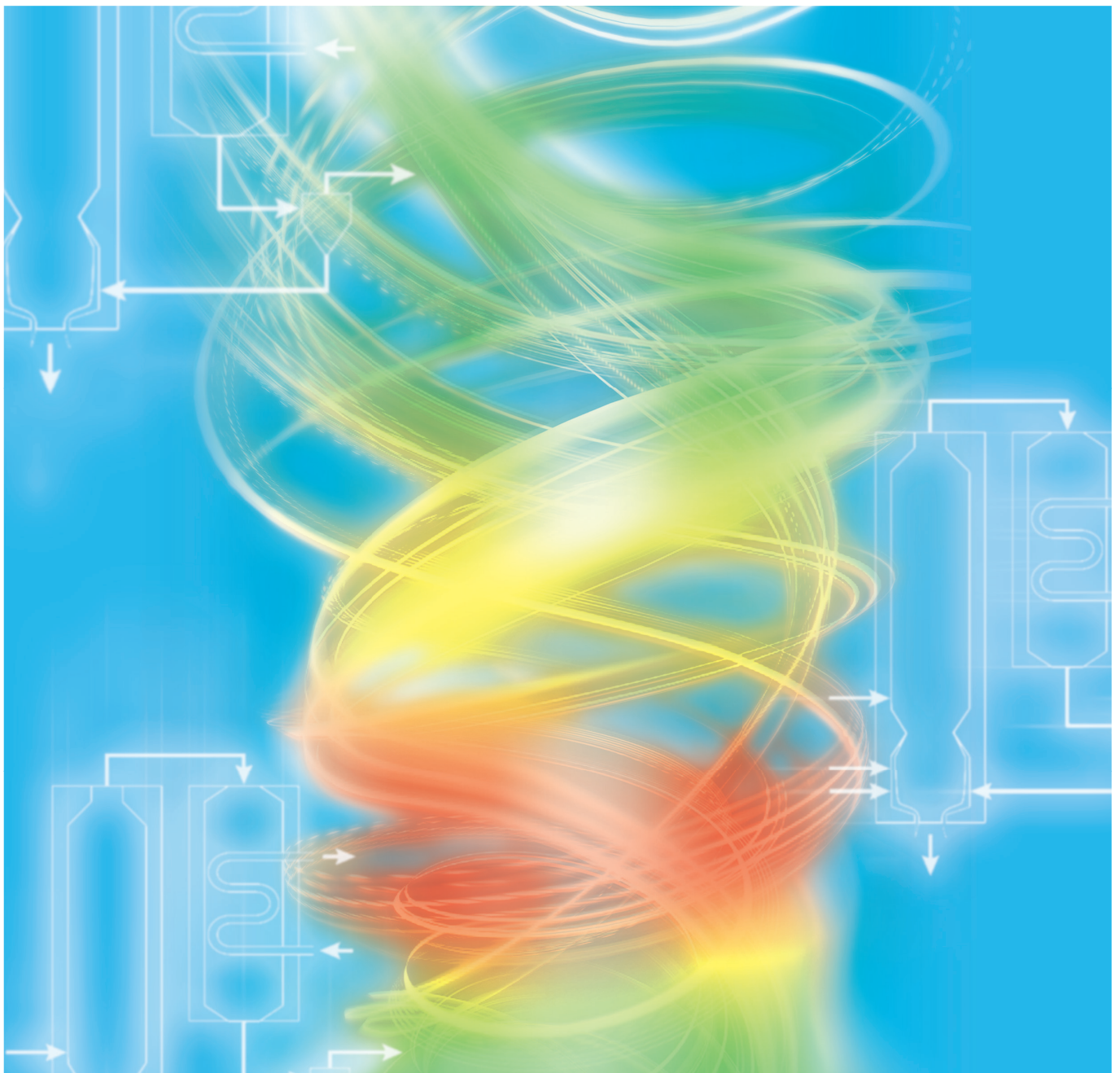


# 電中研レビュー

DENCHUKEN REVIEW

## 石炭ガス化複合発電技術

空気吹きIGCC実証試験の成果





石炭ガス化複合発電技術—空気吹きIGCC実証試験の成果—

はじめに 東京大学 生産技術研究所 金子 祥三… 2	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
石炭ガス化複合発電研究のあゆみ…………… 3	3-1-4 運転試験の実績とガス化炉の評価 …… 43
<b>第1章 石炭ガス化複合発電技術開発の経緯 … 7</b>	3-2 ガス精製設備 …………… 46
1-1 石炭ガス化複合発電技術の位置づけ …… 8	3-2-1 ガス精製設備の役割 …………… 46
1-2 石炭ガス化複合発電の一般的な特徴と構成 …………… 10	3-2-2 実証機のガス精製設備構成 …………… 46
1-2-1 IGCCの特徴 …………… 10	3-2-3 ガス精製設備運転特性の評価 …… 48
1-2-2 石炭ガス化設備 …………… 10	3-3 複合発電設備 …………… 49
1-2-3 ガス精製設備 …………… 13	3-3-1 低カロリーガスへの対応 …… 50
1-2-4 複合発電設備 …………… 14	3-3-2 石炭性状の変動への対応 …… 50
1-2-5 インテグレーション技術 …… 14	3-3-3 ホッパ供給方式への対応 …… 52
1-3 海外における開発 …………… 15	3-4 設備間の関係 …………… 53
1-4 我が国における開発 …………… 17	3-4-1 ガス化炉・SGCとHRSG間での蒸気の関係 …………… 53
◎コラム1：IGCCにおけるCCSへの対応 …… 20	3-4-2 石炭乾燥のための排熱の関係利用 …… 54
◎コラム2：効率向上とコスト低減に寄与する 乾式ガス精製技術 …………… 21	3-5 IGCC商用機に向けて …… 55
◎コラム3：IGCC用ガスタービンの開発動向 …… 22	3-5-1 熱効率の向上 …………… 55
<b>第2章 実証機プロジェクトの概要とその後の運用 …………… 25</b>	3-5-2 設備利用率の向上 …………… 57
2-1 250MW実証機の特徴 …………… 26	3-5-3 炭種適合性の拡大 …………… 58
2-1-1 実施体制 …………… 26	3-5-4 まとめ …………… 58
2-1-2 開発スケジュール …………… 26	<b>参考文献・資料等 …………… 60</b>
2-1-3 実証機のシステム構成と仕様 …… 27	<b>執筆分担 …………… 62</b>
2-2 実証試験の成果 …………… 29	
2-3 プロジェクト終了後の実証機の運用 …… 30	
◎コラム4：東日本大震災の経験と復旧、 そして供給力としての活躍 …… 32	
◎コラム5：実証試験におけるスラグ有効利用 …… 35	
<b>第3章 実証試験結果の評価 …………… 37</b>	
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	

# はじめに

東京大学 生産技術研究所 金子 祥三



化石燃料の96%を輸入に頼る日本にとって石炭は大事な化石燃料である。石炭は化石燃料の中でもっとも資源量が豊富であり、世界中に広く分布し、価格が安価でありかつ安定している。一方、石炭は化石燃料の中で炭素含有比率が高く、従ってカロリーあたりのCO<sub>2</sub>発生量が多い。

現在、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は年々増加し、地球温暖化はますます深刻な問題となっている。だからといって世界中で石炭の使用を制限するのは正しい方法とはいえない。なぜなら安価な電力料金はすべての国にとって不可欠のものであり、特に発展途上国にとっては安定した社会と国民生活の基盤となるものである。これらの諸国に、クリーンで高効率の石炭利用技術を提供し、きれいな大気と少ないCO<sub>2</sub>排出量を保ちながら安い電力料金を実現することは先進国の義務ともいえるものだからである。

日本で世界最高の高効率でクリーンな利用技術を確認し、これらを必要としている諸国に提供することは、国際的な友好を図りつつ地球温暖化防止を実現する崇高な貢献といえるであろう。

1980年代に電力中央研究所は国産技術による石炭ガス化の研究開発に着手した。その目的は燃料のほとんどを海外に頼る日本の国情を考慮し、“世界最高の送電端効率を有する日本独自の発電用石炭ガス化技術”を開発するという壮大なものであった。この構想は電気事業を所管する通商産業省(当時)の全面的な賛同を得て、“空気吹き石炭ガス化複合発電(IGCC)の技術開発”として国家プロジェクトとして推進されることになった。

当時の石炭ガス化技術といえば、アンモニアやメタノールなどの化学原料や合成天然ガス(SNG)などの製造を目的とする酸素吹きガス化

炉がほとんどであった。特に高温を必要とする噴流床ガス化においては空気吹きなど不可能と考えられていた。このように世界に先例のないもので空気吹き噴流床ガス化は着実なステップを踏んで段階的に進められることとなった。すなわち1日あたりのガス化容量(石炭使用量)が2トンの炉からスタートし、200トン/日のパイロットプラントを経て、1,700トン/日(25万kW相当)の実証機として開発が進められることになった。しかしながら2トン/日から200トン/日という100倍のスケールアップにおいては、多くの予見できなかったトラブルが発生し、約3年の工程遅延と多額の追加予算を必要とする事態となった。しかし関係者の不屈の闘志と想像を絶する努力によって、課題はすべて解決され、その成果は実証機の順調な完成と運転によって報いられることとなった。これらの成果をもとに2020年には54万kWの商用規模の大容量機が実現する運びとなり、日本の“空気吹き石炭ガス化複合発電(IGCC)技術”は、ここに世界最高の効率を実現可能な“石炭火力の救世主”となるレベルに達したといえるであろう。

しかしIGCCの技術はさらに発展する余地が大きい。全体のシステムの最適化はもとより、乾式ガス精製技術の実現など電力中央研究所に期待するところ大である。

これから世界的にも日本国内においても電力の自由化がどんどん進んでいくと予想される。電力自由化にはいろいろなメリットが期待されているが、一方、懸念もある。それは“安い電力料金がすべてを制する”ことにより、電力事業者もメーカーも新技術を実現する余地がなくなってしまうことである(一般に新技術は開発された当初は、既存の成熟した量産機にコスト競争力が劣ることが多い)。今後は国のロードマップの中にしっかりと技術の進むべき方向と時期を示し、この実現を可能とする政策を国がしっかりと立て、民間とともにその実現に邁進することが重要と考えられる。

# 「石炭ガス化複合発電研究」のあゆみ

西暦 (元号)	当研究所の研究	国内外の状況
1973 (S48)		・STEAG社 (西独) がケラーマン発電所で170MW級IGCC実証プラントを運転
1974 (S49)		・サンシャイン計画による流動床石炭ガス化炉 (5トン/日、(財)石炭技術研究所)の研究開始
1979 (S54)		・中央電力協議会に「ガス化技術検討会」設置 (1980年に「石炭ガス化専門部会」と改称)
1981 (S56)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・調査報告書「石炭ガス化複合発電に関する当面の研究課題について (280062)」を作成</li> <li>・空気吹き加圧二段噴流床石炭ガス化炉開発の共同研究により基本プロセスを開発 (三菱重工業 (株)、1981～1989年度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源エネルギー庁が「火力新技術研究会」を設置し、21世紀に向けた火力新技術の開発方針を検討</li> <li>・40トン/日流動床ガス化パイロットプラント運転試験開始</li> </ul>
1982 (S57)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中央電力協議会からの依頼研究として、石炭ガス化複合発電に関するフィージビリティ・スタディを実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源エネルギー庁が「火力新技術調査委員会」を設置、石炭ガス化複合発電の開発方針を取りまとめ</li> <li>・米国クールウォータープログラムに電力中央研究所、東京電力 (株)、メーカ2社が共同参加</li> </ul>
1983 (S58)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2トン/日石炭ガス化基礎実験装置 (2トン/日炉)を設置し、試験研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源エネルギー庁、噴流床石炭ガス化複合発電のフィージビリティ・スタディを実施 (1983～1985年度、NEDO (新エネルギー総合開発機構)より電力中央研究所が受託)</li> </ul>
1984 (S59)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乾式ガス精製、低カロリーガス燃焼器の基礎研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クールウォータープログラム (1,000トン/日テキサコ炉)実証運転開始</li> </ul>
1985 (S60)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乾式ガス精製の共同研究を実施 (三菱重工業 (株)、1985～1989年度)</li> <li>・乾式集じん・脱硫基礎実験装置 (2トン/日規模)を設置し、試験研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NEDO「パイロットプラントの基本計画」を取りまとめ</li> <li>・総合エネルギー調査会石油代替エネルギー部会石炭ガス化委員会および産業技術審議会新エネルギー技術開発部会石炭ガス化特別委員会にて、パイロットプラント実施計画が承認される</li> </ul>
1986 (S61)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パイロットプラントの要素研究をNEDOより受託し、パイロットプラント設計に反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化複合発電技術研究組合が設立 (200トン/日パイロットプラントの設計開始)</li> <li>・火力原子力発電技術協会に噴流床石炭ガス化安全設計委員会を設置</li> </ul>
1987 (S62)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備を設置し、ガスタービン燃焼技術の研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サンシャイン計画による流動床石炭ガス化炉の開発終了 (1987年度)</li> </ul>
1989 (H1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの受託研究として、パイロットプラントにおけるメーカ3社の実圧実寸ガスタービン燃焼器事前評価試験を実施し、燃焼器設計やパイロットプラント運転試験に反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クールウォータープログラム実証運転終了</li> </ul>
1990 (H2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化複合発電用1300℃級低NO<sub>x</sub>燃焼器を開発</li> </ul>	
1991 (H3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2トン/日炉によるパイロットプラント実供試験事前評価試験を実施し、パイロットプラント運転試験に反映 (NEDOからの受託研究、1991、1992、1995年度)</li> <li>・亜鉛フェライトを用いた高性能乾式脱硫技術の開発を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・200トン/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントの運転試験開始</li> </ul>
1992 (H4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス化スラグ有効利用技術の開発を実施 (1992～1995年度、太平洋セメント (株)との共同研究)</li> </ul>	

西暦(元号)	当研究所の研究	国内外の状況
1993 (H5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2トン/日炉によるスラッシング現象再現試験を実施し、トラブル解決のためのパイロットプラント改造に反映(NEDOからの受託研究)</li> </ul>	
1994 (H6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス化炉数値解析技術の開発を開始</li> <li>・超高温・加圧型燃料反応実験装置(PDTF)を設置し、ガス化反応性解明研究を本格化</li> <li>・重質油ガス化研究を実施(1994～1998年度、中部電力(株)、三菱重工業(株)と共同研究、1999～2002年度)</li> <li>・石炭ガス中硫黄化合物を1ppm以下まで除去できる亜鉛フェライト系脱硫剤試作に成功</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ブナム284MW実証プラント運転開始(オランダ)</li> </ul>
1995 (H7)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化複合発電用1500℃級低NO<sub>x</sub>燃焼器を開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・200トン/日パイロットプラントで789時間の連続運転を達成</li> <li>・ワバッシュリバー296MW実証プラント運転開始(米国)</li> </ul>
1996 (H8)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭・石炭灰の物性解明と炉内粒子挙動モデリング技術の開発を実施(1996～1999年度、出光興産(株)石炭研究所との共同研究)</li> <li>・乾式脱ハロゲン技術の開発を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タンパ315MW実証プラント運転開始(米国)</li> </ul>
1997 (H9)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・200トン/日パイロットプラント計画終了</li> <li>・実証プラントフィージビリティ・スタディを実施(1997～1998年度、NEDOが東京電力(株)に委託、9電力、電源開発(株)、電力中央研究所による電力共同研究)</li> </ul>
1998 (H10)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス中ハロゲン化合物を1ppm以下まで除去できる粉末状吸収材試作に成功</li> <li>・豪州の国立研究機関CSIROおよび研究組合CRCと研究協力協定を調印(1998～2010年、2013年～)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プエルトヤノ335MW実証プラント運転開始(スペイン)</li> </ul>
1999 (H11)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎実験装置や数値解析ツール等を用いた実証機支援研究を実施し、実証機ガス化炉基本設計、運転試験に反映(1999～2012年度、中電協依頼研究)</li> <li>・ガス化スラグ有効利用技術の開発を実施(1999～2004年度、太平洋セメント(株)と研究会設置)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・250MW IGCC実証機計画が開始(9電力、電源開発(株)、電力中央研究所による電力共同研究)</li> </ul>
2001 (H13)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証機計画の実施主体として(株)クリーンコールパワー研究所が設立(実証機の設計開始)</li> </ul>
2002 (H14)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス中硫黄化合物を1ppm以下まで除去できるハニカム状亜鉛フェライト系脱硫剤を開発</li> <li>・ガス化スラグ高付加価値化技術の開発を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・150トン/日EAGLEパイロットプラント運転開始(NEDO、電源開発(株)による多目的石炭ガス製造技術開発)</li> </ul>
2003 (H15)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス中ハロゲン化合物を1ppm以下まで除去できる吸収材の成形化技術を開発</li> </ul>	
2004 (H16)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証機運転支援、IGCC炭種適合性評価手法確立のため、3トン/日炉石炭ガス化研究炉を設置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証機の建設工事着工</li> </ul>
2005 (H17)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス化スラグの加熱発泡性に着目した軽量化技術を開発し、軽量細骨材への適用性を評価</li> </ul>	

西暦(元号)	当研究所の研究	国内外の状況
2007 (H19)	<ul style="list-style-type: none"> <li>石炭ガス化研究炉による実証機実供試炭評価試験を実施し、実証機運転試験に反映(2007、2009年度)</li> <li>CO<sub>2</sub>回収型高効率IGCCシステムを提案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機運転試験開始</li> </ul>
2008 (H20)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガス化スラグから超軽量発泡体を製造し、屋上緑化資材への適用性を評価</li> <li>NEDOからの受託研究としてCO<sub>2</sub>回収型高効率IGCCシステムの基盤技術を開発(2008～2014年度、九州大学と共同実施)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機長時間連続運転試験(2,000時間)を実施</li> </ul>
2010 (H22)		<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機長期耐久運転試験(5,000時間)を実施</li> </ul>
2011 (H23)	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾式ガス精製システム適用IGCCの効率と経済性を評価(2011～2012年度、中電協要請研究)</li> <li>褐炭ガス化の基礎研究を実施(2011～2013年度、豪州カーティン工科大学との共同研究)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>東日本大震災により実証機運転停止、復旧作業を経て7月に運転再開</li> </ul>
2012 (H24)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガス化スラグの直接・大量利用用途を探索(2012～2013年度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GreenGen 250MW 実証プラント運転開始(中国)</li> </ul>
2013 (H25)	<ul style="list-style-type: none"> <li>石炭ガス化研究炉、PDTF等の基礎実験装置、ガス化炉数値解析技術を活用したIGCC炭種適合性評価手法を確立</li> <li>ガス化スラグの直接・大量利用用途として、海底深掘り跡埋め戻し資材が有望であることを見出し、ガス化スラグの適合性を評価</li> <li>NEDOからの受託研究として次世代高効率石炭ガス化技術の調査研究を実施(2013～2014年度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証機計画終了</li> <li>実証機は常磐共同火力(株)勿来発電所10号機として商用運転に移行、連続運転時間を更新(3,917時間)</li> <li>大崎クールジェン(株)が酸素吹IGCC実証試験発電所着工</li> <li>プフナムIGCCプラント運転終了(オランダ)</li> <li>エドワーズポート618MW 商用プラント運転開始(米国)</li> <li>東京電力(株)が福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画を発表</li> </ul>
2014 (H26)		<ul style="list-style-type: none"> <li>EAGLEパイロットプラントプロジェクト終了</li> <li>福島復興大型石炭ガス化複合発電設備の設計開始</li> </ul>
2015 (H27)	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEDOからの受託研究としてCO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC技術開発を開始(三菱重工業(株)、三菱日立パワーシステムズ(株)と共同実施)</li> <li>NEDOからの受託研究として次世代ガス化システムの基盤技術開発を開始</li> </ul>	





# 第1章

# 石炭ガス化複合発電技術 開発の経緯

1-1	石炭ガス化複合発電技術の位置づけ	8
1-2	石炭ガス化複合発電の一般的な特徴と構成	10
1-2-1	IGCCの特徴	10
1-2-2	石炭ガス化設備	10
1-2-3	ガス精製設備	13
1-2-4	複合発電設備	14
1-2-5	インテグレーション技術	14
1-3	海外における開発	15
1-4	我が国における開発	17
コラム1	IGCCにおけるCCSへの対応	20
コラム2	効率向上とコスト低減に寄与する乾式ガス精製技術	21
コラム3	IGCC用ガスタービンの開発動向	22



## 1-1 石炭ガス化複合発電技術の位置づけ

エネルギー資源に乏しい我が国では、エネルギーセキュリティ確保の観点から電源のベストミックスが進められている。BP統計(2015年版)<sup>(1)</sup>によれば、石炭は、可採年数(確認可採埋蔵量)が110年(8,915億トン)であり、石油の52.5年(1兆7,010億バレル)、天然ガスの54.1年(187.1兆m<sup>3</sup>)に比べ大きく、また、北米、欧州、アジア・オセアニアなどに幅広く分布している。このように、化石燃料の中で、埋蔵量が豊富で地域的偏在性が低いことなどから、石炭は将来にわたって重要なエネルギー源と位置づけられる。

一方、石炭は石油や天然ガスに比べて単位発電熱量あたりの炭素含有量が多く、燃焼時の二酸化炭素排出量が多いことなどから、環境負荷の低減が課題となっている。このため、石炭をクリーンに利用する技術の開発が進められており、特に高効率化に関するさまざまな取組みが行われている。

2008年に公表された「Cool Earth -エネルギー革新技術計画」<sup>(2)</sup>においては、石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)を含めた高効率石炭火力発電は、重点的に取り組むべきエネルギー革新技術の

一つとして位置づけられており、着実な実用化に向けた技術開発ロードマップが示された。その後、東日本大震災および東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、2014年4月には、エネルギーを巡る国内外の大きな環境変化を踏まえた第四次エネルギー基本計画<sup>(3)</sup>が閣議決定された。その中で、「エネルギー政策の要諦は、安全性(Safety)を前提とした上で、エネルギーの安定供給(Energy Security)を第一とし、経済効率性の向上(Economic Efficiency)による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合(Environment)を図るため、最大限の取組を行うことである」と、3E+Sの基本的視点が確認されている。

第四次エネルギー基本計画に基づき、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会長期エネルギー需給見通し小委員会において、現実的かつバランスの取れたエネルギー需給構造の将来像が検討された。小委員会における取りまとめを踏まえ、経済産業省は、2015年7月に「長期エネルギー需給見通し」<sup>(4)</sup>を決定した。ここでは2030年度の電源構成が示され、石炭火力については、発電電力量に占める割合を26%とし、「環境負荷の低減と両立しながら、その有効活用を推進する」とされた。

