

特集：火力プラントにおける高効率化技術とCO₂削減の取り組み

石炭ガス化複合発電（IGCC）実証プラントの開発

長井 輝雄^{*1}
NAGAI Teruo

キーワード：石炭ガス化複合発電（Integrated gasification combined cycle），空気吹き噴流床ガス化炉（Air-blown entrained-flow coal gasifier），ガス精製（Gas cleanup）

1. はじめに

地球温暖化対策のために、原子力、あるいは風力や太陽光といった新エネルギーの導入が進められているところであるが、エネルギー安定供給のためには、埋蔵量が豊富で世界中に広く分布している石炭に頼らざるを得ないのが現実である。発電電力のなかで石炭火力の占める割合は、日本では25%程度であるが、米国では50%強、中国では約80%であり、世界的に見れば、石炭は今でも発電用燃料の主流である。特に、米国や中国では、古くて発電効率の低い石炭火力が数多く稼動し多くのCO₂を排出しているのが現状であり、高効率な石炭火力の開発は急務と言える。

現在日本で建設される微粉炭火力は、ほとんどが蒸気温度600°C程度の超々臨界圧（USC）ボイラを採用し、世界でもトップクラスの熱効率を誇っているが、送電端効率は42%程度（LHV）であり、さらに蒸気温度を上昇させても大幅な効率向上は望めない。そこで、石炭をガス化し、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた複合発電、すなわち石炭ガス化複合発電（IGCC）を採用することができれば、商用段階で送電端効率48~50%が可能となり、微粉炭火力に対して約2割の効率向上が可能となる。

（株）クリーンコールパワー（CCP）研究所は、日本がこれまで開発してきた空気吹きIGCC技術を完成させるため、開発の最終段階である実証プラントの建設、運転試験を行うために設立された。実証プラントは、福島県いわき市の常磐共同火力（株）構内にて、昨年9月に建設が完了し、既に運転を開始してほぼ1年間を経過した。運転試験は計画通り順調に進捗しており、2008年9月には、IGCC信頼性検証のための長期連続運転試験が成功裏に終了し、IGCCの商用化にむけて大きく前進したところである。

原稿受付 2009年1月16日

*1 株式会社クリーンコールパワー研究所 研究開発グループ
〒974-8222 福島県いわき市岩間町川田102-3

2. 海外IGCCとの比較

欧米においても、IGCCの実証プロジェクトが、1990年代から進められており、その概要を表1に示す。海外プロジェクトの共通の特徴は、ガス化炉の方式が酸素吹きだと言うことである。石炭をガス化する際に酸素を使うが、この酸素を製造するのに多くの動力を要するため、所内動力が大きくなり、送電端効率が低くなるのが難点である。図1に酸素吹きと空気吹きIGCCの効率比較を示す。

また、石炭を圧力の高いガス化炉に供給する際、ヨーロッパのIGCCは、乾いた微粉炭のままドライフィードするが、米国のIGCCは、水に溶いてスラリーにしてポンプで送り込む方式を採用しているので、さらに効率は低下する。

これに対し、日本のIGCCは、技術的難度は高くなるが、空気で石炭をガス化する「空気吹き」を採用し、さ

表1 海外IGCCとの比較

プロジェクト名 立地点	Buggenum オランダ	Puertollano スペイン	Wabash River 米国	Tampa 米国	勿来 日本
ガス化炉形式	酸素吹き ドライフィード (Shell炉)	酸素吹き ドライフィード (Plenflo炉)	酸素吹き スラリー・フィード (E-Gas TM 炉)	酸素吹き スラリー・フィード (GE炉)	空気吹き ドライフィード (MHI炉)
ガス化炉容量	2,000 t/d	2,600 t/d	2,500 t/d	2,500 t/d	1,700 t/d
発電端出力 (適用GT)	284MW 1100°C級GT	335MW 1300°C級GT	296MW 1300°C級GT	322MW 1300°C級GT	250MW 1,200°C級GT
実証試験 開始時期	1994年1月 1998年商用運転	1997年11月 現在商用に移行	1995年10月 2000年商用運転	1996年9月 2001年商用運転	2007年9月

