

特集記事・6

SDGsの目標実現に貢献する鉄鋼業

製鉄所副生ガス焚き高効率ガスタービン コンバインドサイクルプラントについて

Blast Furnace Gas Firing Gas Turbine Combined Cycle Plant

三菱パワー(株) 高砂工場
プロジェクト総括部 電力計画部
主席技師 山上展由
Nobuyuki Yamagami

三菱パワー(株) 高砂工場
プロジェクト総括部 電力計画部
瀧 翔太
Shota Taki

三菱パワー(株) 高砂工場
GT技術総括部 大が技部
主席技師 笹原 淳
Jun Sasahara

1 はじめに

近年、製鉄業界においてエネルギーの有効活用および二酸化炭素削減の要求に応えるため、製鉄プロセスで大量に発生する副生ガスを有効活用する目的で、高効率で大容量の製鉄所副生ガス焚きコンバインドサイクルの技術開発が望まれてきた。特に日本は、石炭、石油、ガスの天然資源が乏しく他の国に比べて燃料代が高い傾向にあり、環境負荷の低い副生ガスの有効活用に強い要望がある。これにより、SDGsの目標のうち、目標7にある持続可能かつ環境負荷に配慮した、エネルギー効率の改善が期待できる。しかし副生ガスは天然ガスに比較して低カロリーであり、燃料供給ガス圧力が低いこと、また燃料中に不純物が多いことから副生ガスを利用する場合には解決すべき技術的な課題が多く存在している。

当社は、低カロリー燃料の有効利用というニーズに応えるべく、従来から副生ガス焚きガスタービンの研究開発に取り組んでおり、タービン入口温度1,000℃級を越えるD形、F形ガスタービンによる副生ガス焚きコンバインドサイクルプラントの実績を多数有している。

これらの技術を結集して、従来の1,250℃級D形ガスタービンから更なる高効率化・大容量化を図ったコンバインドサイクルプラントの開発に成功し、JFEスチール(株)扇島火力発電所新1号機に納入した。本発電所は2019年11月20日より営業運転を開始し現在継続運転中である。本報では、製鉄所副生ガス焚きガスタービンコンバインドサイクルプラントに関する当社の最新鋭の技術について紹介する。

2 各種燃料ガスの適用実績

表1は三菱パワーのM型ガスタービンに使用された燃料の種類および台数を示したものであり、2020年9月時点で合計台数が784台に達している。また図1に弊社ガスタービンのガス燃料発熱量の範囲の実績を併せて示す。

図1に示すように、2.5MJ/m³Nから84MJ/m³Nまでの幅広い発熱量のガス燃料の実績を有しており、特に注目すべき点は4MJ/m³N以下の低発熱量の実績が多い点である。

3 副生ガス用ガスタービンの開発と変遷

日本で最初の副生ガス焚きガスタービン(出力850kW)は1958年に開発を終え第一号機として八幡製鐵所(現:日本製鉄(株))に、さらにMW171ガスタービン(出力15MW)を住友金属(株)和歌山製鐵所に納入している。一方、ヨーロッパでは1950~1965年の間に30台前後の副生ガス焚きガスタービンが建設されている。これらのタービン入口温度は約750℃と低いため、これらのプラントの多くは再生サイクルを適用してプラント熱効率を改善している。

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、タービン入口温度の上昇に伴うガスタービンの排ガス温度の上昇により、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年に弊社はM151ガスタービン(タービン入口温度1,000℃以上)を使用したコンバインドサイクルプラントを日本製鉄(株)釜石製鐵所に納入した。本

M151 ガスタービンの開発後、100MW級のD形ガスタービン (1,150℃クラス) での副生ガス焚の開発に着手した。

本成果を基に1987年にはJFEスチール (株) 千葉製鉄所に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。このプラントはプラント効率46% (LHVベース) と、副生ガスを燃料とする発電プラントとして当時の世界記録を達成した。

本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形からタービン入口温度を100℃上昇させたDA形ガスタービンを使用した同規模プラントを瀬戸内共同火力 (株) 倉敷共同電所と福山共同発電所に納入した。

さらにこれらの技術を結集し、君津共同火力 (株) 君津共同発電所5号機に副生ガス焚ガスタービンでは最高のタービン入口温度1,300℃を実現した、世界初となるF形ガスタービンによる高効率大容量の副生ガス焚コンバインドサイクルプラントを納入した¹⁾。

表1 燃料適用例

燃 料	台 数
(1) 天然ガス 又は LNG	405
(2) 製油所ガス 又は LPG	19
(3) 製鉄所ガス	57
(4) 蒸留油	65
(5) 天然ガス / 蒸留油	210
(6) 製油所ガス / 蒸留油	7
(7) 製鉄所ガス / 蒸留油	9
(8) 石炭ガス化ガス / 蒸留油	2
(9) VRガス化ガス / 蒸留油	1
(10) その他	9
合計	784