これを受けて設置された「次世代火力発電の早期実現

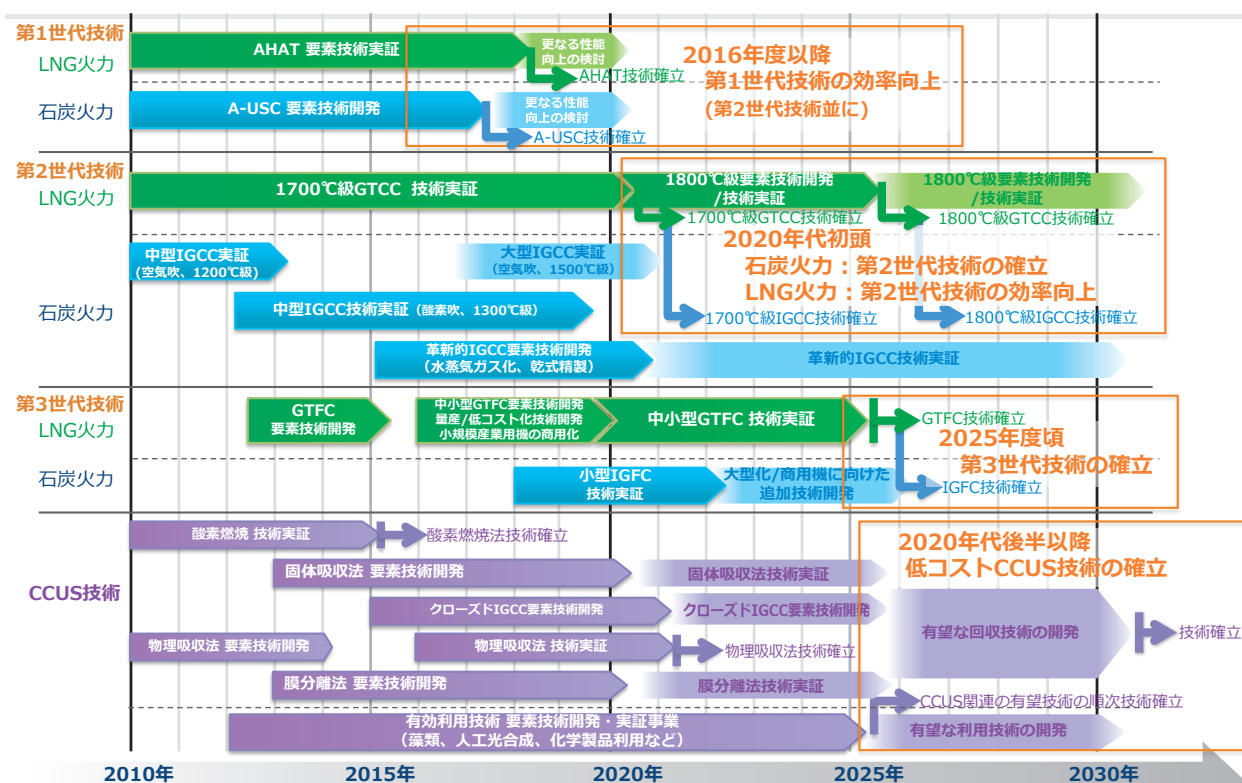


図 1-1-1 次世代火力発電技術のロードマップ (次世代火力発電の早期実現に向けた協議会)<sup>(5)</sup>

に向けた協議会」により、官民一体となって開発を加速するための技術ロードマップ(中間とりまとめ)<sup>(5)</sup>が2015年7月に策定された(図1-1-1<sup>(5)</sup>、図1-1-2<sup>(6)</sup>)。ここで、IGCCは2020年代初頭に技術を確立し、実用化に目処をつけるとされ、石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC: Integrated coal Gasification Fuel Cell combined cycle)についても、2025年度頃に技術を確立、実用化に目処をつけるとされた。CO<sub>2</sub>の回収、貯留(CCS)・有効利用(CCUS)技術については、2030年度以降を見据えて各種の技術開発を進め、2020年代後半以降に経済的に有望な技術を確立するとされた。

我が国のIGCC技術は、現在、250MW実証機プロジェクトが終了し、商用機設計に必要な知見が得られた段階にある。経済産業省と環境省が2013年に示した事業者が利用可能な最良の技術(BAT: Best Available Technology)の中には、実証機と同等規模の20万kW級空気吹きIGCCが含まれている。さらに、東京電力株式会社は、福島復興を加速させるための取り組みとして発表した「福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画」において、2基の500MW級IGCCを2020年代初頭に運転開始するとしている。上述のロードマップ<sup>(5)</sup>では、今後、送電端効率46～48%(HHV: 高位発熱量、以下HHV)の大型機の技術を

順次確立した上で、ガスタービンの超高温化の成果を活用し、更なる高効率化(同48～50%)を図るとしている。

IGCCは、図1-1-3のように、幅広い炭種に対して高効率運転を高い設備利用率で実現し、安定供給、経済性、環境保全の面から我が国のエネルギー供給に貢献するポ

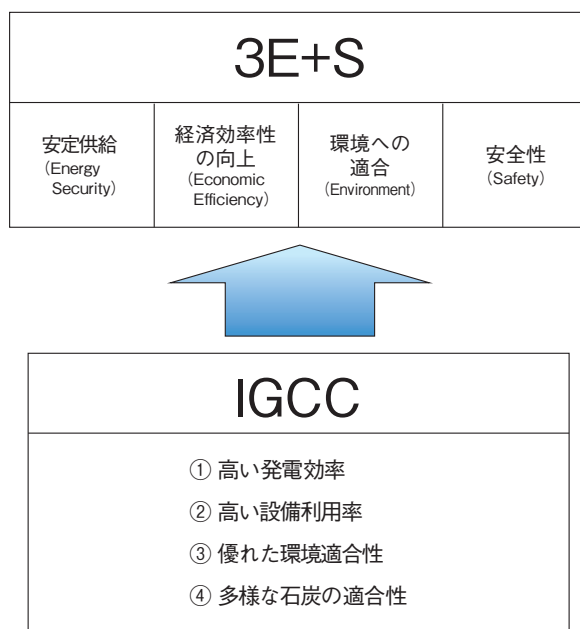


図1-1-3 3E+Sに向けたIGCCのポテンシャル



図1-1-2 次世代火力発電技術の見通し(次世代火力発電の早期実現に向けた協議会)<sup>(6)</sup>

ンシャルを持っている。エネルギー政策の基本的視点である3E+Sを支え、2030年を見据えた“多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造”を構築する上で鍵となる技術の一つとして、IGCCが2020年代に普及してゆくことが期待される。

## 1-2 石炭ガス化複合発電の一般的な特徴と構成

IGCCは、固体燃料である石炭を空気や酸素等をガス化剤として石炭ガスに転換する石炭ガス化設備、石炭ガスに含まれる不純物を除去するガス精製設備、精製後の石炭ガスをガスタービン燃料として発電を行う複合発電設備から構成される(図1-2-1)。様々なタイプのガス化炉を用いたIGCCが開発されており、一般的な特徴や、構成設備について、以下にその概要を述べる。

### 1-2-1 IGCCの特徴

#### (1) 高い発電効率

IGCCの最も大きな特徴は、その高効率性にある。我が国の最新鋭微粉炭火力は、世界的にも最高水準の発電効率であり、送電端で40～41%(HHV)に達している。我が国で開発されているIGCCでは、さらに高い効率が期待され、1,500℃級ガスタービンを用いたときの送電端効率は46～48%(HHV)に達する見通しである。

#### (2) 優れた環境適合性

##### <CO<sub>2</sub>排出削減効果>

前述の高効率化により、発電電力量当りのCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、

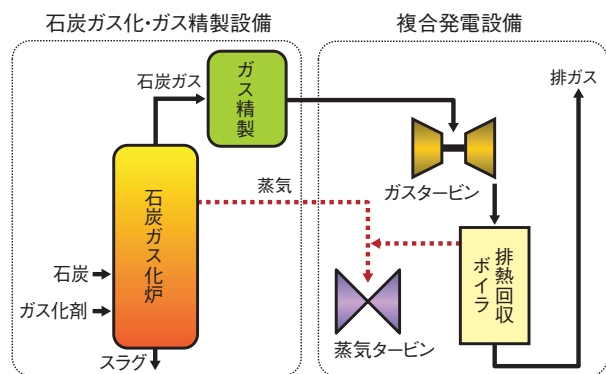


図1-2-1 石炭ガス化複合発電の基本システム構成

NO<sub>x</sub>、ばいじんの排出量を低減することが可能であり、特に、CO<sub>2</sub>排出削減効果については、微粉炭火力と比べると、効率向上により直接排出量が減少し、上述の場合、CO<sub>2</sub>排出量を約20%低減可能である。また、CCSに対応する場合でも、ガスタービンでの燃焼前にCO<sub>2</sub>を回収するIGCCは、排ガスからの回収となる微粉炭火力よりも回収プロセスでの処理ガス量が少なくなる。(コラム1に関連記事)

##### <容易な石炭灰処理>

発電用として用いられることの多い噴流床ガス化炉の場合には、石炭中に含まれる灰は炉内で一旦熔融状態(熔融スラグ)となり、それが水で急冷された後、ガラス状の固化スラグとして排出される。この固化スラグからは、有害成分の溶出も無く、骨材等への有効利用が可能である。

#### (3) 多様な石炭の適合性

噴流床ガス化炉では、石炭中の灰を熔融スラグの状態にして排出するため、灰付着トラブル等の観点から微粉炭火力で使い難い、灰融点の低い石炭の利用が可能である。

### 1-2-2 石炭ガス化設備

固体燃料である石炭は、揮発分、固定炭素、灰分で構成されている。高温のガス化炉内に石炭が投入されると、熱分解反応により揮発分が気相に放出され、固定炭素と灰分を主成分とするチャー粒子となる。揮発分中の可燃成分やチャーに含まれている固定炭素は、ガス化剤中のO<sub>2</sub>により酸化され(C+O<sub>2</sub>→CO<sub>2</sub>、2C+O<sub>2</sub>→2CO)、さらに、気相中に存在するCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Oによりガス化されていく(C+CO<sub>2</sub>→2CO、C+H<sub>2</sub>O→CO+H<sub>2</sub>)。また、水性ガスシフト反応(CO+H<sub>2</sub>O⇌CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>)などの気相反応も進み、生成ガス組成が定まる。すなわち、石炭ガス化とは、石炭中の固定炭素をガス化し、所定の品位の石炭ガスを製造するもので

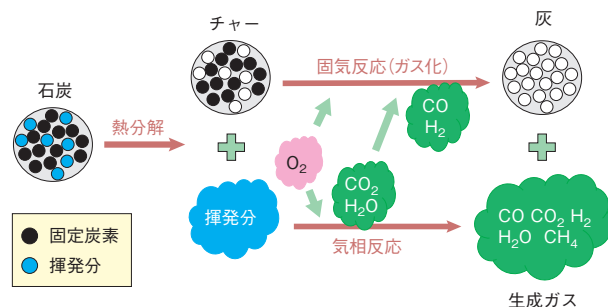


図1-2-2 石炭ガス化のイメージ

ある。これら一連の石炭ガス化のイメージを図1-2-2に示す。

石炭ガス化炉にはさまざまな形式があり、(1) 炉内での石炭粒子の挙動、(2) ガス化剤、(3) 石炭供給方式、などにより分類される<sup>(7)</sup>。

(1) 炉内での石炭粒子の挙動による分類

ガス化炉は表1-2-1<sup>(8)</sup>に示すよう、固定床方式、流動床方式、噴流床方式の3方式に大別される。

固定床方式および流動床方式は、都市ガス製造用や化学原料製造用として古くから開発が進められ、現在でも商用プラントで用いられている。

噴流床方式は、大容量化が容易で、負荷追従性も比較的良いため、国内外で開発されているIGCCの大部分は、加圧型噴流床方式石炭ガス化炉を採用している。噴流床方式では、ガス流れ(上昇流と下降流)や炉型(二室二段、一室二段、一室一段)、炉壁構造(水冷壁、耐火レンガ)によってさまざまな方式がある。表1-2-2には、国内外で開発が進められている主要な発電用の噴流床ガス化炉の概要をまとめる。

(2) ガス化剤による分類

ガス化剤に対しては、酸素を用いる酸素吹きと、空気を用いる空気吹きとに分類される。

酸素吹きの場合、空気中の窒素を分離し高濃度の酸素としてガス化炉に供給することにより、発熱量10～

11MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>程度の中カロリーガスが得られる。空気吹きに比べ石炭ガス流量が少ないためガス化炉はコンパクトとなるが、高濃度酸素を製造するために大規模な空気分離装置が必要となり、その所要動力が大きくなる。ここで副生される窒素は、ガスタービン燃焼器に投入され、NO<sub>x</sub>発生を抑制するとともにガスタービンで動力回収が図られている。微粉炭の搬送にも用いられる。

空気吹きでは、空気をガス化剤として用いるため、石炭ガスは発熱量4～5MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>程度の低カロリーガスとなる。空気吹きにおいても、プラントで必要な不活性ガスとして窒素を製造するために小規模の空気分離装置が設置される。ここで副生される高濃度の酸素をガス化剤として利用することから、酸素富化空気吹きともいわれる。

(3) 石炭供給方式による分類

ガス化炉への石炭供給方式としては、微粉炭を水と混合・スラリー化してポンプにより供給するスラリーフィード方式と、微粉炭をガスで搬送・供給するドライフィード方式とがある。

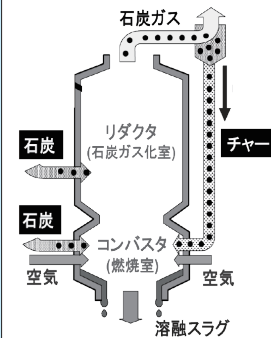
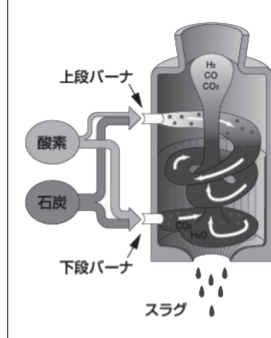
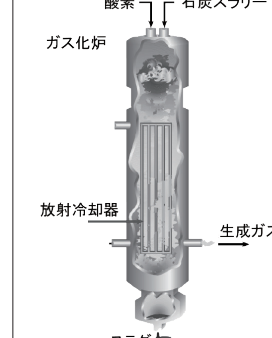
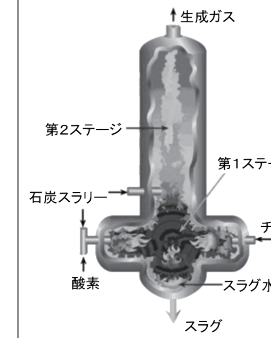
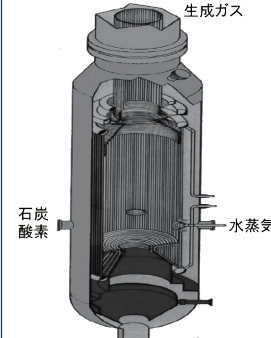
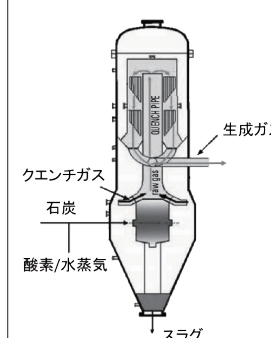
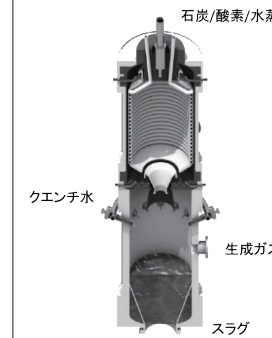
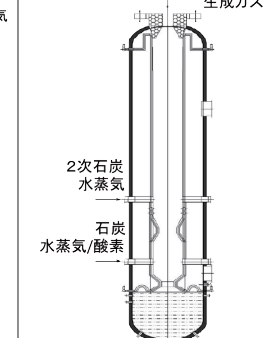
スラリーフィード方式は、ガス化炉への加圧供給が容易である。しかし、ガス化時に部分燃焼で発生した熱がスラリー水の蒸発熱として奪われる。また、湿式ガス精製と組み合わせた場合には、冷却過程での水蒸気損失が大きい。

一方、ドライフィード方式の場合、加圧下への供給のためのホップシステムが必要になるなど設備構成が複雑であるが、熱効率の上で有利である。

表 1-2-1 ガス化炉の方式<sup>(8)</sup>

項目	固定床(移動床)	流動床	噴流床
概念図			
ガス化剤	酸素・水蒸気または空気	空気(酸素・水蒸気)	酸素・水蒸気または空気
ガス化温度	400～900(～1800)℃	700～1100℃	1600～1800℃
生成ガス	2500～4000kcal/Nm <sup>3</sup>	1000～1200kcal/Nm <sup>3</sup>	酸素吹き: 2500kcal/Nm <sup>3</sup> 空気吹き: 1100kcal/Nm <sup>3</sup>
石炭粒径	5～30mm	1～5mm	0.1mm 以下
灰の排出形態	灰またはスラグ	灰	スラグ

表 1-2-2 国内外で開発中の主要な発電用噴流床ガス化炉

	CCP(MHPS) <sup>(9)</sup>	EAGLE(MHPS) <sup>(10),(11)</sup>	GE Energy <sup>(12),(13)</sup>	E-Gas™(CB&I) <sup>(14),(15)</sup>
ガス化剤	酸素富化空気	酸素	酸素	酸素
石炭供給	乾式	乾式	スラリー	スラリー
形式	2室2段	1室2段	1室1段	2室2段
ガス流れ	上昇流	上昇流	下降流	上昇流
炉壁	水冷壁	水冷壁	耐火材壁	耐火材壁
炉形状				
IGCCプロジェクト	<ul style="list-style-type: none"> <li>勿来発電所10号機(日本)</li> <li>・ガス化炉容量:1700t/d</li> <li>・発電端出力:250 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):40.5%</li> <li>・運転開始:2008年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大崎クールジェンプロジェクト(日本)</li> <li>・ガス化炉容量:1180t/d</li> <li>・発電端出力:166 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):40.5%</li> <li>・運転開始:2016年(予定)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tampa Electric IGCC(米国)</li> <li>・ガス化炉容量:2200t/d</li> <li>・送電端出力:250 MW</li> <li>・送電端効率(実績, HHV):37.5%</li> <li>・運転開始:1996年</li> <li>Edwardsport IGCC(米国)</li> <li>・ガス化炉容量:Tampaと同等x2基</li> <li>・送電端出力:618 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):38.4%</li> <li>・運転開始:2013年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wabash River IGCC(米国)</li> <li>・ガス化炉容量:2550t/d(+予備機)</li> <li>・送電端出力:262 MW</li> <li>・送電端効率(実績, HHV):39.7%</li> <li>・運転開始:1995年</li> </ul>
	Shell <sup>(16)~(18)</sup>	PRENFLO®(Uhde) <sup>(17),(19)</sup>	Siemens <sup>(20)</sup>	HCERI <sup>(21),(22)</sup>
ガス化剤	酸素	酸素	酸素	酸素
石炭供給	乾式	乾式	乾式	乾式
形式	1室1段	1室1段	1室1段	2室2段
ガス流れ	上昇流	上昇流	下降流	上昇流
炉壁	水冷壁	水冷壁	水冷壁	水冷壁
炉形状				
IGCCプロジェクト	<ul style="list-style-type: none"> <li>Buggenum IGCC(オランダ)</li> <li>・ガス化炉容量:2000t/d</li> <li>・発電端出力:253 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):41.4%</li> <li>・運転開始:1994年</li> <li>Taeon IGCC(韓国)</li> <li>・ガス化炉容量:2670t/d</li> <li>・発電端出力:305 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):42%</li> <li>・運転開始:2016年(予定)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puertollano IGCC(スペイン)</li> <li>・ガス化炉容量:2600t/d</li> <li>・発電端出力:300 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):41.5%</li> <li>・運転開始:1997年</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Texas Clean Energy Project(米国)</li> <li>・ガス化炉容量:3000t/d</li> <li>・発電端出力:400 MWおよび尿素併産</li> <li>・90% CO<sub>2</sub>回収(EOR向け)</li> <li>・運転開始:2018年(2016年着工予定)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GreenGen Project phase I(中国)</li> <li>・ガス化炉容量:2000t/d</li> <li>・発電端出力:265 MW</li> <li>・送電端効率(設計, HHV):41%</li> <li>・運転開始:2012年</li> </ul>

### 1-2-3 ガス精製設備

IGCCにおけるガス精製設備は、石炭ガス中に含まれる不純物をガスタービンの許容量まで除去するためのものであり、同時に、環境影響物質が除去される。不純物としては硫黄化合物 ( $H_2S$ 、 $COS$ )、チャー等の微粒子、アンモニア ( $NH_3$ )、その他にもハロゲン化物 ( $HF$ 、 $HCl$ ) などの微量成分が存在する。

ガス精製設備としては、湿式ガス精製方式と、現在開発段階にある乾式ガス精製方式がある。

#### (1) 湿式ガス精製方式<sup>(23)</sup>

湿式ガス精製の主要な構成機器は、水スクラバ、 $COS$ 変換器、湿式脱硫である(図1-2-3)。水スクラバでは、チャー等の微粒子、 $NH_3$ 、微量成分が除去され、湿式脱硫では $H_2S$ が除去される。 $COS$ 変換器では、湿式脱硫で除去されにくい $COS$ を、 $H_2S$ に転換( $COS+H_2O \rightarrow H_2S+CO_2$ )する。

水スクラバの下流に $COS$ 変換器を設置することで、不純物による $COS$ 変換触媒の劣化を避けられる。一方、 $COS$ 変換触媒の動作温度は $200 \sim 300^\circ C$ 程度であり、水スクラバよりも上流側に $COS$ 変換器を設置することで、熱効率上有利となる。

湿式脱硫では、硫黄化合物を液に溶解させて吸収する物理吸収法、硫黄化合物と吸収液とを化学反応させて吸

収する化学吸収法がおもに使われている。代表的な物理吸収法には、メタノールを用いたRectisol法(動作温度: $-60 \sim -40^\circ C$ )、ポリエチレングリコール・ジメチルエーテルを用いたSelexol法(動作温度: $-40 \sim -5^\circ C$ )などがある。代表的な化学吸収法としては、アルコールアミン系とアルカリ塩系に大別されるが、近年のIGCCプラントではアルコールアミン系のうち、MDEA(メチルジエタノールアミン)法(動作温度: $40^\circ C$ 程度)が数多く採用されている。また、Buggenum(ブフナム)IGCCプラントでは、スルフォランを物理吸収剤とし、これに化学吸収剤としてDIPA(ジイソプロパノールアミン)を混合したSulfinol法を採用していた。

湿式ガス精製は、石炭ガス中の不純物の精密除去が可能であり、ガスタービン等後流機器の信頼性や環境保全性の面からは有利であるが、脱硫プロセスの動作温度が低く、また、各機器で動作温度が異なるため、ガス温度の昇降が必要であることが、システムの複雑化と熱損失の要因となる。

#### (2) 乾式ガス精製方式

乾式ガス精製は、フィルター等による脱じんと金属酸化物を用いた乾式脱硫により、ガス化炉熱交換器出口の $400 \sim 500^\circ C$ の高温ガスをほぼそのままの温度で精製し、冷却せずにガスタービンに送るため、熱損失が少ない。

乾式脱じんとして、後述の200トン/日規模パイロットプラントでは移動床方式の試験が行われたが、近年のIGCCプラ

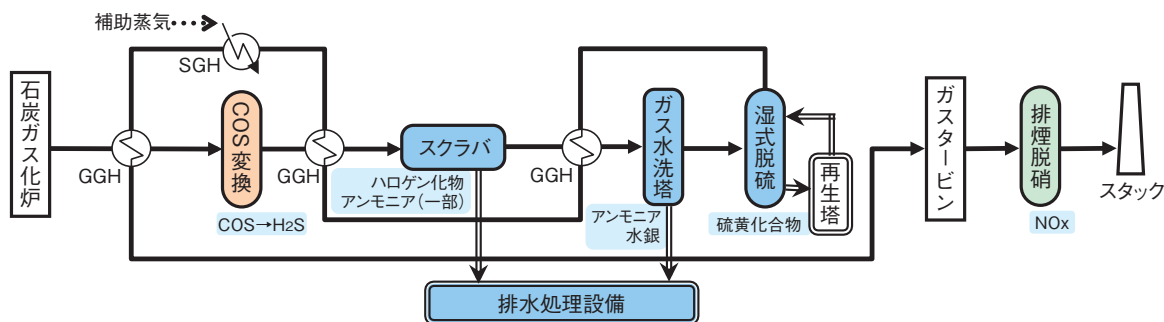


図 1-2-3 湿式ガス精製プロセスの主要な構成

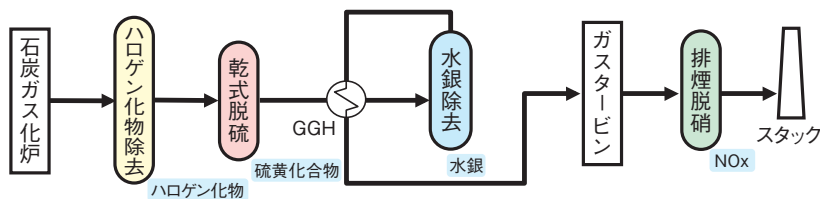


図 1-2-4 乾式ガス精製のプロセス構成例

ントではセラミックフィルタまたはメタルフィルタを用いたシステムが主流となっている。

乾式脱硫剤としては、鉄系 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) や亜鉛系 ( $\text{ZnO}$ )、亜鉛フェライト系 ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ) 等が開発されている。また、反応器の方式としては、固定床方式、流動床方式、移動床方式があり、200トン/日規模パイロットプラントにおいて、これら3方式について技術開発が行われた。

