3-4-2	石炭乾燥のための排熱の関係利用	54
3-5	IGCC商用機に向けて	55
3-5-1	熱効率の向上	55
3-5-2	設備利用率の向上	57
3-5-3	炭種適合性の拡大	58
3-5-4	まとめ	58



当研究所は、前章で概要を述べた250MW 空気吹きIGCC実証機プロジェクトに参加し、現地ならびに研究所内の双方において全面的なバックアップを行い、支援研究を実施した。本章では、プロジェクトで蓄積した経験をとりとめ、ガス化炉設備、ガス精製設備、複合発電設備のそれぞれについて実証試験結果を評価し、商用機の設計に反映すべき知見を整理する。

3-1 ガス化炉設備

3-1-1 空気吹き噴流床ガス化炉の概要

実証機で採用された空気吹き二段噴流床ガス化炉の原理を図3-1-1に示す。本ガス化炉は、乾式給炭、上昇流式の噴流床である。燃料である石炭（微粉炭）を分けて投入する二段炉で、コンバスタと呼ばれるガス化炉下部、および、リダクタと呼ばれるガス化炉上部に分けられる。コンバスタに投入された微粉炭は、輻射熱を受けて迅速に熱分解され、揮発分（気体）とチャー（未燃炭素と灰分を含有する固体残渣）を生成するとともに、空気（酸素富化空気）により燃焼（部分酸化）する。リダクタに投入された微粉炭は、コンバスタから上昇してくる高温ガスにより、石炭の熱分解と

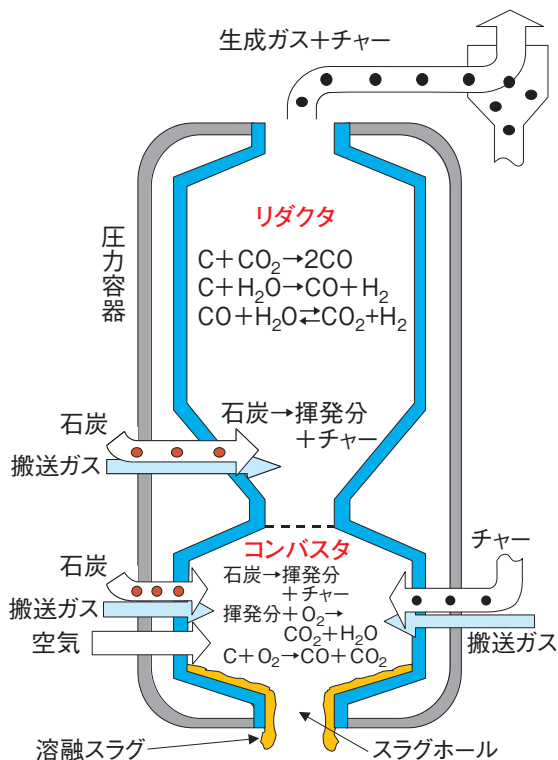


図3-1-1 空気吹き二段噴流床石炭ガス化炉の概略

チャーのガス化反応が進む。

チャーのガス化反応とは、固体である炭素が二酸化炭素や水蒸気と反応し、一酸化炭素と水素が生成する反応である。吸熱反応であることから、コンバスタで発生する高温ガスは、ガス化剤であると同時にガス化反応の熱源でもある。二段噴流床ガス化炉では、吸熱反応によりリダクタバーナ付近でガス温度が急激に低下する特徴があり、これをケミカルクエンチと呼んでいる。空気吹きガス化炉では、一般的に酸素吹きガス化炉よりも未反応炭素を多く含むチャーが発生するが、この生成チャーを全量回収し、コンバスタへリサイクルすることで未反応炭素によるエネルギー損失を防いでいる。チャーの生成量は炭種や運転条件により大きく変化するため、ガス化炉の容積やチャー回収・リサイクル設備の容量を適正化するためには、ガス化炉から排出されるチャーの量を精度良く見積もる必要がある。

石炭に含まれる灰分は、高温部であるコンバスタで溶融スラグとなり炉底から流下し排出される（スラッキング方式）。そのため、ガス化炉を連続的に安定運転する上で不可欠なことは、灰が確実に溶融するコンバスタ温度を保つことである。

コンバスタに投入された微粉炭およびリサイクルチャーに含まれる灰分は、強い旋回流により壁面に捕捉され、溶融した状態で壁面を流下し、炉底部のスラグホールから排出されるが、一部の灰は捕捉されずにガス流に乗ってリダクタ部へ運ばれる（キャリアオーバー）。このキャリアオーバー灰とリダクタ部に投入された石炭中の灰は、生成チャーの一部としてガス化炉から排出され、コンバスタ部にリサイクルされる。コンバスタ壁面は溶融スラグで覆われているが、リダクタバーナよりも上部では、前述のケミカルクエンチの効果により灰は固化しており、溶融・軟化灰によるトラブルが抑制される。

3-1-2 空気吹き噴流床ガス化炉の開発ステップ

空気吹き二段噴流床石炭ガス化炉の開発経緯は、第1章および第2章で述べたように、当研究所の2トン/日炉、NEDO事業として開発された200トン/日パイロットプラント、経済産業省の補助金を受け電気事業大で開発した1,700トン/日の250MW実証機という段階を踏んでスケールアップされてきた。各開発段階における研究成果を表3-1-1にまとめる。

ベンチ炉規模の2トン/日炉では約20炭種のガス化試験

を実施し、フラックス添加や混炭による高灰融点炭の灰融点降下方策を開発するなど、空気吹き加圧二段噴流床ガス化炉の基本技術を確立した。ガス化炉形状やスラグホール構造、ガス化炉材料などの研究成果が、200トン/日パイロットプラントの設計に反映された。

パイロットプラントでは、ガス化炉が閉塞しかかる深刻なスラッキングの発生を経験したが、スケールアップ手法に原因があることが解明され、大改造を経てスラッキングトラブルは解決された。高灰融点炭を含む3炭種（3炭種）のガス化試験が行われ、フラックス添加や酸素富化によるスラグ排出性の改善効果が確認されるとともに、789時間の連続運転が実現された。

パイロットプラントプロジェクトにおける課題への対応を検証するため、メーカーである三菱重工株式会社は、同社の長崎研究所に24トン/日一貫試験設備を設置し、事前検討試験を行った。ガス化炉については、微粉炭搬送システム、チャー回収システムおよび熱交換器の信頼性やスケールアップ手法が検証され、実証機設計に必要なデータが得られた。

当研究所では、実証機の建設が始まった2004年に2トン/日炉の主要機器をリプレースし、3トン/日石炭ガス化研究炉として試験を再開した。実証機での炭種変化試験の支援

研究などに研究炉は用いられた。

それまでの知見を反映して設計された実証機は、2007年9月から2013年3月まで運転試験が行われた。ガス化炉に関する設計段階の評価および運転試験の実績とその評価について、以下に述べる。

3-1-3 実証機ガス化炉の設計段階におけるスケールアップ評価

噴流床ガス化炉は、微粉炭を高温で迅速にガス化するため滞留時間が短く大容量化に向くと考えられるが、化学反応・燃焼・流れ・伝熱などが複雑に作用する反応装置であるため、開発の過程においては、スケールアップに伴い相似性が崩れて想定外の停止を招く事象が発生することがある。空気吹き二段噴流床ガス化炉の開発では、上述のように2トン/日炉から200トン/日パイロットプラントへの100倍のスケールアップの際に深刻なスラッキング現象によるトラブルを経験したが、250MW実証機に向けた更に約8倍のスケールアップでは、この経験が生かされスムーズな実証試験につながった。実証機から2倍のスケールアップが想定される次

表 3-1-1 空気吹き二段噴流床石炭ガス化炉の各開発段階における研究成果

	2トン/日炉での主な成果 (1982～1995年度に運転)	200トン/日パイロットプラントでの主な成果 (1990～1995年度に研究運転)	1,700トン/日実証機での主な成果 (2007～2012年度に運転試験)
ガス化特性	<ul style="list-style-type: none"> 約 20 炭種（3炭種）のガス化特性を取得 200T/日炉候補炭・実供試験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（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"> 瀝青炭および亜瀝青炭合計 9 炭種で安定出力を達成 生成ガス発熱量とチャー生成量の予測技術を確認
微粉炭供給系・チャーリサイクル系の運転特性	<ul style="list-style-type: none"> ロックホップ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ィード現象を経験 	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度搬送システムによる安定供給を検証 チャーの生成量と性状に応じた供給系の調整手法を確認 精密脱塵システムの信頼性を実証
スラッキング特性・灰付着特性	<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"> 運転条件（負荷・炭種）にかかわらず炉内スラッキング現象は発生せず、長期間安定して運転を実施 炭種変化試験における熱交部の詰まりに対応した運用指針を確認
熔融スラグの排出特性	<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グ排出性改善効果を確認 スラグタップ形状変更によりスラグ排出性改善 	<ul style="list-style-type: none"> 低灰融点炭および中灰融点炭によるスラグ安定排出を確認 高灰融点炭に適合する運転手法を確認 スラグ排出監視を自動化
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・停止要領を確認 	<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% / 分で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・停止要領を確認 2,238 時間の連続運転、長期耐久運転試験により、年利用率 70% 以上の見通しを確保（2013 年の商用運転にて連続運転時間を 3,917 時間に更新） 目標を超える熱効率（LHV ベース送電端効率 42.9%）を達成
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"> 各部の減肉、腐食状況を把握し、適切な材料を選定
ガス化炉スラグの有効利用	<ul style="list-style-type: none"> 約 10 炭種（3炭種）のスラグについて、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"> セメント原料および道路用資材として全量有効利用

期商用機の設計においても、これまでに培われたスケールアップ手法が有効であると考えられる。

スケールアップを検証する手法として、複雑な炉内現象を可視化する数値解析技術の活用が効率的でかつ有効である。そのためには鍵となる炉内現象を踏まえたモデルを組み込んだ解析が不可欠である。当研究所では、基礎実験と数値解析技術を中心とするガス化炉評価手法(図3-1-2)を確立し、実証機の設計評価と運転支援研究を実施してきた。

ガス化炉の設計段階において、数値解析を用いて検討すべきと考える主要な項目を図3-1-3に示す。多岐にわたる検討項目が挙げられるが、それぞれの現象に対応する数値モデルを用いることにより評価することができる。実証機の設計に対しては、ガス化炉の三次元数値モデルにおいて、反応を含めた固気混相流の熱流動解析を行いガス化性能や炉内現象を明らかにし、また、気液二相流の伝熱流動解析から熔融スラグ挙動を明らかにした。特に、スラッキングによるトラブルを防ぐ検討や、コンバスタにおける灰捕集効率とチャー循環量の予測・評価、スラグホールでの熔融スラグの排出性評価、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重要であると考え、以下の検討を実施してきた。

(1) ガス化炉内の伝熱流動状態とガス化性能の評価

実証機ガス化炉の基本設計では、200トン/日パイロットプラントから石炭処理量で約8倍へのスケールアップが計画され、コンバスタ直径比で約3倍のサイズとされた。コンバスタには、微粉炭バーナとチャーバーナが、壁面での灰粒子の

捕捉に必要な旋回流を発生するように配置され、リダクタには微粉炭バーナが対向に配置された。

このようなガス化炉の構造を忠実に反映した三次元数値モデルを作成し、実証機の定格での計画運転条件(ベース運転条件)における炉内の熱流動解析⁽¹⁾⁽²⁾を実施した結果を図3-1-4に示す。本解析は、乱流の解析にRNG κ - ϵ モデルを採用し、粒子運動の計算には代表粒子で粒子群を模擬するラグランジュ法を用いて、有限体積法により非圧縮性流れを取り扱うガス化炉内数値解析である。伝熱現象には、流れ場による対流伝熱、乱流による渦拡散および輻射伝熱を考慮した。化学反応として、熱分解反応、チャーガス化反応および気相反応を考慮しており、特に重要なチャーガス化反応については、実験データに基づくチャーガス化反応モデル⁽³⁾⁽⁴⁾から決定した。

図3-1-4(a)は、実証機で予測されたガス化炉垂直方向断面のガス流速を、パイロットプラントと比較したものである。色は軸流速の大きさ(赤が最大値、青が最小値)を示す。解析の結果、実証機はパイロットプラントとほぼ相似の旋回流が形成されており、ガス流動状態は良好であることが分かった。また、実証機については、ベース運転条件に対して空気比^(注1)を $\pm 4\%$ 増減した条件の解析も行い、この範囲ではガス流動状態に大きな変化はないことが分かった。

図3-1-4(b)は、実証機のガス化炉内の粒子軌跡であり、色は粒子温度を示す。炉内温度は空気比の影響を受け、高空気比条件では高温の粒子がコンバスタ出口付近にまで到達することが予測された。

