

特 集 論 文

# ガスタービンの燃料多様化によるCO<sub>2</sub>削減対策

## CO<sub>2</sub> Emission Reduction Method from Various Fuel Gas Firing Capability of Gas Turbine



小森 豊明\*<sup>1</sup> 潮崎 成弘\*<sup>2</sup> 山上 展由\*<sup>2</sup>  
 Toyooki Komori Shigehiro Shiozaki Nobuyuki Yamagami  
 北内 洋介\*<sup>3</sup> 秋月 渉\*<sup>4</sup>  
 Yohsuke Kitauchi Wataru Akizuki

### 1. はじめに

地球温暖化防止への対策を考える場合、この温暖化への影響が最も大きい二酸化炭素ガス (CO<sub>2</sub>) の削減が重要である。このCO<sub>2</sub>削減対策は、大きく二つに分けられ、CO<sub>2</sub>排出量削減とCO<sub>2</sub>回収に区別される。

更に、このCO<sub>2</sub>排出量削減については、エネルギー変換機器の効率向上とCO<sub>2</sub>排出が少ない水素リッチへの燃料転換に区別される。

発電プラントの場合は、高性能ガスタービンを採用したガスタービンコンバインドプラント導入による熱効率の向上が既に進んでおり、更なる熱効率向上によるCO<sub>2</sub>排出量低減については、次世代のガスタービン開発が必要である。

一方、燃料転換については、現行のガスタービン技術から燃焼器部分を主に改良設計すれば十分対応可能であり、かつ燃料転換後の燃料性状によっては、CO<sub>2</sub>排出量削減に大きく寄与できる。

当社は、このニーズにこたえるべく早い時期から水素リッチガスの燃料をガスタービンに適用できるように開発を進め、既に商用機で10台以上の運転実績を

有している。

本報ではこれら燃料多様化に関連する水素リッチガス及び低カロリーガス焼きガスタービンの運転実績と設計概要等について紹介する。

### 2. 各種燃料ガスの適用実績

表1は当社のガスタービンに使用された燃料の種類を示したものであり、2006年12月時点で合計台数が477台に達している。図1にはガス燃料発熱量の範囲の実績を示した。

図1に示すように、2.5 MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub> から 84 MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub> までの幅広い発熱量のガス燃料の実績を有している。特に注目すべき点は4 MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub> 以下の低発熱量ガス焼きガスタービンを11台納入している。

### 3. 水素リッチガス用ガスタービンの開発と変遷

図2に当社の水素ガス含有量20 vol %以上の水素リッチガス焼きガスタービンの運転実績を示す。これらのガスタービンは、燃料供給源の区別から、コークス炉ガス (COG)、製油所オフガスとガス化ガスの3

表1 燃料適用例

2006年12月時点	
燃料	台数
1. シングル燃料	
(1) 天然ガス又はLNG	187
(2) 製油所ガス又はLPG	19
(3) 製鉄所ガス	25
(4) 蒸留油	63
(5) その他	1
2. デュアル燃料	
(1) 天然ガス/蒸留油	157
(2) 天然ガス/重油	6
(3) 製油所ガス/蒸留油	7
(4) LPG/蒸留油	7
(5) 製鉄所ガス/蒸留油	3
(6) 石炭ガス化ガス/蒸留油	1
(7) VRガス化ガス/蒸留油	1
合計	477