さらに、その他の不純物として、ハロゲン化物や $\text{NH}_3$ 等の除去技術についても研究開発が進められている。図1-2-4に乾式ガス精製システムの構成例を示す。

既存のIGCCプラントでは、フィルターシステムによる乾式脱じんと湿式ガス精製の組合せが主流となっているが、IGCCの大きな特徴である高効率化を最大限に発揮するためには、乾式ガス精製技術は非常に重要な技術である。ばいじん、硫黄化合物以外の不純物除去技術についても要素技術の開発は進んでおり、大型化に向けた検討が待たれる。(コラム2に関連記事)

## 1-2-4 複合発電設備

### (1) ガスタービン

石炭ガス用ガスタービンは、LNGや軽質油用に開発された高温ガスタービン技術をベースとしている。石炭ガスは発熱量が約 $4 \sim 11\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ の低～中カロリーガスで、LNGの発熱量に比べ $10 \sim 5$ 分の1と低いため、これに対応した安定燃焼技術がIGCC用ガスタービンの特徴である。起動用燃料から石炭ガスへの切り替えも行われる。ピーク用にデュアル燃料対応とする場合もある。

LNG等に比べ石炭ガスの火炎温度は低いため、サーマル $\text{NO}_x$ の発生量は少なくなるが、石炭ガス中には石炭由来の $\text{NH}_3$ が含まれるため、燃料 $\text{NO}_x$ への転換を抑制する低 $\text{NO}_x$ 燃焼技術も用いられる。

これまでにIGCC実証機に採用された実績のある機種は、General Electric (GE) 社7FA型、Siemens社V94.2、V94.3型、三菱日立パワーシステムズ株式会社(MHPS) M701DA型で、 $1,100 \sim 1,300^\circ\text{C}$ 級である。商用機としては、Edwardsport IGCCでGE社7FB型が採用されている。また、MHPS社M701F型は、低カロリーの高温ガスで実績がある。(詳細はコラム3を参照)

### (2) 排熱回収ボイラ (HRSG)、蒸気タービン

HRSGや蒸気タービンについては、既存のLNG複合発電や汽力発電での技術が適用される。LNG複合発電との違いは、IGCCではガス化設備の熱交換器でも熱回収を行い、複合発電設備側と水・蒸気系のインテグレートをすることが可能な点である。この結果、ガスタービンと蒸気タービンの出力比は、LNG複合発電ではおよそ2:1であるのに対し、IGCCでは蒸気タービンの出力割合が高くなり、空気吹きIGCCではほぼ1:1である。

また、蒸気タービンが全ての発電出力を担う微粉炭火力と比較すると、IGCCではガスタービンと蒸気タービンで分担することから、プラント出力当たりのタービン復水器所要水量が低減する。

## 1-2-5 インテグレーション技術

IGCCの大きな特徴は、主要構成機器の間で空気や水・蒸気等の物質や熱エネルギーをインテグレートすることにより高効率を達成する点である。IGCCにおける主要なインテグレーション技術として、(1) 空気系のインテグレーション(ガスタービン圧縮機から空気分離装置やガス化炉への空気供給)、(2) 水・蒸気系のインテグレーション(ガス化設備の熱交換器と排熱回収ボイラでの水・蒸気のやりとり)を以下に述べる。

### (1) 空気系のインテグレーション<sup>(7)</sup>

ガス化剤である酸素あるいは微粉炭搬送やパージなどに用いる不活性ガス(窒素)は、空気分離装置で製造される。酸素吹きガス化と空気吹きガス化とでは空気分離装置の役割が異なるため空気廻りの構成が異なる(図1-2-5)。

酸素吹きガス化の場合は、空気分離装置への原料空気の供給方法としてフルインテグレーションとパーシャルインテグレーションがある。効率面からみれば、フルインテグレーションの方が原料空気圧縮機の動力を低減できるため有利となるが、一方、プラント運用性・制御性におけるフレキシビリティが小さくなる。

副生される余剰窒素については、 $\text{NO}_x$ 発生抑制と動力回収のためガスタービン燃焼器に投入する方式も採用されている。

#### ① フルインテグレーション

すべての原料空気をガスタービン圧縮機からの抽気でまかなう。(図1-2-5 (a)において原料空気圧縮機からの供給無し)



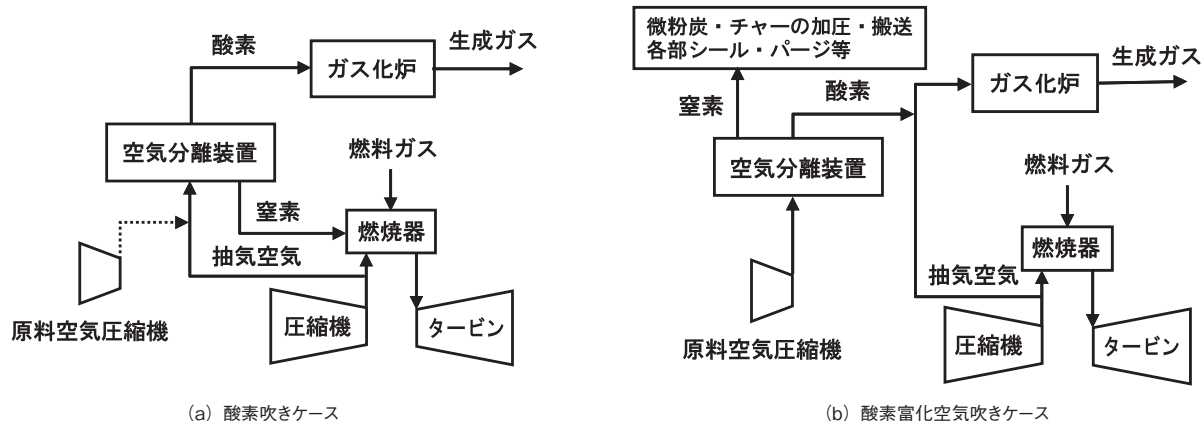


図 1-2-5 空気系のインテグレーション

② パーシャルインテグレーション

原料空気を原料空気圧縮機とガスタービン圧縮機からの抽気でまかなう。(図1-2-5 (a))

一方、空気吹きガス化の場合、ガス化炉へ投入するガス化剤となる空気は、ガスタービン圧縮機から抽気する。さらに、空気分離装置で副生する酸素をガス化剤空気に混合し、酸素富化する方式が採用されている。(図1-2-5 (b))

(2) 水・蒸気系のインテグレーション

LNG 複合発電の場合は、HRSGで発生する蒸気で蒸気タービンの出力を得ているが、IGCCの場合は、ガス化設備の熱交換器 (SGC:Syn-Gas Cooler) でも蒸気が発生可能となる。SGCで熱回収せず生成ガスを水で直接冷却するダイレクトクエンチを採用するシステムもあるが、HRSGとSGCの間で水・蒸気系をインテグレートし、SGCで回収した熱を蒸気タービンでの発電に有効に活用することで効率向上が図れる。

1-3 海外における開発

世界で最初のIGCC実証プラントはSTEAG社(西独)のKellerman発電所における170MWのプラントである。本プラントは、当時実用化されていた技術を組み合わせたものであり、ガス化炉としては、Lurgi式固定床ガス化炉を用いている。1972年頃より運転が行われたが、主としてタール発生によるトラブルのため順調な運転には至らず、終了した。この結果を踏まえ、以後、各国でIGCC用石炭ガス化炉の開発が進められ、次に紹介するクールウォータープログラムが、現在のIGCCの草分けといえる。

クールウォータープログラム(CWP)は米国・日本の共同研究開発プロジェクトとして実施され、米国側はSouthern California Edison (SCE)社、Texaco社、Electric Power Research Institute (EPRI)、GE社 および Bechtel社が参加し、日本側は東京電力株式会社、株式会社東芝、石川島播磨重工業株式会社および電力中央研究所がJCWP (Japan Cool Water Program Partnership)を結成し、本プロジェクトに参画した。本プロジェクトではTexaco式噴流床ガス化炉(現在、GE炉)を用いた120MW級IGCCプラントがSCE社のクールウォーター発電所構内に建設された。1984年から5年間の実証運転が行われ、IGCCが技術的に成立することを世界で始めて実証した<sup>(24)</sup>。

クールウォータープログラム以後、1990年代に欧米で本格的なIGCC実証・商用計画が進められた。四大プロジェクトとして、Buggenum(オランダ)、Wabash River(米国)、Tampa(米国)、Puertollano(スペイン)のIGCCが知られており、以下に紹介する。

(1) 四大プロジェクト

① Tampa(米国)<sup>(12), (25)~(27)</sup>

Tampa Electric Integrated Gasification Combined-Cycle Projectは、米国Department of Energy (DOE)のClean Coal Technology (CCT)プログラムで選定された。Tampa Electric社がフロリダ州Polk Power Station 1号系列として1994年からプラントの建設が始められ、1996年9月~2001年9月の実証期間の後に商用化された。

ガス化炉には2,200トン/日酸素吹き一段噴流床スラリーフィードガス化炉(GE炉)、ガス精製には湿式(集じんおよび

び脱塩素:湿式スクラバ、脱硫:CO<sub>2</sub>コンバータ+MDEA)、ガスタービンにはGE社7FAが採用された。発電端出力は313MW(ガスタービン:192MW、蒸気タービン:121MW)、送電端出力は250MWである。送電端効率の設計値は39.7%(HHV)であるが、ガス化炉の炭素転換率が想定よりも低いことなどから、設計値に達していない(37.5%)。また、燃料としては、石炭以外に石油コークスも用いられている。

ガスタービンについては、天然ガス用をベースとし、天然ガスに比べて発熱量の低い(燃料ガス流量の多い)石炭ガスに対応させるため、空気流量の低減、燃焼温度の低減、燃焼器・タービンの通過ガス量の増加などを含む改良を行っている。タービン通過ガス量の増加や空気流量の減少により、出力は天然ガス時(162MW)よりも増加している。空気分離装置(ASU:Air Separation Unit)との間で空気系のインテグレーションは行っていないが、燃焼器でのサーマルNO<sub>x</sub>低減とガスタービンでの動力回収のため、ASUからの窒素が燃焼器に投入されている。運転開始後、ガス化炉後流の輻射型および対流型SGC、ガス/ガス熱交換器、CO<sub>2</sub>コンバータ等に改良が加えられた。

## ② Wabash River (米国)<sup>(15),(25),(26),(28)</sup>

Wabash River Coal Gasification Repowering Project は、Tampaと同様に、米国DOEのCCTプログラムとして実施されたものである。1993年からプラントの建設が開始され、1995年10月～1999年12月の実証期間の後、2000年に商用化された。

本プラントは既設微粉炭火力をリパワリングしたものであり、2,550トン/日酸素吹き二段噴流床スラリーフィードガス化炉(E-Gas<sup>TM</sup>炉)、ガス精製設備(集じん:ポーラスフィルタ、脱塩素:湿式スクラバ、脱硫:CO<sub>2</sub>コンバータ+MDEA)、ガスタービン(GE社7FA)、HRSGおよび蒸気タービン等からなる。燃料としては、石炭および石油コークスを使用している。発電端出力は297MW(ガスタービン:192MW、蒸気タービン:105MW)、送電端出力は262MWで、送電端効率の計画値は37.8%(HHV)、実績値は石炭で39.7%(HHV)、石油コークスで40.2%(HHV)である。

運転開始後、灰付着トラブルによるガス化炉壁およびSGC部の改造、集じん装置におけるセラミックフィルタからメタルフィルタへの変更、CO<sub>2</sub>コンバータ触媒の劣化対策、MDEA吸収液からの熱安定性塩除去対策等が施された。

ガスタービンについては、基本的には前述のTampaと同形式のものを用いているが、ASUからの窒素の燃焼器への

投入は行っておらず、NO<sub>x</sub>対策としては、石炭ガスの予熱・増湿および燃焼器への蒸気噴射を採用している。

## ③ Buggenum (オランダ)<sup>(15),(25),(26)</sup>

Buggenum IGCCプラントは、電力会社4社により設立されたオランダ電力委員会(SEP)がスポンサーとなり、1990年より建設が行われ1994年1月から4年間の実証試験の後、1998年から商用運転が行われた。

酸素吹き加圧一段噴流床ドライフィードガス化炉(Shell炉)、湿式ガス精製設備(集じん:サイクロン、セラミックフィルタ、湿式スクラバ、脱硫:Sulfinol-M法)、ガスタービン(1,150℃級Siemens社V94.2)、排熱回収プラント等で構成される。発電端出力は285MW、送電端出力は253MWで、送電端効率の計画値は41.4%(HHV)となっている。

本プラントの特徴は、ASUの原料空気をすべてガスタービン圧縮機からの抽気でまかなうフルインテグレーションを採用し、高効率化を指向している点である。運転初期にはフルインテグレーションに起因する制御不良を経験している。また、ガスタービン燃焼器で燃焼振動が発生し、燃焼器・バーナの設計変更を行っている。

オランダ最大の電力会社Nuon社が商用機として運営し、CO<sub>2</sub>削減対策としてバイオマスの混合ガス化運転も行っていたが、2013年4月に運転を終了した。

## ④ Puertollano (スペイン)<sup>(25),(26),(29)</sup>

Puertollano プロジェクトは、スペインのENDESA、フランスのÉlectricité de France (EDF)、イタリアのENEL等の電力会社を中心とするELCOGASコンソーシアムが推進しているものである。1993年に建設を開始し、1998年より地元の高灰分炭/石油コークス(50%/50%)を燃料とするガス化ガスによる商用運転を行っている。

ガス化炉には酸素吹き一段噴流床ドライフィードガス化炉(Prenflo<sup>®</sup>炉)、ガス精製には湿式ガス精製(集じん:サイクロン、セラミックフィルタ、湿式スクラバ、脱硫:MDEA法)、ガスタービンには1,250℃級Siemens社V94.3を採用している。発電端出力は335MW、送電端出力は300MWで、送電端効率の計画値は41.5%(HHV)である。

運転開始当初から、ガスタービン燃焼器での燃焼振動やタイル損傷、ガス化炉熱交換器部での灰付着、ガス化炉メンブレンチューブや生成ガス配管の腐食、セラミックフィルタ、CO<sub>2</sub>変換触媒の劣化等のトラブルが報告されていたが、種々対策を施し、運転信頼性向上を図ってきている。

## (2) 最近のIGCC開発動向

四大プロジェクトに前後して、石油精製における重質残渣油を燃料とするIGCCも欧米で稼働している。重質残渣油は、灰は少ないものの硫黄の含有量が高く、また、石炭と異なり、高温腐食の原因となるバナジウムや、ガスタービン翼へのデポジットの原因となるニッケルの含有量が多いことが特徴である。

石炭のIGCCとしては、最近になって新たなプロジェクトが進んでいる。米国のEdwardsportプロジェクト<sup>(13),(30),(31)</sup>では、GE炉(2基)を用いる送電端出力618MWのIGCCが建設され、2012年10月のガス化炉点火に始まる一連の調整試験後、2013年6月に商用運転を開始した。2014年春から夏にかけてはガス化炉稼働率90%を維持し、秋にはGT点検やガス化炉耐火材交換を実施したと報じられている。

また、新型の移動床ガス化炉(TRIG<sup>TM</sup>)を開発する送電端出力582MWのKemper Countyプロジェクト<sup>(32)</sup>においては、試運転が行われている。運転は当初計画の2014年5月から遅れており、現在、2016年上期を予定している。

中国では、GreenGenプロジェクト<sup>(21),(22)</sup>のStageIとして250MW規模のIGCCが天津で建設され、2012年4月よりガス化炉(HCERI炉)の運転が開始されている。また、広東省でTRIG<sup>TM</sup>炉をレトロフィットする120MW級のDongguanプロジェクト<sup>(33)</sup>では、建設工事が開始されている。

韓国では、Shell炉を用いた送電端出力305MWのTaean IGCC<sup>(18),(34)</sup>が、2015年に試運転を開始しており、2016年には運転する予定とされている。

## (3) 産業用ガス化炉の急速な普及

海外での大型石炭ガス化炉の開発および普及は、IGCCよりもむしろアンモニアやメタノール製造などの産業用途として、特に中国で急速に進んでいる。Gasification & Syngas Technologies Council (<http://www.gasification-syngas.org/>)が2015年1月時点で公開していたデータベースによると、約260箇所の産業用石炭ガス化サイトが中国にある。その用途別内訳は化学工業用が約210、ガス製造用が約40、液体燃料用が約10である。

その大半はGE炉で、中国において約200基の産業用ガス化炉を導入したと発表しており、最近では2013年12月に年産400ktのアンモニア製造プラント(Shihlien)、2014年5月に年産600ktのオレフィン製造プラント(Chinacoal Yulin社)、2014年10月に年産600ktのオレフィン製造プラント

(Pucheng Clean Energy社)が運開した<sup>(31)</sup>。

次に実績の多いShell社は、2012年に石炭ガス化の拠点をオランダから北京に移した<sup>(35)</sup>。2013年10月には新しい技術となるBottom Quench炉の実証機を南京で運開し、これまでに4炭種を試験し、H<sub>2</sub>+CO濃度90%という良好な性能を確認したと報告されている<sup>(36)</sup>。

Siemens社は、2012年に中国西北部の寧夏回族自治区でNingxia Coal-to-Polypropylene Projectを運開し、日量5,300tのメタノールを安定的に製造している<sup>(37)</sup>。

E-Gas<sup>TM</sup>技術を持つCB&I社は、中国では水素製造プラントを受注し、2015年に着工した段階であるが、韓国Gwangyangで亜瀝青炭による年産500ktの合成天然ガス(SNG)製造プラントが、インドJamnagarでは石油コークスと亜瀝青炭から発電・水素製造・SNG製造をするプラントが、2015～2016年に運開予定としている<sup>(38)</sup>。

## 1-4 我が国における開発

我が国におけるIGCC開発は1970年代に始まり、1980年代に流動床石炭ガス化複合発電技術のパイロットプラントが開発された。1990年代には噴流床石炭ガス化複合発電技術のパイロットプラントが開発され、噴流床石炭ガス化複合発電技術は2000年代に実証機へスケールアップされた。また、2010年代には噴流床方式多目的ガス化技術の実証機の開発も進んでいる。これらの開発経緯を以下に記す。

### (1) 流動床石炭ガス化複合発電技術<sup>(39)</sup>

サンシャイン計画において、我が国最初のIGCC開発である流動床石炭ガス化複合発電の開発が進められた。1974年度より通商産業省からの委託を受けた財団法人石炭技術研究所は、夕張試験場において5トン/日流動床石炭ガス化試験設備(運転期間:1975～1983年度)、および40トン/日パイロットプラント(運転期間:1981～1987年度)を用い、空気吹き加圧二段流動床ガス化炉や、乾式ガス精製(流動床脱硫、移動床脱じん)等の開発を行った。さらに、パイロットプラントの成果に基づき、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究として、電源開発株式会社が1,000トン/日実証プラントの基本設計を実施した。

流動床石炭ガス化複合発電技術としての開発は1987年度で終了したが、40トン/日パイロットプラントで試験研究が行われた乾式ガス精製(流動床脱硫、移動床脱じん)につ

いては、次に述べる噴流床石炭ガス化複合発電技術における勿来200トン/日パイロットプラントのガス精製設備として採用され、開発が継続された。

## (2) 噴流床石炭ガス化複合発電技術<sup>(40),(41)</sup>

1980年より、国・電気事業において噴流床石炭ガス化複合発電技術の検討が進められ、1983～1985年度にNEDOからの委託を受けた電力中央研究所が、噴流床石炭ガス化複合発電技術に関するフイージビリティ・スタディ(FS)を実施した。このFSの結果を踏まえ、1986年度に9電力会社、電源開発株式会社、電力中央研究所の11法人から成る石炭ガス化複合発電技術研究組合(IGC組合)が設立され、NEDOの委託事業として、200トン/日パイロットプラント計画が開始された。

パイロットプラントのガス化炉には、電力中央研究所と三菱重工業株式会社が2トン/日石炭ガス化基礎実験装置により開発を行った空気吹き加圧二段噴流床方式が採用された。ガス精製には上記の流動床石炭ガス化複合発電技術における夕張40トン/日パイロットプラントで開発を行ってきた流動床脱硫・移動床脱じんが採用された。なお、メーカーとIGC組合との共同研究として、20トン/日規模の固定床方式脱じん・脱硫装置、4トン/日規模の移動床方式脱じん・脱硫装置も併設された。また、出力12.5MWの1,300℃級低カロリーガス焚きガスタービン設備、実証機用ガスタービン(175MW級)燃焼器1缶分の実圧実寸燃焼器試験装置が設置された。

本パイロットプラントは、福島県いわき市の常磐共同火力株式会社勿来発電所構内に建設された。1991年3月より運転が開始され、1992年7月には空気吹きガス化炉と乾式ガス精製の組合せとして世界で初めての石炭ガス化発電に成功した。運転開始当初はガス化炉内の灰付着等のトラブルが発生したが、それらを全て解決し、1995年3月から4月にかけて約1ヶ月間(789時間)の連続運転に成功した。その後も1996年2月までの運転期間に各種データの取得を進め、1996年度には解体研究を実施し、プロジェクトは終了した。

パイロットプラントの成果を踏まえ、実証機プロジェクトに関する検討が行われ、1997～1998年度にNEDOより東京電力株式会社への委託研究として実証機FSおよび要素研究が実施された(研究体制としては、9電力会社と電源開発株式会社、電力中央研究所の共同研究)。この成果を受け、

1999年度より250MW空気吹きIGCC実証機プロジェクトが進められた。2013年3月末にプロジェクトは終了し、2013年4月より実証機は常磐共同火力株式会社勿来発電所10号機として商用運転を開始した。実証機プロジェクトの詳細については、第2章および第3章で述べる。

## (3) 噴流床方式多目的ガス化技術<sup>(11),(41)~(45)</sup>

上記の噴流床石炭ガス化複合発電と並行し、サンシャイン計画において、1983年度より噴流床方式多目的ガス化技術の開発について検討が行われた。1986年度よりNEDOの委託事業として、石炭利用水素製造技術研究組合(HYCOL組合)による50/日パイロットプラント計画が開始された。ガス化炉には株式会社日立製作所が開発した酸素吹き加圧二段噴流床方式が採用された。

本パイロットプラントは、千葉県袖ヶ浦市に建設され、1991年度から1994年4月まで運転研究が行われた。1993年12月から1994年1月にかけて1,149時間の連続運転に成功するなど、所定の開発目標を達成した。これらの成果を引き継いで、1995年度より高効率・高信頼性の酸素吹きガス化炉の開発ならびに石炭ガスを燃料電池へ供給可能とするためのガス精製技術の確立などを目的に、電源開発株式会社がNEDOとの共同研究事業として、多目的石炭ガス製造技術開発(EAGLEプロジェクト;Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity)が実施された。

EAGLEプロジェクトでは、パイロットプラントが電源開発株式会社若松研究所内に建設された。プラントは、150トン/日酸素吹き一室二段旋回型噴流床ガス化炉、湿式ガス精製(MDEA法、石膏回収)、ガスタービン、空気分離設備(加圧深冷分離)、生成ガス燃焼設備等で構成された。2002年度から2006年度までは、STEP-1として各種試験が実施され、負荷100%での安定した運転、高効率な石炭ガス化性能・ガス精製性能、多炭種対応性等が確認された。さらに、大型化技術の検証を行い、1,015時間の長時間連続運転に成功するなど、全ての開発目標を達成した。

引き続き2007年度から2009年度までは、STEP-2として、①高灰融点炭種対応、②CO<sub>2</sub>分離回収試験、③微量物質挙動調査、について試験が実施された。高灰融点炭種対応について、3炭種の試験が行われ、適用可能であることが確認された。CO<sub>2</sub>分離回収試験については、精製ガスの一部を分岐し、化学吸収方式CO<sub>2</sub>分離回収設備が追設

された。累積通ガス時間1,341時間の運転が行われ、基本特性や、分離回収システムの石炭ガスへの適用性、システムの基本諸元等が確認された。さらに、微量物質挙動調査についても、EAGLE試験炭における微量成分の系内挙動を確認するなど、所期の目的を達成した。