ガス化炉内数値解析では、流れや温度だけでなくチャー

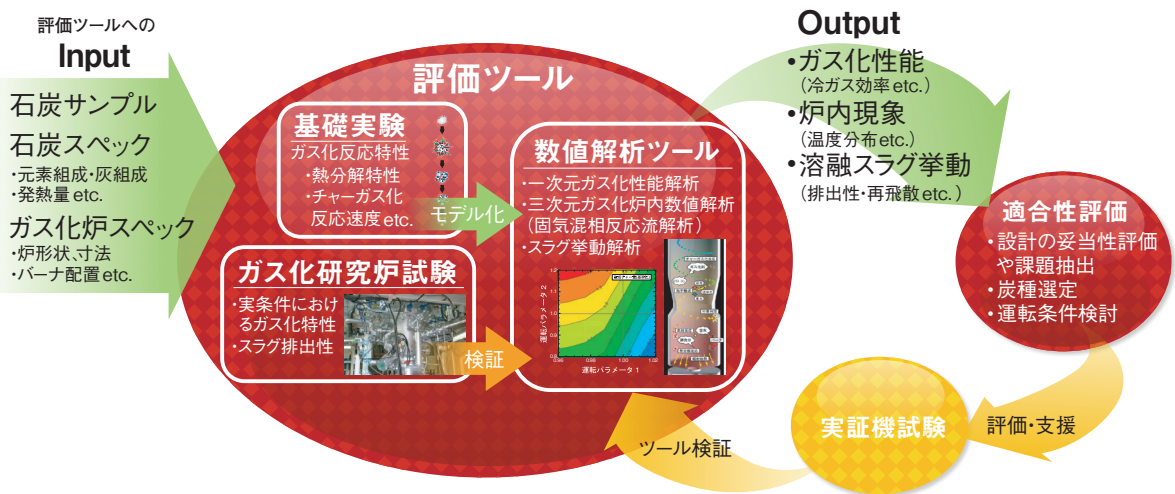


図3-1-2 当研究所のガス化炉設計評価・炭種適合性評価手法の概要

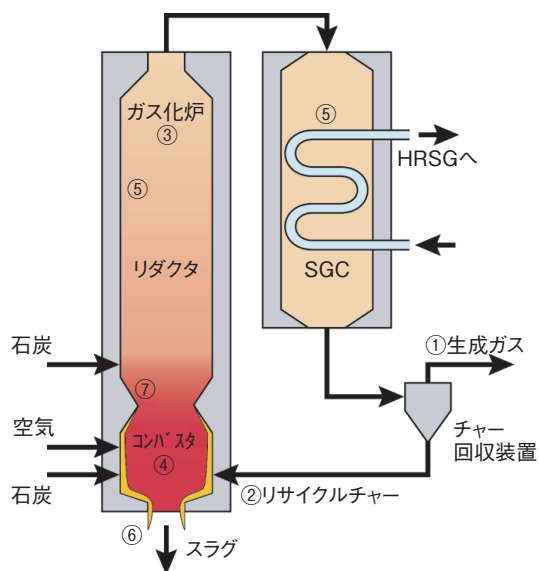
中未燃分やガス組成の炉内分布や各成分毎の流量が明らかになるので、ガス化炉出口におけるこれらの情報から冷ガス効率^(注2)や炉内炭素転換率^(注3)というガス化性能を算出できる。図3-1-5には、ベース空気比におけるガス化性能に対する比として、空気比による変化を示した。空気比を下げることで生成ガス発熱量が増加し冷ガス効率は向上する一方、炉内炭素転換率が低下し生成チャー量は増加する傾向が定量的に確認された。

なお、運転試験が開始された後には、実際の運転条件におけるガス化炉内数値解析を実施し、解析手法の妥当性を検証することができた。

(2) 溶融スラグの排出性評価

溶融スラグの安定排出はガス化炉の安定運転に直結する重要な炉内現象であるため、実証機の設計に対してスラグ層厚さの解析を実施し、安定排出性を評価した。本解析は、炉底部の溶融スラグ流動と伝熱を解析対象とした自由表面を有する気液二相流の三次元熱流動解析である。温度に対する溶融スラグの粘度特性を考慮して解析した。

- (注1) 空気比=ガス化炉投入空気量/ガス化炉投入石炭の理論燃焼空気量
- (注2) 冷ガス効率=(生成ガス発熱量×生成ガス量)/ (石炭発熱量×全石炭量)
- (注3) 炉内炭素転換率=生成ガス中炭素流量/投入石炭およびチャー中炭素流量



- ・ガス化性能 (反応解析)
 - ①生成ガス量・組成 →冷ガス効率
 - ②生成チャー量・組成 →ガス化炉単体性能
- ・ガス化炉内現象 (固気混相反応流解析)
 - ③炉内温度分布、速度分布
 - ④コンバスタ灰捕集効率 →灰循環量
 - ⑤炉壁面および熱交換器への灰粒子の付着堆積性
- ・溶融スラグ挙動 (気液混相流解析)
 - ⑥炉底部の溶融スラグ排出性
 - ⑦スロート部の溶融スラグ飛散性

図 3-1-3 数値解析が対象とする評価項目

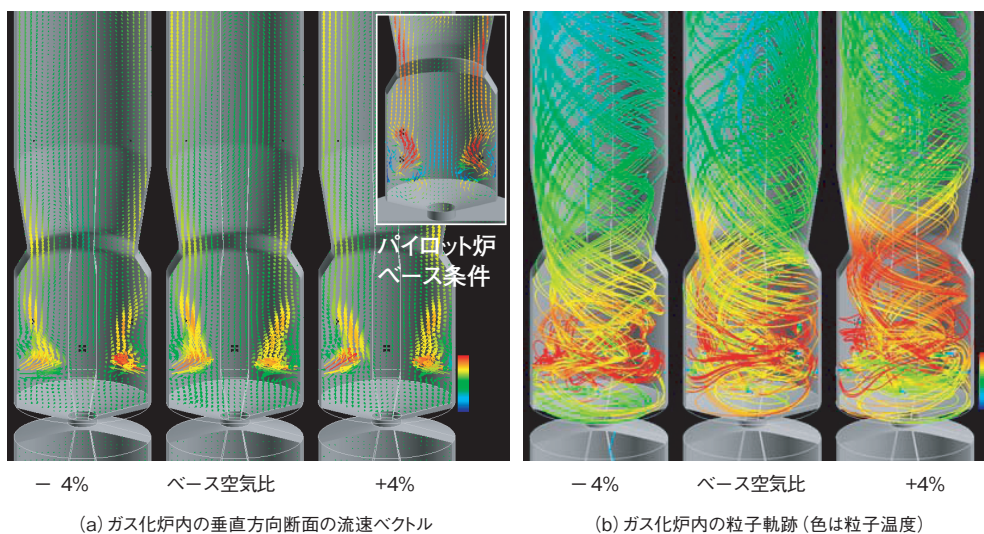
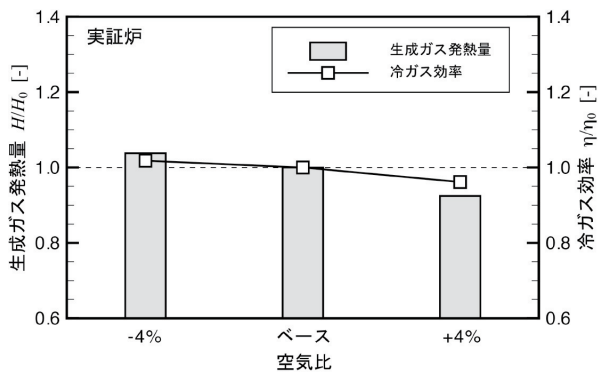


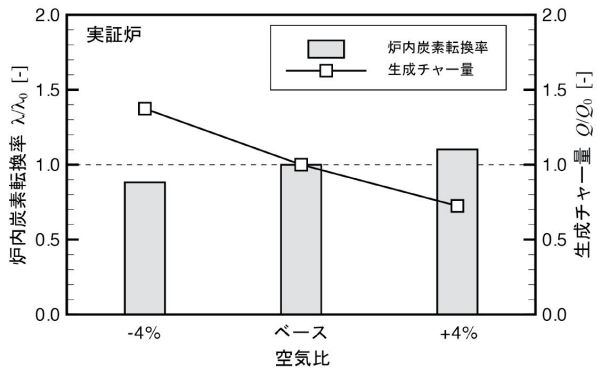
図 3-1-4 実証機ガス化炉内現象の解析結果

コンバスタ壁面から炉底部にかけて存在するスラグ層表面は、対流伝熱と高温領域からの輻射伝熱により加熱されて溶融している（溶融スラグ層）。一方、コンバスタ周壁管で冷却されるため、溶融スラグ層の底には固化スラグ層がある。炉内温度が低下すると、固化スラグ層が厚く成長するため、炉底部ではスラグホールの湯口以外からも溶融スラグが流出する（オーバーフロー）など、スラグ排出の不安定化が懸念される。

前項のガス化炉内数値解析結果を入力条件として溶融スラグ熱流動解析を行ったところ、**図3-1-6**に示すスラグ層厚さが得られた。**図3-1-5**と比較して考察すると、空気比を低減することで、ガス化性能（冷ガス効率）が向上する一方で、スラグ層厚さは溶融スラグ層と固化スラグ層ともに厚くなり、溶融スラグ排出性に影響があることが定量的に確認された。逆に、空気比を高めることで、冷ガス効率は低下するが、溶融スラグ排出性を改善する効果があることがわかる。本解析結果から、ベース運転条件から空気比を±4%増減した運転範囲では、スラグのオーバーフローなどの現象は発生しないと評価された。実証試験の結果、本項で述べた事前予測と同様な傾向が得られた。



(a) 生成ガス発熱量と冷ガス効率の比較



(b) 炉内炭素転換率と生成チャー量の比較

図3-1-5 ガス化炉性能の予測（ベースに対する相対値）

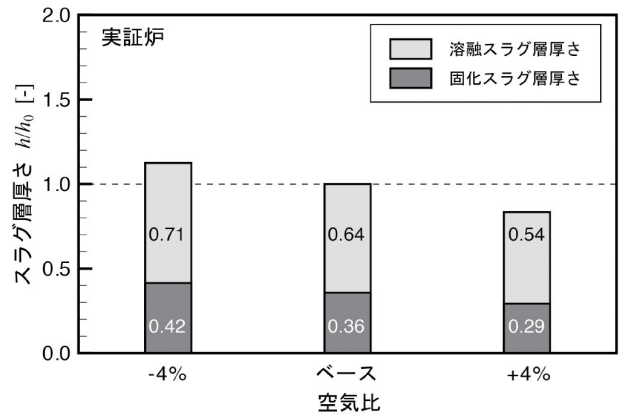


図3-1-6 ガス化炉底部のスラグ層厚さの予測（ベースに対する相対値）

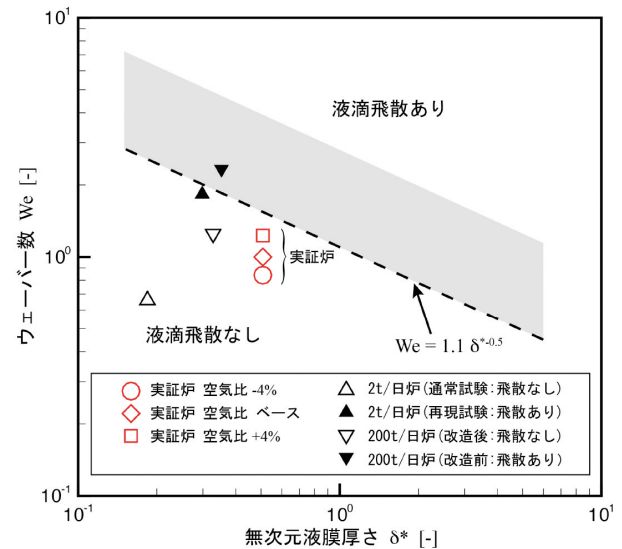


図3-1-7 灰飛散現象発生の評価

(3) 溶融スラグの飛散性評価

スラグホールからの溶融スラグ排出性に加え、パイロットプラントでは、前述のようにリダクタでのスラッキング現象が大きな運転障害となった。コンバスタ出口スロート部の強い旋回上昇流により溶融スラグが飛散したためである。そこで、慣性力（気体の動圧）と表面張力の比を表す無次元数であるウエーバー数を用いることで、溶融スラグが液滴として飛散する限界を示す指標を作成した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

ここでは、前項で解析した3つの空気比条件において、溶融スラグの飛散現象が発生する可能性について、本評価手法を用いて検討を行った結果を**図3-1-7**に示す。図の破線は飛散現象の起こる限界で、破線よりも上の領域は飛散現象が懸念されることを示している。本評価にあたっては、スロート壁近傍におけるガス流速を予測することが重要であるため、前述の三次元石炭ガス化炉内数値解析による計

算結果を用いて評価を行った。その結果、空気比が高くなるに従ってスロート壁近傍のガス流速が大きくなるため、灰飛散領域に近づくものの、本検討の空気比範囲では、灰飛散現象が発生する可能性が低いことがわかった。