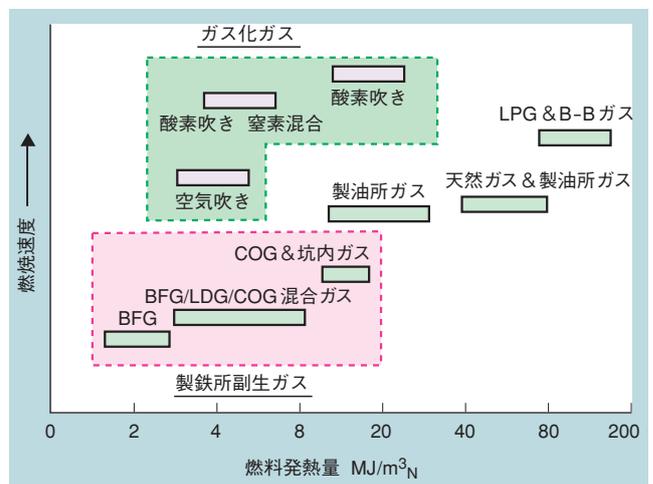


図1 燃料ガスの実績

\*1 高砂製作所ガスタービンコンバインドプラント計画部ガスタービン計画課長

\*2 高砂製作所ガスタービンコンバインドプラント計画部ガスタービン計画課

\*3 高砂製作所ガスタービン技術部特殊燃料ガスタービン推進グループ長

\*4 高砂製作所ガスタービン技術部ガスタービン燃焼器グループ

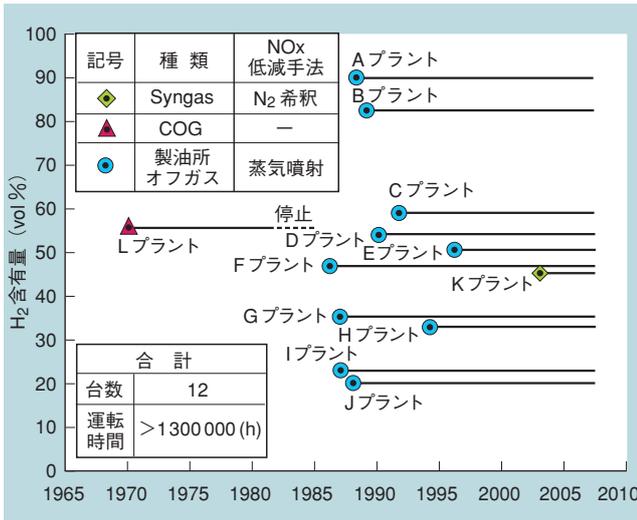


図2 水素リッチガス（20 vol %以上）焼きガスタービンの運転実績

種類に大別できる。

水素リッチガス焼きの初号機は、COGを燃料とした30 MWの入口温度が700℃級ガスタービンで1970年に営業運転を開始している。このCOGは石炭化学工場にて産出されている副生ガスで水素含有量は50 vol %を超えている。このCOGは、水素が多いという以外にも不純物が含有されているという特徴があり、ガスタービン燃焼器に加えガス圧縮機等の燃料処理供給装置にも種々の対策を講じた。

1980年代に入ると、石油危機以降産業界で省エネルギーの機運が高まり、石油化学業界からは精油プロセス等からの水素リッチガスをガスタービン用燃料として利用する要望が増えてきた。あわせて、ガスタービン排ガスから高温・高圧の蒸気を排ガスボイラを用い供給する必要があり、プラントの高効率化を踏まえ、当時としては画期的な1250℃級のガスタービンを開発した。高温ガスタービンに水素リッチガスを燃料として適用する場合、燃焼器部でのフラッシュバック対策が重要となるが、燃料ノズル形状等に工夫をすることにより、この課題を克服した。

これら水素リッチの製油所オフガス焼きガスタービンは、10台が納入され、現在も順調に運転されている。

これらの運転実績と4項に述べる低カロリーガス焼きガスタービンの運転実績を基にガスタービン単機あたりとしては、世界最大容量の431 MW水素リッチガスのVRガス化ガス焼きガスタービンコンバインドプラントを新日本石油精製(株)根岸製油所に2003年納入した。

このプラントの主要仕様を表2に、概略系統を図3に示す。ここのプラントの燃料で留意したのはNOx対策である。

表2 431 MW VRガス化ガス焼きコンバインドプラントの主要仕様

発電端プラント出力 (MW)	431
送電端プラント出力 (MW)	342
燃料 主/補助	VRガス化ガス/灯油
ガスタービン	形式 出力 (MW) 回転数 (min <sup>-1</sup> ) 開放単純サイクル M701F 301 3000
蒸気タービン	形式 出力 (MW) 回転数 (min <sup>-1</sup> ) 蒸気条件 主蒸気 再熱蒸気 中圧蒸気 単車室下向排気再熱式混気復水タービン 130 3000 蒸気タービン入口 9.8 MPaG×538℃ 2.9 MPaG×538℃ 0.7 MPaG×313℃
発電機	形式 容量 (kVA) 電圧 (kV) 回転数 (min <sup>-1</sup> ) AC三相交流同期, H2冷却式 479 390 23 3000
排ガスボイラ	形式 再熱三重圧型自然循環式
脱硝装置	形式 乾式アンモニア接触還元法 ガス縦流れ固定床式