2010年度から2014年度は、STEP-3として物理吸収方式CO<sub>2</sub>分離回収装置を設置して試験を実施し、CO<sub>2</sub>分離回収によるエネルギーロスの大幅な低減に見通しが得られた。また、最長連続ガス化運転時間が1,295時間に更新された。2013年度の運転終了後、2014年度にかけて材料劣化調査も実施された。一連の試験研究を通し、STEP-3での開発目標は全て達成され、EAGLEプロジェクトは終了した。

EAGLEプロジェクトの成果に基づき、中国電力株式会社と電源開発株式会社の共同出資で2009年に設立された大崎クールジェン株式会社により、石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)を実証する大崎クールジェン(OCG)プロジェクトが進められている。中国電力株式会社大崎発電所構内に166MWの実証機を建設中で、第1段階である酸素吹きIGCCの実証試験運転が2017年3月に開始される予定である。第2段階では、石炭ガスの最大30%を導入するCO<sub>2</sub>分離回収装置(回収率90%)を追設し、CO<sub>2</sub>分離回収型IGCCの実証試験が計画されている。さらに第3段階として、最終目標であるCO<sub>2</sub>分離回収型IGFC実証試験が計画されている。

#### (4) 残渣油ガス化複合発電

我が国では、重質残渣油を燃料とするIGCCが1基稼働している。我が国最初のガス化複合発電商用機として、JX日鉱日石エネルギー株式会社根岸製油所で根岸IGCCが2003年に運転を開始した。製油所で余剰留分となる減圧残渣(アスファルト)を燃料とし、GE社のダイレクトクエンチ炉とMHI社F701型1,350℃級ガスタービンを採用した発電出力431MW、送電端効率36%(HHV)のIGCCで、日揮株式会社がEPC契約で建設した<sup>(46)</sup>。

#### (5) 産業用石炭ガス化炉

産業用石炭ガス化炉としては、1984年に宇部アンモニア工業株式会社が4基のGE炉を導入し、本プロセスによる当時世界最大のアンモニアプラント(生産能力1,000トン/日)を建設した。同社ではガス化炉に独自の改良を続けている。

新日鉄住金エンジニアリング株式会社が開発する石炭熱分解ガス化技術(ECOPRO<sup>®</sup>)では、経済産業省の石炭生産・利用技術振興補助事業として、20トン/日規模のパイロットプラントが新日鐵住金株式会社八幡製鉄所に建設され、2006年に試験が開始された。噴流床式二室二段ガス化炉で、冷ガス効率が高く、揮発分の多い低品位炭からのSNG製造に向いていることが特徴である。現在、数千トン/日規模の商用機を前提に、数百トン/日規模の実証機が中国で計画されている<sup>(47)</sup>。

株式会社IHIが開発する二塔式循環流動層ガス化炉(TIGAR<sup>®</sup>)は、気泡流動層型ガス化炉とライザー燃焼炉を組み合わせたもので、2009年に同社の横浜事業所に褐炭処理量6トン/日のパイロットプラントが建設された。常圧・低温(800℃~900℃)でガス化するため、経済性とメンテナンス性に優れるとされている。経済産業省の補助事業として50トン/日実証機がインドネシアの肥料工場で建設され、2015年に運転を開始した<sup>(48)</sup>。

以上、本章では、IGCC技術の全般と、空気吹きIGCCを含め各種技術開発の経緯や動向について述べてきた。第2章、第3章では商用運転に移行した空気吹きIGCC実証機に焦点を当て、実証試験の成果をまとめ、今後の商用機的设计に反映すべき知見について考察する。

コラム1：IGCC における CCS への対応

CCS (Carbon Capture and SequestrationあるいはCarbon dioxide Capture and Storageなど各種の表記がなされている) は、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出量を大幅に削減するため、工場や発電所といった大規模排出源でCO<sub>2</sub>を分離・回収し、地中などに貯留するものである。CO<sub>2</sub>を分離・回収する技術 (Capture)、貯留地点まで輸送する技術 (Transport)、地中に貯留する技術 (Storage) から構成される。現在の技術では、発電効率の大幅な低下と発電コストの増加が避けられず、石油増進回収 (EOR: Enhanced Oil Recovery) の目的以外に経済的な優位性を見出すことが難しい。

我が国のCO<sub>2</sub>分離・回収技術としては、化学吸収法による燃焼後回収 (Post-combustion capture) 技術は実用化しており、酸素燃焼 (Oxy-fuel combustion) 技術は実証試験を終了した。IGCCでは、ガスタービンで燃焼する前の石炭ガス化ガスの段階でCO<sub>2</sub>を分離・

回収する燃焼前回収 (Pre-combustion capture) 技術 (図1) の実証試験が計画されている。

当研究所では、酸素燃焼の概念をIGCCに組み入れたセマイクロブドGTシステムを提案し、CO<sub>2</sub>回収を行っても高い効率を維持するCO<sub>2</sub>回収型高効率IGCC (High efficiency Oxy-fuel IGCC) 技術 (図2) を2030年代半ばに確立するため、NEDOプロジェクトとして「CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC技術開発」を進めている<sup>(1)</sup>。本システムは、排ガス (CO<sub>2</sub>) を再循環するセマイクロブド型のIGCCである。CO<sub>2</sub>はガス化炉への石炭搬送や、ガスタービンの温度制御に用いられる。CO<sub>2</sub>回収装置が不要なことや、系内に窒素を含まないためガス流量が少なく熱損失が少ないことから、高い熱効率が得られる。燃焼前回収型IGCCよりも高い42% (HHV) の送電端効率を目指している。

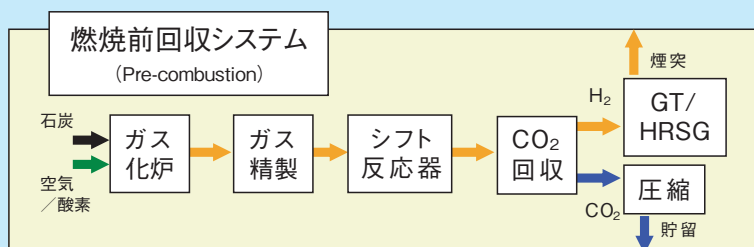


図1 燃焼前回収型 IGCC の概略構成

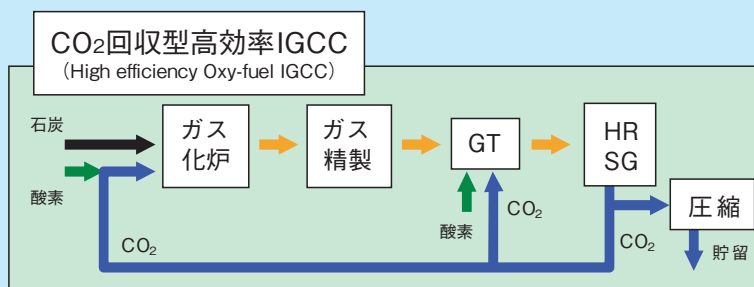


図2 CO<sub>2</sub>回収型高効率IGCC (CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC) の概略構成

コラム 2 : 効率向上とコスト低減に寄与する乾式ガス精製技術

これまでのIGCCプラントで採用されている湿式のガス精製技術に替えて、乾式ガス精製技術を適用することができれば、水分の凝縮やガス冷却に伴う熱損失を大きく削減できるため、IGCCの一層の熱効率向上が期待できる。さらには設備構成の簡素化が期待される。空気吹きIGCCのパイロットプラントプロジェクトで乾式ガス精製技術が開発された当時、除去対象は硫黄化合物のみであったが、その後の環境規制動向などからハロゲン化物や水銀が対象に加わった。そこで、当研究所ではそれぞれに対応する不純物除去剤の開発を進めるとともに、それらの技術を用いた乾式ガス精製システムの再評価を行った。

空気吹きIGCCに乾式ガス精製技術を適用したシステム構成を検討し(図1)、熱効率を試算したところ、湿式ガス精製技術の場合に比べてHHVベースで1.6%(ポ

イント)の向上が見込まれることがわかった。経済性については、熱交換器や回転機(ポンプ、ブロワ)の機器点数が減り配管系統も簡素になることから、設備費は湿式ガス精製設備の65%程度に抑えられると推算された。一方、再利用できない吸収剤を使用することで運転維持費の増加要因となる。発電効率向上に伴い燃料費を削減できることから、IGCCの発電原価としては、乾式ガス精製の採用により1.5%の削減が見込まれた。

このように乾式ガス精製技術を適用したIGCCは、熱効率向上に伴うCO<sub>2</sub>排出原単位の一層の削減と合わせ、経済性の向上も期待される。今後は、これまで開発してきた各種不純物除去剤を適用したプロセスの大型化と実証を進め、乾式ガス精製システムが実用化されることが望まれる。

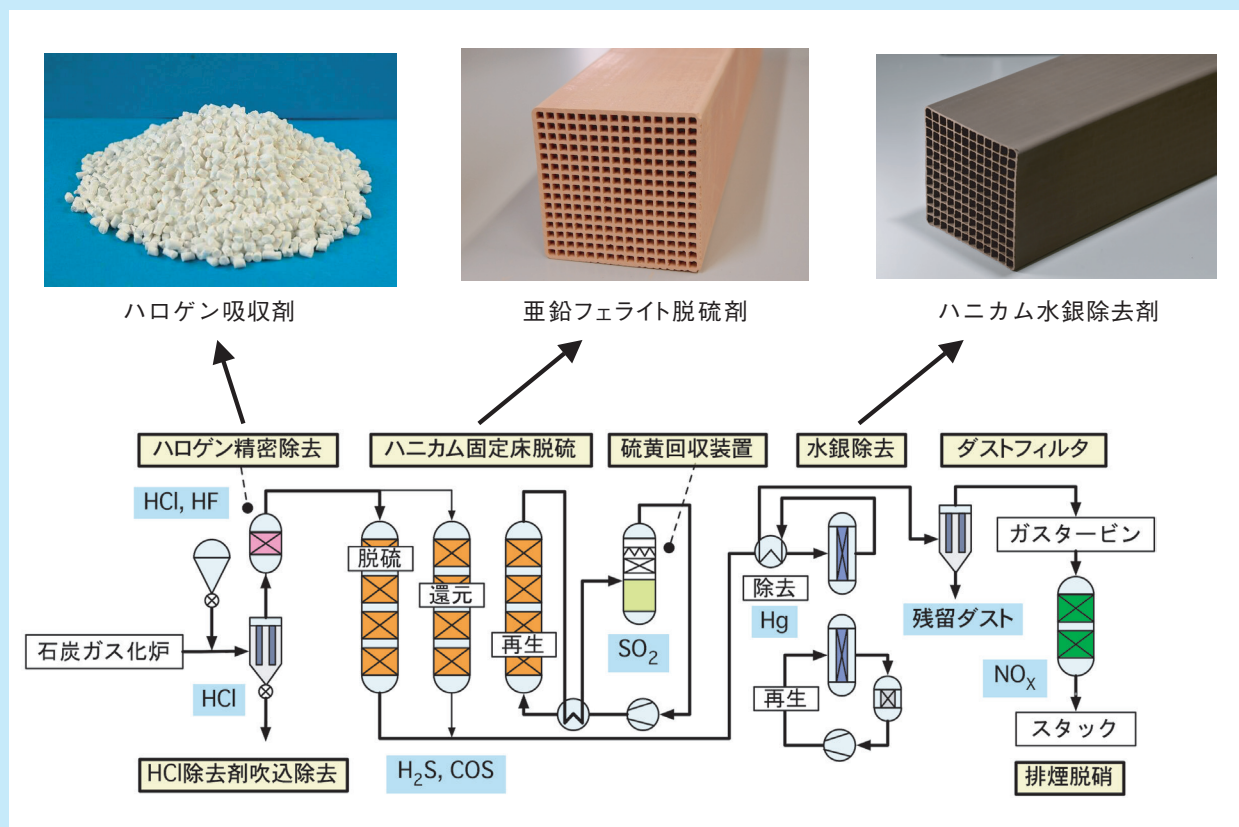


図1 開発技術を集約した乾式ガス精製システムの構成

## コラム3：IGCC用ガスタービンの開発動向

天然ガス焼きのガスタービン(以下GT、**図1**)の開発では、プラント熱効率の向上のため、タービン入口ガス温度(TIT:Turbine Inlet Temperature)の高温化と大容量化が推し進められてきた。そのため、IGCCプラントでも高温・大容量型のGTの導入が進められている。以下に3大GTメーカー(GE社、Siemens社、三菱日立パワーシステムズ株式会社)におけるIGCC用GTの動向について簡単に紹介する。(各プラントの詳細は1-3節および1-4節を参照)

**(1) GE<sup>(1)~(3)</sup>**

米国Tampa(1996~)とWabash River(1995~)に導入した1,250℃級GTの7FA(出力:192MW)の長期運用による経験から、2013年6月に運開した米国Edwardsportでは新たに開発した1,300℃級のsyngas用GTである7FB(出力:約232MW、TIT:1,370℃)が導入されている。

7FBはこれまでの技術を踏襲したマルチキャン・マルチバーナ型燃焼器を採用しており、天然ガスとsyngasのDual Fuelに対応する。運転開始時には天然ガスからsyngasへの切り替えが可能であり、天然ガスとsyngasの混合割合も任意に変化させることができる。また、詳細は不明だが、高温部品にはIGCC環境を想定し、耐食性を強化した材料が使用されている。7FBは2011年に建設を着工した韓国Taeonにも採用されている。

GE社は、2010年より米国DOEの先進IGCC用水素燃焼タービンの開発に参画しており、1,450℃級GTの要素技術開発(~2020年)に取り組んでいる。同プロジェクトでは、並行して1,700℃級GTの要素技術開発(2015年~2028年)、それ以降には大型実証研究が計画されている。

**(2) Siemens<sup>(1),(3)~(5)</sup>**

サイロ型燃焼器を有するオランダBuggenum(1994~2013)に導入した1,100℃級GTのV94.2(出力:156MW)とスペインPuertollano(1998~)に導入した1,250℃級GTのV94.3(出力:182MW)の長期運用によって経験・実績が積み重ねられている。中国

GreenGen(2012年~)でも、上記実績のある1,100℃級GTのSGT2000E(旧V94.2K、出力:173MW)が採用されている。

現在試運転中の米国Kemper IGCCと2016年に着工予定のTexas Clean Energy併産型IGCCでは、ウェスチングハウス(WH)社の流れを汲むマルチキャン型の燃焼器を有する1,300℃級GTのSGT6-5000F(旧WHではW501F、出力:約200MW)が採用/計画されている。

Siemens社もGE社と同様に2010年より米国DOEの先進IGCC用水素燃焼タービンの開発に参画しており、1,450℃級GTの要素技術開発(~2020年)に取り組んでいる。

**(3) 三菱日立パワーシステムズ MHPS<sup>(6)~(9)</sup>****(三菱重工業・日立製作所)**

BFG(高炉ガス)焼きGTで経験・実績を有する三菱重工業株式会社にとって、IGCC用GTとしては250MW空気吹きIGCC実証機(2007~)に導入した1,200℃級GTのM701DA(出力:175MW)が初めてである。空気吹きガス化炉から生成される低カロリーの石炭ガス化燃料に対応した燃焼器が採用され、実証試験およびその後の商用運転で経験・実績が積み重ねられている。

2017年3月に実証運転を開始する予定の大崎クールジェンプロジェクトでは、株式会社日立製作所が開発した2軸型、1,300℃級GTのH100(出力:約100MW)が導入されている。

さらに、福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画(勿来および広野)では空冷燃焼器の採用によって起動時間の短縮など、運用性の改善が図られた1,400℃級GTのM701F4の導入が2020年を目途に計画されており、これまで先行するGE社とSiemens社を超える高温型GTの適用・運転となるため、注目されている。

MHPS社は、天然ガス焼きGTを対象とした国家プロジェクト「1,700℃級超高温ガスタービン要素技術開発」にも参画しており、将来的にはそれによって開発した技術を転用してIGCC用1,700℃級GTの開発に繋げることが考えられている(**図2**)。



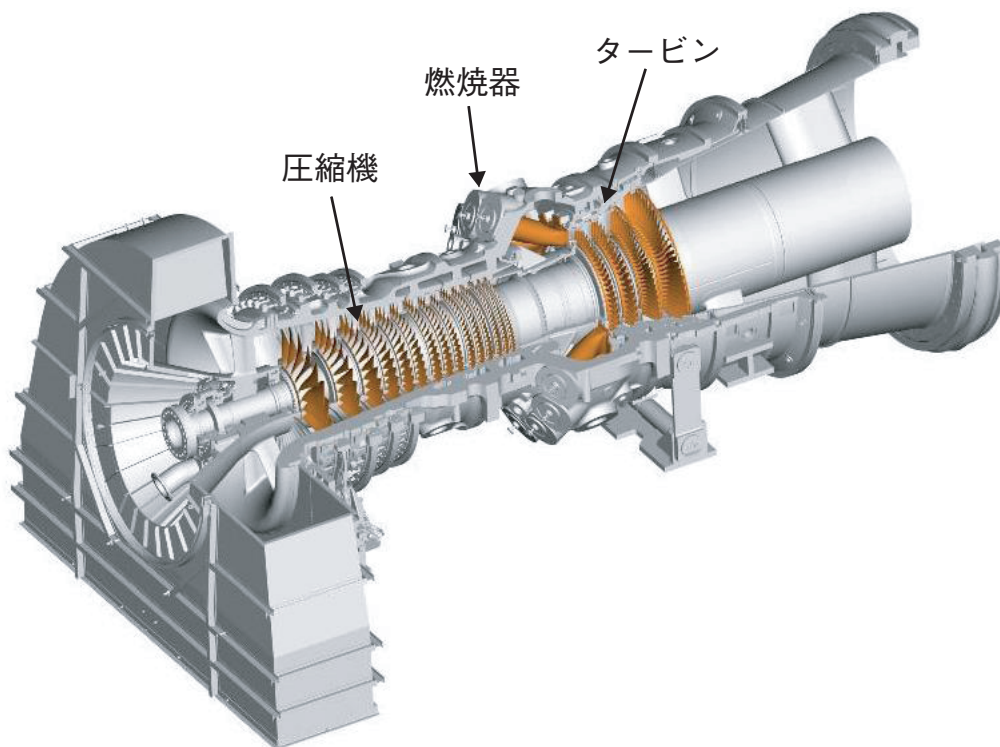


図1 発電用ガスタービンの外観・断面図（提供元：三菱日立パワーシステムズ株式会社）

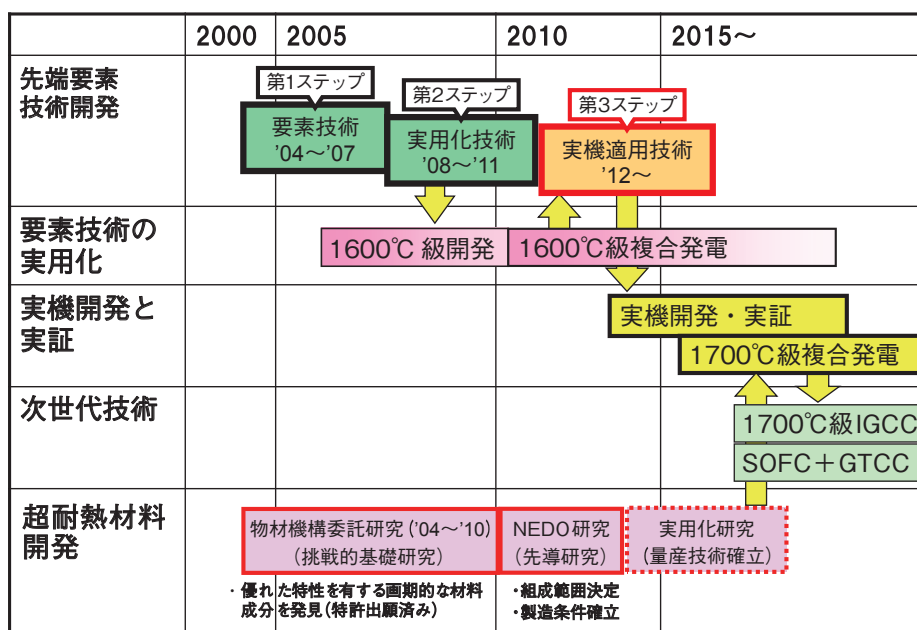


図2 超高温ガスタービンの技術開発ロードマップ<sup>(9)</sup>



## 第2章

# 実証機プロジェクトの概要と その後の運用

---

<b>2-1 250MW実証機の特徴</b> . . . . .	26
2-1-1 実施体制 . . . . .	26
2-1-2 開発スケジュール . . . . .	26
2-1-3 実証機のシステム構成と仕様 . . . . .	27
<b>2-2 実証試験の成果</b> . . . . .	29
<b>2-3 プロジェクト終了後の実証機の運用</b> . . . . .	30
コラム4：東日本大震災の経験と復旧、そして供給力としての活躍 . . . . .	32
コラム5：実証試験におけるスラグ有効利用 . . . . .	35



## 2-1 250MW実証機の特徴

電気事業大で進めて来たIGCC技術開発は、海外の先行プラントで採用されている酸素吹きガス化方式と比較して高い送電端効率が期待できる空気吹きガス化方式を採用して進められてきた。空気吹きIGCCの開発経緯を図2-1-1に示す。当研究所に設置された石炭処理量2t/日規模の小型ガス化炉による基礎試験を1983年から開始し、1991～1996年には常磐共同火力株式会社勿来発電所構内に建設した200t/日規模(25MW相当)のパイロットプラント試験が行われた。また、1998年にガス化炉、ガス精製、ガスタービンが揃った24t/日規模の一貫試験設備を三菱重工業株式会社が建設し、IGCC全体の運転特性の検証やシステム制御技術の向上が進められた。それらの成果を受け、商用化への最終段階として信頼性・耐久性・経済性などを実証することを目的に、出力250MW(石炭使用量1,700t/日規模)の空気吹きIGCC実証機での運転試験が、株式会社クリーンコールパワー研究所(Clean Coal Power R&D、以下CCP研究所)によって2007～2013年に実施された。本章では、このIGCC実証機プロジェクトの概要、設備の特長、運転試験の成果、およびプロジェクト後に商用転用されたプラントの運転状況について述べる。

### 2-1-1 実施体制

実証試験の実施体制を図2-1-2に示す。CCP研究所は、空気吹きIGCCの実証試験研究を行うことを目的に、北海道から九州までの9電力会社および電源開発の出資により設立された。試験費用と必要な人員は出資会社に電力中央研究所を加えた11法人が提供し、実証試験はCCP研究所が推進した。また、実証機の設置場所である常磐共同火力は、敷地、ユーティリティ、運転員の提供などの運転支援を通して積極的に試験に係わった。なお、プロジェクトは経済産業省からの補助金を受けて実施したが、当初の目標を達成したことから2010年6月に補助事業は完了し、以降の実証機プロジェクトでは11法人が費用を負担して試験を継続した。

### 2-1-2 開発スケジュール

IGCC実証機プロジェクトは1999年にスタートし、事前検証試験と設計研究を経て、2001年6月からは実証試験の実施主体として設立されたCCP研究所によって推進された。IGCC実証機プロジェクトのスケジュールを図2-1-3に示す。2001年から3年間で設備設計と環境アセスメントを実施