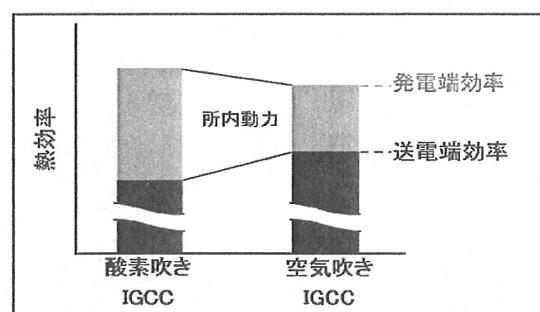


図1 IGCCの効率比較

らに、石炭の供給方式はヨーロッパと同様のドライファイードを採用しているので、世界のどのIGCCより高い送電端効率が得られるIGCCと言える。

3. IGCCの特徴

3.1 高い発電効率

図2に石炭火力発電の熱効率の推移を示す。日本の微粉炭火力では、効率向上のために、早くから超臨界圧ボイラを採用し、40%程度(LHV)の送電端効率で運転を行っていた。最近では、さらに蒸気の圧力と温度を上昇させた超々臨界圧(USC)条件を採用し、42%程度の効率となっている。さらに蒸気の圧力と温度を上昇させれば、効率は向上するが、材料の制約からなかなか難しいのが現状である。

ここにIGCCを適用すると、1200°C級のガスタービンと組み合わせて42%程度、1300°C級のガスタービンと組み合わせると45~46%程度、1500°C級のガスタービンと組み合わせれば48~50%の送電端効率を得ることが出来る。

我々の実証プラントは、出力規模を商用機の半分の25万kWに抑えるために、1200°C級のガスタービンを採用しているため、送電端効率はUSCプラントと同等の42%程度に留まっているが、商用機段階では、現在LNG火力で採用されている1500°C級ガスタービンと組み合わせて、出力50~60万kW、送電端効率48~50%程度が達成できる見込みである。

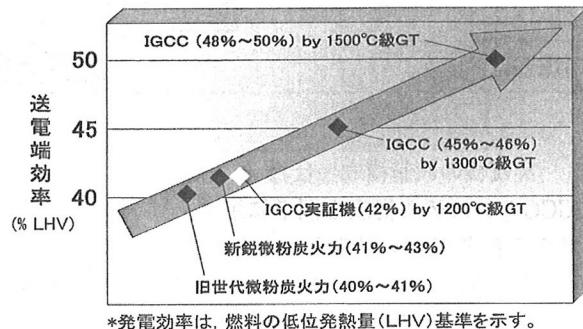


図2 石炭火力発電の熱効率推移

3.2 適用炭種の拡大

微粉炭ボイラは、燃焼温度が1400°C程度であるため、石炭灰は溶融せずにフライアッシュとして回収される。微粉炭ボイラに、灰融点の低い石炭を使用すると、ボイラ壁に溶融灰が付着して伝熱障害を起こす。

一方、IGCCのコンバスタでは、燃焼温度が1800°C程度と高いため、石炭灰は溶融状態となり、ガラス質の水碎スラグとして排出される。従って、IGCCの場合は、微粉炭火力とは逆に、灰融点の低い石炭の方が使い易い。図3に示すとおり、IGCC向きの灰融点の低い石炭は、北米、中国、インド、インドネシア等に広く分布している。