大気温度：15℃，大気圧力：0.1013 MPa，相対湿度：60%

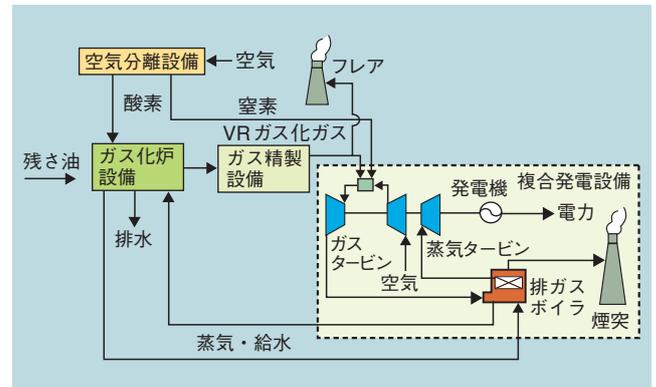


図3 431 MW VRガス化ガス焼きコンバインドプラントの概略系統

ガス化炉にて生成されるVRガス化ガスは断熱火炎温度が高く、そのまま燃焼させるとNOxが多量に発生する。このため本プラントではVRガス化ガスに空気分離設備より供給される窒素を混合し、この混合ガスをガスタービン燃料として使用している。本混合ガスは天然ガス(LNG)に比べ燃料発熱量、断熱火炎温度が低く、NOxの発生量を低減できる。また、水素割合が高いため燃焼速度が速く、可燃範囲が広いという特徴がある。これらの燃料特性から、拡散燃焼器を適用してもガスタービン出口でのNOx排出濃度は天然ガスの予混燃焼器並みまで低減可能であり、本プラントにおいては燃料性状の変動に対し安定燃焼が可能な拡散燃焼器を採用している。

また、本プラントではガス化炉起動前に灯油焼きによりガスタービンを先行起動する必要があるため、ガス及び油のデュアル燃料焼き対応が可能な燃焼器となっている。

4. 低カロリーガス用ガスタービンの開発と変遷

日本で最初のBFG焼きガスタービン（出力850kW）は1958年に八幡製鐵(株)(現：新日本製鐵(株))に納入し、さらにMW171ガスタービン（出力15MW）を住友金属工業(株)和歌山製鐵所に納入している。

その後、タービン入口温度の高温化とガスタービンの各要素効率の改善によりガスタービン自体の熱効率が向上した。また、ガスタービンの排ガス温度が上昇しているため、排熱回収ボイラのエネルギー回収効率も向上することとなった。

以上の変遷を経て、1982年にはM151ガスタービン（タービン入口温度1000℃以上）コンバインドサイクルプラントを新日本製鐵(株)釜石製鐵所に、1987年にはJFEスチール(株)東日本製鐵所（千葉地区）に145MW級のガスタービンコンバインドサイクルプラントを納入した。

この大容量コンバインド発電プラントの運転実績を基に、1994年と1995年にD型よりタービン入口温度が100℃高いDA型のガスタービンを使用した同規模のプラントを瀬戸内共同火力(株)倉敷共同発電所と福山共同発電所に納入している。