実証試験実績においてスラッキング現象は発生しなかったことから、本評価手法はリダクタでのスラッキングを防ぐ設計思想として有効であるといえる。

3-1-4 運転試験の実績とガス化炉の評価

(1) 実証試験における運転実績

実証機の運転試験は2007年9月のガス化炉点火に始まり、長期連続運転試験、耐久性確認試験、炭種適合試験などを行い、信頼性、環境性、経済性、耐久性などを実証して2013年3月末に終了した(表3-1-2)。長期連続運転試験は、電力需要の高い夏期3ヶ月間にプラント停止をせずに電力供給が可能な信頼性を示すもので、2,000時間連続運転が目標とされた。耐久性確認試験は、商用機の段階で十分な利用率が期待できることを確かめるための試験で、1年間に5,000時間運転することが目標とされた。

入念な事前検証試験など準備の甲斐があり、ガス化炉設備は給炭系やチャー回収・供給系を含め設計通りの性能を示し、運転試験開始から1年後には2,000時間連続運転を達成した。計画に近い工程で進捗したことで、欧米の四大プロジェクトと比較して高い完成度が示された。また、2010年6月には、年間5,000時間運転到達(耐久性確認試験)をもって、当初の試験目標を全て達成した。国の補助事業

はここで終了したが、技術の成熟化のために試験期間は2年間延長された。

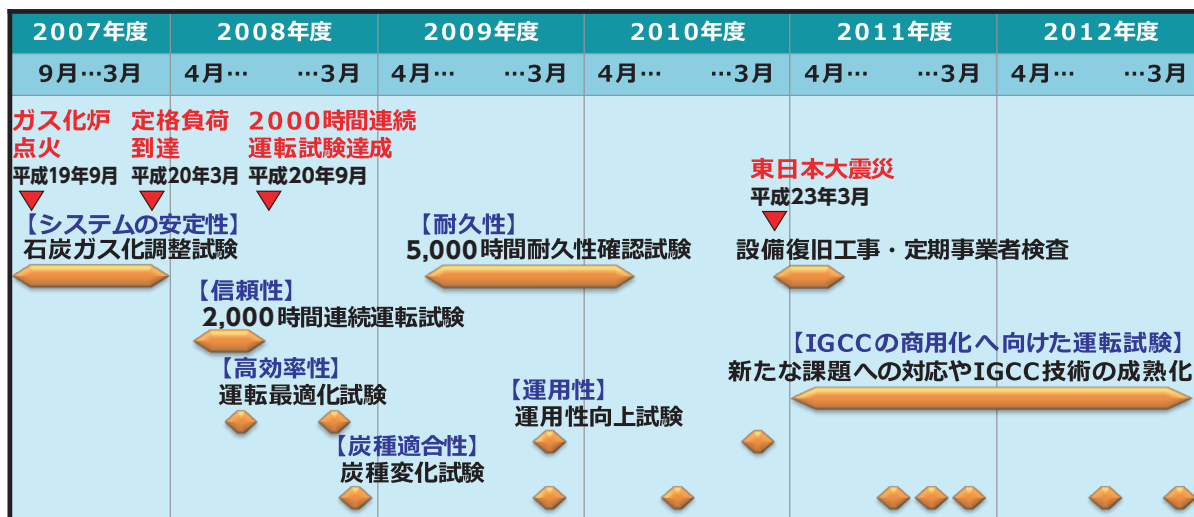
耐久性確認試験では、計画外停止を伴うトラブルが発生したが、何れも対策を行うことで長期的なプラントの運用が可能であった。図3-1-8に示すように、チャー回収系の回転バルブからのチャーのリーク、スラグ排出コンベアのトリップ、微粉炭集塵機からの微粉炭リーク、チャーバーナ冷却管からの冷却水リーク、ガス化炉後流の熱交換器(SGC:Syn-Gas Cooler)における差圧上昇など、トラブルの大半がガス化炉設備(付帯設備を含む)で発生した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

ガス化炉本体で発生したバーナ冷却管の摩耗による冷却水のリークに対しては、バーナ先端の設置位置の適正化が図られた。また、生成ガス配管についても摩耗が設計よりも大きい部分があり、耐摩耗構造を改良するなどの対策がなされた。これらの対策について、実証試験終了までに妥当性が確認されている。

なお、運転中に東日本大震災にあったが、震度6弱の地震と津波による約2mの水没、電力系統の停電のなか、IGCC設備は安全に自動停止した。第2章コラム4で紹介したように、設備は大きな被害を受けたが、震災から5ヶ月後には定格出力での発電状態に復旧することができた。本経験で、図らずもIGCC実証機の設備構成・安全対策が、商用電源として十分な信頼性を有することが示された。

炭種変化試験では、設計炭以外に8炭種の試験が行われ、炭種適合性が示された。炭種変化試験でのガス化性能に関する詳細は、次項で述べる。一部の炭種においてはSGCの差圧上昇によりプラント停止に至る場合があった。

表3-1-2 実証試験実績工程



これはSGC入口部の伝熱管に堆積したチャーが焼結することで閉塞傾向となるものである。実証機では高圧除煤装置 (Soot Blower) を用いて定期的にチャーを取り除く運用としているが、炭種によって焼結に至る時間が異なることが一因と考えられた。そこで、SGC伝熱管をチャーの溜まりにくい構造に改造した上で、高圧除煤装置の使用頻度を上げる運用を行い、詰まりの抑制が確認された。

(2) 実証試験における炭種適合性

実証機は1炭種に限定した設計炭に対し、裕度をほとんど取らない最適設計がなされた。しかし、我が国の石炭火力としては多炭種への適合性が不可欠であることから、運転試験の段階では炭種変化試験が計画され、最終的にベースの中国炭を含め、米国、インドネシア、コロンビア、ロシア、カナダの合計9炭種の試験が実施された。噴流床ガス化炉の特徴として、一般的に灰を溶融排出するため低灰融点炭が向いており、また、燃料比が低く揮発分が多い石炭の方がガス化しやすいといえる。そこで、実証機の設計炭には、燃料比が比較的低く灰溶融温度が低い瀝青炭である中国の神華炭が選択されていた。

図3-1-9には、実証試験の各供試炭⁽⁹⁾の灰溶融温度と

燃料比を示した。2トン/日炉やパイロットプラントの供試炭も含めて比較すると、実証試験では、低燃料比炭を中心に幅広い灰融点の石炭を使用したことが分かる。微粉炭ボイラでは、炉内での灰付着を防ぐため高灰融点炭が好まれるので、噴流床ガス化炉では微粉炭ボイラで敬遠される低灰融点炭を焚くことができるメリットがある。低灰融点炭は低品位で安価な石炭に多い。そこで、炭種変化試験では、低品位な方向として亜瀝青炭がまず用いられた。

しかし、微粉炭ボイラに併設されるIGCCプラントでは、両設備で共有できる石炭を用いることも発電所の運用上のメリットとなり得ることから、灰溶融温度が比較的高い石炭の試験が次に行われた。パイロットプラントでも高灰融点炭の試験を実施しており、石灰石を灰融点降下剤 (フラックス) として用いることで運転実績を作った。一方、実証機ではフラックス添加試験は実施せず、空気比やガス化剤中酸素濃度を適切に調整することで対応し、一部の石炭では混炭で安定運転を実現した。従って、ガス化炉としては、フラックス添加と混炭のいずれにも対応可能であることが実証されたといえる。

図3-1-10には、炭種変化試験における運転状態を示す。ベース炭である石炭 #1 (瀝青炭) では定格負荷で安定した

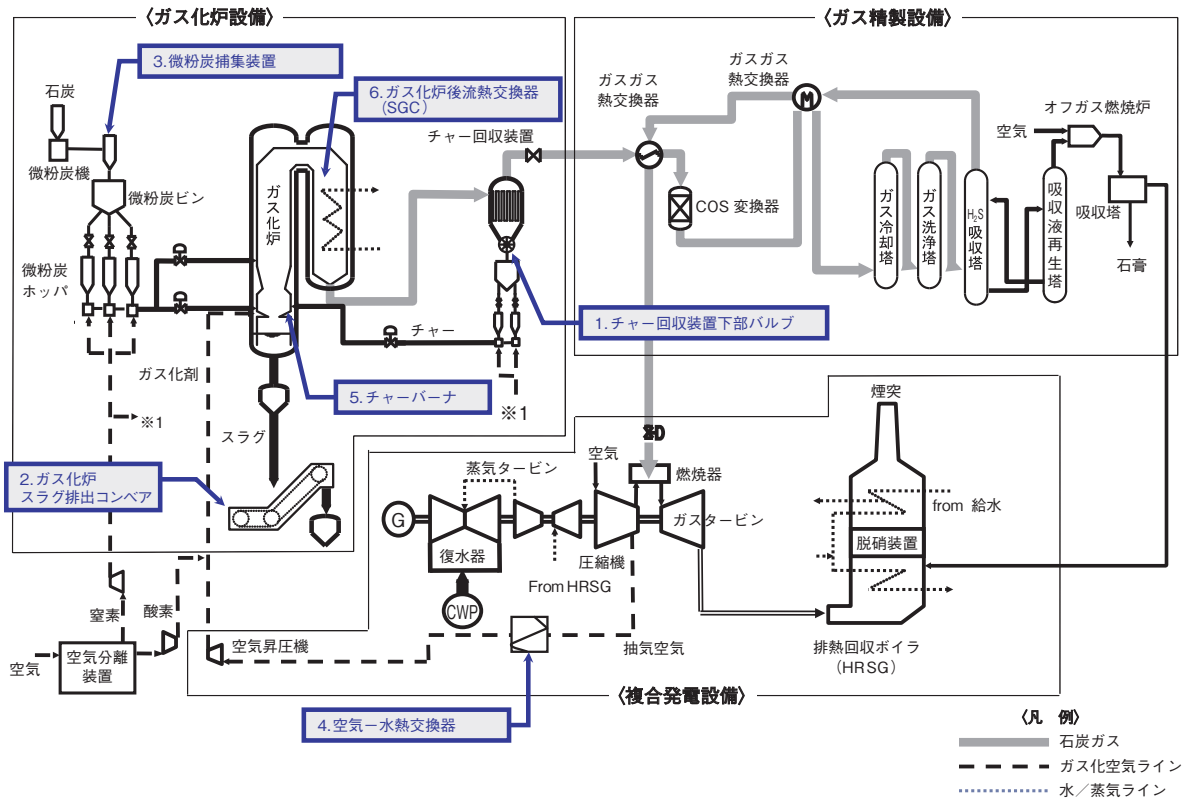


図3-1-8 実証機の構成と主なトラブルの発生箇所⁽⁸⁾

出力が得られており、また、いずれの炭種でも生成ガスの発熱量は同程度で安定した発電出力が得られていることが分かる。なお、石炭#1以外では定格出力よりも低い部分負荷運転となったが、これは、ガス精製設備等の設備容量の制約によるものである。例えば、高水分の亜瀝青炭(石炭#2～#4)では、排水処理設備容量が発電出力の制約となった。また、高硫黄炭(石炭#5)では、脱硫設備の容量が制約となった。従って、設計段階においてこれらの炭種を想定していれば、定格運転が可能であると考えられる。中～高灰融点炭(石炭#5～#9)の一部の石炭でスラグの排出性が悪化した。前述のように混炭により良好なスラグ排出性が得られ、安定運転が可能であることが示された。

らスロート部にかけて高温域が形成されて炉底部での温度が低下しているが、石炭#2は低灰融点炭であり、スラグの溶融排出性の点で適正な範囲内で調整できたといえる。

本解析は、実証機供試炭を用いて当研究所で実施したガス化基礎実験に基づくガス化反応速度式を用いており、炭種の違いによる運転状態の変化を定量的に予測することが可能となった。実証試験の供試炭選定や、炭種変化試験における運転条件の設定および監視項目の選定において、これらの解析が活用された。

実証試験では炭種によって安定運転時の負荷が異なる結果となったが、定格負荷を想定したときのガス化性能を数

(3) 数値解析による実証試験の評価と運転支援

当研究所では、3-1-3節のスケールアップ評価で用いたガス化炉内数値解析技術を、運転試験の支援にも適用した。実証試験での実際の運転条件を入力値とし、三次元の炉内熱流動解析を実施したときの炉内温度分布の予測結果を図3-1-11に示す。石炭により温度分布が異なることが分かった。これは石炭性状や負荷などの違いによる影響を受けたものである。ベース条件では主にコンバスタ下部において高温域がみられるのに対し、石炭#2ではコンバスタ