このように、IGCCでは、微粉炭火力で使い難い石炭

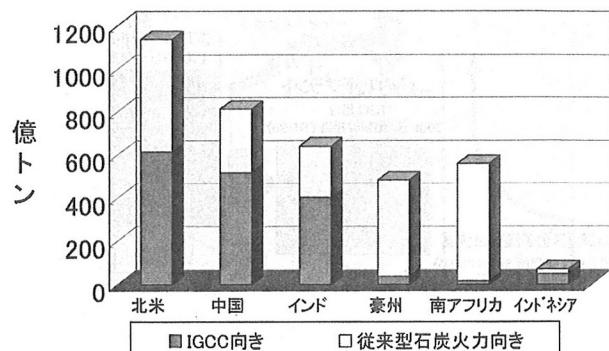


図3 灰溶融点別の石炭埋蔵量

が使えるため、IGCCの導入により、日本全体で使用できる石炭の種類が拡大できるメリットもある。

3.3 スラグ（石炭灰）の有効利用

図4の写真に示すようにIGCCのガス化炉から排出されるスラグは、灰が溶融することによる容積の減少と、熱効率が高いことによる発生量の減少により、発電電力量当たりの石炭灰の容積は、微粉炭火力のフライアッシュの半分程度となる。

また、溶融スラグは、ガラス化しているため、微量物質の溶出がほとんど無く、有効利用した際の環境影響も少ない。溶融スラグは、砂あるいは小石状であるため、従来のセメント原料としての利用の他、路盤材や、アスファルト、コンクリートの骨材など、土木材料としての有効利用も期待される。



図4 スラグの有効利用

3.4 環境特性の向上

高効率化に伴い、SOx、NOx、ばいじんの排出原単位が低減される。また、複合発電のため微粉炭火力に比べ温排水量は約3割低減される。さらに、微粉炭火力では排煙脱硫装置で多量の用水を使用するが、IGCCはガスタービンの燃料である石炭ガスの段階で脱硫するため処理量が少なく、用水の使用量が低減される。

このようにIGCCのメリットは様々あるが、課題は、設備が複雑となり安定運転が難しいことである。

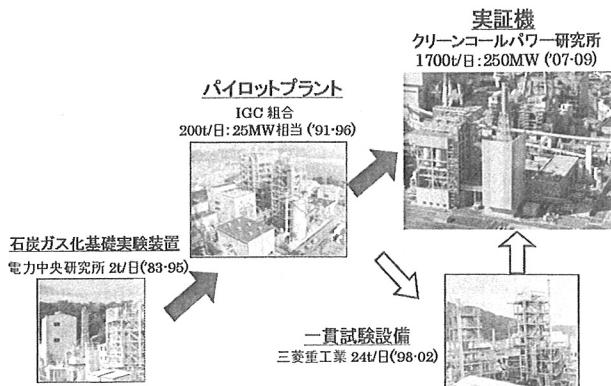


図5 空気吹きIGCCの開発の歴史

4. 空気吹きIGCCの開発の歴史

空気吹きIGCCの開発の歴史を図5に示す。空気吹きIGCCの開発のスタートは、1983年、電力中央研究所に設けられた石炭処理量2t/日のプロセス・ディベロップメント・ユニットであり、次に200t/日、2.5万kW相当のパイロットプラント、そして今回の1700t/日、25万kWの実証プラントと、段階的にスケールアップを行しながら開発を進めてきた。この間、実に25年間という歳月がかかった。

パイロットプラントでは、ガス精製設備は、より効率の高い乾式を採用していたが、実証プラントでは、信頼性を重視して湿式ガス精製に変更した。そこで、一旦、24t/日規模にスケールダウンをして、湿式ガス精製を含めた一貫試験設備で確認試験を行い、ここでの知見も含めて、実証プラントの設計に反映した。

商用機の規模は、50～60万kWであるので、実証プラントからは約2倍のスケールアップとなる。

5. IGCC実証機の概要

5.1 実施体制

(株)クリーンコールパワー研究所は、IGCC実証プロジェクトの試験研究を実施する目的で、北海道から九州までの日本の9電力会社、そして電源開発株式会社の出資により、2001年6月に設立された。

