

# IGCC 発電プラントの計画

Integrated Gasification Combined-Cycle Power Plant Planning

古川 俊樹  
FURUKAWA Toshiki

宇都宮 正治  
UTSUNOMIYA Masaharu

埋蔵量の限られた化石燃料を使用する火力発電において、燃料多様化、地球環境、規制緩和など状況が大きく変化している。石炭、残さ油など低質燃料をガス化し精製したクリーンなガス燃料を使用するガス化複合(IGCC)発電プラントは、その変化に対する回答になる可能性があり期待されている。当社は、IGCC の経験豊富な米国 GE 社と IGCC 用ガスタービンに関する技術契約を締結して、ガス化システムとの連携技術を含み技術確立し、各種 IGCC 方式に対応したコンバインド サイクル発電プラントの計画・設計を推進している。

In the thermal power generation field, which utilizes fossil fuels whose supply is limited, major changes are taking place in relation to varieties of fuel, the global environment, deregulation, and other conditions. Integrated gasification combined-cycle (IGCC) power plants may be an answer to these changing conditions, since they utilize clean gas fuel obtained by gasifying low-level fuels such as coal, residual oil, etc. and cleaning the produced gas.

Toshiba has concluded an agreement on gas turbines for IGCC application with General Electric Company (GE), which has abundant experience in the field of IGCC systems, and established combined-cycle technologies including technologies for gasification system integration. We are now promoting the design of combined-cycle plants for various IGCC plants in Japan.

## 1 まえがき

火力発電で使用されている石炭、石油、天然ガス(NG)など化石燃料は、地球上に海と大陸ができた後、動植物が繁栄し億年単位の長期間で生成されたもので埋蔵量が限られている。

1997年12月京都会議で温室効果ガスの削減目標が設定されたが、数百年で使い切ろうとしている貴重な化石燃料を効率良く使用し、子孫に負の遺産を残さないためにもその目標を達成しなければならない。発電 kWh 当りの二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)発生量は、石炭、石油、NGの順に10、8、6の比率であるが、21世紀以降のエネルギーを考えると、環境負荷は大きい可採年数の長い石炭および石油系重質油など低質燃料の高効率利用技術が要求されている。

IGCC 発電プラントは、石炭、石油残さ油、石油コークス、液体燃料の一種であるオリマルジョン、廃棄物、植物などを酸化剤などで部分酸化してガス化し、そのガスを精製して得られるクリーンなシンガス(Synthetic Gas)をコンバインド サイクル(以下、C/Cと略記)発電プラントのガスタービン(以下、G/Tと略記)に導き発電するもので、高効率、燃料多様化、環境性、スラグ排出など多くの特長をもった発電方式であり期待されている。

各種 IGCC 方式のガス化炉側とのインテグレーション技術を含め当社が担当する C/C 発電プラントの計画上の考慮点およびプラント計画例について述べる。

## 2 IGCC への取組み

IGCC 発電プラントには、表1に示す酸化剤種類、シンガス冷却方式、ガス精製方式、空気連携方式などの組合せによる各種 IGCC 方式がある。これらを最適プラントにするためには、ガス化炉側と C/C 発電側が相互理解を深めたうえで各種インテグレーションの最適化設計が必要である。

IGCC の C/C 発電プラントを担当する当社は、世界の IGCC 用 G/T の大半を供給し豊富な経験をもつ GE 社と“IGCC 用 G/T に関する技術契約”を96年10月に締結し

表1. 各種 IGCC 方式を構成する要素とプラント例

Various types of IGCC systems and examples of plants

酸化剤種類	シンガス冷却方式	ガス精製方式	空気連携方式	プラント例
酸素	SGC なし (水クエンチ)	湿式	G/T 抽気なし	サラックス(イタリア)
			G/T 抽気なし	CWP,ワバッシュリバー,タンバ(米国)
		乾式	部分	テムコック(オランダ)(FI) フェルトラノ(スペイン)(FI)
空気 (含,酸素 富化)	SGC あり	湿式	FIまたは部分	-
		乾式		

FI: Full Integration(空気完全連携)

CWP: Cool Water Program(米国のIGCC)