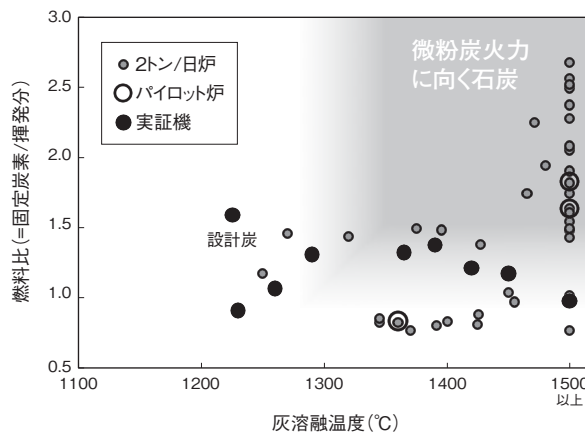


図 3-1-9 供試炭の特徴

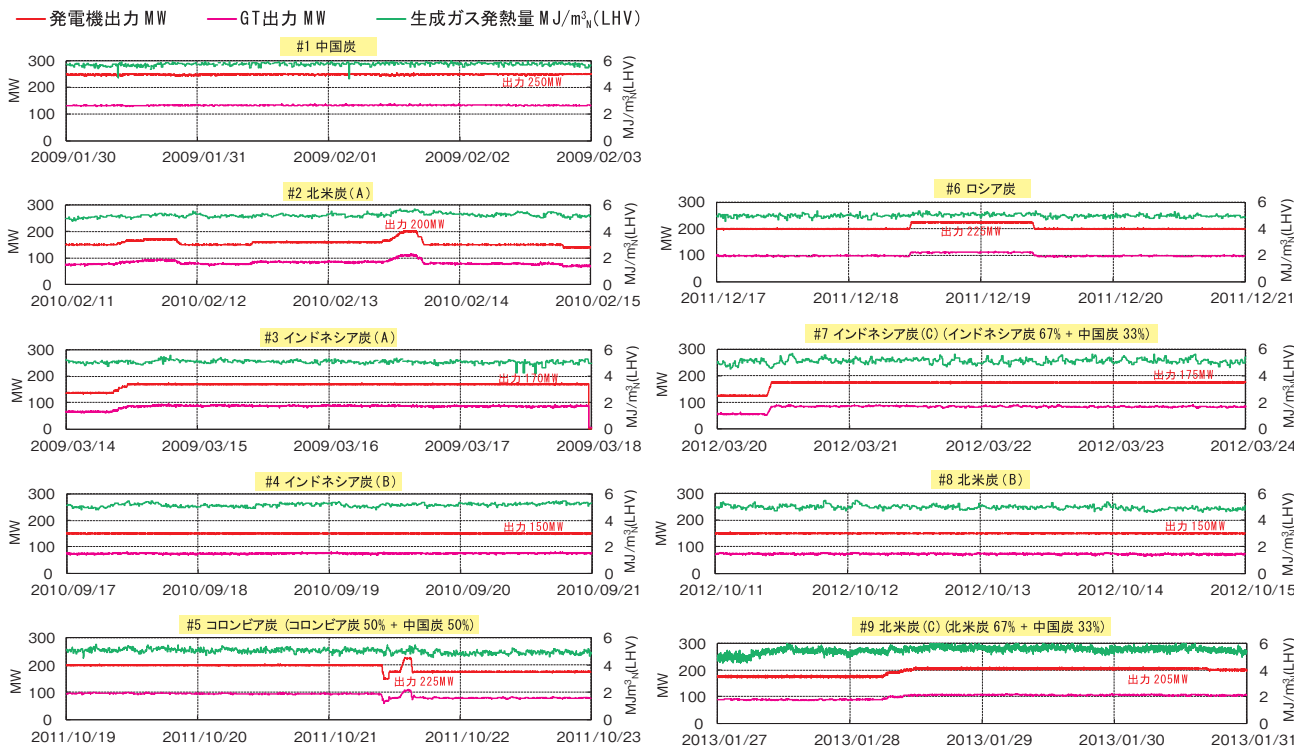


図3-1-10 炭種変化試験実績(左軸:出力、右軸:生成ガス発熱量)

値解析で予測することができる。図3-1-12に示した結果は、計算負荷の小さい次元モデルを用い、チャーのガス化反応速度を考慮して、熱物質収支を解析したものである。空気比を一定としてガス化性能を予測すると、生成チャー量は石炭性状の違いにより大きく変わるが、冷ガス効率には大きな変化がないことが分かり、前述した設備容量の制約がなければ、供試炭はいずれも高い熱効率での運転が可能であったといえる。

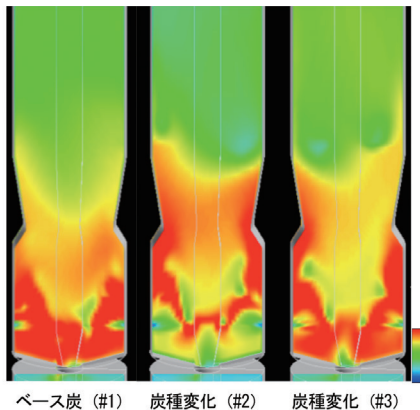


図 3-1-11 炭種変化試験におけるガス化炉内現象の解析結果 (ガス化炉内温度分布)

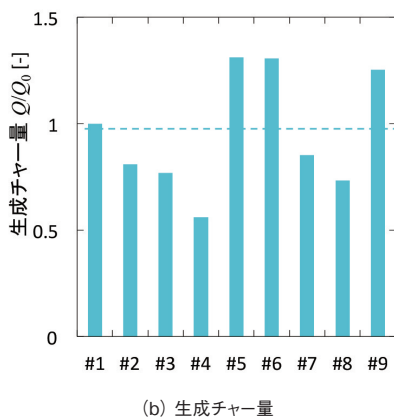
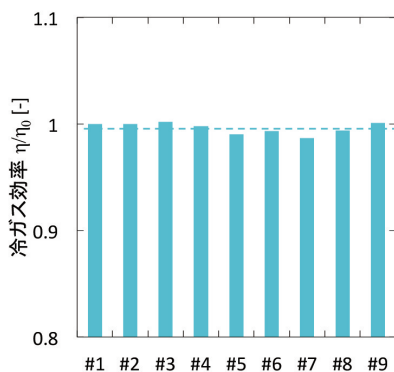


図 3-1-12 定格条件における各炭種のガス化性能予測 (同一空気比、ベース炭 #1 に対する相対値)

以上の実証試験の経験から、ガス化炉の基本設計思想の妥当性が検証されたとともに、各部の耐久性やプラント全体を考慮した炭種適合性など、今後の商用規模設備の設計につながる知見が得られた。

3-2 ガス精製設備

3-2-1 ガス精製設備の役割

ガス化炉で生成した石炭ガス化ガスには不純物としてダスト、硫黄化合物である H_2S および COS 、窒素化合物である NH_3 や HCN 、ハロゲン化合物である HCl ならびに HF 、さらには微量物質などが含まれる。これらは、ガスタービンの腐食や摩耗を引き起こす要因物質であり、また燃焼後に硫黄化合物、窒素化合物、酸性ガスなどとして排ガスに含まれることとなる。ガス精製設備は、これらの不純物をガスタービンで燃焼させる前段階で除去するものであり、構成機器の保護ならびに環境負荷の低減の観点から、IGCCに必要な不可欠な設備である。ガス精製の方式としては、吸収液で洗浄することによって不純物を除去する「湿式ガス精製」と、固体の吸収剤や触媒などと接触させて不純物を除去する「乾式ガス精製」に大別される。

湿式ガス精製をIGCCに適用する場合には、ガス化炉で生成した高温の石炭ガス化ガスを冷却してから吸収液で洗浄し、不純物を除去した精製後のガスを再度加熱してガスタービンに供給することとなる。そのため、湿式ガス精製では、ガス温度の調整に伴う熱損失が生じることとなる。また、不純物を除去するガス洗浄装置(スクラバ)の他に、ガス温度を調節する機器類(ガス/ガス熱交換器や冷却器・加熱器など)や、除去した不純物を含有する排水の処理設備が必要となり、ガス精製設備全体の機器構成が複雑となる。しかしながら、湿式ガス精製は、微量物質を含む一連の不純物をまとめて低減することが可能であることから、化学合成プラントや石油精製プラント等向けとして実用化が進んでおり、不純物除去の観点では確立した技術である。

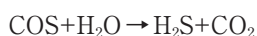
3-2-2 実証機のガス精製設備構成

IGCC用のガス精製設備には、排ガスの環境対策の観点から、 SO_x 排出に関わる全硫黄(H_2S+COS)濃度を50ppm以下、 NO_x 排出に関わる NH_3 濃度を10ppm以下

に低減すると共に、ガスタービン保護の観点から、アルカリ金属 (Na、K)、ハロゲン化物 (Cl、F)、微量物質などを除去することが求められる。実証機プロジェクトに際しての設備構成の検討においては、IGCCプラントの早期かつ確実な開発を優先し、ガス精製方式として技術的な完成度の高い前述の湿式ガス精製が選定された。乾式ガス精製は200トン/日パイロットプラントで集塵・脱硫についての目標性能は達成した⁽¹⁰⁾ものの、当時の実証機の機器構成の検討の段階で、機器信頼性・環境性に関する技術課題が比較的少ないと想定される湿式ガス精製を採用すべきと判断されたためである。

実証機の湿式ガス精製設備では、水で水溶性物質や凝縮性物質を除去する水洗装置と、アミン溶液で硫黄化合物を吸収する湿式脱硫装置によって、石炭ガス化ガスから不純物を分離する。実証機の湿式ガス精製の設備構成を図3-2-1に、主要不純物である硫黄化合物、窒素化合物ならびにハロゲン化物の挙動を図3-2-2に示す。

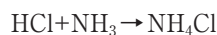
湿式ガス精製設備に入る集塵後の石炭ガス化ガスは、まずCOSの加水分解反応



の触媒を装填したCOS変換器に導入される。これにより、アミン系溶液にはほとんど吸収されないCOSも、湿式脱硫装置で除去することが可能となる。

COS変換器を通過した石炭ガス化ガスは、ガスクーラーでガス温度を下げた後から水洗装置に導入される。水洗前の石炭ガス化ガスにはHClとNH₃が含まれており、ガス温度

が下がるとそれらの反応



が進行して塩化アンモニウム (NH₄Cl) が生成する。NH₄Clは固体物質であり、その生成によってガス流路を閉塞させることが懸念されることから、ガスクーラーの出口温度はNH₄Cl生成を抑制した条件とし、水洗装置には高温のガスを導入可能なベンチュリースクラバを適用している。

ベンチュリースクラバでNH₃、HCl、HFなどの水溶性物質の一部を除去した石炭ガス化ガスは、ガス/ガス熱交換器で温度を下げた後に、冷却塔および洗浄塔に導入される。ガス温度を後段の湿式脱硫装置の運転温度である40℃程度に冷却することによって、ベンチュリースクラバで除去しきれなかったNH₃などが洗浄水に溶解して除去されると共に、アルカリ金属や微量物質についても低減される。また、温度の低下に伴ってガスに含まれる水蒸気が凝縮することとなり、冷却塔および洗浄塔からは不純物を含む大量の水が排出される。

ベンチュリースクラバ、冷却塔ならびに洗浄塔で使用した洗浄水は、pH、温度および圧力の調整などの処理を行った上で循環利用される。その際に放出されるオフガスに含まれる不純物は、燃焼炉で焼却・熱分解して無害化される(図3-2-1の②)。一部の洗浄水は排水処理設備に抜き出して、凝集沈殿やpH調整などを行って重金属や微量物質などを低減した上で排出される(図3-2-1の③)。

湿式脱硫装置では、アミンの一種であるメチルジエタノールアミン (MDEA) の水溶液を用いて、石炭ガス化ガス中の

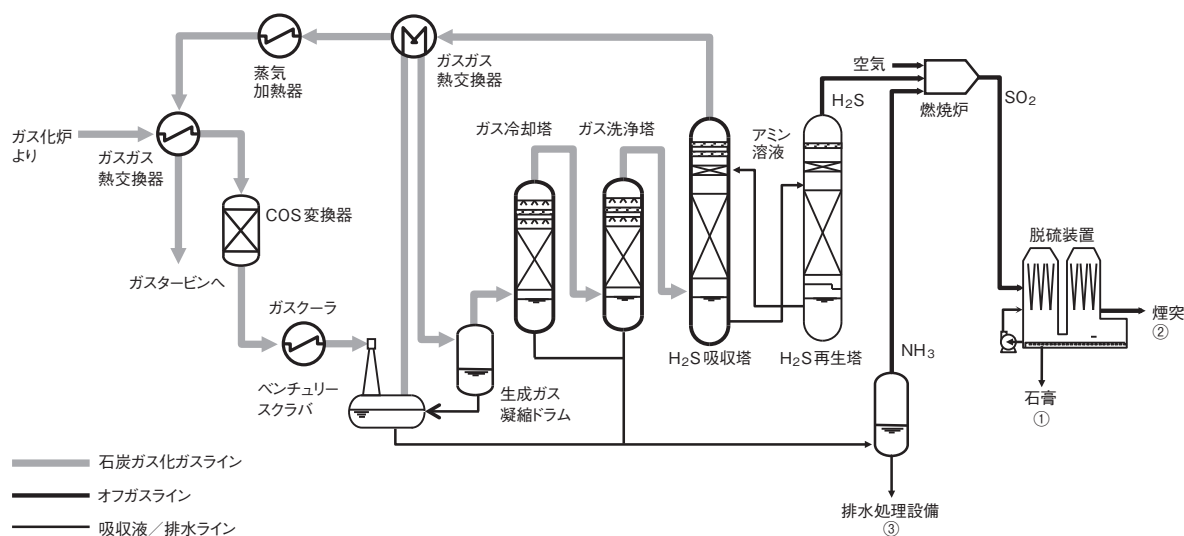


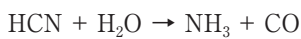
図3-2-1 IGCC実証機のガス精製設備の構成

H₂Sを除去する。H₂Sを吸収したアミン溶液は減圧および加熱することで再生できるため、H₂S吸収塔と再生塔を循環させることで、アミン溶液を繰り返し使用することが可能である。再生塔で放出されるH₂Sは、燃焼炉で焼却してSO₂に変換した上で、湿式脱硫装置にて石膏に変換して排出される(図3-2-1の①)。