実施体制は図6に示すとおり、出資会社に電力中央研究所を加えた11法人から試験費用の70%と必要な要員の提供を受け、CCPを含めた12法人で共同研究契約を結び、CCP研究所が代表して試験を推進している。

また経済産業省から30%の補助金を受け、設置場所である常磐共同火力からは運転要員等の提供を受け、さらに設備の設計、建設は三菱重工業に発注して試験を実施している。

5.2 実証プロジェクト全体スケジュール

表2に示すとおり実証機プロジェクトは、CCP研究所が設立した2001年6月からスタートした。全体として9年間のプロジェクトであるが、最初の3年間が設備の設計と環境アセスメント、次の3年間が建設、最後の約2年半が運転試験のスケジュールである。

建設は2007年の9月20日に完了し、そこからガス化炉を点火して運転試験が始まった。試験開始からまもなく1年以上になろうとしているが、運転試験は計画通り順調に進捗している。

表2 IGCC実証プロジェクトスケジュール

5.3 実証機の設備構成・仕様

IGCCのシステム構成を図7に示す。ガスターービン燃料である石炭ガスを製造する「ガス化炉」、石炭ガス中の不純物を取り除く「ガス精製」、ガスターービン・蒸気タービン・排熱回収ボイラ（HRSG）を用いた発電設備の「複合発電」から構成される。

JGCC実証機の仕様は、表3のとおりである。出力規

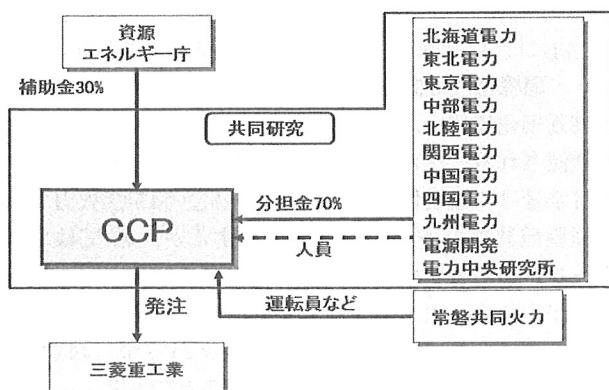


図6 IGCC実証試験体制

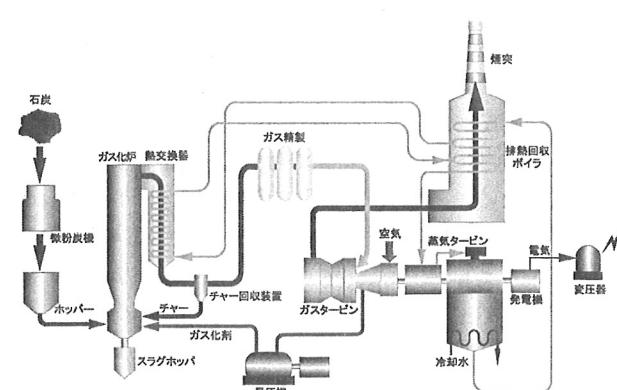


図7 IGCC実証機の系統図

表3 IGCC実証機の仕様

出力		250MW
石炭使用量		約 1700 t/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	1200 °C級
目標熱効率	発電端	48 %
	送電端	42 %
環境特性(目標値)	SOx排出濃度	8 ppm
	NOx排出濃度	5 ppm
	ばいじん排出濃度	4 mg/m ³

※ 热効率は低位発热量(LHV)基準、排出濃度は(O₂ 16%換算)

模を25万kWに抑えるために1,200°C級のガスタービンを使用しており、このため送電端熱効率は42%とやや低目であるが、商用段階では1,500°C級ガスタービンの採用により、送電端効率は48%を超える見込みである。

実証機の全景概観図を図8に示す。中央の高い架構がガス化炉設備で、高さは約60mである。その手前の一段低い架構がガス精製設備で、左側の建屋内に中央操作室、ならびにタービン、発電設備がある。HRSGは直上煙突方式を採用しており、煙突直下の架構内にある。