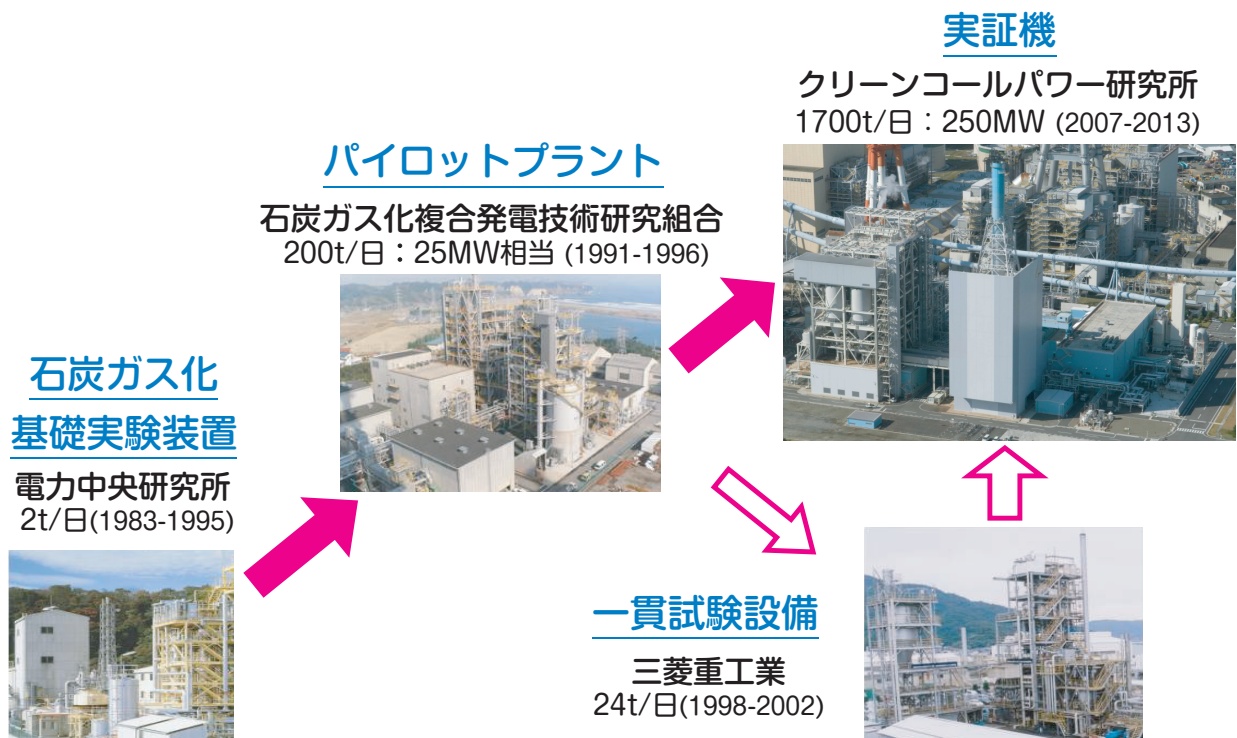


図 2-1-1 空気吹き IGCC の開発経緯

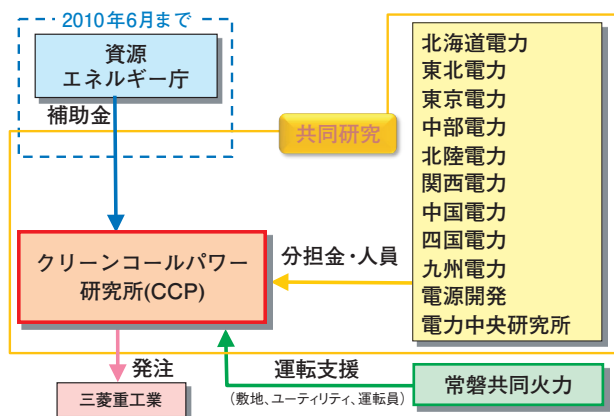


図 2-1-2 IGCC 実証試験体制

し、次の3年間で実証機を常磐共同火力株式会社勿来発電所(福島県いわき市)構内に建設して、2007年9月より運転試験を開始した。途中、東日本大震災による地震と津波による損傷を受けたが、ほぼ計画どおりに実証機プロジェクトを推進することができ、5年半の運転試験を通して目標としていた試験成果を達成し、商用機設計に必要なデータを取得して、2013年3月にプロジェクトは終了した。

### 2-1-3 実証機のシステム構成と仕様

実証機のシステム構成を図2-1-4に、設備の全景を図2-1-5に、主な仕様と性能目標値を表2-1-1に示す。実証機は、乾式の石炭供給装置と高温集塵(チャー回収)装置を備えた空気吹き加圧二段噴流床方式の「ガス化炉設備」、ガス洗浄塔やH<sub>2</sub>S吸収塔などの「ガス精製設備」、ガスタービン・蒸気タービン・排熱回収ボイラおよび発電機などの「複

合発電設備」から構成される。

ガス化炉設備では、固体の石炭を可燃性のガス燃料(石炭ガス)に変換するとともに、石炭に含まれる灰分を溶融スラグとして排出する。ガス精製設備では、石炭ガスに含まれる硫黄化合物や窒素化合物などの不純物をガスタービンで燃焼する前の段階で除去する。複合発電設備では、精製した石炭ガスを燃料としてガスタービンを駆動させるとともに、ガスタービンの排ガスやガス化炉の熱交換器から回収した熱で蒸気タービンを駆動して発電を行う。

発電出力は想定する商用機の約1/2規模の250MW(石炭使用量1,700t/日)であり、ガスタービンは1,200℃級を採用している。送電端効率は42%(LHV:低位発熱量、以下LHV)と最新鋭の微粉炭火力とほぼ同等の値を目標としており、将来の商用機では高温型ガスタービンを採用することによって48%(LHV)を超える送電端効率の達成を見込んでいる。

表 2-1-1 IGCC 実証機の仕様

出力	250MW	
石炭使用量	約 1,700t/日	
方式	ガス化炉	乾式給炭空気吹き加圧二段噴流床
	ガス精製	湿式ガス精製 + 石膏回収
	ガスタービン	1,200℃級
目標熱効率 低位発熱量(LHV)基準	発電端	48%
	送電端	42%
環境特性 (目標値、O <sub>2</sub> 濃度16%換算)	SO <sub>x</sub> 排出濃度	8ppm
	NO <sub>x</sub> 排出濃度	5ppm
	ばいじん排出濃度	4mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
設計・製造	三菱重工業株式会社	

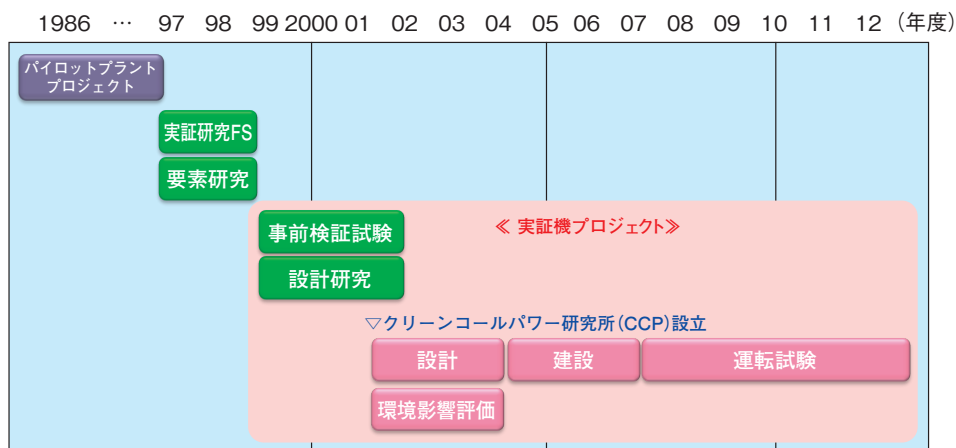


図 2-1-3 IGCC 実証機プロジェクトのスケジュール

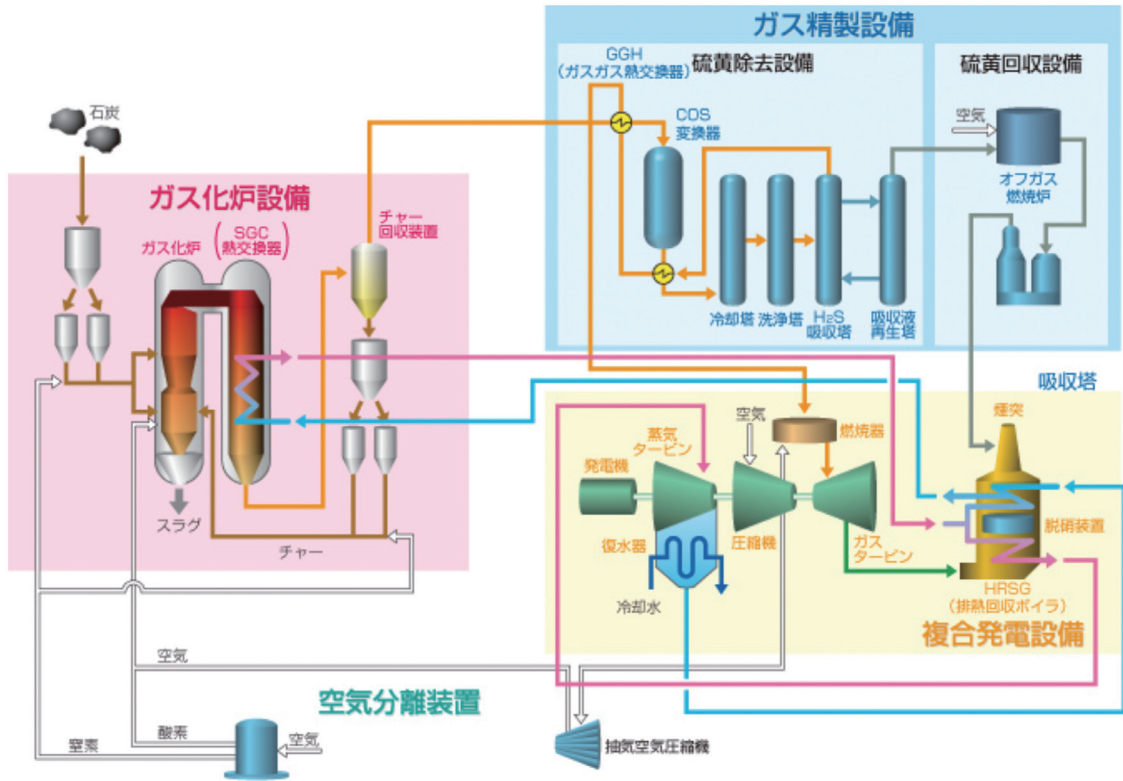


図 2-1-4 IGCC 実証機のシステム構成

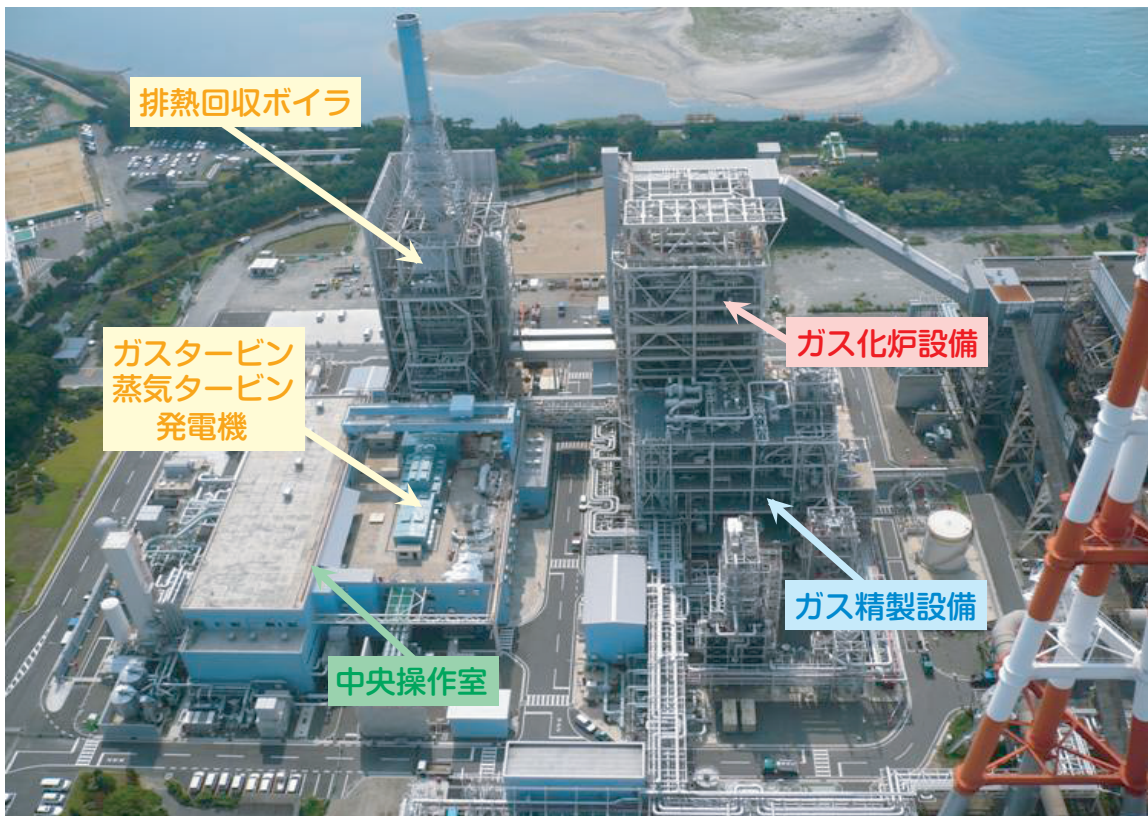


図 2-1-5 IGCC 実証機の外観

## 2-2 実証試験の成果

IGCC実証機プロジェクトでの検証項目と成果を表2-2-1に、実証試験の運転時間および発電電力量の実績を図2-2-1に示す。この運転試験により、IGCCの性能や運用性などについて以下の成果を得た。

### (1) システムの安定性

定格負荷および部分負荷において安定した運転を継続することを実証するとともに、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん濃度、排ガス量などの環境目標値を全て満足することを確認した。また、トラブルを模擬したインターロック試験を実施し、プラントが安全に停止することを確認した。これらのシステム評価により、特有の化学プロセスが様々な物質・エネルギーを介して関係しているIGCCシステムが、安定かつ安全に運用されていることを検証した。

### (2) 設備の信頼性

運転試験では、連続運転2,238時間を含む通算18,700時間を超えるガスタービン石炭ガス専焼運転を実施した。累積発電電力量は3,700GWh余りとなり、発電設備としての信頼性が検証された。運転試験中に発生した2011年3月11日の東日本大震災では、震度6弱の揺れでプラントは安全に停止したものの、地上面は津波により浸水・水没し、地盤沈下に伴う設備基礎の被害を受けた。しかしながら、復旧工事を経て同年7月28日に運転を再開し、電源確保が喫緊だった震災後の重負荷期の重要な供給力として機能することができた(詳細はコラム4を参照)。

### (3) 炭種適合性

適合炭種の拡大を目的として、従来の微粉炭火力では焚きにくい灰融点の低い、あるいは含有水分の多い低品位な亜瀝青炭などを含む幅広い石炭の適用性を評価した。石

表 2-2-1 IGCC 商用化に向けた検証項目

検証項目	内容	成果
1) システムの安定性	安定に運転を継続できるとともに、プラント異常時において安全に停止するシステムであることを検証する。	定格出力 250MW および部分負荷での安定運転を実証 SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、ばいじん濃度、排ガス量等の環境目標を満足 トラブルを模擬したインターロック試験で安全性を検証
2) 設備の信頼性	信頼性確認のため最低 2,000 時間の連続運転 (夏季 3 ヶ月間相当) を行う。	連続 2,238 時間を含む通算 18,788 時間の運転 総発電電力量 3,704GW
3) 炭種適合性	設計炭以外の炭種を用いて運転を行い、将来の商用機設計に資する特性データを取得する。	設計炭以外に8炭種での運転試験を実施 ・微粉炭火力で使用される灰融点温度の高い瀝青炭 ・含有水分が多く低品位な亜瀝青炭
4) 高効率性・環境特性	目標熱効率の達成、環境基準のクリアにより、IGCC の優れた特長である高効率性・環境性を検証する。	送電端効率 42.9% (低位発熱量 LHV 基準) を達成 排ガス、排水、石炭灰に関する環境基準をクリア
5) 耐久性	長時間運転と開放点検により、設備の耐久性を検証する。	年間 5,013 時間の運転を達成 開放点検により設備に重大な損傷のないことを確認
6) 経済性	運転実績に基づいて、建設費・運転費・保守費等を総合的に勘案し、商用機の経済性を評価する。	商用機の発電単価は、従来型石炭火力と同等以下となる可能性あり

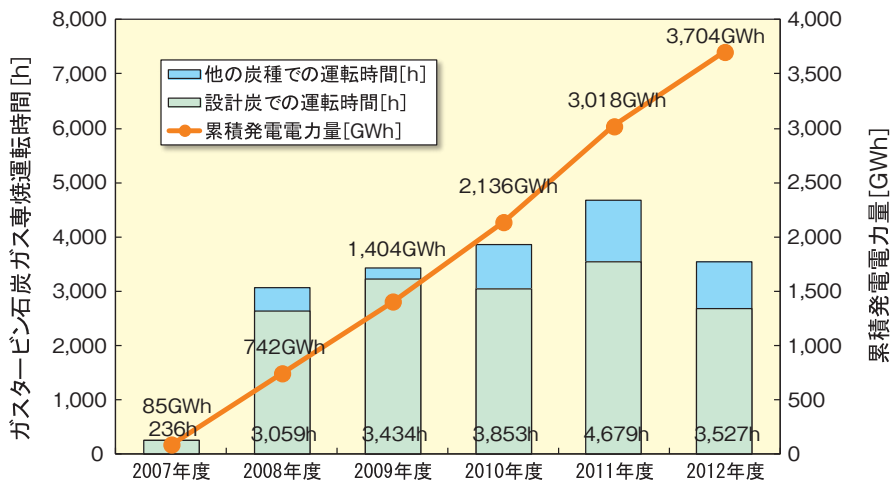


図 2-2-1 IGCC 実証機の運転実績

表2-2-2 運転最適化試験の結果(2009年1月30日実施)

	設計値	結果
大気温度	15℃	9.9℃
発電機出力	250MW	248.8MW
GT出力(ガスタービン)	128.9MW	130.4MW
ST出力(蒸気タービン)	121.1MW	118.4MW
送電端効率(LHV基準)	42%	42.9%*
冷ガス効率	73%	77%
炭素転換率	>99.9%	>99.9%
生成ガス発熱量組成	LHV 4800kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	5600kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
	CO 28.0%	31.9%
	CO <sub>2</sub> 3.8%	2.7%
	H <sub>2</sub> 10.4%	10.0%
	CH <sub>4</sub> 0.3%	1.4%
	N <sub>2</sub> 他 57.5%	54.0%
環境特性 (O <sub>2</sub> 濃度16%換算)	<目標値>	
	SO <sub>x</sub> 8 ppm	0.5 ppm
	NO <sub>x</sub> 5 ppm	3.9 ppm
	ばいじん 4 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	<0.1 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>

※大気温度 15℃による補正值

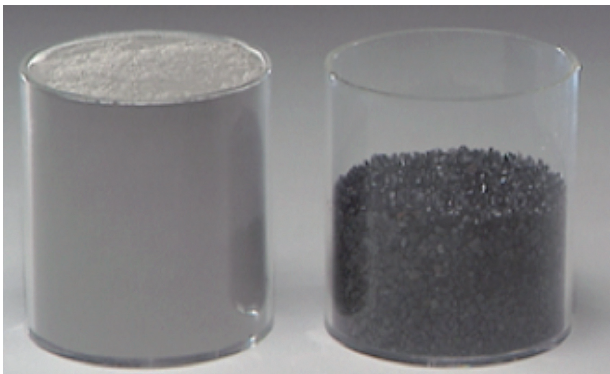
フライアッシュ  
(従来型微粉炭火力)溶融スラグ  
(IGCC)

図 2-2-2 石炭灰の外観と容積の比較

炭性状に応じて運転パラメータを適切に調整し、必要に応じて設計炭との混炭で運用することで、様々な炭種が適用できることを確認した。

#### (4) 高効率性および環境特性

プラント熱効率の向上を目指した運転条件の最適化を検討した際のプラント性能を、設計値とともに表2-2-2に示す。送電端効率は42.9% (LHV)と、目標性能である42%を達成することを確認した。石炭ガスへの変換性能の指標である冷ガス効率や、未燃分の指標である炭素転換率はいずれも設計値を満足しており、石炭を効率よく石炭ガスに変換できていることが検証された。

煙突出口のSO<sub>x</sub>濃度、NO<sub>x</sub>濃度、ばいじん濃度は目標値を大きく下回ることを検証した。また、ガス化炉から排出される溶融スラグは、図2-2-2に示すように微粉炭火力のフ

ライアッシュに比べて容積がほぼ半減し、ガラス質のために微量物質の溶出がほとんどないことから、その全量を有効利用している(詳細はコラム5を参照)。その他の水質、騒音、振動等についても基準をクリアしており、IGCCの優れた環境特性が実証された。

#### (5) 耐久性

商用運転に準じて高利用率の運転を想定した耐久性確認試験を行い、設備改善などを実施しながら、年間5,013時間の運転を達成した(2009～2010年度)。運転後に設備点検を行った結果、深刻な損傷や不具合が生じていないことを確認し、IGCCプラントが想定どおりの耐久性を有することを検証した。

#### (6) 経済性

IGCCは高温高压の反応容器を含む数多くの機器で構成されることから、プラントの建設費や修繕費は従来型の微粉炭火力よりも高くなると想定される。一方、発電効率については、高温型ガスタービンの適用により従来型に比べて約2割の効率向上が期待できる。また、IGCCは、低灰融点炭などこれまで発電には使われにくかった石炭を活用できることから、燃料調達費を軽減できると考えられる。IGCC実証機の運転実績に基づき、建設費、運転費、保守費用等を総合的に勘案して、商用機の経済性を評価した。その結果、IGCCの発電原価は、従来型の微粉炭火力と同等以下となる可能性があると考えられた。

以上のとおり、IGCC実証試験では目標とした技術課題を達成し、空気吹きIGCC技術に関する設計・建設・運転・保守のノウハウと商用プラントの設計に不可欠な実証データを取得することができた。我が国で開発を進めてきた空気吹きIGCCは、世界最高水準の送電端効率を発揮する石炭火力発電技術であることが実証され、石炭利用によるエネルギーセキュリティの確保、効率向上による地球温暖化対策を両立した発電システムとして期待できることが確認された。

## 2-3 プロジェクト終了後の実証機の運用

計画された全ての試験項目を完遂し、将来のIGCC商用プラントの設計に必要なデータを得て、IGCC実証機プロジェクトは2013年3月末に終了した。本件のような研究プロ



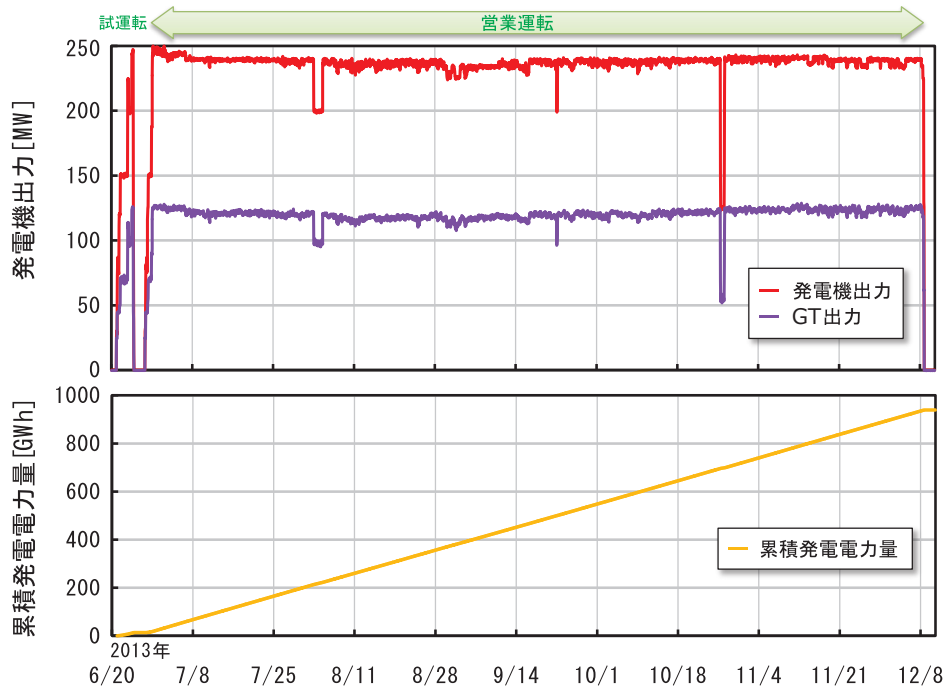


図2-3-1 常磐共同火力勿来発電所10号機の最初の商用運転状況(2013年6月～12月)