酸素富化: 空気に酸素を追加して酸素濃度を増加すること。

た。GE 社から入手する技術および実機経験で蓄積した C/C 技術を組み合わせることにより、表 1 に示す各種 IGCC

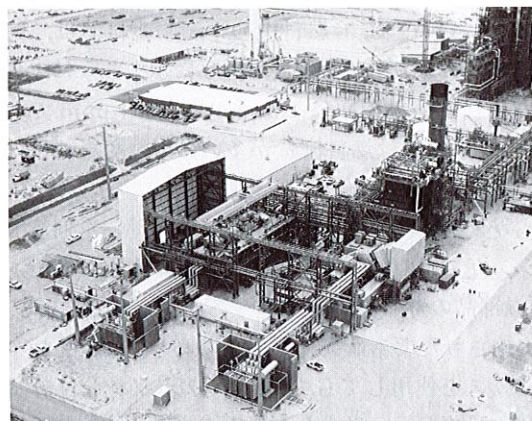


図 1. タンパ石炭 IGCC プラント GE 社が納入した屋外設置の別軸式 C/C 発電プラントを示す。  
Tampa coal IGCC plant

方式のすべてに対応可能である。

米国フロリダ州にあるタンパ石炭 IGCC プラントの C/C 発電設備(GE 社納入)を図 1 に示す。

酸素吹きガス化炉または空気吹きガス化炉と湿式ガス精製方式を組み合わせた IGCC システム構成を図 2 と図 3 に示す。

### 3 ガス化システムと G/T 入口シingas 性状

ガス化炉にて低質燃料を酸化剤で部分酸化してシingas (H<sub>2</sub> と CO が主成分) を生成する。酸素吹きでは空気分離装置 (Air Separation Unit=ASU) で生成される酸素 (通常、95% 純度) を使用し、発熱量 2,500 kcal/m<sup>3</sup>N 前後のシingas が生成される。空気吹きでは G/T 圧縮機吐出空気の一部を抽気し昇圧してガス化炉に供給し 1,000 kcal/m<sup>3</sup>N 前後のシingas が生成される。

ガス化炉出口シingas 中の不純物を除去し G/T が許容する燃料とするために脱じんと脱硫用ガス精製装置が設置される。湿式ガス精製は、シingas をスクラッパーで水洗浄して、ダスト、アルカリ金属、塩素、アンモニアを除去し、さらに熱交換器で約 40℃ まで冷却してアミンなどを用いた脱硫装置で硫化水素を除去するもので熱損失は大きい。シingas 中の不純物はほとんど除去される。脱硫装置で CO<sub>2</sub> の一部が吸収されると G/T 出力が減少するので吸収率の小さい脱硫剤がよい。温度を下げるのでシingas 中の水蒸気も除去されるが、精製シingas を加熱し、サチュレーション装置で水と接触させて水蒸気を含ませ性能向上と低 NO<sub>x</sub> 化 (窒素酸化物発生量の低減) が可能である。G/T 入口シingas の温度上昇でプラント熱効率を向上できるが、ガス化炉出口または SGC 出口シingas で加熱する GGH (Gas Gas Heater) 方式はリークの発生で重大なトラブルにつながるので留意する必要がある。

一方、乾式ガス精製は 400~500℃ の高温ガス状態で脱じん・脱硫するので熱損失は少ないが、シingas 中の不純物やアンモニアが湿式より多くなる。湿式と乾式ガス精製の IGCC プラント熱効率の差は、酸素吹き IGCC で約 1 ポイントであり、空気吹き IGCC ではシingas 流量が多いため、約 2 ポイントである。

### 4 IGCC 用 C/C 発電プラントの計画

#### 4.1 IGCC 用燃焼器と低 NO<sub>x</sub> 化

酸素吹きの場合の中カロリーシingas (水素を含むので予混合燃焼は採用できない) は、断熱火炎温度が NG より高いので、サーマル NO<sub>x</sub> を低減するために ASU で生成した窒素を燃焼器に注入 (窒素連携) し、低 NO<sub>x</sub> 化を図るとともに G/T 出力を増加できる。