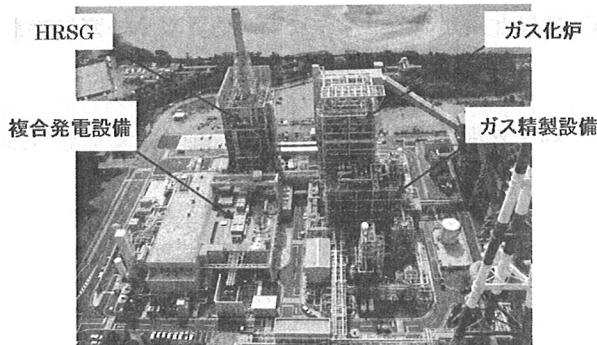


図8 IGCC実証機の全景

5.3.1 ガス化設備

ガス化炉には大きく分けて空気吹きと酸素吹きがある。両者を比較すると、酸素吹きの方が高温でガス化反応の進行が早く、ガス化炉として成立しやすい。しかし、炉内温度が高いことに起因して、逆にガス化炉の耐久性や信頼性に課題が残る。さらに、酸素吹きでは所内動力の大半を占める大型の空気分離設備が必要で、空気吹きの方が所内率を小さくすることができる。

図9に空気吹き二段噴流床ガス化炉の原理を示す。ガス化炉には、石炭のガス化、石炭灰の溶融排出という2つの重要な機能がある。石炭灰を安定して溶融排出するためには、炉内を灰の溶融温度以上の高温に保つ必要があるが、炉内温度を上昇させるために空気(酸化剤)の供給を増やすと燃焼条件に近づき、冷ガス効率(=生成ガスの化学熱/投入石炭の化学熱: ガスタービンなどの後流機器で使える熱量)が低下する。そこで、ガス化炉をコンバスタとリダクタの二段式としている。

コンバスタでは、石炭とチャーを高温で燃焼させ、リ

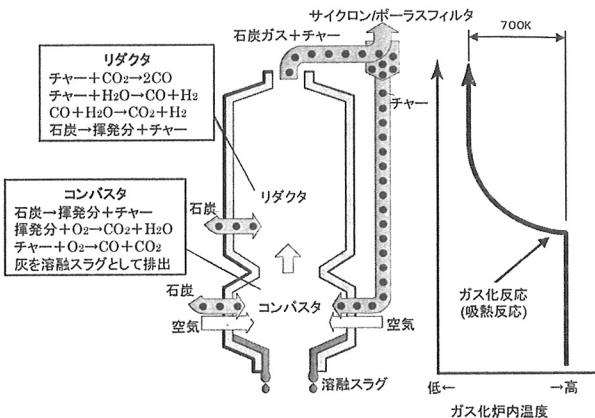


図9 空気吹きガス化炉の原理

ダクタでのガス化に必要な高温熱源を発生させるとともに、石炭灰を溶融排出する。コンバスター内では強い旋回流が形成されており、これによって溶融した石炭灰はコンバスター壁面に捕捉され壁面に沿って流下し、コンバスター底部中央のスラグホールから溶融スラグとして排出される。一方、リダクタでは、コンバスターから上昇してくる高温ガスに石炭を吹き込みガス化させる。このとき、ガス化の吸熱反応を利用して炉内温度を低下させることで、炉内のスラッギングや後部伝熱面への灰付着トラブルを防止している。このように、コンバスターのみを高温状態とすることで空気の供給を抑えることができ、溶融スラグの良好な排出と高い冷ガス効率を同時に達成することが可能となる。

また、空気吹きガス化炉では酸素吹きよりもガス化温度が低いため、リダクタからは未反応炭素を含むチャーが多く生成される。そこで、チャーは全量回収し、コンバスターへ戻してリサイクルすることにより、システム全体としては高い炭素転換率(=生成ガス中炭素流量/ガス化炉投入石炭中炭素流量)となる。