さらにこれらの技術を結集して、君津共同火力(株)君

表3 低カロリーガス焼きガスタービンの実績

納入先	プラント	運開	型式	プラント出力	燃料		燃焼器
					主	補助	
八幡製鐵(株)(八幡)	高炉送風	1958	・	0.85MW	BFG (3.2MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	シングルキャン
八幡製鐵(株)(八幡)	高炉送風	1964	・	4MW	BFG (3.2MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	シングルキャン
住友金属工業(株)(和歌山)	コージェネレーション (WHB, G・M, BLOWER)	1965	MW 171	15MW	BFG (3.1MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	シングルキャン
四国電力(株)(坂出)	コンバインドサイクル	1970	MW 301	225MW	COG (18.8MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
三菱石炭工業(株)(南大夕張)	コージェネレーション	1970	MW 101	9MW	坑内ガス (20MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	油	マルチキャン
新日本製鐵(株)(釜石/大分)	コンバインドサイクル 既設ST流用	1982	M 151	16MW	BFG (2.8MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	シングルキャン
JFEスチール(株)(千葉)	コンバインドサイクル (一軸式)	1987	M 701	149MW	BFG/COG (4.2MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
三菱ガス化学(株)(水島)	コージェネレーション (WHB)	1988	MF 111	16MW	BFG/COG (10MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	油	マルチキャン
日新製鋼(株)(呉)	コージェネレーション (WHB)	1989	M 251	32MW	BFG (2.9MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
新日本製鐵(株)(広畑)	コンバインドサイクル 既設ST流用	1989	M 251	30MW	LDG (7.6MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
(株)中山製鋼(船町)	コンバインドサイクル (一軸式)	1991	M151	37MW	BFG/LDG (4.2MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
瀬戸内共同火力(株)(倉敷)	コンバインドサイクル (一軸式)	1994	M 501 DA	149MW	BFG/COG (4.0MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
瀬戸内共同火力(株)(福山)	コンバインドサイクル (一軸式)	1995	M 501 DA	149MW	BFG/COG (4.0MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
NUON(オランダ)	コンバインドサイクル (一軸式)	1997	M 701	149MW	BFG/COG (4.2MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
新日本製鐵(株)(大分)	コンバインドサイクル	2001	M 251	67MW	BFG (2.9MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
新日本石油精製(株)(根岸)	コンバインドサイクル (一軸式)	2003	M 701 F	431MW	Syngas + N <sub>2</sub> (5.9MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	油	マルチキャン
君津共同火力(株)(君津)	コンバインドサイクル (一軸式)	2004	M 701 F	300MW	BFG/COG (4.4MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
沙鋼鋼鉄(中国)	コンバインドサイクル	2006	M 251	30MW×4	BFG (3.1MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
鞍山鋼鉄(中国)	コンバインドサイクル (一軸式)	2007	M 701 F	300MW	BFG/COG (4.4MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
邯鄲鋼鉄(中国)	コンバインドサイクル	2006	M 251	30MW×2	BFG (3.1MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
馬鞍山鋼鉄(中国)	コンバインドサイクル (一軸式)	2007	M 701 DA	153MW	BFG/COG (4.4MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
POSCO(韓国)	コンバインドサイクル (一軸式)	2007	M 501 DA	146MW	FOG (5.7MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
クリーンコールパワー研究所(勿来)	コンバインドサイクル (一軸式)	2007	M 701 DA	250MW	Syngas (4.2MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	油	マルチキャン
蓮源鋼鉄(中国)	コンバインドサイクル	2007	M 251	30MW	BFG (3.1MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
包頭鋼鉄(中国)	コンバインドサイクル (一軸式)	2008	M 70 1DA	138MW×2	BFG/COG (4.4MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン
IUD(ウクライナ)	コンバインドサイクル (一軸式)	2009	M 701 DA	151MW×2	BFG/COG (4.4MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )	・	マルチキャン