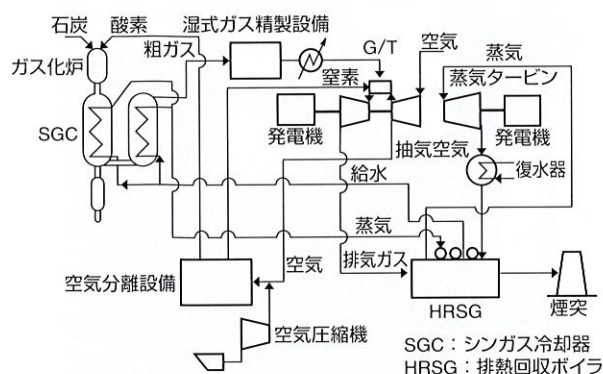


図 2. 酸素吹き IGCC のシステム構成 テキサコガス化炉、湿式ガス精製、空気部分連携の場合を示す。  
Configuration of oxygen-blown IGCC system

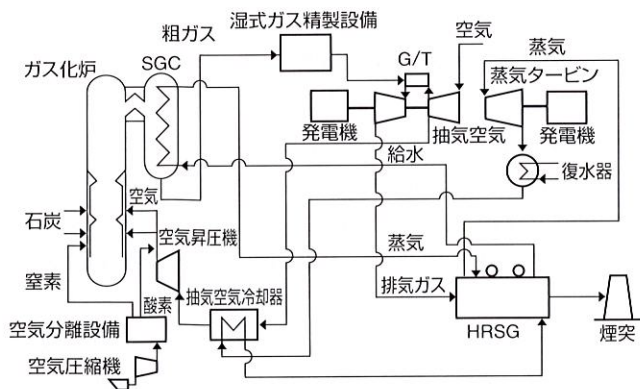


図 3. 空気吹き IGCC のシステム構成 酸素富化空気吹き、湿式ガス精製、空気完全の場合を示す。  
Configuration of air-blown IGCC system

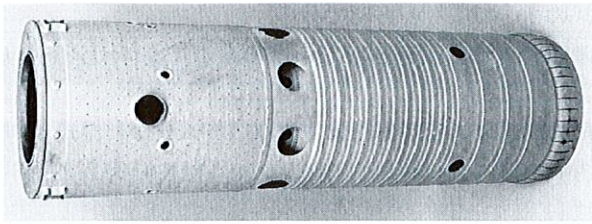


図4. 空気吹き乾式精製 IGCC 用リッチリーン燃焼器 燃料中アンモニアの NO<sub>x</sub> への転換率を低減する燃焼器である。  
Rich-lean combustor for air-blown dry-cleanup IGCC

一方、空気吹きの場合、低カロリーシingasの断熱火炎温度は 1,700℃ 程度で、サーマル NO<sub>x</sub> は小さいが、乾式ガス精製のシingasにはアンモニアが多く含まれるのでフェル NO<sub>x</sub> 低減技術としてリッチリーン燃焼を採用する。これは一次燃焼域で空気に対して燃料リッチで噴射してアンモニアの酸化反応を抑え NO<sub>x</sub> への転換率を抑制するもので、当社はこの燃焼器(図4)を開発し福島県の勿来(なこそ)パイロットプラント燃焼試験設備で実圧燃焼試験を実施し良い結果を得た。

IGCC 用 G/T は、灯油、軽油、NG などの起動用燃料が必要でありデュアルフェルシステムで計画する。起動用燃料で運転中にシingas系統に燃焼ガスが逆流しないように、シingas燃料ノズルに空気を流してパージする。また、ガス化炉停止時に起動用燃料で G/T ベース負荷運転の要求がある場合、これを考慮して C/C 発電プラントの設計を行う。

#### 4.2 G/T 翼

シingas中の不純物にアルカリ金属やバナジウムなどの重金属類が多いと、共晶化合物を形成してダストとともにタービン翼に付着して高温腐食を発生し、また、フィルム冷却空気孔を閉塞(そく)して翼メタル温度が上昇し寿命を

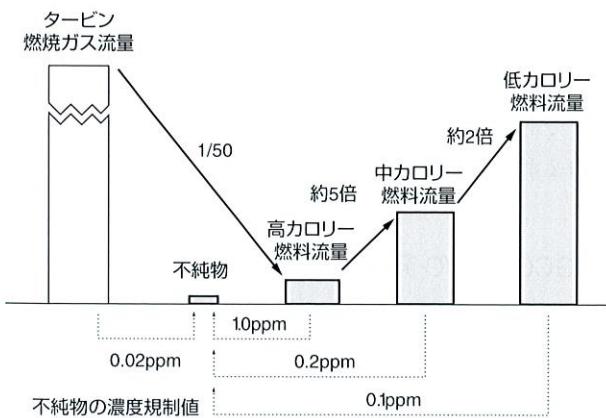


図5. G/T 燃料中の不純物の規制値 発熱量の小さい燃料は不純物の濃度規制値が厳しい。  
Gas turbine fuel contaminant limits