次に、ガス化炉設備全体について述べる。石炭は、微粉炭機で微粉碎後、ロックホッパを通じて約3 MPaの加圧系内に入り、気流搬送でコンバスターべーナおよびリダクタべーナからガス化炉内に投入される。微粉炭の搬送には、空気分離設備で製造した窒素が使用され、微粉炭ハンドリングの安全確保を図っている。ガス化炉は水冷壁構造となっており、水冷周壁管により圧力容器を高温から保護するとともに蒸気として熱回収する。ガス化炉後流の熱交換器では、ガス化炉で発生した生成ガスや生成チャーを冷却し、ガスやチャーの顯熱を高压蒸気として回収する。生成ガスは約5 MJ/m³(Normal)の低カロリーガスである。石炭ガス中のチャーは、チャー回収装置で全量分離回収され、気流搬送によりチャーべーナでコンバスターに投入され、リサイクルされる。従って、投入石炭中の可燃分はすべて石炭ガスに、灰分はすべてスラグに転換する。チャー回収装置はサイクロンとポーラスフィルタの2段階から成る。ポーラスフィルタは精密脱じんが可能であり、ガスタービン排ガスにはガス化

に起因するばいじんはほとんど含まれない。

コンバスターから排出された溶融スラグは、ガス化炉下部のスラグホッパーで水碎され、ガラス状のスラグとして、ガス化炉下部から排出される。このスラグは、微量成分の溶出がなく吸水性も小さいため、土木分野での有効利用が期待される。当社でも、アスファルト舗装用の骨材およびコンクリート成型製品の骨材の代替として有効であることを検証している。

5.3.2 ガス精製設備

ガス精製設備では、ばい煙原因物質である硫黄化合物やアンモニア等を石炭ガスから除去する。ガスタービン燃焼前の燃料ガスを加圧状態で精製するため、微粉炭火力における排煙処理と比較して設備がコンパクトとなる。200t/日パイロットプラントでは乾式ガス精製の試験を実施したが、実証機ではIGCCの早期実現を重視し、開発要素の少ない湿式ガス精製を採用した。

湿式ガス精製の原理を図10に示す。ガス精製設備は、石炭ガス中の不純物を除去することでガスタービン機器を硫黄分や金属分等から保護するとともに、ガスタービン燃焼での大気汚染物質の発生を防止する機能を受け持つ。後者の機能は従来型微粉炭火力の排煙処理に相当するものであるが、燃料ガス量が燃焼ガス量に比べて数分の1である上に、高圧であるため実体積流量は大幅に少なく、IGCCでは効率的なガス処理が可能でコンパクトな設備になる。

石炭ガス中の主な不純物には、石炭中の硫黄分に由来する硫化水素 (H_2S) や硫化カルボニル (COS)，窒素分に由来するアンモニア (NH_3) などがある。石炭ガスを湿式脱硫するには、石油化学工業で実績のあるアミン系やアルコール系の脱硫液に硫黄化合物を吸収させる方法がある。それらの中で、所内動力や熱損失が少ないことからアミン水溶液 (メチルジエタノールアミン：MDEA) が最も適しており、脱硫液にはこれを採用した。

ガス精製設備は、COS変換器、冷却塔、洗浄塔、 H_2S 吸収塔から構成される。石炭ガス中の硫黄分は H_2S 吸收塔でMDEAに吸収され、使用済みのMDEAは吸收液再生塔で再生され、再び脱硫に使用される。ただし、一般にMDEAは H_2S の除去には有効であるが、COSはほとん

ど吸収しない。そこで、COS変換器を上流に設置し、加水分解反応により H_2S に転換する。MDEAの再生過程で回収する硫黄分は、従来型微粉炭火力と同様に石膏として回収する。IGCCでは微粉炭火力のようなフライアッシュの混入が全くないため、きわめて純度の高い高品位な石膏となる。 NH_3 やハロゲン等は冷却塔、洗浄塔で除去される。