精製後のガスは、ガス/ガス熱交換器ならびに蒸気加熱器(SGH)により昇温した後に、ガスタービンに導入される。湿式ガス精製設備ではNH₃の大半が除去されるので、燃料中窒素に由来するNO_x(Fuel-NO_x)の発生はほとんどないが、ガスタービン排ガスには燃焼用空気由来するNO_x(Thermal-NO_x)が含まれるため、アンモニア接触還元式の排煙脱硝装置が備えられている(図2-1-4参照)。

3-2-3 ガス精製設備運転特性の評価

実証機のガス精製設備は、ガス化炉の起動停止を含む全ての工程で通ガスしているため、その運転時間はガス化炉と同一である。運転中の湿式ガス精製の除去性能は、ガス精製出口のガス分析で把握しており、目標性能である全硫黄(H₂S+CO₂)濃度50ppm以下、NH₃濃度10ppm以下を継続して達成していることが実証された。また、COS変換器に装填した触媒において、HCNの加水分解反応



も進行することが判明した⁽¹¹⁾。COS変換器でHCNがNH₃

に変換されることによって、後流のスクラバや水洗塔で除去すべき窒素化合物はNH₃が主となる。そのため、厳しい排水基準が定められているシアン化合物の抑制にも効果があることが明らかとなった。

煙突出口の窒素酸化物、硫酸酸化物の濃度測定においては、実証機の環境特性目標であるSO_x排出濃度8ppm、NO_x排出濃度5ppm、ばいじん排出濃度4mg/m³_Nを常に達成しており、湿式ガス精製によりプラントの環境性が保持されていることが確認された。

実証試験でのガス化条件や負荷の変化、長期連続運転、炭種適合試験などを経る中で、ガス精製設備に関してもプラント状況に対応した運転条件の最適化や、性能維持のための管理評価などに関する技術が培われた。湿式ガス精製設備の運用に関する主な成果を以下に示す。

(1) 石炭ガス化ガス性状に応じた運用調整

石炭ガス化炉で生成される石炭ガス化ガスの性状は、ガス化条件や炭種によって異なる。湿式ガス精製の除去性能に対しては、特に硫黄化合物濃度、CO₂濃度、および水蒸気濃度の変動による影響が大きいことから、プラント状況に応じた運用調整を実施した。

石炭ガス化ガスに含まれる硫黄化合物であるH₂SおよびCO₂は、主に石炭の硫黄含有量に依存する。高硫黄炭ほどそれらの濃度は高くなり、COS変換器ならびに湿式脱硫装置に対する負荷が大きくなる。また、CO₂濃度および水蒸気濃度は、主に石炭性状に依存し、特に含有水分が多い

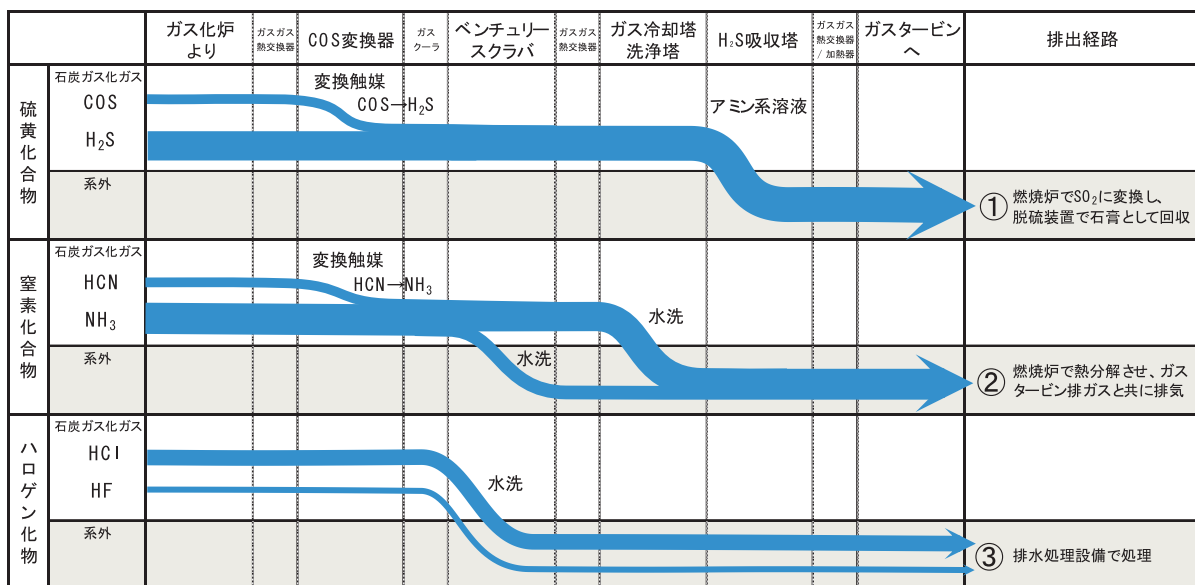


図3-2-2 湿式ガス精製における不純物の挙動

ほどこれらの濃度が高くなる。湿式脱硫装置の吸収液であるアミン溶液はCO₂の一部も吸収するため、CO₂濃度が増加することで吸収液の再生時に放出されるオフガス量が増大することとなる。また、湿式ガス精製では石炭ガス化ガスに含まれる水蒸気のほとんど全量が凝縮するため、水蒸気濃度が高くなると排水処理量が増大する。

これらのことから、実証試験において炭種適用性を評価する際には、特に精製ガスの硫黄濃度、オフガス量、ならびに排水処理量の変化に留意しながら試験が行われた。実証機のCOS変換器に関しては、高硫黄炭の適用によってCOS濃度が上昇しても、十分なH₂Sへの変換性能を発揮することが確認された。高水分炭を適用した際に排水処理設備の容量が制約となる場合があったが、これは石炭ガス化ガスからの凝縮水量が実証機の設計値よりも多いことによるものである。そのため、適用する炭種を考慮した適切な設備設計を行うことで対応可能な事象と考えられる。

一方、湿式脱硫装置については、石炭ガス化ガス性状の変動の影響が大きく、脱硫性能とオフガス処理量の両方の制約条件に対応するための運転調整が必要であった。そこで、実証試験では、石炭性状に応じて湿式脱硫装置のH₂S吸収塔トレイ段数を切り替えて対応する技術が確立された。具体的には、H₂S濃度が高い場合にはトレイ段数を多くして吸収液との接触時間を長くすることで脱硫性能を確保し、CO₂濃度が高い場合には段数を少なくしてCO₂捕集量を抑制することでオフガス量の増加を抑えることができた。実証試験では、石炭分析値やガス化条件に基づいて石炭ガス化ガスの性状を予測し、運転中にトレイ段数を切り替えることで、石炭ガス化ガス性状の変動に対応できた。トレイ段数の調整は脱硫性能とオフガス量に逆の作用をもたらすため、両方がともに厳しくなる高硫黄・高水分炭の制約があるものの、ガス化条件や石炭性状に応じた適切な運用が可能であることが実証された。

(2) 精製性能の維持技術

実証試験では各装置における不純物除去特性を詳細に把握すると共に、停止時の開放点検による装置状況を確認することによって、ガス精製設備の性能を維持するための管理評価技術について検証が進められてきた。

特に脱硫性能においては、COS変換器や湿式脱硫装置の両方が常に機能していることが求められ、それぞれの性能を保持し続けるための処置を適切に施さなくてはならな

い。COS変換器においては、触媒の反応性を充填位置ごとに評価したところ、触媒性能はガスの上流側から低下していることが確認された。そのため、COS変換器の性能を確保するには、触媒交換を部分的に実施すると共に、触媒位置を順次変更する運用方策が適切と考えられた。また、湿式脱硫装置については、アミン溶液の劣化要因である熱安定性塩の混入状況について把握している。H₂S吸収性能を維持するには、運転に伴って蓄積する熱安定性塩を分離除去するとともに、アミン溶液を補充あるいは交換する運用によって性能を保持することが可能となった。

併せて、ベンチュリースクラバ、冷却塔、洗浄塔、ならびにIGCC特有のガス処理系統や排水処理設備においても、安定に運用するための運転および監視技術が検証された。各設備の最適な運用条件を明らかにするとともに、プラント変動にも対応できる操作手法を確立し、その後の商用運転に活用されている。

(3) トラブル対応技術の確立

IGCCの機器保全と環境性の観点で重要な役割を担っているガス精製設備は、実証試験の初期より設計通りの不純物除去性能を発揮しており、発生したトラブルは主に機械的なものであった。その多くはプラントの運転状態が大きく変動した際に発生しており、耐腐食性を向上させた材料を適用して耐久性を高めるとともに、実証試験で得られたガス精製設備の装置特性に基づいて運転調整を行うことで、回避することが可能と考えられる。

また、ポンプやストレーナなどの補機類では劣化損傷などに起因する動作不良が生じる場合があった。これに対しては、機器の運転特性から不具合の前兆を検知するとともに、補機系統を多重化して機器補修を段階的に実施することによって、プラント運転を継続しながらメンテナンスする技術を確立している。

これらのトラブル対応技術により、IGCCの安定運用を見据えた湿式ガス精製設備の信頼性が検証され、今後の実証機の商用運転や商用規模設備の設計に繋がる知見が得られている。

3-3 複合発電設備

複合発電設備は、ガスタービンと蒸気タービンを複合運用して高効率発電を実現するシステムであり、天然ガスを燃料

とする発電プラントでは既に普及している。石炭を複合発電設備に適用する場合は、石炭、ガス化炉、および複合発電設備が固有に有する特性を考慮した適切なシステム構成と運用手法が求められる。

考慮すべき特性の1点目は、ガスタービンに供給される燃料ガスの発熱量である。空気吹きIGCCでは、天然ガスに比べて発熱量の低い石炭ガス化ガスがガスタービンに供給される。2点目は、石炭性状のばらつきである。固体である石炭は、採掘から輸送の工程を経ても均一化されにくい。炭種や輸送船のロットの違いによる性状のばらつきに加え、同一のロット内でも炭質のムラにより性状がばらつくことが一般的である。3点目は、ホッパ供給方式を採用していることである。微粉炭とチャーはホッパのサイクル運用によりガス化炉に供給されるため、微粉炭の調製やチャーの生成、そしてこれらをガス化炉に供給するタイミングには時間差が生じる。

実証機では、石炭ガス化ガスを複合発電設備の燃料として適用するにあたり、上記のIGCC固有の特性を考慮した設計や運用が行われた。複合発電設備を安定して運用するために実証機で考慮した3点について、本節で述べる。

- ① 低カロリー燃料である石炭ガス化ガスに対し、ガスタービンの燃焼を安定させること（低カロリーガスへの対応）
- ② さらに微粉炭性状のばらつきによる石炭ガス化ガスの発熱量の不規則な変動に対し、ガスタービンの燃焼を安定させること（石炭性状の変動への対応）
- ③ ホッパ供給方式による微粉炭とチャーの性状変化の時間差に対し、石炭ガス化ガスの発熱量を安定させること（ホッパ供給方式への対応）

3-3-1 低カロリーガスへの対応

空気吹きIGCCでは、 $5\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 程度と発熱量の低い石炭ガス化ガス（低カロリーガス）がガスタービンに供給される。石炭ガス化ガスの発熱量はガス化炉の運転状態により変化するが、典型的なガス組成を表3-3-1に示す。低カロリーガスは発熱量あたりで見ると体積が大きいことから、実証機のカスタービンには体積流量の大きい燃料に対して安定燃焼が可能な拡散燃焼方式の燃焼器が採用された。

また、安定燃焼のためには、石炭ガス化ガスの発熱量がガスタービンの燃焼可能範囲を下回らないようシステムを制御する必要がある。実証機ではガスタービンの燃料要求量

に応じて、自動制御により微粉炭供給量を調整する方式が採用された。同時に、石炭ガス化ガスの組成を複数の方法により監視し、ガスタービンに流入する燃料ガスの発熱量が安定するよう、ガス化炉への微粉炭供給量が補助的に調整された。