プロジェクトでは、建設した試験設備は終了とともに解体するケースが多いが、IGCC実証機は25万kWの電力供給力を有する発電プラントであることに加え、運転の継続によりIGCC技術の更なる知見が得られることが期待された。そのため、2013年4月以降は常磐共同火力株式会社がCCP研究所を吸収合併し、IGCC実証機は商用発電プラント(勿来発電所10号機)として運用することとなった。

勿来発電所10号機の最初の商用運転状況を図2-3-1に示す。定期事業者検査と試運転を経て、2013年6月末に我が国初の石炭専焼IGCC商用機として運転を開始し、電力需要が高まる夏季期間を通して高稼働で安定した運用を継続した。中間点検のためにプラントを停止した12月8日までの連続運転時間は3,917時間、発電電力量は979GWhの実績となり、IGCCプラントの最長記録(オランダBuggenum発電所:3,287時間)を更新している。

その後もベースロード運用を基本として、中間点検や設備メンテナンスなどを実施しながら断続的に運転を継続して

り、営業運転での累積時間は10,360時間、積算発電電力量は2,454.4GWhに達している(2015年5月末時点)。途中で、主に設備の経年的な劣化に起因するメンテナンスのために一時的な負荷降下やプラント停止を実施している。これはプラントが研究設備としての設計に基づいて製作されており、十分な耐用年数を想定していない機器が存在することが一因となっている。そのため、2015年度には一層の安定運用を可能とするため、設備の耐力強化を狙いとした大型改修を実施している。

定格負荷での長期間運用が求められる商用運転を通して、IGCCの運転操作技術、プラント制御性向上、機器設備の監視とメンテナンス、および安全管理技術が磨かれている。実証試験に留めることなく運転を継続したことにより、次期商用機に繋がる重要な知見と経験が得られるだけでなく、商用プラントとしての真価が実証されることとなった。勿来発電所10号機は、クリーンかつ高効率な空気吹きIGCC技術の礎として、さらに運転を継続する計画となっている。

本コラムは、IGCC実証機が受けた東日本大震災による被災状況と、夏の重負荷時期の供給力に向けた設備の復旧過程について、現地での経験に基づいて記載したものである。

### 【被災】

2011年3月11日(金)午後、IGCC実証機では約3%/分の負荷変化速度の確認試験を終え、次週からの中灰融点・高硫黄炭への炭種変化試験に向けた準備が進められていた。14時46分、携帯電話の緊急通報が鳴り響き、その後始まった揺れは徐々に拡大した。設備の状態を確認するため近くにいた各設備の担当はすぐに監視モニタに向かった。

揺れはどこかで収まるであろうと思っていたが、中央操作室内のキャビネットが大きな音を立てて倒れた時、その期待が消えた。実証機は経験したことのない震度6弱の揺れを受けたのであった。

ガスタービン軸振動大の信号により全系への自動停止指令が出た。自動停止の動作中も揺れは続き、天井材が降り落ちる中、運転員は必死に監視モニタを支え、プラント状態を監視し続けた。天井からの落下物から身を守るため机の下に潜っても、机自体が大きな揺れで動いてしまい役に立たなかった。連絡する電力系統の停電により、発電所は全停となり、隣接する常磐共同火力から最低限必要な非常用電源を受電するまでは、無停電電源を頼りに実証機の状態が監視された。

### 【津波】

揺れの合間を縫うように設備担当者全員が中央操作室に辛うじて駆けつけた。揺れるモニタを押さえつけ設備の状態を把握しようと格闘しているところに、「車が流されてる」との声が出た。津波という言葉自体が思い浮かばなかったのだ。

実証機の排熱回収ボイラ(HRSG)は最も海側に位置したため、HRSGの制御装置、給水ポンプ、防音壁は真っ先に津波にのみこまれ、続いて全設備に津波の勢いが廻った。設備全域の浸水は地上2m程度に及び、海辺に近かったCCP研究所の事務棟は水位が地上3m近くに達した。

3月11日は一晩中断続的な揺れが続き、津波の前兆である潮の引きが常磐共同火力側で繰り返し観測された。夜間は常磐共同火力のサービスビルの屋上からサーチライトが照らされ、津波の2次被害を止める体制が取られた。

### 【設備の緊急対応】

停電によりターニングモータが動かない状態でタービンは自然放冷された。タービンの焼き付き・反りを回避するため、ハンドターニングが夜を徹して行われた。その他の設備でも安全停止に向けた緊急の対応が続けられた。また、大きな余震が頻発したため、起動用の液体燃料やガス精製用ユーティリティ等、設備全体の安全確認に加え、安全停止に必要なユーティリティの確保が進められた。

安全停止に必要なユーティリティの一つに防火用水がある。津波の直撃を受けたHRSG設備の近くには脱硝用のアンモニア貯槽があり、停電によるフェイルオープン機能により防火用水が散水され続けていた。余震による他の設備での不測の事態に備え、防火用水はこれ以上無駄にはできない。深夜、津波による泥沼を歩くため靴紐を固く結び、いつもと違い静まり返ったプラントを月光と懐中電灯のみを頼って進み、散水を止めに行った。しかし、津波の再来を知らせるサーチライトに照らされ目的を達せず引き返すことになり、防火用水の残量を減らしてしまうということもあった。



図1 津波にのまれるIGCC設備(アンモニア設備は自動で散水されている)

### 【緊急体制の構築】

被災状況の把握、安全体制の確保、物資の供給、および復旧の見通しを立てることが被災後には重要となった。震災からの復旧に向けた緊急体制が実証試験本部内で整えられ、設備の被災情報や復旧見込みの情報が徐々に集められてきた。海沿いにあり甚大な被害を受けた事務棟でも、緊急体制が整えられ、地域の被災情報や物資の供給に関する情報、石炭を保管している小名浜港の情報等が集められた。

### 【設備の損傷】

時を追って地震と津波による深刻な被害が明らかになってきた。特にガス精製設備では熱交換器の脱落等、設備が大きな損傷を受けていた。また実証機は湿式のガス精製設備を有することから、フロア面に多くのポンプやモータを保有している。これらのモータや制御装置、電源ケーブル等が津波により損傷していた。海水に浸かったケーブルは浸食が進む前に切断された。海岸線に最も近かったHRSG設備では、蒸気タービン用の高圧、中圧ポンプがいずれも損傷を受けた。HRSGの制御室内は壊滅的な状況であった。IGCC特有の設備であるガス化炉は地震で大きく揺れ、ガス化炉の振れを止める金属製のストッパーは破損した。しかし、揺れに対してもガス化炉本体は致命的な損傷を受けず、運転再開への明かりも一部で見え始めた。

### 【貯炭場】

実証機で使用される小名浜港の貯炭場は、構造の弱



図2 小名浜港の揚炭機とバース（地面が陥没している）

い矢板式であったことから大きな損傷を受けていた。巨大な揚炭機も脱線した状態で傾いており、陥没や傾斜で貯炭場には車も入れない状況であった。石炭は津波の直撃を受け、海水混じりの燃料となった。小名浜港の他の貯炭場も地面が陥没・損傷しており、石炭の置き場が不足する状態が続いた。また、実証機は震災の翌週から炭種変化試験を予定していたため、実証機にとって未経験の中灰融点炭が貯炭場の大きな部分を占有していた。

### 【直下型の余震】

設備の復旧作業がようやく進み始めた4月11日、いわき市直下で震度6弱の巨大な余震が発生した。続く4月12日、またしても震度6弱の直下型の余震が発生した。これらの余震の揺れは3月11日の本震と同程度であったが、直下型であったため、予兆もなく急激な揺れが襲った。幸いなことに人的な被害はなかったものの、設備の損傷は拡大し、設備付近の送電系統も損傷を受け、設備の復旧工程に大きな影響を及ぼした。

### 【設備の復旧】

設備の復旧は海水汚泥の除去による工事用アクセス路の確保から始まった。作業用の仮設電源、仮設コンプレッサーが確保された。ガス化設備は緊急停止したため大量のチャーが炉内に残っており、困難を極める炉内の清掃と点検が行われた。また、エレベータが使用できないため地上約60mのガス化炉トップまで窒素ポンペを担ぎ上げ、操作用の計装空気を窒素で代用してポーラスフィルタのパーズ操作が行われた。

震災は東日本の広い範囲に及んだため、設備を修復するための物資の流通が滞った。津波に浸った電気設備で部品供給が見込めないものは純水で洗い、天日で干して仮復旧させた。

被害が甚大だったガス精製設備では、地元の鉄工所の協力のもと、脱落した熱交換器のつり上げ・再設置が行われた。水没したポンプやモータも被害の大きいものは工場に持ち帰り、比較的被害の小さいものは現場で分解・点検・整備が行われた。

実証機では窒素や蒸気を設備内で連係利用してい

るが、連係利用のための配管に漏れなどがないか細かく点検された。また、基礎地盤の沈下や構造物の支柱の損傷も併せて復旧された。工業用水や純水等のユーティリティも徐々に調達されるようになっていった。

被災したエリアの南の方から発電所復旧の知らせが届くようになった。実証機でも2011年の夏季重負荷時期の供給力として貢献できるよう、7月中を目途とした運転再開計画がたてられ、従業員の尽力、常磐共同火力の協力、自治体・地域の協力、協力会社・メーカーの緊急応援により、設備の復旧が進められた。6月中旬には待ちに待った所内用の電力が届き、それまでに着々と進めてきた復旧作業が、各機器の試運転調整段階に入った。

7月28日、実証機は石炭ガス化ガスによる運転を再開したが、蒸気タービンのリークにより一旦発電を停止した。8月10日に運転を再開し、震災から5か月後の8月11日、定格出力での発電状態まで復旧し、供給力として戦列に復帰した。

発電状態に復旧した後は、設備の確実な運用に所員全員の力が集中した。実証機を最大出力で発電し続けるため、小名浜港の石炭の使い方が毎日のように変更された。海水が混入した石炭は出力に影響しない範囲で新しい石炭と混炭して利用された。実証試験として計画していた炭種の試験も遂行する必要があり、震災前から保有していた中灰融点炭は混炭方法を変更して試験に利用された。発電再開以降、設備は最大出力での運転を継続したものの、震災で受けたダメージは大きく、設備の一部は健全な状態での運用とは言い難かった。

### 【重負荷期の供給力と将来】

2011年8月の夏季の電力重負荷期に向け、各地で節電の呼びかけや、緊急電源の準備が行われる中、実証機は重要な供給力としての役割を担った。8月11日以降の高出力運転は11月まで続き、当時の連続運転時間の最長を記録した。新技術であることや機器点数が多いという実証機ならではの事情を抱えながらも、重要な時期に供給力として貢献できたことは、協力会社、メーカー、そしてCCP研究所社員の「チーム

IGCC」としての誇りであり、地域にとっての希望にもなった。また、共に被災し復旧に全力を尽くしながら人事異動により定格出力を見ることなく勿来の地を去ったメンバーの経験も、復旧のノウハウの形で後任に引き継がれていった。

震災の経験は自然災害への実証機の耐性を確認することにもなり、信頼性の向上につながったものと考えられる。長期に及ぶ震災からの復旧を無事故・無災害で乗り越えられたことは、日常からの安全教育と緊急時への備えの賜物でもある。IGCCが将来、国内外の自然災害の多い地域に導入されていく場合、東日本大震災の経験が活かされ、緊急時の適応能力が如何なく発揮されることであろう。



図3 静かな海とフルパワーのIGCC（ガス化炉トップより2011年末に撮影）

## コラム 5：実証試験におけるスラグ有効利用

IGCCにおける石炭灰は、粒径数mmの粒状あるいは針状のガラス質スラグとして排出される(図1)。スラグの主成分は二酸化ケイ素、酸化アルミニウムであり、その他に酸化鉄、酸化カルシウム、酸化マグネシウム、酸化カリウム、酸化ナトリウムなどで構成され、それらの含有割合は原炭の灰組成と同程度である。スラグは、密度が大きい、未燃分を含まない、微量物質の溶出がほとんどないという特長があり、土木建築分野などへの有効利用が期待できる。

IGCC実証機から排出されるスラグは、セメント原料や道路の路盤材に用いられており、一連の実証試験で発生したスラグは全て有効利用されている。また、有効利用先の拡大の検討として、アスファルトやコンクリートの骨材への適用について検討された<sup>(1)</sup>。アスファルト骨材としては、常磐共同火力株式会社勿来発電所構内の道路の舗装に適用しており、石炭運搬用の大型トラックの荷重にも十分耐えうる強度が保たれていることが検証されている(図2)。コンクリート骨材としては、スラグ混合率の異なるプレキャストコンクリート側溝を製造し、発電所近隣の道路に試験施工しており、一般製品と同様の実用性を有することを確認している(図3)。

今後IGCCの導入が進むことによって、スラグ発生量の増大が予想される。スラグの有効利用先を拡大すると共に、用途に適した性状のスラグを効率的に製造する技術が必要となろう。IGCCスラグが一般的に広く活用されるよう、有効利用方法に適合する製品スラグの規格化が待たれるところである。



図1 IGCC スラグの外観

図2 道路舗装のアスファルトへの利用<sup>(1)</sup>図3 コンクリート成型製品への利用<sup>(1)</sup>



# 第3章

## 実証試験結果の評価

<b>3-1</b>	<b>ガス化炉設備</b>	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
<b>3-2</b>	<b>ガス精製設備</b>	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
<b>3-3</b>	<b>複合発電設備</b>	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
<b>3-4</b>	<b>設備間の関係</b>	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
<b>3-5</b>	<b>IGCC商用機に向けて</b>	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まとめ、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

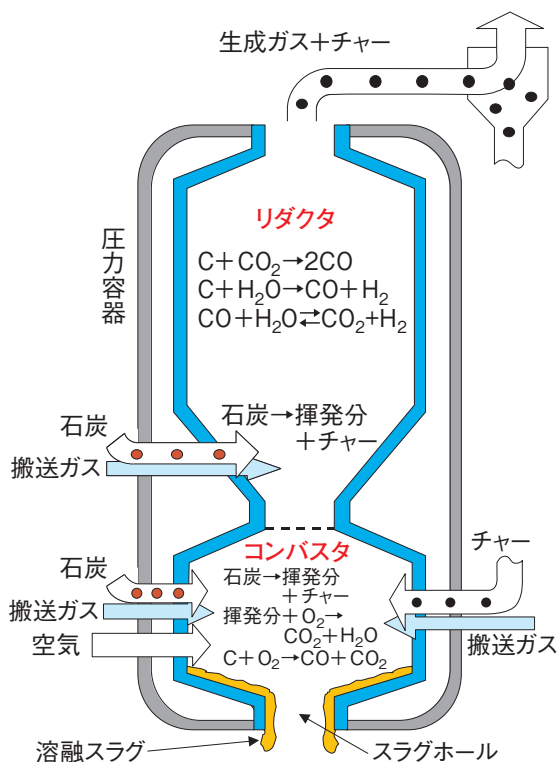


図 3-1-1 空気吹き二段噴流床石炭ガス化炉の概略

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工業株式会社は、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"> <li>約 20 炭種のガス化特性を取得</li> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 炭種のガス化試験により各炭種のガス化特性を取得</li> <li>酸素富化による生成ガス発熱量増大効果を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>瀝青炭および亜瀝青炭合計 9 炭種で安定出力を達成</li> <li>生成ガス発熱量とチャー生成量の予測技術を確認</li> </ul>
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"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>テーブルフィーダ方式でオーバーフィード現象を経験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高濃度搬送システムによる安定供給を検証</li> <li>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</li> <li>精密脱塵システムの信頼性を実証</li> </ul>
スラッキング特性・灰付着特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>伝熱管灰付着時の伝熱特性基礎データを取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内スラッキング現象が発生、炉改造により解決</li> <li>熱交部チャー堆積特性、付着時の伝熱性能を把握</li> <li>除灰装置の効果を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>
熔融スラグの排出特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>スラグタップ形状のノウハウ取得、200T/日炉改造案に反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>スラグタップ形状変更によりスラグ排出性改善</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>高灰融点炭に適合する運転手法を確認</li> <li>スラグ排出監視を自動化</li> </ul>
運転特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>789 時間連続運転での安定運転性を確認</li> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電プラント全体としての起動・停止要領を確認</li> <li>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）</li> <li>目標を超える熱効率（LHV ベース送電端効率 42.9%）を達成</li> </ul>
材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体研究により要部材質の減肉、腐食状況を把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各部の減肉、腐食状況を把握し、適切な材料を選定</li> </ul>
ガス化炉スラグの有効利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>約 10 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>セメント原料および道路用資材として全量有効利用</li> </ul>

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溶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、スラグホールでの溶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<sup>(1)(2)</sup>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  $\kappa$ - $\epsilon$ 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<sup>(3)(4)</sup>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<sup>(注1)</sup>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

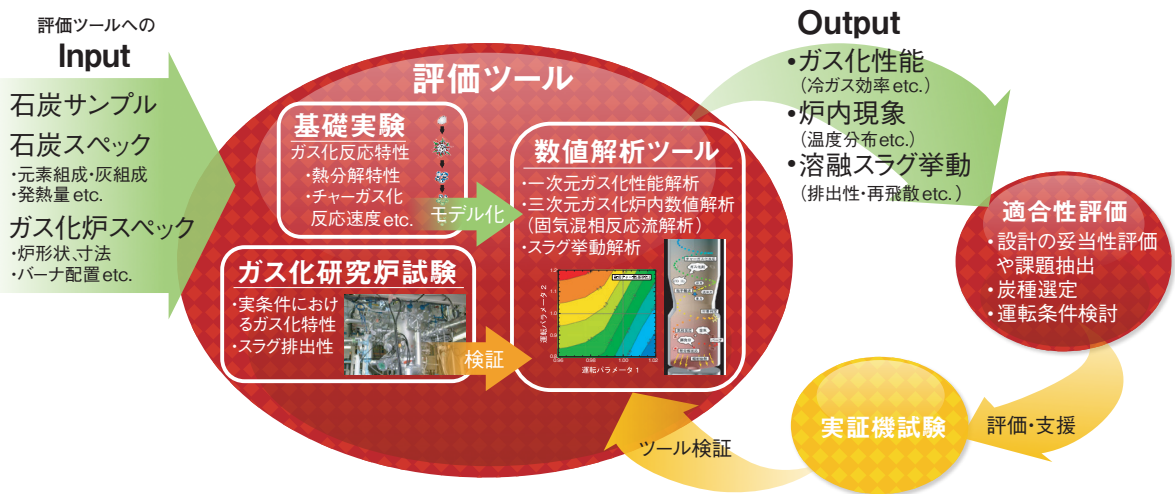


図3-1-2 当研究所のガス化炉設計評価・炭種適合性評価手法の概要

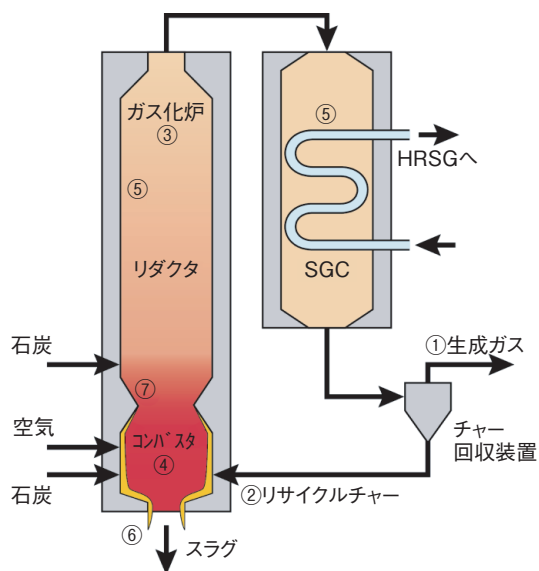
中未燃分やガス組成の炉内分布や各成分毎の流量が明らかになるので、ガス化炉出口におけるこれらの情報から冷ガス効率<sup>(注2)</sup>や炉内炭素転換率<sup>(注3)</sup>というガス化性能を算出できる。図3-1-5には、ベース空気比におけるガス化性能に対する比として、空気比による変化を示した。空気比を下げることで生成ガス発熱量が増加し冷ガス効率は向上する一方、炉内炭素転換率が低下し生成チャー量は増加する傾向が定量的に確認された。

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

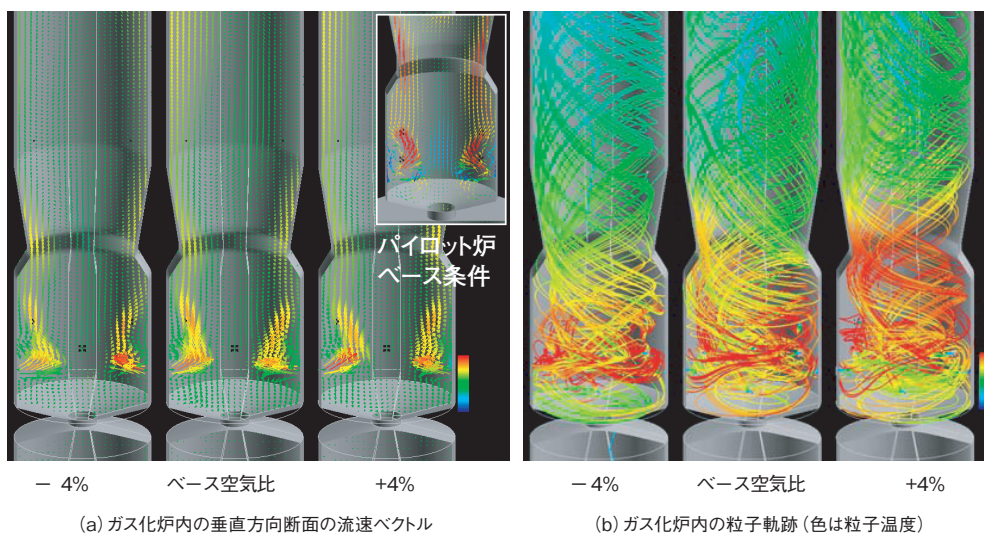
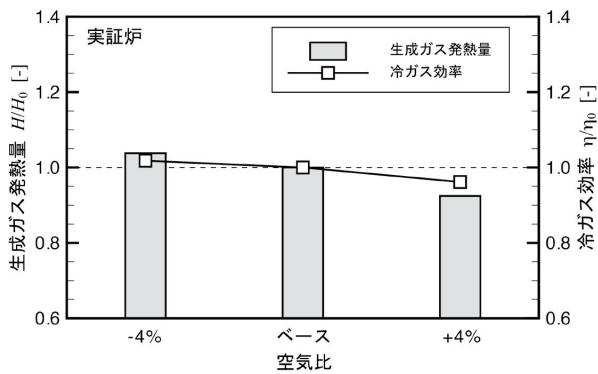