5.3.3 複合発電設備

ガス精製設備により精製された石炭ガスは、ガスタービンで燃焼され発電を行う。ガスタービン後流の排熱回収ボイラ (HRSG) にて熱回収された蒸気は、ガス化炉後流の熱交換器で熱回収されたものと共に蒸気タービンを駆動し、複合発電を行う。このように、IGCCではHRSGだけではなくガス化炉からも蒸気が発生することが、LNG火力にはない特色である。また、ガスタービン空気圧縮機の圧縮空気の一部をガス化炉へ抽気することで、設備の簡素化と所内動力の低減が図られている。

空気吹きガス化炉の石炭ガスは、LNGと比べて発熱量が1/10程度の低カロリーガスではあるが、水素が多いことからLNGよりも可燃範囲が広い。また、ガス精製設備で NH_3 を除去するためガスタービンでフューエル NOx はほとんど発生せず、また、低カロリーガスであるためサーマルNOxの発生も少ない。

6. 約1年間の運転試験の結果

6.1 運転試験 (RUN) の推移

2007年9月20日に建設を完了し、まず初めは、ガス化炉を灯油で点火し、灯油焚での調整試験を行った。その後、10月10日にガス化炉に石炭を投入し、ここからRUN1を開始した。

その後、RUN2にてガス化炉の単独調整を行い、12月に入ってRUN3でガスタービンに石炭ガスを送り、石炭ガス化複合発電を開始し、RUN4にて50%負荷運転、および50%負荷遮断試験を行った。

ガス化炉の初期調整段階では、微粉炭流量の変動が大きく、ガス化炉トリップを2度経験したが、微粉炭供給ホッパーへの窒素供給方法の調整、微粉炭流量制御弁の調整等により微粉炭の安定搬送が可能となり、その後はガス化炉の安定運転が可能となった。

2008年に入り、1月にはRUN5で75%負荷運転、75%負荷遮断試験を行った後、3月にはRUN6で100%負荷運転、および100%負荷遮断試験を終了させ、当初計画どおり、2007年度中の定格出力運転を達成した。

そして4月にはRUN7にて、各負荷帯での静特性、動特性試験を行い、性能確認も行った。この段階では、期間もそれ程かけられないため、簡易な制御調整に留めた。

その後、設備点検および若干の設備改造を行い、5月末にRUN8で健全性確認試験を行った後、6月10日からRUN9として、2000時間を目標とする長期連続運転試験に入った。