石炭ガス化ガスの発熱量を把握する上では、ガス組成分析値の信頼性、分析装置の応答遅れ等も考慮する必要があった。そこで、石炭ガス化ガスの発熱量をガス化炉・SGCの蒸気量（ガス化炉とSGCの水冷壁および熱交換器で発生した蒸気の量）から把握することが効果的であった。即ち、供給される石炭の発熱量は、石炭ガス化ガスの発熱量と、ガス化炉・SGCで発生する蒸気の熱量の合計に相当し（図3-3-1の①+②）、ガス化炉・SGCの蒸気量を監視すれば石炭ガス化ガスの発熱量を推算することが可能である。ガス化炉・SGC蒸気の流量測定値の信頼性は比較的高いことから、石炭ガス化ガスの発熱量の変化を察知するための有効な手段である。

以上の通り、実証機では、低カロリーガスに対応した燃焼器の採用と微粉炭流量の自動制御に加え、複数の手段による石炭ガス化ガスの発熱量の監視、およびガス化炉・SGCの蒸気発生量から石炭ガス化ガスの発熱量の変化を推算する方法を補助的に併用し、低カロリー燃料によるガスタービンの安定した燃焼状態が確保された。なお、実証機のカスタービン起動時は液体燃料を用いて運転された。ガスタービンの燃料を石炭ガス化ガスに切り替える際、液体燃料と石炭ガス化ガスの発熱量の差が大きいと、切り替えのタイミングに注意を払った運用が行われた。

表 3-3-1 空気吹きIGCCの石炭ガス化ガス組成
（設計炭運用時の一例）⁽¹²⁾

発熱量(LHV)	$5.2\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$
CO	30.5%
CO ₂	2.8%
H ₂	10.5%
CH ₄	0.7%

参考 天然ガスの発熱量(LHV)：約 $40\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$

3-3-2 石炭性状の変動への対応

既存の微粉炭火力では、蒸気タービンの作動流体である蒸気は石炭燃焼による高温ガスから熱交換して間接的に発生されること、および蒸気タービンに流入する蒸気の流量が

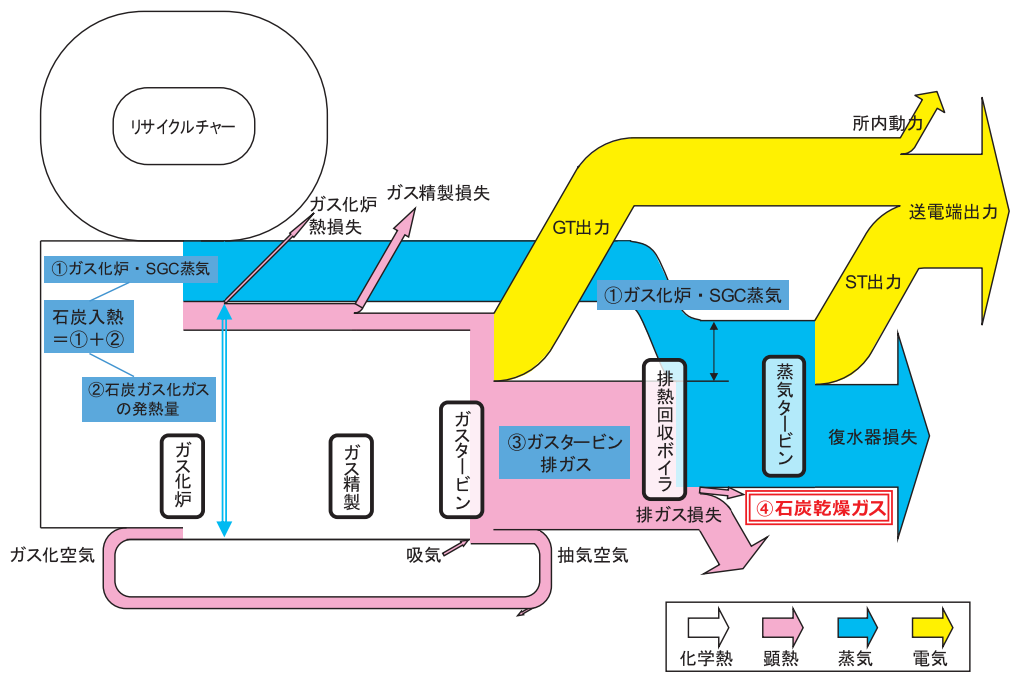


図 3-3-1 IGCC システム全体のエネルギーの流れ

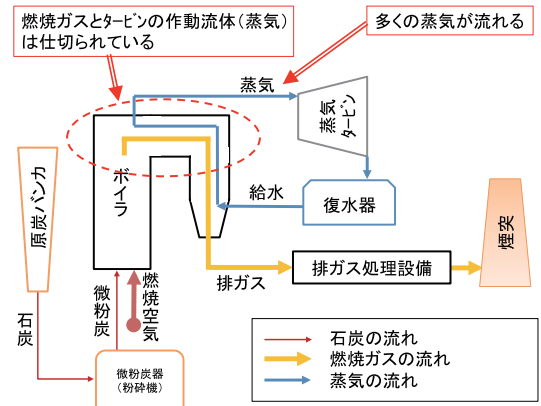


図 3-3-2 従来型微粉炭火力発電の構成

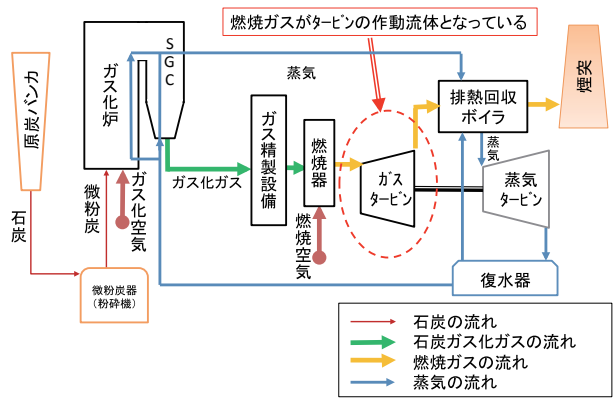


図 3-3-3 IGCC 実証機の構成

非常に多いことから、石炭性状が変動しても蒸気タービンの出力は変動しにくい(図3-3-2)。一方IGCCでは、石炭ガス化ガスを燃焼した燃焼ガス自身がガスタービンの作動流体となっているため、石炭ガス化ガスの発熱量変化に対して敏感で、石炭性状の変動に起因するガスタービンの出力変動が生じやすい(図3-3-3)。

例えば、炭種変化や石炭性状のばらつきにより発熱量の低い微粉炭が供給されたとき、ガス化炉の運転状態が変化して石炭ガス化ガスの発熱量が低下する。これにより、ガスタービン燃焼器の温度が低下(ガスタービン入口のエンタルピが低下)し、ガスタービンの出力は低下する。ガスタービンは出力を維持するために燃料ガスを多く要求することから、

石炭ガス化ガスの供給量が増え、ガス化炉の運転圧力が低下する。この場合、ガスタービンの出力を維持するため、ガス化炉の微粉炭供給量を増加しガス化炉の圧力を高め、石炭ガス化ガスの発熱量と供給量を増加させる操作がなされる(図3-3-4)。

そこで、実証機では、ガス化炉の圧力を運転指標として微粉炭供給量を調整し、ガスタービンとガス化炉を協調運用する制御方式が採用された。また、石炭性状の変動に対して微粉炭供給量の調整が過度にならないよう、微粉炭供給量は緩慢に制御された。特に水分等の性状が大きく異なる石炭を混炭して運用する場合、石炭ガス化ガス組成とガス化炉・SGCの蒸気発生量の関係や、後述する石炭の乾

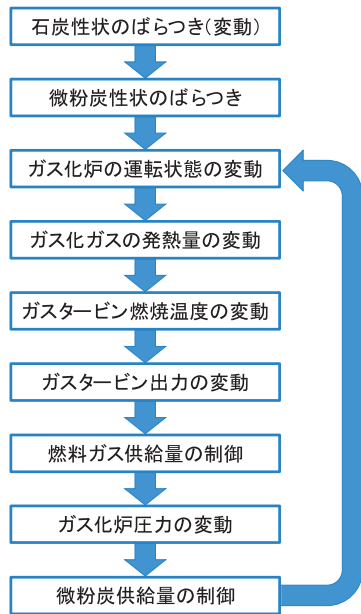


図 3-3-4 石炭性状のばらつきがガスタービン出力変動に影響するスキーム

燥工程における水分管理によりガス化炉の運転状態の変動を予測し、微粉炭供給流量が先行的に調整された。これらの運用により、燃料ガスの発熱量変動に対して敏感に応答するガスタービンの出力変化を抑制することができた。

3-3-3 ホッパ供給方式への対応

実証機では、加圧されたガス化炉に微粉炭とチャーを供給する手段として、ホッパ供給方式が採用された。3つの

微粉炭ホッパと4つのチャーホッパで構成され、それぞれ受入・昇圧、待機、供給の工程を1サイクルとして運用される(図3-3-5)。石炭は微粉炭としてホッパに一時的に貯蔵されるため、微粉炭器に供給されてからガス化炉に供給されるまでに時間差が生じる。同様にチャーもガス化炉で生成されホッパに貯蔵されてから、ガス化炉に供給されるまでに時間差が生じる。

ガス化炉に供給される微粉炭(図3-3-6の微粉炭ホッパA)は、微粉炭ホッパ運用の2工程前に受け入れた微粉炭であり、例えば約1時間前に乾燥・粉砕された微粉炭の性状を有する。さらに、ガス化炉に供給されるチャー(図3-3-6のチャーホッパA)は、チャーホッパ運用の3工程前に受け入れたチャーで、例えば約1時間前にガス化炉に供給された微粉炭から生成された未燃分であり、約2時間前に乾燥・粉砕された石炭の性状を反映している。そのため、ガス化炉に供給されている微粉炭とチャーは、過去の異なる時間に乾燥・粉砕された石炭性状の影響を遅れて受けている(図3-3-6)。

一例として石炭性状の変動に起因して一時的に水分の多い微粉炭がガス化炉に供給された場合を考える。この場合、ガス化炉の温度が低下し、石炭ガス化ガスの発熱量が低下する。実証機では、石炭を粉砕する際の乾燥工程において、微粉炭中の水分変化を把握している。即ち、水分の多い石炭が供給された場合、石炭乾燥後のガス温度が低下することから、乾燥ガスの温度変化により微粉炭に含まれる水分量の変化を把握することが可能である。この水分

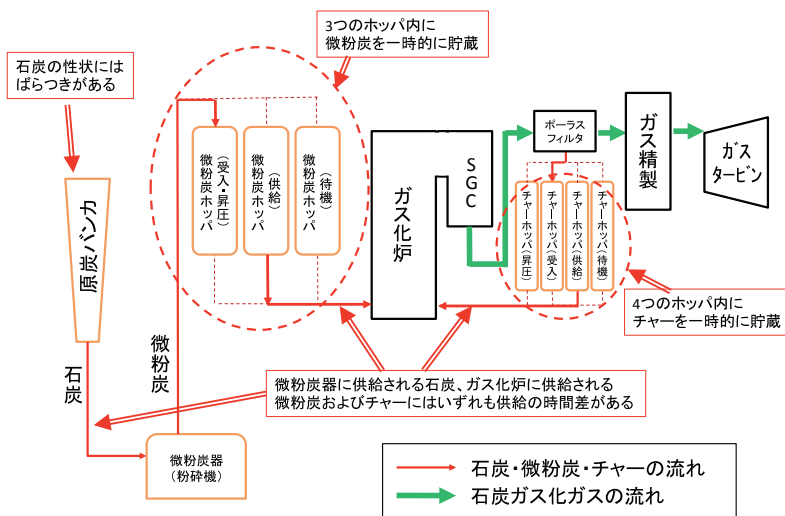


図 3-3-5 実証機のホッパ方式による微粉炭供給
(従来の微粉炭火力では微粉炭器で粉砕された石炭は直ちにボイラに供給される)

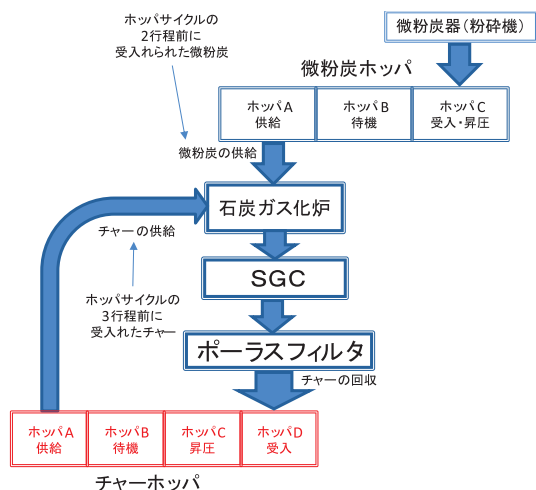


図 3-3-6 ホッパーの状態とガス化炉への供給タイミング

量の推測により、水分を多く含む微粉炭がどのホッパーに受け入れられ、石炭ガス化ガスの発熱量に、いつ、どの程度の影響を与えるかを類推する運用が行われた。

一方、チャーの性状（未燃分および発熱量）も石炭ガス化ガスの発熱量に大きな影響を及ぼすが、チャーの性状を運転中に把握することは困難である。実証機ではチャーの生成速度（チャーホッパーへの受入速度）や、いつ粉碎された微粉炭を起源とするチャーであるかを把握し、経験的にチャーの発熱量を類推する運用が行われた。例えば、微粉炭中の水分の変動によりガス化炉の温度が低下した場合、その時に生成されるチャーは未燃分が多くなる。この際、未燃分を多く含む発熱量の高いチャーがどのホッパーに受け入れられたかを念頭に入れ、そのチャーがどの程度遅れてガス化炉に供給されるかを把握する運用が行われた。