短縮する。これを防止するために GE 型 G/T では、クリーンなガス燃料の場合と同等のタービン翼寿命が得られるように、G/T のタービン燃焼ガス中のアルカリ金属、バナジウム、鉛、ダストなどの不純物の総量に対し規制値が決められている。G/T 燃料中の不純物規制値は、例えばナトリウム+カリウムの場合、図5に示すように、高/中/低カロリー燃料の順に、1/約0.2/約0.1 ppm であり、IGCC のシingasは燃料流量が多いので濃度規制値は小さな値である。

乾式ガス精製は、より高いプラント熱効率を期待できるが、シingas中の不純物が湿式より多くなる傾向であり G/T 高温部品の寿命消費を考慮する必要がある。97, 98 年度に実施された要素研究に当社も参画し、ガス化炉で発生する実ガスを使用して G/T 翼へのデポジット付着試験と材料腐食試験を行い貴重なデータを得た。試験装置を図6に示す。

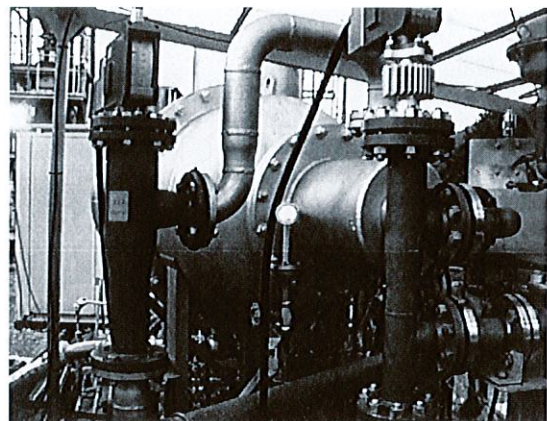


図6. G/T 翼デポジット付着試験装置 実ガスの燃焼ガスに試験翼を暴露する試験を行いデポジット付着状況を把握した。  
G/T nozzle deposit test facility

#### 4.3 ガス化設備との空気連携

ASU または空気吹きガス化炉への空気源として G/T 圧縮機吐出空気の一部の抽気で必要量の全量をまかなう場合を完全連携、この抽気と別置圧縮機吐出空気の両方を送る場合を部分連携と言う。空気吹きの場合、燃料流量が非常に大きいので圧縮機サージ防止のために抽気は必須(す)であり完全連携を採用するケースが多い。GE 型 G/T は多量の燃焼ガスでも運転できる特性をもっており、酸素吹きの場合、別置圧縮機をもった ASU 設備を単独で設置した空気連携なしシステムの採用も可能である。

酸素吹き IGCC では通常、大容量化しやすい深冷分離方式 ASU が設置される。空気部分連携の場合、G/T 圧縮機

吐出圧力を考慮し高圧 ASU が採用され、空気連携なしの場合は、その運転圧力を独自で選定することができるので深冷分離に有利な低圧 ASU が採用される。

#### 4.4 フラットレイティング(G/T 出力特性)

高カロリー燃料の場合、気温上昇で空気密度が減少し、G/T 出力は低下するが、酸素吹き IGCC の場合、タービンの燃焼ガス流量が多くなるので G/T 出力が 20% 前後増加し、広い気温範囲でその G/T の最大出力が得られるフラットレイティングの採用が可能である。

#### 4.5 蒸気サイクルと水/蒸気連携

ガス化設備には高温熱源があり、これを有効利用するシステム設計が重要である。SGC 採用の場合の水/蒸気連携を含む IGCC プラント全体の最適化検討を行なった。酸素吹きで良質炭の場合、シingas 流量が比較的少ないので蒸発器だけの SGC 構成とし SGC 給水温度を 300℃ 程度まで上昇し高低圧の二重圧 HRSRG が良い。石炭質の低下に応じてシingas 流量が増加するので節炭器/蒸発器の SGC 構成とし SGC 給水温度を低下させる。この SGC は蒸気タービン(S/T)高圧主蒸気流量の約 70% の蒸発を分担し、S/T 出力は C/C 出力の約 40% である。