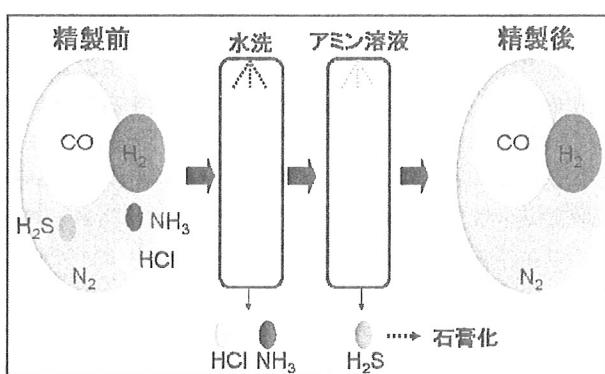


図10 湿式ガス精製の原理

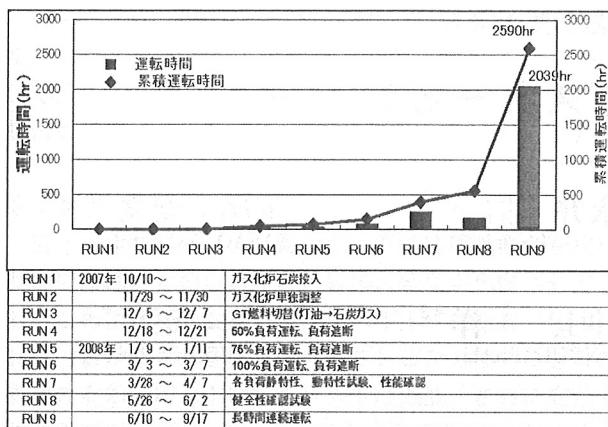


図11 RUN項目と運転時間の推移

図11において、棒グラフの高さは、各RUN毎の石炭ガス複合発電を行った運転時間を示しているが、RUN9において一気に運転時間を伸ばし、2,039時間の長時間運転を達成した。なお、1,568時間連続運転の後、1度停止・再起動を行っているが、これはIGCCの信頼性とは全く関係のない事象による停止であったことから、我々の所期目標である「IGCCが夏場の3ヶ月間（約2,000時間）を連続運転できる信頼性の検証」はできたと判断している。

6.2 プラント性能データ

表4は、RUN7において、25万kW、100%負荷運転時の性能データを示す。

表4 プラント性能データ

大気温度	13.1 °C		
発電機出力	250.0 MW		
GT出力	124.2 MW		
ST出力	125.8 MW		
送電端効率	42.4 % (LHV)		
冷ガス効率	75.3 %		
炭素転換率	99.9 %以上		
生成ガス発熱量LHV	5.2 MJ/m ³ N		
生成ガス組成	CO	30.5 %	
	CO ₂	2.8 %	
	H ₂	10.5 %	
	CH ₄	0.7 %	
	N ₂ &others	55.5 %	
排ガス環境値 (16% O ₂ 換算)	SO _x	1.0 ppm	
	NO _x	3.4 ppm	
	ばいじん	< 0.1 g/m ³ N	

ガスタービンと蒸気タービンの出力は、それぞれ124.2MWと、125.8MWであり、ほぼ1:1の出力比である。一般にLNG火力では、ガスタービンと蒸気タービンの出力比は2:1になるが、IGCCでは1:1になるのが特徴である。

送電端効率は、42.4% (LHV) であり、ほぼ目標値を達成した。その他の性能データ、あるいは環境データは表4に示す通りであり、いずれの数値も、計画通り、あるいは計画を上回る数値が得られている。

なお、送電端効率については、まだ粗調整の段階でのデータであり、今後の運転最適化試験の中で、さらに高い数値を目指すこととしている。

6.3 今後の運転試験スケジュール

長期連続運転試験後は、設備の開放点検を行っているが、2009年の1月より、試験運転を再開し、それ以降は、下記の運転試験を予定している。

①運転最適化試験（2009年1月）

運転パラメーターを変化させ、送電端効率の向上を目指すと共に、負荷変化率の向上試験等も実施する。

②炭種変化試験（2009年1月～2月）

現在使用している中国の神華炭に加え、北米のPRB炭、インドネシア炭によるガス化試験も行う。これらはいずれも亜瀝青炭であり、空気吹きIGCCで亜瀝青炭もガス化できることを実証する。

③耐久性確認試験（2009年5月～12月）

約5,000時間の運転を行い、設備の耐久性確認を行う。

7. まとめ

日本が開発を進めている空気吹きIGCCは、世界でも最高の送電端効率が得られるIGCCである。この技術が完成すれば、石油火力と同等のCO₂発生量で石炭火力発電が可能となり、資源の節約と同時に、地球温暖化対策にも大きく貢献することができる。

実証機の運転試験を開始してから1年以上が経過したが、既に定格出力での安定運転が可能となり、さらにIGCCの信頼性を確認するための長時間連続運転試験も成功裏に終了し、商用化に向けて大きく前進している状況にある。

今後も、予定されている運転試験を計画どおり進め、高効率、高信頼性、かつ価格的にも国際競争力のある空気吹きIGCCを完成させていく予定である。