実証機では、微粉炭とチャーのホッパー供給に起因する石炭ガス化ガスの発熱量の変動遅れに対し、微粉炭供給量を自動調整して安定化させるとともに、特に水分変動の大きい石炭や性状の大きく異なる石炭を混炭で利用する場合には、必要に応じて微粉炭量の手動調整が行われた。

以上の実証機の運用実績により、複合発電設備を安定して運用するために必要な技術が検証され、今後の実証機の商用運転や商用規模設備の設計に繋がる知見を得ることができた。

3-4 設備間の連係

IGCCでは、システムを構成する設備間で熱や物質を相互に利用するため、個々の機器の挙動がシステム全体の運

転状態に及ぼす影響を考慮した運用が必要である。実証機では、空気分離装置で製造する窒素と酸素、ガスタービンの圧縮空気と排ガス、ガス化炉・SGCで発生した蒸気等が設備間で連係して利用されている。ここでは設備間の蒸気や熱に関わる連係がシステム全体に及ぼす影響と実証機における対応について述べる。

3-4-1 ガス化炉・SGCとHRSG間での蒸気の連係

ガス化炉・SGCを熱源として発生した蒸気は、HRSGにてガスタービン排ガスを熱源とする蒸気と合流し、蒸気タービンに供給される（図3-4-1）。ガス化炉・SGCの蒸気発生量はガス化炉の運転状態、即ちガスタービンが要求する石炭ガス化ガスの量によって決まり、HRSGの蒸気発生量はガスタービンの排熱量により決まる。ガス化炉はガスタービンの出力変化に先立って運用状態を変更することから、ガス化炉・SGCの蒸気量変化はHRSGでの蒸気量変化より先行する。システム全体の安定運用には、ガスタービン、ガス化炉・SGC、HRSG等の時定数の異なる機器を連係して制御することが重要となる。

(1) 石炭性状の変動における連係

例えば正常運転時に水分等の石炭性状の変動によりガス化炉の入熱量が大きく低下した場合、3-3節で述べたようにまずガス化ガスの発熱量の低下によりガスタービンの出力が低下する。次にガス化炉・SGC、HRSGの蒸気量へ遅れて影響が及び、蒸気タービンの出力が低下する。この時、システム全体の発電出力を補うため、ガスタービンは出力を上昇させ、ガス化炉は微粉炭の供給量を増やす。その結果、ガス化炉の入熱量が増加し、ガス化炉・SGCの蒸気発生

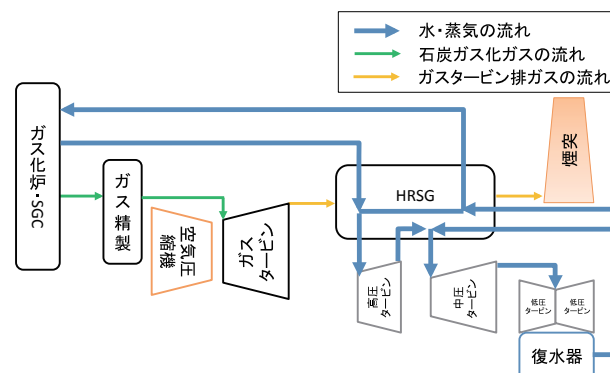


図 3-4-1 実証機における設備間での蒸気の連係利用

量は回復する。ガスタービンの出力が上昇している間は、ガスタービン排ガスの熱量が増えるためHRSGでの蒸気発生量も遅れて増加する。ガス化炉・SGCとHRSGでの蒸気発生量の回復に合わせてガスタービンの出力を定常の状態に戻す必要がある。

実証機では、ガス化炉・SGC、およびHRSGでの蒸気の連係利用を考慮し、設備同士を協調した自動制御手法が採用された。また異種の石炭の混炭運用のように、ガス化炉の状態が大きく変動する運転では、運転員が経験的に把握している各機器の時定数等を基に、微粉炭量の手動調整を併用した。これらの制御・調整により、蒸気を設備内で連係することによる運転状態の変動を安定させることができた。

(2) 負荷変化における連係

複合発電システムでは蒸気タービンの出力応答が緩慢なため、システム全体の発電出力を変化（負荷変化）させるには、応答の速いガスタービンの出力を先行して変更する必要がある。天然ガス複合発電設備と比較して空気吹きIGCCは、システム全体の出力に占めるガスタービンの出力割合が小さいため、負荷変化時に蒸気タービンの出力応答の遅れを補うためのガスタービンの役割が相対的に大きい。

IGCCの負荷変化時に、ガスタービンの出力を蒸気タービンに先行して変化させるためには、ガス化炉の運転状態を迅

速に変化させる必要がある。また、システム全体の発電出力が目標出力に達した直後は、蒸気タービンは未だ定常運転状態に至らず、ガスタービンの出力がオーバーシュートした状態となる。ガス化炉や、ガス化炉・SGC蒸気量も同様にオーバーシュートした状態で一時的に運用される。

実証機の負荷変化運転では、ホッパ内に貯蔵された微粉炭を先行して利用し、負荷変化に合わせてガス化炉の運転状態を迅速に変化させた。同時にガス化炉に供給するガスタービンからの抽気空気量を自動で先行調整した（図3-4-2）。また、ガスタービン、ガス化炉、及びSGCの過度なオーバーシュートを回避するため、負荷変化速度を適正化させるとともに、ガス精製設備も運転状態の変更を適切に行った。これらのシステム全体の協調制御と負荷変化パターンの適正化により、システム全体では約3% / 分の負荷変化速度を達成した。

3-4-2 石炭乾燥のための排熱の連係利用

実証機では微粉炭器で石炭を乾燥するため、ガスタービンの排ガスをHRSGから取り出して乾燥熱として利用している（図3-3-1、図3-4-3）。石炭の乾燥は、微粉炭を安定して燃焼させることに加え、石炭ガス化ガス中の水分を低く抑え、ガス精製での排水量を削減する効果がある。特に、亜瀝青炭等の水分の多い石炭を利用するとき、石炭ガス化ガス中の水蒸気量が多くなるため、ガス精製設備の容量制限から発電出力に制限が出るケースがあった。

一方、石炭の乾燥に取り出すガスタービンの排ガスを増やすと、HRSGでの取熱量が低下し蒸気タービンの出力が低下する。このときシステム全体の発電出力を補うにはガスタービンの出力を増加させるため、ガス化炉への微粉炭

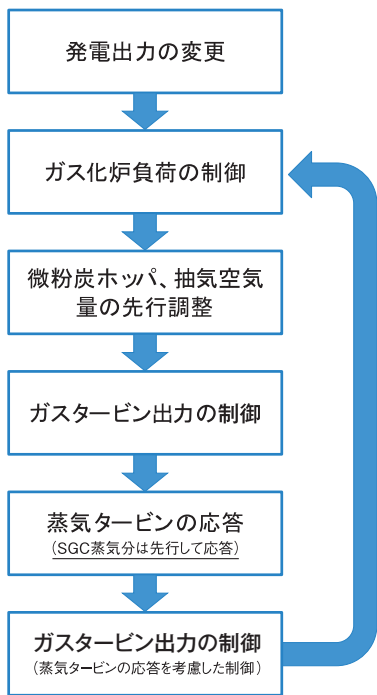


図 3-4-2 発電出力変更時の運用変化

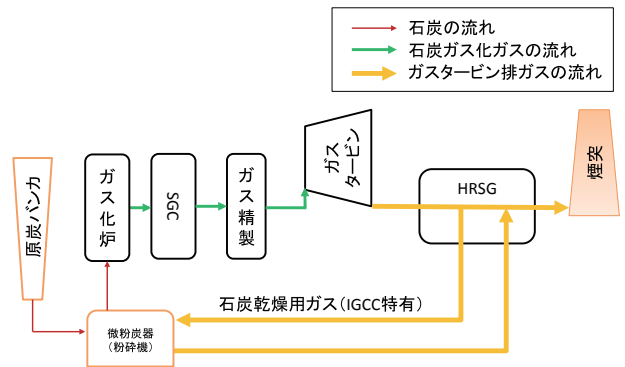


図 3-4-3 石炭乾燥用ガスの取り出し

の供給量が増える。システムの高い発電出力を維持するには、石炭の供給量や組成に合わせて乾燥に必要なガスの温度と流量を調整し、HRSGから熱を過剰に取り出さないことが重要である。

実証機では、石炭中に含まれる水分量や石炭のガス化反応性をあらかじめ分析し、石炭ガス化ガスに含まれる水分量を推計する運用が行われた。また、ガス精製の設備容量、及びシステム全体の出力を考慮しながら、石炭の乾燥条件を適正化した。これらの運用により多様な炭種での運用や混炭運用の場合でも安定した運転が確保された。

3-5 IGCC商用機に向けて

IGCC実証機は、実運用性を実証するための試験プラントに留まらず、震災後には貴重な電源として機能し、さらに実証試験終了後には商用プラントとして継続して運用されている。実証試験で得られた成果、ならびに一連のプラント運用実績により、技術確立に重要な知見と経験が蓄積され、今後の高効率火力発電システムとしてのIGCCの信頼性は格段に向上した。

ガス化炉設備については、機器点数が多いことから初期トラブルが集中したが、設備の調整改良を施すことで、早い段階で設計炭での定格運転を達成でき、基本設計思想の妥当性が検証された。また、実証試験では性状の異なる石炭での運転も実施し、高灰融点炭や高水分炭を適用した際のガス化炉運転特性を把握し、IGCCの特長である炭種適合性に関する知見が高められた。一方、設計段階で想定していなかった不具合として、ガス化炉後流の熱交換器がチャー焼結物で閉塞するという事象が生じたが、石炭ガス化条件の最適化と熱交換器の改造によって抑制でき、長期にわたる連続運転が可能となった。ガス化炉の構成材料が受ける長期的な影響についても、累積3万時間近い運転を通して明らかになりつつあり、今後は設備の安定運用への影響が大きい粉体による摩耗等に関する超長期的な検証が重要である。

ガス精製設備は、既存技術を応用した湿式ガス精製方式が採用され、石炭ガス化ガスに含まれる多種多様な不純物に対してほぼ設計通りの除去性能が発揮された。ガス化炉運転条件や石炭性状の変化に伴う生成ガスの組成変化に応じて、ガス精製設備側で対応すべき運転ノウハウが蓄積された。オフガス処理や排水処理などを含む設備全体の

性能も検証されたが、数多くの機器が複雑に組み合わせられていることから、機器構成や処理方法の最適化や、設備監視、運転制御、メンテナンスを含む運用性の更なる向上が必要である。

複合発電設備は、既存のガスタービン技術に発熱量の低い石炭ガス化ガスを適用したものであるが、実証試験では失火や燃焼振動などの重大な支障なく運転できることが実証された。燃焼用空気ならびに冷却空気を適正に調整して最適な燃焼器温度を制御することが重要であり、定格運用時の送電端効率は42.9% (LHV基準)と目標を上回る発電効率を達成し、負荷変化や炭種変化などに伴うガス発熱量の変動にも対応できることが確認された。ガスタービンを構成する高温部品については、石炭ガス化ガス燃料への適応性が実証されており、今後は材料寿命に関する長期間耐久性の検証と運用保守技術の構築が課題となる。

IGCCは、反応性、応答性が大きく異なる設備、機器を相互に協調させたプラントであり、それぞれの運転特性の相違を考慮した運用が求められる。特に、空気、水、蒸気などの物質や熱エネルギーを適切に連携利用できることが重要であり、安定かつ高効率な運用を可能とする全体システムの運用技術が不可欠である。実証試験では、定格負荷での定常運用のみならず、プラントの起動停止、ならびに負荷変化や炭種変化などの変動操作にも対応してきており、その運転ノウハウに基づいたプラントの監視、解析、制御技術の向上が重要である。

IGCC実証機は、実証試験用の設備として設計、建設されたものであり、設備構成や規模に関して様々な制約があるプラントであった。今後のIGCC商用機的设计においては、実証機プロジェクトで得られた成果を活用し、表3-5-1に示す機能の拡充が重要となる。次期IGCC商用機へのステップアップにあたり、IGCCの特長を最大限に引き出すために特に取り組むべき要件を以下に記す。