空気吹きの場合、シingas 流量が酸素吹きの 2 倍以上であり、SGC の熱交換量が非常に多いので、SGC 給水温度を下げるとともに、SGC は節炭器/蒸発器と高価な過熱器が必要になる。HRSRG の給水流量が多く中圧節炭器の熱回収で排ガス温度が下がるので高中圧の二重圧 HRSRG が最適である。SGC は S/T 高圧主蒸気流量の約 80% を分担し、主蒸気流量は酸素吹きに比べて多く、約 1.5 倍になる。S/T 出力は C/C 出力の約 50% を占め、復水器交換熱量も大きい。

残さ油など水分を含まない液体をガス化する場合、HRSRG から高圧の蒸気または熱水をガス化炉に供給する。水クエンチ方式ガス化炉の場合、ガス化炉出口中温シingas の熱回収で中圧蒸気を発生し S/T に混入して出力増加を図る。

## 5 IGCC 発電プラント計画

酸素吹きガス化炉、湿式ガス精製、空気部分連携、MS 9001 FA G/T採用の石炭 IGCC 発電プラントの計画例を表 2 に示す。また、その概略配置を図 7 に示す。

## 6 あとがき

石炭 IGCC 大容量実証機のフェージビリティスタディに当社も参画し、運転実績に基づいた信頼性の高いシステムを提案するなど、各種 IGCC 方式に対応した C/C 発電プラントの計画を行なっている。将来を見据えて新しい発電

表 2. 石炭 IGCC 発電プラント計画例(LNG C/C との比較)  
Coal IGCC plant specifications compared to LNG C/C

項目	石炭 IGCC	LNG C/C
ガス化炉	酸素吹き, SGC あり	-
ガス精製	湿式	-
空気連携(率)	部分連携(60%)	-
G/T	MS9001FA(窒素注入あり)	MS9001FA
HRSRG	再熱 3 圧式	再熱 3 圧式
G/T 燃料 HHV(kcal/m <sup>3</sup> N)	2,150	13,000
発電端出力 (MW)	500	380
送電端出力 (MW)	440	370
送電端効率 (%)	44	49

LNG : Liquefied Natural Gas(液化天然ガス)  
HHV : High Heating Value(高位発熱量)

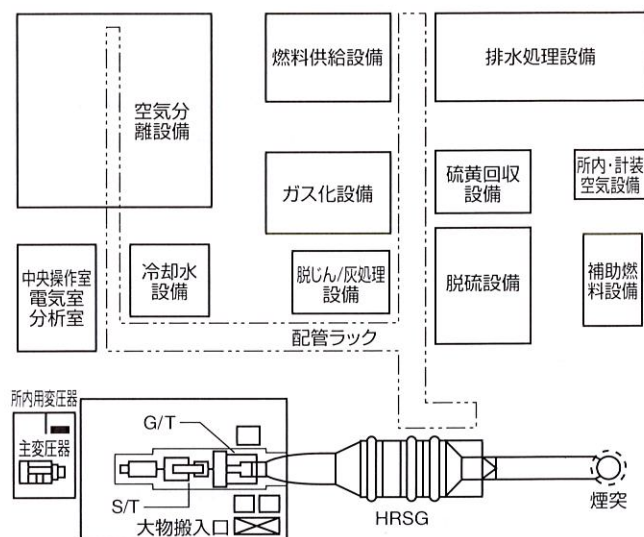


図 7. 石炭 IGCC プラント概略配置 シingas、圧縮機吐出抽気などの流れを考慮して配置を計画した。

Layout drawing of coal IGCC plant

システムにチャレンジする必要がある、今後も火力発電において燃料多様化、地球環境、規制緩和を鑑(かんが)み、石炭、残さ油など低質燃料を有効利用する IGCC 発電の実用化を目指し努力していく所存である。



古川 俊樹 FURUKAWA Toshiki

電力システム社 火力事業部 火力産業・IPP 技術部担当部長。IGCC および IPP のコンバインドサイクル発電の計画に従事。日本ガスタービン学会、日本機械学会、火力原子力発電技術協会会員。

Thermal Power Systems Div.



宇都宮 正治 UTSUNOMIYA Masaharu

電力システム社 火力事業部 火力産業・IPP 技術部主務。IGCC および IPP のコンバインドサイクル発電の計画に従事。

Thermal Power Systems Div.