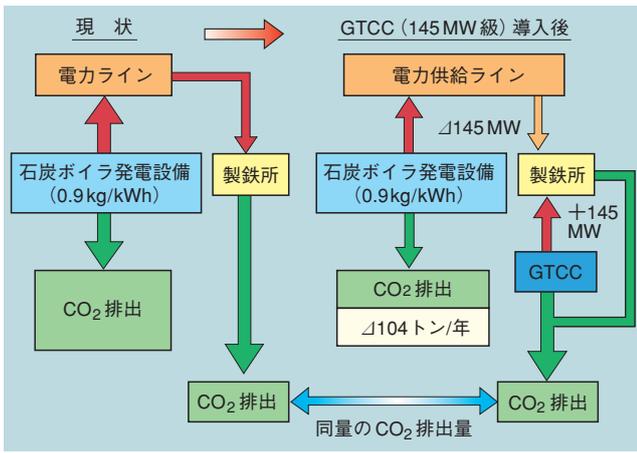


図4 製鉄所でのCO<sub>2</sub>削減のイメージ図

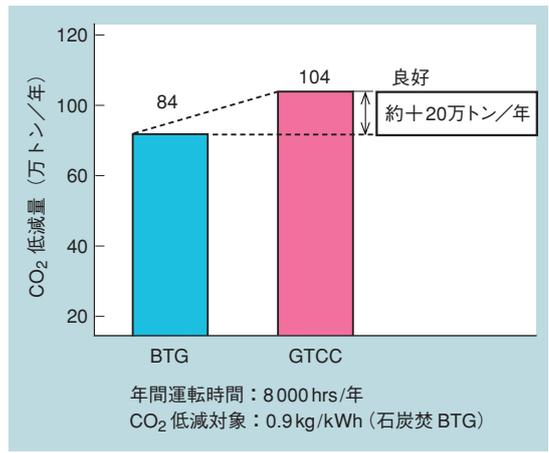


図5 CO<sub>2</sub> 低減量の比較

津共同発電所5号機においては、世界初となるF形ガスタービンによる高効率大容量のBFG 焼きコンバインドサイクルプラントを納入し、BFG 焼きガスタービンでは最高のタービン入口温度1300℃を実現している。最近では、中国及び韓国の製鉄業界の急成長に伴いBFG 焼きガスタービンの納入実績が伸びてきている。表3にその納入実績を示す。

### 5. BFG 焼きコンバインドプラントのCO<sub>2</sub> 排出削減効果について

CO<sub>2</sub> の発生量は、製鉄所副生ガスのBFG/COG量と相関がある。このBFG/COG量は粗鋼生産量により支配されるのでCO<sub>2</sub> 削減はこれらの副生ガスを利用する発電設備だけでなく周囲の設備も含めて評価する必要がある。この評価案を以下に示す。

途上国では、BFGが現状発電設備に利用されず大気放散されている。これとガスタービンコンバインドプラント(GTCC)導入後の比較を図4に示す。BFG 焼きGTCCで145MWを発電させることで、現状の石炭焼き汽力プラント(BTG)で発生させていた145MW分を削除することができる。その石炭焼きBTGのCO<sub>2</sub>削減分は年間発電時間を8000時間と仮定すると104万トン/年のCO<sub>2</sub>を削減できる。

新設BTGと比べると図5に示すように、GTCCが約20万トン/年も有利となる。

このように、BFGの有効活用としてプラント高効率化及び二酸化炭素の排出量抑制という観点から、ガスタービンコンバインドサイクルプラントの優位性を見ることができる。

### 6. ま と め

当社の水素リッチガス焼き及びBFGを主体とした

低カロリーガス焼きガスタービンの技術を導入した発電設備は、現在、多数の運転実績があり、また今後建設予定の発電設備も国内外に多数ある。この技術開発によりエネルギーの有効利用や地球環境対策の要求にこたえ、社会に大いに貢献できると考える。今後も当社はこの分野で先駆的な役割を果たすべく、より一層の技術開発に努める所存である。

### 参 考 文 献

- (1) H. Matsuda, Y. Oka, "Large Capacity and High Efficiency Combined Cycle Plant F Type Gas Turbine with BFG Firing" Mitsubishi Technical Review 2004.
- (2) T.Komori, N.Yamagami "Update on Design and Operating Experience of BTU Gas Firing Gas Turbine for Steel Works" 2005 Asian Congress on Gas Turbines (ACGT2005)
- (3) 小森豊明ほか、BFG 焼きガスタービンコンバインドサイクルプラント、日本ガスタービン学会誌 Vol.34 No.35 (2006)
- (4) 園田隆ほか、残さ油ガス化複合発電プラント向けF形ガスタービンの開発、三菱重工技報 Vol.41 No.1 (2004)



小森豊明



潮崎成弘



山上展由



北内洋介



秋月渉