3-5-1 熱効率の向上

(1) ガスタービンの高温化

既存の微粉炭火力よりも高い効率が実現できることが、IGCCの最大の特徴である。効率向上による燃料消費量の削減効果は、運転コスト低減のみならず、エネルギーセキュリティの向上やCO₂排出量削減に貢献する。実証機の送電端効率は、最新鋭の大型石炭火力である超々臨界圧

表 3-5-1 商用 IGCC に求められる要件

3E+S	安定供給:Energy Security
	経済効率性の向上:Economic Efficiency
	環境への適合:Environment
	安全性:Safety
① 熱効率の向上	
	安定供給 経済効率性の向上
ガスタービン高温化	<ul style="list-style-type: none"> タービン入口温度 (TIT) の向上による高効率化 石炭ガス化ガス燃焼特性 微量物質等の影響評価 高温部品の保守・管理技術の確立
ガス化炉スケールアップ	<ul style="list-style-type: none"> ガスタービンに合わせたガス化炉処理量の決定 スケールアップ手法の踏襲
② 設備利用率の向上	
	安定供給 経済効率性の向上 安全性
ガス化炉運転の安定化	<ul style="list-style-type: none"> 石炭ガス化ガスの組成および流量の変動抑制 微粉炭、チャー、ガス化用空気の最適制御 プラント監視および制御システムの高度化
設備の健全性、安全性の向上	<ul style="list-style-type: none"> プラント寿命を考慮した超長期的な運用性検証 設備、機器の適正な寿命評価 材料や構造の改良、トラブル発生時の対処技術
計画外停止の回避	<ul style="list-style-type: none"> 設備多重化による運転継続での補修技術 ガスタービンのデュアル燃料適用による安定運用 負荷追従、タービン単独発電などプラント運用性の拡大
③ 優れた環境適合性	
	環境への適合
排ガス処理	<ul style="list-style-type: none"> ガス精製設備の最適化、簡素化 乾式ガス精製技術の適用による効率向上
石炭灰の処理	<ul style="list-style-type: none"> 水砕スラグの用途拡大 スラグ有効利用に向けた規格化
排水処理	<ul style="list-style-type: none"> IGCC 特有の排水処理技術の最適化 設備構成の簡素化
CO ₂ 排出量の削減	<ul style="list-style-type: none"> 発電効率の向上 バイオマス混焼の適用 CO₂ の分離回収技術を見据えた、CCS-Ready プラントの設計
④ 炭種適合性の拡大	
	安定供給 経済効率性の向上
未利用炭への炭種拡大	<ul style="list-style-type: none"> 亜漚青炭、褐炭のガス化技術の確立 定格出力を前提としたプラント設計と設備容量のバランス
中～高融点炭の適用	<ul style="list-style-type: none"> ガス化炉温度 スラグ排出の安定化 適正なコンバスタ温度 混炭運用などによる灰融点の調整

(USC) ボイラと同程度であり、250MWの規模としては高い発電効率を達成した。次期商用機にはさらに高い発電効率で運用できることが求められ、その実現に直結した技術として高温型ガスタービンの適用が挙げられる。

天然ガス焼き複合発電システムの高効率化は、主にガスタービンの高温化によって推し進められてきた。我が国における最初の天然ガス焼き複合発電設備には、タービン入口温度(TIT)1,100℃級のガスタービンが適用された。その後、高温強度特性に優れた材料の開発が進められ、現時点では1,300～1,600℃級の高温型ガスタービンが普及しており、

1,700℃級ガスタービンの開発も進められている。

IGCC用のガスタービンについては、天然ガス焼きガスタービンをベースに、燃料(発熱量、供給量)の違いに対応するよう、主に燃焼器と通過ガス量の増加するタービン部を変更することとなる。これは、製鉄所の高炉ガス(BFG)やコークス炉ガス(COG)のガスタービンへの適用拡大において実施されている技術であり、BFG用として1,300℃級ガスタービン(MHPS社M701F型)も実用化されている。そこで、次期の大型実証IGCC向けとしては、1,400℃級ガスタービン(MHPS社M701F4型)の適用が検討されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

IGCC用の高温型ガスタービンの課題としては、燃焼器の燃焼技術と高温部品の健全性確保が挙げられる。石炭ガス化ガスは、発熱量が天然ガスの約1/4～1/10程度であり、高温での安定燃焼と同時にサーマルNO_x発生量の増加を抑えた低NO_x燃焼が求められることとなる。また、ガスタービンの運用管理やコスト管理において重要な高温部品に関しては、TITを高めた場合の耐久性について検証が必要であり、特に、燃料ガスに含まれる微量成分がタービン翼の耐熱コーティング(TBC)に及ぼす影響の評価が必要である。

(2) スケールアップ

実証機プロジェクトでは、250MW級のプラント規模が計画され、この規模に合うガスタービンとして、1,200℃級であるMHPS社M701DA型が採用された。次の段階となる福島復興プロジェクトで適用するM701F4型の場合は、ガス化炉規模と蒸気タービン出力を勘案して540MW級のプラントを想定しており、実証機から約2倍のスケールアップが必要となる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

空気吹きIGCCの開発においては、2トン/日試験炉から200トン/日パイロットプラントへの約100倍のスケールアップを行った際に、ガス化炉内での灰付着による閉塞(スラッキング)が発生し長時間運転の障害となったため、ガス化炉形状の改造を経てトラブルを克服した経緯がある。この事象は相似形状としたスケールアップが要因であることが判明し、ガス化炉内部でのガス流速についても考慮した設計によってスラッキングトラブルを防止できることを確認している(3-1節参照)。

それに続いて建設されたIGCC実証機は1,700トン/日の規模であり、パイロットプラントから約8.5倍のスケールアップであった。ガス化炉内の反応性、灰付着性に関する大きな支障はなかったことから、パイロットプラントで培った「流速の一致」と「流動の相似」を併用する設計手法の妥当性が実証されている。この設計思想を踏襲することで、次期の大型実証IGCCへの約2倍のスケールアップは支障なく進められると考えられる。

3-5-2 設備利用率の向上

我が国の電源構成と需給バランスの観点から、石炭火力がベース電源の一つとして位置づけられるなかで、特に

IGCCには継続的な定格運用での高効率発電が期待されている。実証機プロジェクトでは、連続運転時間ならびに年間運転時間を評価項目として、設備の信頼性と耐久性を検証してきた。実証試験では、連続2,238時間、年間5,013時間の運転を達成すると共に、その後の商用運転において連続3,917時間のベースロード運転に成功しており(2章参照)、定格負荷での長時間運用に一定の見通しが得られている。

IGCCでは、ガス化炉設備、ガス精製設備、複合発電設備が密に係り、化学エネルギーと熱エネルギーを有効に利用することで、高い発電効率が達成される。そのため、一部の設備に不調が生じると、他の設備の運転にも影響が波及し、場合によってはプラントの停止に至る可能性がある。商用発電プラントとしての信頼性を確保するには、IGCCに特有の設備構成と運転特性を考慮した適切な運用技術の確立が重要である。

プラントの安定な運用には、ガス化炉設備で石炭のガス化反応を安定的に進行させることが求められる。ガス性状(発熱量、組成、温度、圧力等)の変動の少ない石炭ガス化ガスが製造されることにより、ガス精製やガスタービン、蒸気タービンの運転は定常化し、プラント全体が安定するためである。特に、炭種や負荷を変化させる際に、微粉炭供給、チャー搬送、ガス化用空気の供給量を適切に制御できることが、実運用において重要な要素となる。3-3節で述べたように実証試験においてはプラント状況に応じた運転操作技術が培われており、プラント監視および制御システムの向上を図ることで、更なる安定運用につながると考えられる。

安全の観点では、ガス化炉設備で製造した高温高压の石炭ガス化ガスが毒性のあるCOを主要成分として含み、またH₂SやHClなどの腐食性を有する成分も含有することに留意する必要がある。そのため、ガス化炉設備、ガス精製設備、複合発電設備には、配管や補機類を含めて、設備の健全性、安全性が保たれることが非常に重要である。

設備利用率を高く維持するには、不調や不具合などが発生した場合に、プラントを停止させずに対処できることが求められる。迅速に適切な対処を施せるよう各設備の監視ならびに制御技術を高めるとともに、重要な補機類は系統を多重化させた構成とし、部分的な設備停止の場合にも発電運転を継続できることを考慮したプラント設計が重要である。例えば、複数のユニットを並列して設置し、ガス化炉設備やガス精製設備を係り・共有することで、設備のメンテナンス

を行いながら発電を継続する考え方もある。海外のIGCCのように、複合発電設備のガスタービンに天然ガスとの混焼機能（デュアルフュエル）を備えることで、石炭ガス化ガスの性状変動を吸収させるとともに、必要な場合には天然ガス専焼での運転を行うことで、発電設備の利用率を高めることも可能と考えられる。これらの機能を備えると設備構成はさらに複雑となるため、実際に設備として採用するには、信頼性とコストの兼ね合いから判断することとなる。

3-5-3 炭種適合性の拡大

IGCCは、高効率で環境性に優れた発電運転が可能であることに加え、適合炭種が拡大することによるエネルギーセキュリティ面の効果も期待される。IGCCにおける炭種の拡大方向性について、石炭の発熱量と灰融点の関係をを用いて図3-5-1に示す。

低灰融点炭は、中国、北米、インドネシア等の広い地域で産出されるが、微粉炭焼きボイラにそのまま適用した場合にはスラッキングやファウリングが懸念されるため、国内の石炭火力発電での利用は限定的である。IGCCでは未利用の低灰融点炭を使用できるため、燃料費の低減によるコストメリットに加え、発電用燃料の選択幅が広がることにより、化石燃料全体の安定供給や価格抑止という効果も期待できる。

また、IGCCが微粉炭火力で利用している石炭も共用できると、石炭輸送や貯蔵に関する既存のインフラを活用できるとともに、燃料を調達する上での柔軟性も高まる。実証試験では、微粉炭火力で使用される中～高灰融点炭を適用した炭種変化試験を実施し、石炭性状に合わせて運転条件

を調整することにより、課題であったスラグ排出性を良好に保つ運転調整技術を確認した。これにより、IGCCは、既存の微粉炭火力と共用した運用も可能であることが検証され、発電プラントの増設やリプレイスにおける有望な選択肢になったと考えられる。

ただし、実証試験での炭種変化試験では、長期間の炭種変化運用が難しく、また、一部の炭種では構成機器の容量や性能の制約により部分負荷での運転となった。そのため、実証試験後の商用運転においても、定格出力での炭種変化を慎重に実施している段階である。次期商用機では、適用炭種の特長（発熱量、反応性、灰融点、水分、硫黄、塩素など）に対応できる最適な設備構成・容量とすることが重要である。また、炭種変化の際の運転監視・制御技術を高めると共に、新たな石炭の特性に対する事前予測を行い、混炭運用や融点降下剤（フラックス）などによる適用技術を確認することで、IGCCに適合する炭種の更なる拡大が可能となる。

3-5-4 まとめ

今後のエネルギー供給では、3E+S（安定供給:Energy security、経済効率性の向上:Economic Efficiency、環境への適合:Environment、さらに、安全性:Safety）を念頭にした技術を高めていくことが強く求められている。IGCCは、発電効率と環境適合性で優れており、石炭の持つ経済性やエネルギーセキュリティ面を強化することによって、3E+Sに大きく貢献する技術と期待される。IGCC実証機プロジェクトでは、商用発電プラントとしての潜在能力が実証されたことで、新たな石炭火力発電の選択肢を確認することができた。今後も実証機を商用化した常磐共同火力10号機を運転継続することは、運転技術の更なる向上に繋がるとともに、設備設計やメンテナンス技術に重要な知見と経験が得られることとなる。今後、IGCCが国内外に普及し、幅広い炭種に対して高い発電効率を達成してゆくことで、安定供給、経済性、環境保全の面で信頼性の高い技術として活用されることを強く期待する。

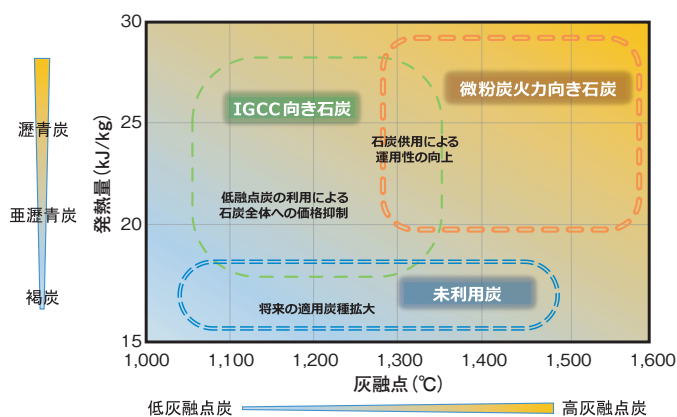


図 3-5-1 IGCC 適合炭種拡大の方向性