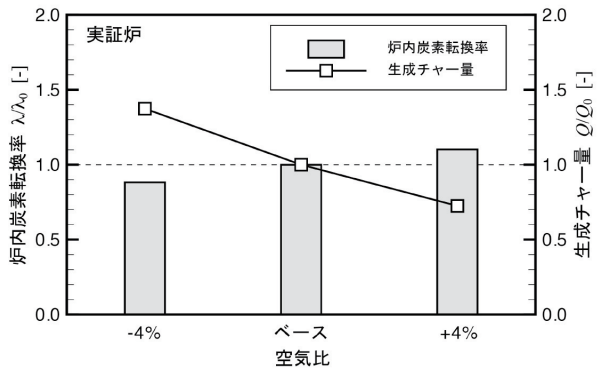
図 3-1-4 実証機ガス化炉内現象の解析結果

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）

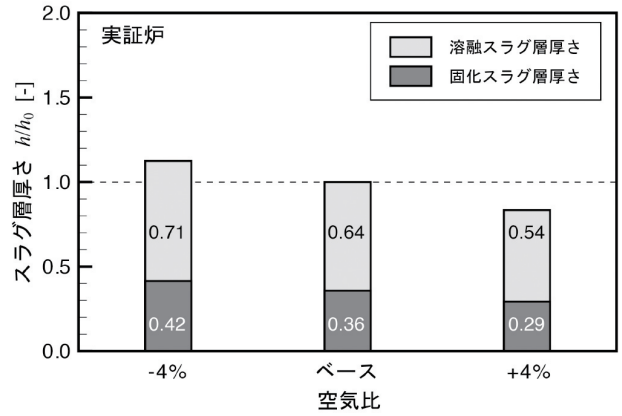


図3-1-6 ガス化炉底部のスラグ層厚さの予測（ベースに対する相対値）

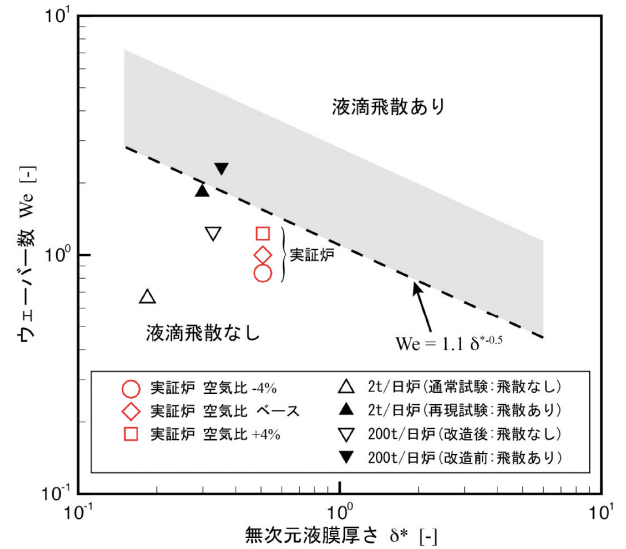


図3-1-7 灰飛散現象発生の評価

### (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<sup>(5)(6)</sup>。

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。

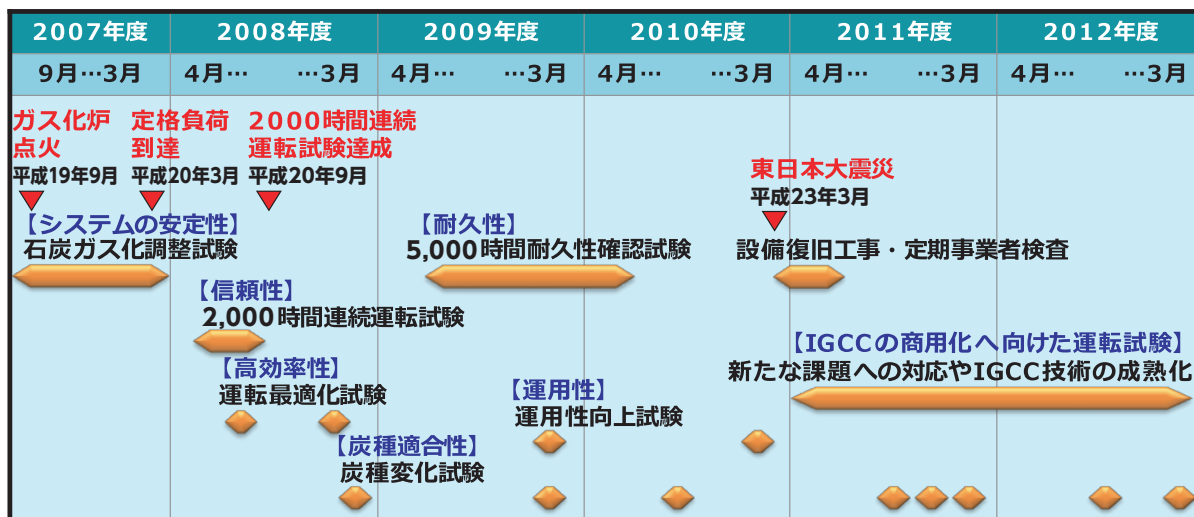
耐久性確認試験では、計画外停止を伴うトラブルが発生したが、何れも対策を行うことで長期的なプラントの運用が可能であった。図3-1-8に示すように、チャー回収系の回転バルブからのチャーのリーク、スラグ排出コンベアのトリップ、微粉炭集塵機からの微粉炭リーク、チャーバーナ冷却管からの冷却水リーク、ガス化炉後流の熱交換器(SGC:Syn-Gas Cooler)における差圧上昇など、トラブルの大半がガス化炉設備(付帯設備を含む)で発生した<sup>(7)(8)</sup>。

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<sup>(9)</sup>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

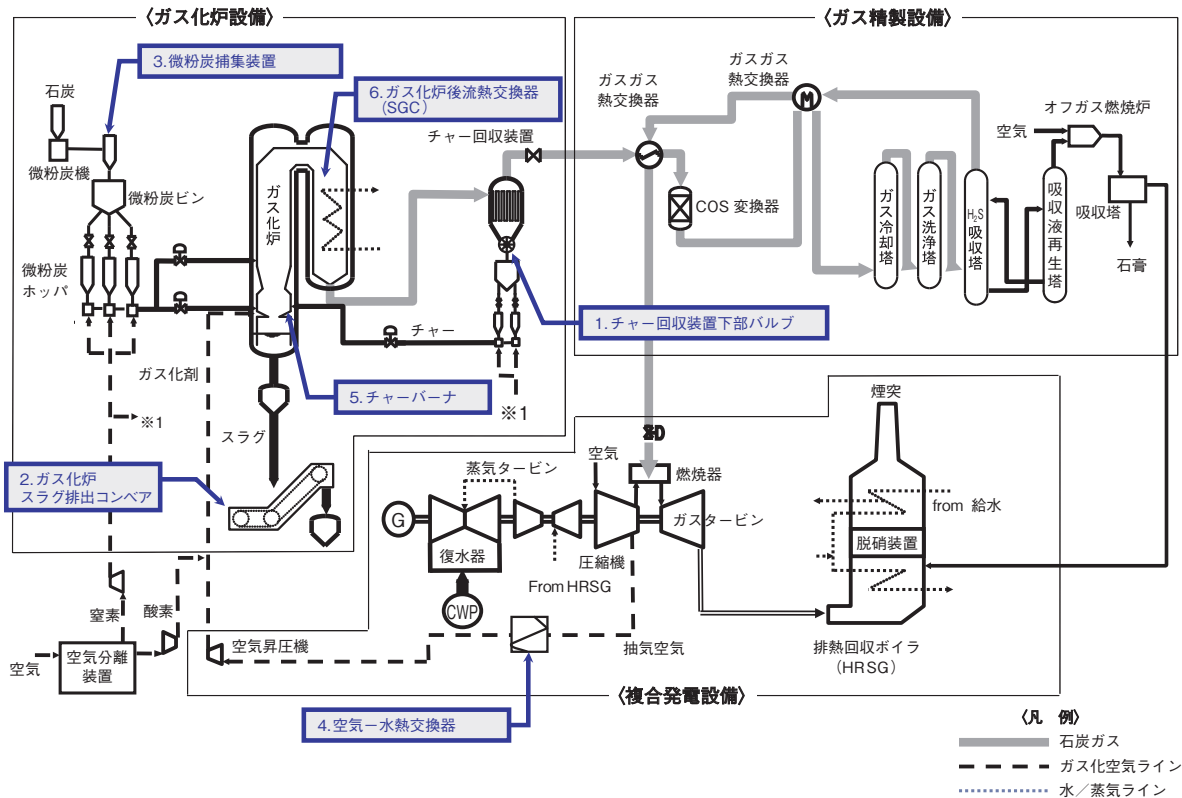


図3-1-8 実証機の構成と主なトラブルの発生箇所<sup>(8)</sup>

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

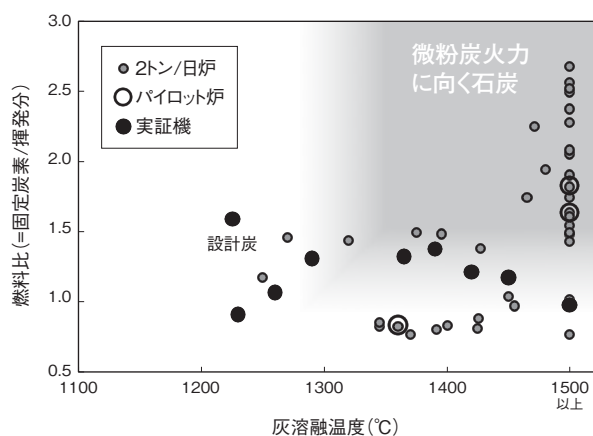


図 3-1-9 供試炭の特徴

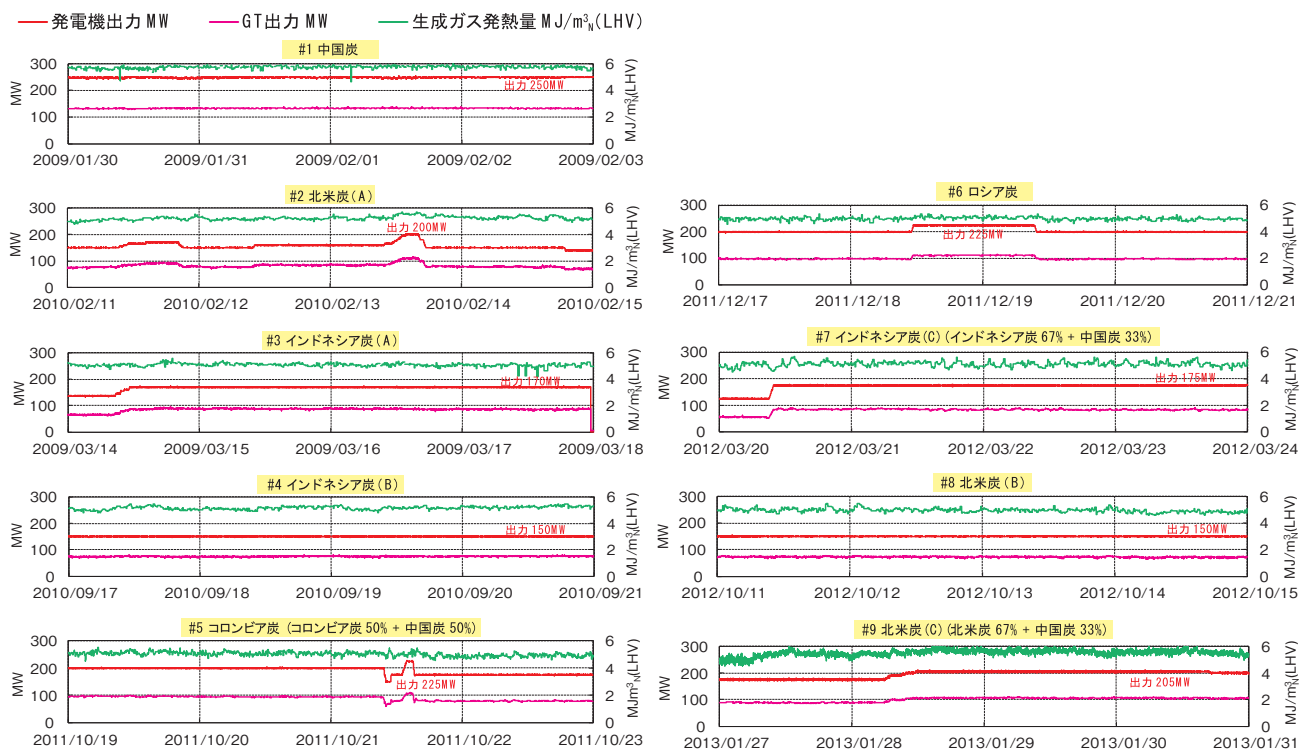


図3-1-10 炭種変化試験実績(左軸:出力、右軸:生成ガス発熱量)

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。

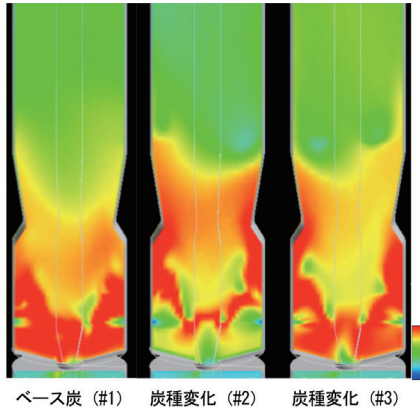


図 3-1-11 炭種変化試験におけるガス化炉内現象の解析結果 (ガス化炉内温度分布)

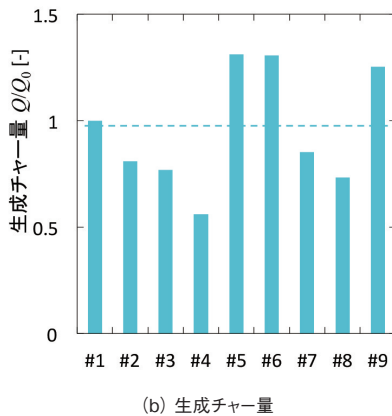
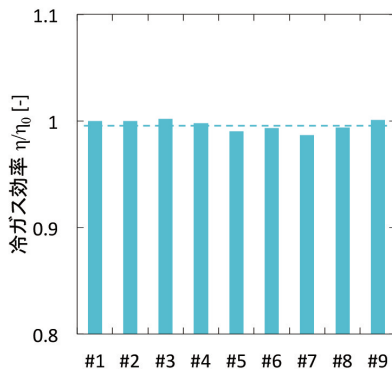


図 3-1-12 定格条件における各炭種のガス化性能予測 (同一空気比、ベース炭 #1 に対する相対値)

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

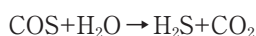
IGCC用のガス精製設備には、排ガスの環境対策の観点から、 $SO_x$ 排出に関わる全硫黄( $H_2S+COS$ )濃度を50ppm以下、 $NO_x$ 排出に関わる $NH_3$ 濃度を10ppm以下



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<sup>(10)</sup>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。

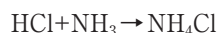
湿式ガス精製設備に入る集塵後の石炭ガス化ガスは、まずCOSの加水分解反応



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て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NH<sub>3</sub>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 (NH<sub>4</sub>Cl) が生成する。NH<sub>4</sub>Cl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NH<sub>4</sub>Cl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NH<sub>3</sub>、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NH<sub>3</sub>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

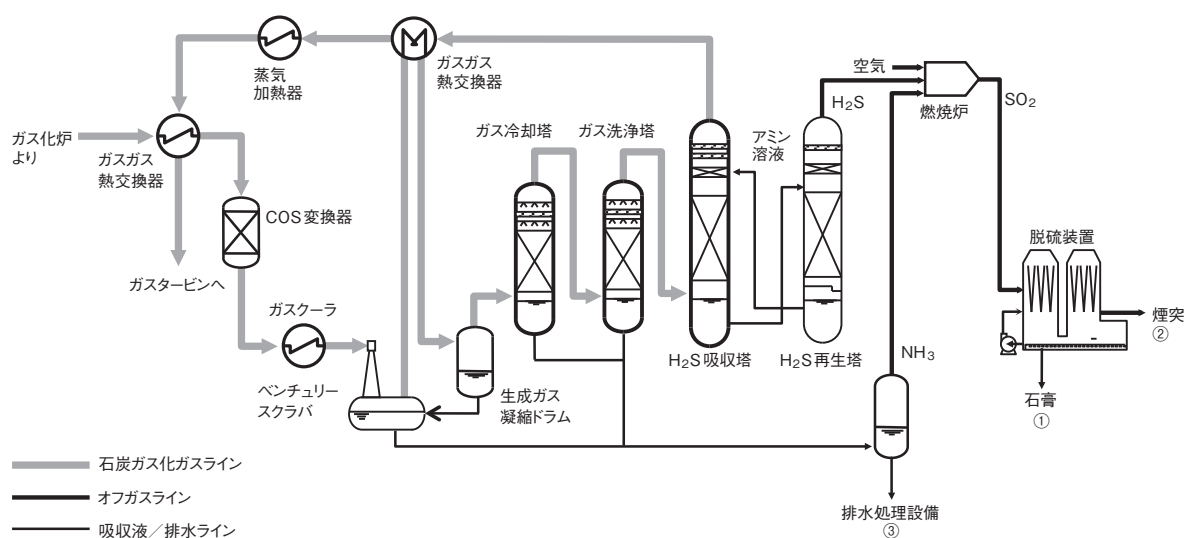


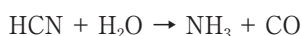
図3-2-1 IGCC実証機のガス精製設備の構成

H<sub>2</sub>Sを除去する。H<sub>2</sub>S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、H<sub>2</sub>S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H<sub>2</sub>Sは、燃焼炉で焼却してSO<sub>2</sub>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NH<sub>3</sub>の大半が除去されるので、燃料中窒素に由来するNO<sub>x</sub>(Fuel-NO<sub>x</sub>)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<sub>x</sub>(Thermal-NO<sub>x</sub>)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(H<sub>2</sub>S+CO<sub>2</sub>)濃度50ppm以下、NH<sub>3</sub>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<sup>(11)</sup>。COS変換器でHCNがNH<sub>3</sub>

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NH<sub>3</sub>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<sub>x</sub>排出濃度8ppm、NO<sub>x</sub>排出濃度5ppm、ばいじん排出濃度4mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>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、CO<sub>2</sub>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H<sub>2</sub>SおよびCO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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

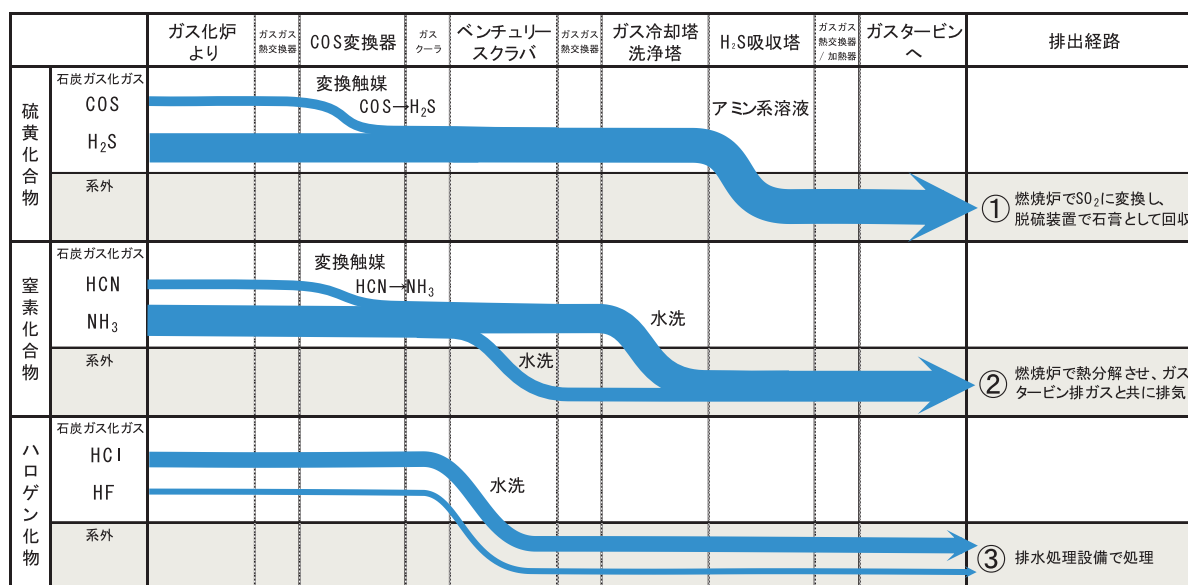


図3-2-2 湿式ガス精製における不純物の挙動

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CO<sub>2</sub>の一部も吸収するため、CO<sub>2</sub>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H<sub>2</sub>S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H<sub>2</sub>S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、H<sub>2</sub>S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、CO<sub>2</sub>濃度が高い場合には段数を少なくしてCO<sub>2</sub>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。H<sub>2</sub>S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）<sup>(12)</sup>

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

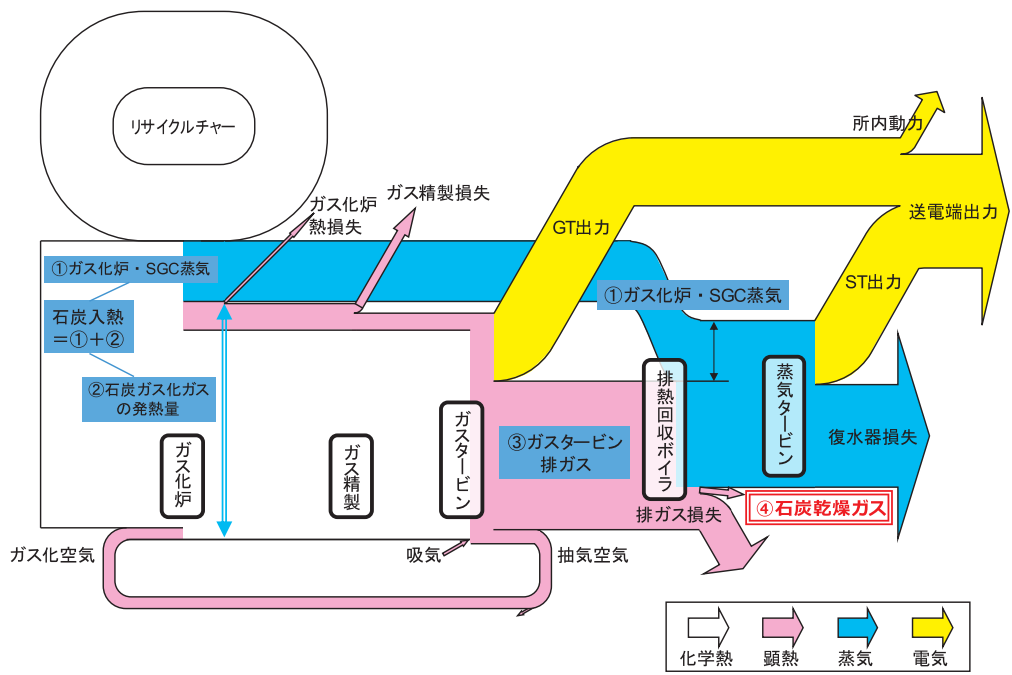


図 3-3-1 IGCC システム全体のエネルギーの流れ

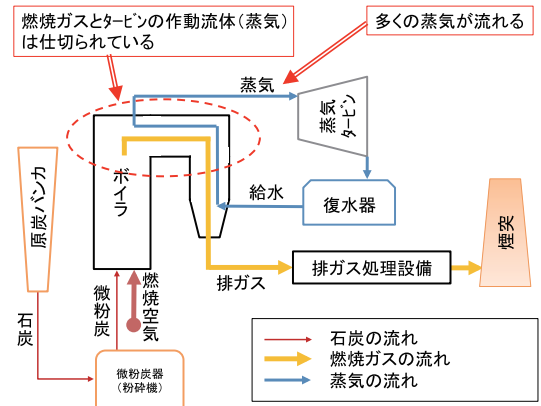


図 3-3-2 従来型微粉炭火力発電の構成

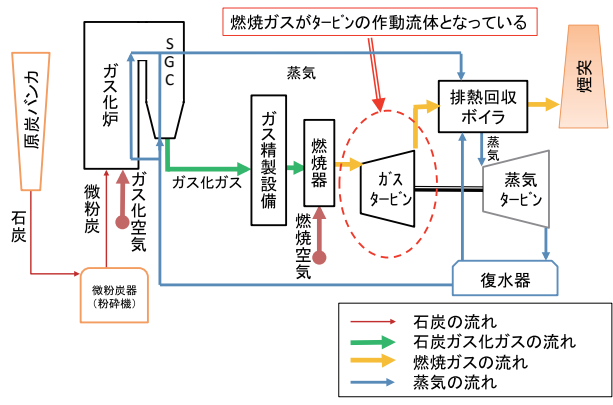


図 3-3-3 IGCC 実証機の構成

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

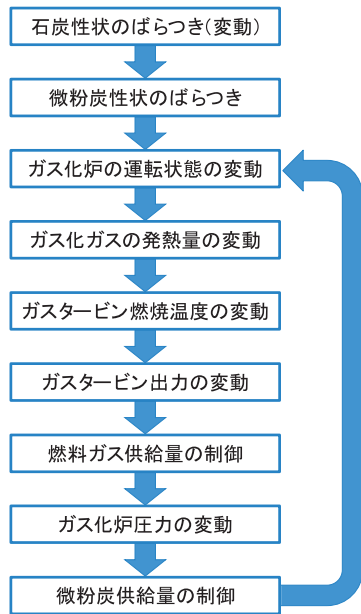


図 3-3-4 石炭性状のばらつきがガスタービン出力変動に影響するスキーム

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

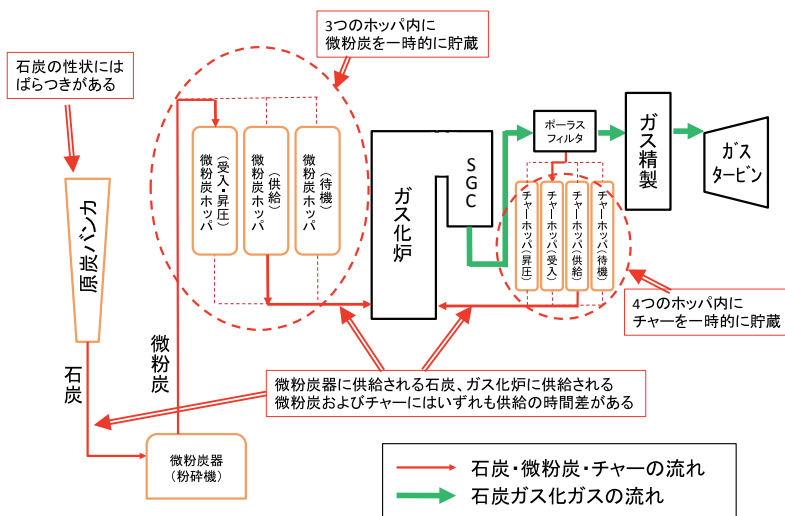


図 3-3-5 実証機のホッパ方式による微粉炭供給  
(従来の微粉炭火力では微粉炭器で粉砕された石炭は直ちにボイラに供給される)

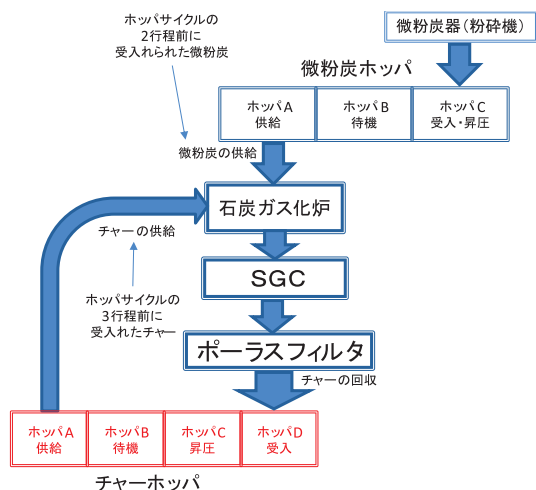


図 3-3-6 ホッパーの状態とガス化炉への供給タイミング

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

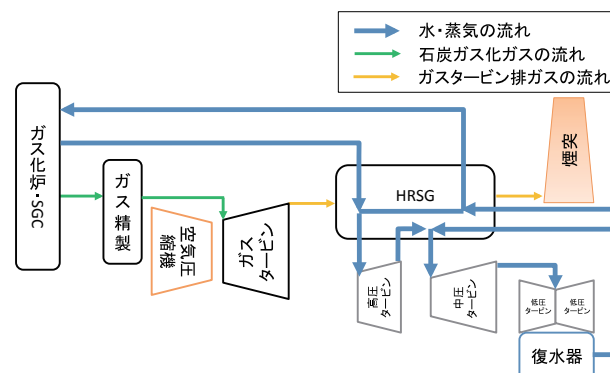


図 3-4-1 実証機における設備間での蒸気の連係利用

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

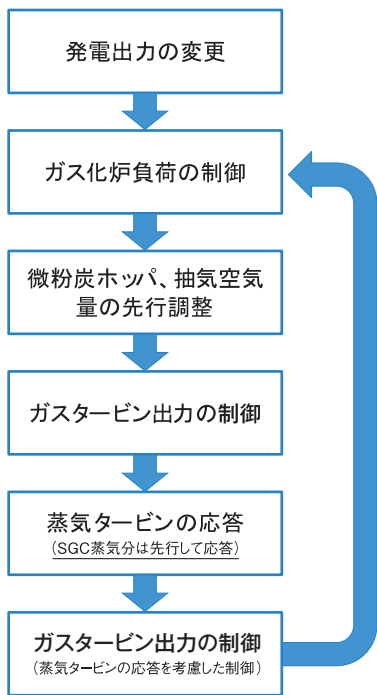


図 3-4-2 発電出力変更時の運用変化

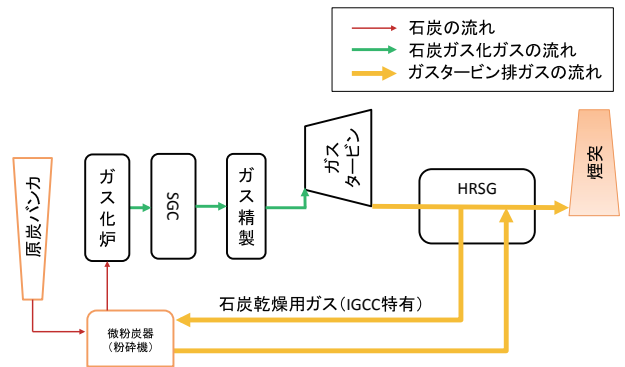


図 3-4-3 石炭乾燥用ガスの取り出し



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CO<sub>2</sub>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

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

(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。

天然ガス焚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焚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、天然ガス焚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<sup>(13)(14)</sup>。

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<sub>x</sub>発生量の増加を抑えた低NO<sub>x</sub>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<sup>(12)(13)</sup>。

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連携し、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H<sub>2</sub>S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連携・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。

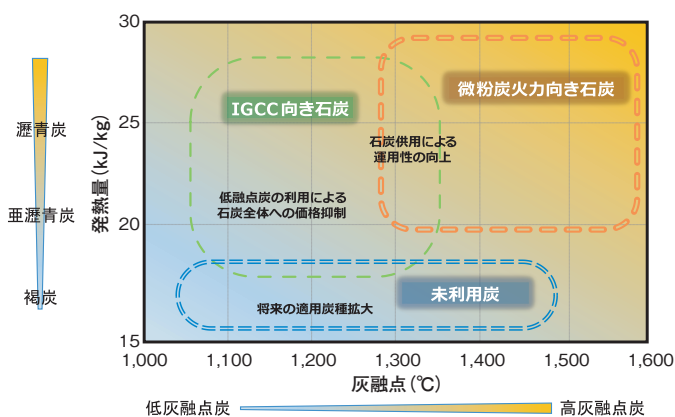


図 3-5-1 IGCC 適合炭種拡大の方向性



## 参考文献・資料等

### 第1章

- (1) BP : BP Statistical Review of World Energy 2015 (2015)
- (2) 経済産業省 : Cool Earth ―エネルギー革新技術計画 (2008)
- (3) 経済産業省 : エネルギー基本計画 (2014)
- (4) 経済産業省 : 長期エネルギー需給見通し (2015)
- (5) 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 : 次世代火力発電に係る技術ロードマップ中間とりまとめ (2015)
- (6) 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 : 次世代火力発電に係る技術ロードマップ技術参考資料集 (2015)
- (7) 通産省資源エネルギー庁公益事業部発電課編 : 21世紀に向けた石炭火力発電技術の展開―21世紀に向けた発電技術懇談会・火力部会 中間報告 (1996)
- (8) 日本エネルギー学会編 : 石炭の科学と技術、コロナ社、p.287 (2013)
- (9) 石橋 : 石炭ガス化複合発電 (IGCC) 商用設備の最新運転状況、課題と今後の展開、日本計画研究所 (2014)
- (10) 長崎、武田、穂山、熊谷 : 新たな石炭利用技術の事業化への取り組み ―酸素吹きIGCC+CCS―、日立評論、Vol.92、No.04、pp.290-293 (2010)
- (11) 荒木 : 大崎クールジェンプロジェクトの進捗状況、火力原子力発電、No.66、Vol.4、p.225 (2015)
- (12) The U.S. Department of Energy and Tampa Electric: The Tampa Electric Integrated Gasification Combined-Cycle Project An Update, CLEAN COAL TECHNOLOGY, TOPICAL REPORT NUMBER 19 (2000)
- (13) Craig Marchino : Edwardsport IGCC Station, Gasification Technologies Conference (2013)
- (14) CB&I : ウェブサイトE-Gas Technology Advantage (2015) <http://www.cbi.com/technologies/e-gas-technology-advantage> (2015.12.28確認)
- (15) The U.S. Department of Energy and Wabash River Coal Gasification Project Joint Venture : The Wabash River Coal Gasification Repowering Project An Update, CLEAN COAL TECHNOLOGY, TOPICAL REPORT NUMBER 20 (2000)
- (16) Ing, J.D. de Graaf : Shell Coal Gasification Technology, Lecture, Technische Universiteit Eindhoven (2008)
- (17) Agnieszka Leśniak, Marek Bieniecki : Energy production in selected integrated gas-steam IGCC systems powered by gas from coal gasification processes, CHEMIK, Vol.68, No.12, pp.1080-1085 (2014)
- (18) Seungmin Kim : Taeon IGCC Project Update, Gasification Technologies Conference (2015)
- (19) KEPCO-Uhde Inc. : Company Brochure (2014) <http://www.kepco-uhde.com/index.html> (2015.12.28確認)
- (20) Harry Morehead : Siemens Gasification and IGCC Update, Asia Pacific Partnership Meeting (2006)
- (21) Zhimin Huang, Jiansheng Zhang, Guangxi Yue : Status of domestic gasification technology in China, Front. Energy Power Eng. China, Vol.3, No.3, pp.330-336 (2009)
- (22) Guangyu Li : Industrial Application of Two Stage Dry Pulverized Coal Gasification Technology, Gasification Technologies Conference (2012)
- (23) 電力中央研究所 : 石炭ガス化複合発電の実現に向けて、電中研レビュー、No.44 (2001)
- (24) 電力中央研究所 : 石炭ガス化複合発電の実用化に向けて (その2)、電中研レビュー、No.23 (1989)
- (25) Richard A. Dennis, Walter W. Shelton, and Patrick Le : Development of Baseline Performance Values for Turbines in Existing IGCC Applications, Proceedings of GT2007, GT2007-28096 (2007)
- (26) Holt, N. : Coal-based IGCC Plants -Recent Operating Experience and Lessons Learned, Gasification Technologies Conference (2004)
- (27) U.S. Department of Energy : Tampa Electric Polk Power Station Integrated Gasification Combined Cycle Project -Final Technical Report (2002)
- (28) U.S. Department of Energy : Wabash River Coal Gasification Repowering Project -Final Technical Report (2000)
- (29) Casero, P. : Puertollano IGCC Power Plant -Operational Experience and Current Developments, Proceedings of 2nd International Conference on IGCC & XtL Technologies (2007)
- (30) Jason Crew : GE Gasification Project Update, Gasification Technologies Conference (2012)
- (31) Honghai Dong : GE Gasification Global solution, China focus, Gasification Technologies Conference (2014)
- (32) Tim Pinkston : Kemper County IGCC Project Update, Gasification Technologies Conference (2013)
- (33) Ron Gualy : TRIG™ Technology -Applications for IGCC, Refueling, and Syngas Projects, Gasification Technologies Conference (2012)
- (34) Sung Chul Kim : Overview of IGCC R&D Projects in South Korea, Gasification Technologies Conference (2011)
- (35) Chua Sze-Hong : Integrated Shell Gasification Value Proposition, Gasification Technologies Conference (2013)
- (36) Rob van den Berg : DEMONSTRATION OF THE SHELL-WISON BOTTOM QUENCH COAL GASIFICATION PROCESS, Gasification Technologies Conference (2014)
- (37) Harry Morehead : Siemens Gasification Technology-Improving Plant Economics Through Performance, Gasification Technologies Conference (2014)
- (38) Jayesh Shah : CB&I E-Gas Technology Progress on All Fronts, Gasification Technologies Conference (2015)
- (39) 石、久米 : 夕張・石炭ガス化試験場の研究開発、資源と素材、Vol.105、No.11、p.845 (1989)
- (40) 浜松、犬丸 : 石炭ガス化複合発電、火力原子力発電、No.529、Vol.51、No.10、p.288 (2000)
- (41) 原、犬丸 : V.開発技術V-4.石炭ガス化複合発電、火力原子力発電、No.649、Vol.61、No.10、p.156 (2010)
- (42) 長井、山下 : 低炭素社会の実現に向けた電力エネルギー・

環境技術Ⅳ.CO<sub>2</sub>削減技術 2) 石炭ガス化複合発電、火力原子力発電、No.637、Vol.60、No.10、p.61 (2009)

- (43) 木村：多目的石炭ガス製造技術 (EAGLE) の開発とCO<sub>2</sub>分離回収、石炭利用国際会議2008 (2008)
- (44) NEDO研究評価委員会：多目的石炭ガス製造技術開発 (EAGLE) 事後評価報告書 (2010)
- (45) 小俣：酸素吹き石炭ガス化システム、日本エネルギー学会誌、No.93、Vol.7、p.624 (2014)
- (46) Ono, T.: NPRC Negishi IGCC Startup and Operation, Gasification Technologies Conference (2003)
- (47) 小菅、武田、水野、加藤：石炭ガス化技術 (ECOPRO<sup>®</sup>) による褐炭利用技術の開発、日本エネルギー学会誌、No.93、Vol.11、p.1106 (2014)
- (48) 高藤、劉、坪井、PAETHANOM、大原、藤森、藤吉、谷、渡邊：二塔式循環流動層ガス化炉 (TIGAR<sup>®</sup>) によるガス化技術の開発、日本エネルギー学会誌、No.93、Vol.11、p.1115 (2014)

#### コラム 1

- (1) Oki, Y.: Development of High-Efficiency Oxy-fuel IGCC System, Gasification Technologies Conference (2013)

#### コラム 3

- (1) 小野崎、坪井：米国と中国のIGCCの現状、季報エネルギー総合工学、第37巻、第3号、p.44 (2014)
- (2) Jeffrey Goldmeier : GE Syngas Turbines to Debut at IGCC Plant, Power Engineering (2010)
- (3) NETL, DOE : Advanced Turbines-Technology Program Plan, Clean Coal Research Program (2013)
- (4) Juergen Karg : IGCC experience and further developments to meet CCS market needs, COAL-GEN EUROPE (2009)
- (5) John Xia, Josh Kovac, Gerry McQuiggan, Ben Wolfe : SGT6-5000F (W501F) Engine Enhancements to Improve Operational Flexibility, POWER-GEN International 2005 (2005)
- (6) 三菱日立パワーシステムズ：世界最大級高効率2軸型ガスタービン (H-100)、三菱重工技報、Vol.52、No.2、p.10 (2015)
- (7) 木村、井上、西村、藤本、本多：石炭焼き火力から環境に配慮した最新F形ガスタービンコンバインドプラントへのリプレースー東北電力 (株) 仙台火力発電所第4号機一、三菱重工技報、Vol.48、No.1、p.6 (2011)
- (8) 坂本、品田、佐々木、流森、横濱：IGCC 石炭ガス化複合発電プロジェクトの動向、三菱重工技報、Vol.52、No.2、p.88 (2015)
- (9) 伊藤、塚越、正田、石坂、斉藤、鳥越：超高温ガスタービンの要素技術の開発、三菱重工技報、Vol.52、No.2、p.15 (2015)

#### コラム 5

- (1) 長井：石炭ガス化複合発電 (IGCC) 実証プラントの開発、日本ガスタービン学会誌、Vol.37、No.2、p.28 (2009)

### 第3章

- (1) 渡邊、大高、犬丸：石炭ガス化炉数値解析技術の開発、日本機械学会論文集B編、Vol.70、pp.1856-1863 (2004)
- (2) Watanabe, H., Otaka, M. : Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier, Fuel, Vol.85、pp.1935-1943 (2006)
- (3) 梶谷、芦澤、渡邊、市川、鈴木、原、犬丸：石炭ガス化反応のモデリング、電力中央研究所報告 W02021 (2003)
- (4) 梶谷：石炭基礎講座 (11) 石炭ガス化反応機構、日本エネルギー学会誌、Vol.90、pp.1102-1112 (2011)
- (5) 犬丸、大高、渡邊：石炭ガス化炉内における溶融スラグ飛散現象の発生条件、電力中央研究所報告 W99031 (2000)
- (6) 犬丸、渡邊、大高、芦澤、市川：噴流床石炭ガス化炉内における溶融スラグ飛散現象の発生条件、日本機械学会論文集B編、Vol.75、pp.1576-1583 (2009)
- (7) 石橋：石炭ガス化複合発電 (IGCC) 実証機の実証試験終了と商用転用、エネルギーと動力、Vol.63 (2013 春季号)、pp.1-9 (2013)
- (8) 産業構造審議会産業技術分科会 評価小委員会：次世代電力供給システムに係る技術に関する施策・事業評価報告書 (2011)
- (9) Asano, T. : Progress in Japanese air-blown IGCC demonstration project update, Coal Gasification Symposium (2012) <http://www.joban-power.co.jp/igccdata/research/memoir.html> (2015.12.28 確認)
- (10) 荒木、花井：200t/d 石炭ガス化発電パイロットプラントでの研究成果、日本エネルギー学会誌、Vol.75、pp.839-850 (1996)
- (11) Honjo, S., Susaki, M., Okino, S. and Yasutake, T. : 250MW IGCC demonstration start up - MHI gas clean-up system -, Proceeding of the 25th Annual International Pittsburgh Coal Conference (2008)
- (12) Nunokawa, M. and Asano, T. : Progress and Utilization of Nakaso 250MW air-blown IGCC demonstration project, Bulletin of the JSCE, Mechanical Engineering Journal, Vol.2 No.5 (2014)
- (13) 坂本、品田、佐々木、流森、横濱：IGCC 石炭ガス化複合発電プロジェクトの動向、三菱重工技報、Vol.52、No.2、p.88 (2015)
- (14) Sakamoto, K. : MHPS IGCC Technology (Air-blown IGCC -from Demonstration to Commercial stage-), Gasification Technologies Conference (2014)

## 執筆分担

はじめに：東京大学 生産技術研究所 金子 祥三

1章：原 三郎、梶谷 史朗、沖 裕壮、小林 誠、  
百合 功、濱田 博之

2章：常磐共同火力株式会社 浅野 哲司、  
布川 信、吉葉 史彦、沖 裕壮

3章：梶谷 史朗、布川 信、吉葉 史彦、原 三郎、  
木戸口 和浩、梅本 賢、梅津 宏紀、  
常磐共同火力株式会社 浅野 哲司



**原 三郎**

エネルギー技術研究所 副研究参事  
高効率発電領域

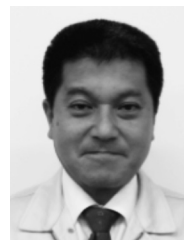
専門分野：反応工学、伝熱流動、  
プラントシステム



**梶谷 史朗**

エネルギー技術研究所 上席研究員  
高効率発電領域

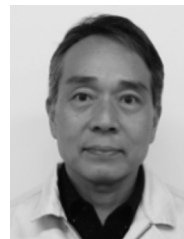
専門分野：反応工学、プラントシステム、  
燃焼



**沖 裕壮**

エネルギー技術研究所 上席研究員  
高効率発電領域

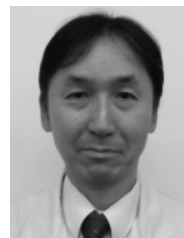
専門分野：反応工学、伝熱流動、  
プラントシステム、燃焼



**小林 誠**

エネルギー技術研究所 上席研究員  
燃料高度利用領域

専門分野：反応工学、プラントシステム



**百合 功**

エネルギー技術研究所 上席研究員

専門分野：燃焼、構造材料

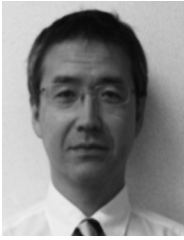


**濱田 博之**

エネルギー技術研究所 主任研究員  
高効率発電領域

専門分野：伝熱流動





**浅野 哲司**

常磐共同火力株式会社 勿来発電所  
石炭ガス化発電事業本部 次長

主な職歴：コンバインドサイクル発電設備  
建設、IGCC 設備運用



**木戸口 和浩**

エネルギー技術研究所 上席研究員  
高効率発電領域

専門分野：反応工学、伝熱流動



**布川 信**

エネルギー技術研究所 上席研究員  
燃料高度利用領域

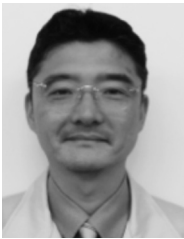
専門分野：反応工学、プラントシステム



**梅本 賢**

エネルギー技術研究所 主任研究員  
高効率発電領域

専門分野：化学工学、反応工学



**吉葉 史彦**

エネルギー技術研究所 上席研究員  
エネルギー変換領域

専門分野：プラントシステム、  
熱エネルギー利用



**梅津 宏紀**

エネルギー技術研究所 主任研究員  
高効率発電領域

専門分野：伝熱流動、反応工学

## 編集後記

電中研レビュー第57号「石炭ガス化複合発電技術 -空気吹きIGCC実証試験の成果-」をお届けします。

本分野の電中研レビューは、実証機計画の実施主体となった(株)クリーンコールパワー研究所が設立された2001年に、第44号「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-」が発刊されています。それから約15年ぶりに電中研レビューを発刊することといたしました。この間、250MW級の空気吹きIGCC実証機的设计・建設・運転試験が進められ、東日本大震災も経験しましたが、実証機計画を無事終了し、現在、常磐共同火力株式会社 勿来発電所10号機として商用化されています。

本号では、当研究所の支援研究成果も含め、国内初となる250MW空気吹きIGCCの実証試験結果を中心に、できるだけ分かりやすく、詳細に取りまとめました。本レビューが、IGCC技術へのご理解、今後の本格的なIGCC商用機の普及に少しでもお役に立てば幸いです。また、本冊子についてのご意見等をお待ちしております。

最後になりましたが、本レビューの“はじめに”をご執筆いただいた東京大学生産技術研究所 金子 祥三様、第2章及び第3章の一部をご執筆いただいた常磐共同火力株式会社 勿来発電所 石炭ガス化発電事業本部 次長 浅野 哲司様、実証試験結果を中心に内容へのご助言等をいただいた常磐共同火力株式会社、北海道電力株式会社、東北電力株式会社、東京電力株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、関西電力株式会社、中国電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社、電源開発株式会社ならびに三菱日立パワーシステムズ株式会社、三菱重工業株式会社の関係者の皆様に、心から感謝申し上げます。

## 既刊「電中研レビュー」のご案内



No.56  
地球温暖化の科学的知見  
と対策技術  
2015.11



No.55  
原子燃料サイクルバック  
エンド技術の信頼性向上  
に向けて  
2013.5



No.54  
アークプラズマとその応  
用技術  
—廃棄物処理と材料創製への適用—  
2010.12



No.53  
低線量放射線生体影響の  
評価  
2006.3



No.52  
コンクリートキャスク貯蔵  
技術  
—経済的な中間貯蔵実用化への挑戦—  
2006.2



No.51  
燃料電池発電技術  
—MCFC実用化への挑戦—  
2004.3



No.50  
電気事業とIT  
—情報通信技術で変える・変わる—  
2003.10



No.49  
未利用地熱資源の開発に  
向けて  
—高温岩体発電への取り組み—  
2003.3

No.48 送電設備の風荷重・風応答評価技術 2003.2

No.47 商用周波磁界の生物影響研究 2002.11

No.46 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— 2002.11

No.45 地球温暖化の解明と抑制 2001.11

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.43 酸性雨の総合評価 2001.2

No.42 原子力発電所の人工島式海上立地 2001.1

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 2000.11

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.39 新時代に向けた電力システム技術 2000.6

No.38 大気拡散予測手法 2000.3

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

ホームページ (<http://criepi.denken.or.jp/research/>) の研究内容から「電中研レビュー」を選択すると、上記のレビューは全文PDFをご覧いただくことができます。冊子をご要望の方は、広報グループへご連絡ください。



発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

---

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 (大手町ビル7階)

TEL: 03-3201-6601 FAX: 03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>