2020年9月時点

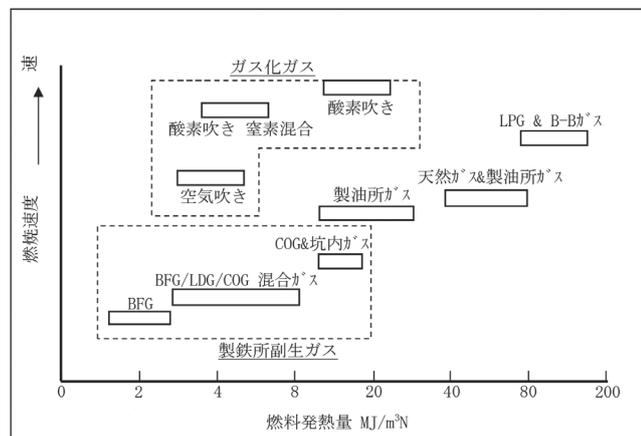


図1 燃料ガスの実績

最近では、中国及び韓国の製鉄業界の急成長に伴い副生ガス焚ガスタービンの納入実績が伸びてきている。表2に製鉄所副生ガス焚きの納入実績のうち、D及びF形の大容量発電

表2 副生ガス焚ガスタービンの納入実績

運開年	燃 料	プラント出力	GT名称	納入先
1958年	BFG	0.85 MW	プロウ駆動	日本
1964年	BFG	4 MW	プロウ駆動	日本
1965年	BFG	15 MW	MW171	日本
1970年	COG	225 MW	MW301	日本
1982年	BFG	16MW	M151S	日本
1987年	増熱BFG	149MW (CC)	M701DS	日本
1989年	BFG	32 MW	M251S	日本
1989年	LDG	30 MW	M251	日本
1991年	増熱BFG	37 MW (CC)	M151S	日本
1994年	増熱BFG	149 MW (CC)	M501SDA	日本
1995年	増熱BFG	149 MW (CC)	M501SDA	日本
1997年	増熱BFG	145 MW (CC)	M701DS	オランダ
2001年	BFG	67 MW (CC)	M251S	日本
2004年	増熱BFG	300 MW (CC)	M701SF	日本
2006	BFG	30 MW×4	M251S	中国
/2008年				
2006年	増熱BFG	300 MW (CC)	M701SF	中国
2006年	BFG	30 MW×2	M251S	中国
2007年	増熱BFG	153 MW (CC)	M701SDA	中国
2007年	CFG	146 MW (CC)	M501SDA-B	中国
2007	BFG	30MW ×3	M251S	中国
/2009年				
2008	増熱BFG	138 MW (CC)×2	M701SDA	中国
/2009年				
2008年	増熱BFG	30 X 2	M251S	中国
2009年	増熱BFG	151 MW (CC)	M701SDA	中国
2009年	増熱BFG	30 X 2	M251S	中国
2008年	BFG	30MW	M251S	中国
2010年	増熱BFG	142 MW (CC)×2	M501SDA	韓国
2010年	増熱BFG	151 MW (CC)	M701SDA	中国
2010年	COG	26MW	H-25 (28)	中国
2011年	増熱BFG	30MW	M251S	中国
2011年	BFG	30MW×2	M251S	中国
2011年	増熱BFG	140 MW (CC)	M501SDA	日本
2011年	増熱BFG	30MW X 2	M251S	中国
2012年	増熱BFG	30MW X 2	M251S	中国
2012年	増熱BFG	152 MW (CC)	M701SDA	日本
2012年	BFG	30MW	M251S	中国
2013年	増熱BFG	30MW X 2	M251S	中国
2013年	増熱BFG	30MW	M251S	中国
2013年	増熱BFG	300MW (CC)	M701SF	日本
2013年	増熱BFG	145MW (CC)×2	M501SDA	韓国
2013年	BFG	30MW×2	M251S	中国
2013年	BFG	30MW×2	M251S	中国
2014年	増熱BFG	147 MW (CC)	M501SDA	日本
2014年	増熱BFG	138 MW (CC)×2	M701SDA	中国
2015年	増熱BFG	145 MW (CC)	M501SDA	日本
2015年	増熱BFG	87 MW (SC)	M501SDA	日本
2016年	増熱BFG	30MW (CC)	M251S	中国
2018年	増熱BFG	183MW (CC)	M701SDAX	中国
2019年	増熱BFG	186MW (CC)	M701SDAX	中国
2019年	増熱BFG	188MW (CC)	M701SDAX	JFEスチール殿 (扇島)
2020年	増熱BFG	227MW (CC)	M501SF	日本
2020年	増熱BFG	189MW (CC)	M701SDAX	中国
2021年	増熱BFG	150MW (CC)	M501SDA	韓国
2022	増熱BFG	165MW (CC) x 2	M701SDAX	中国
/2023年				

設備の実績を、図2に中国及び韓国での副生ガス焚ガスタービンの納入場所を示す。

4 副生ガス用ガスタービンの設計

表3に代表的な副生ガス性状を示す。通常のガスタービンに使用される標準の天然ガスに対し製鉄所副生ガスとして代表的なBFG (Blast Furnace Gas) は、発熱量が低く、窒素及び二酸化炭素の不活性成分の割合が高い。また燃焼速度が遅く可燃範囲が狭いという特徴を有している。

このため、副生ガス焚ガスタービンでは、標準の天然ガス焚ガスタービンに対して、燃料制御システム、燃料供給システム、燃焼器などの最適化設計が必要となる²⁾。

当社は、長年の技術開発と多くの運転実績を基に、副生ガス焚ガスタービンの設計を確立させた。図3にその概要を示す。

図3に示すように、副生ガスで安定した運転を維持するた

めには、空気圧縮機、燃焼器、燃料供給システムの最適なマッチング設計が必要である。

次にその各要素の設計内容について説明する。

4.1 燃料発熱量

燃料発熱量はガスタービンの設計を行う上で重要なパラメータであり、発熱量が減少する場合には設計変更が必要となる。表4に燃料発熱量と設計のコンセプトを示す。

高信頼性及び高温部品の互換性を維持するために、タービン部品は共有化するが、他の要素は発熱量の違いにより設計変更を行う。

参考として、副生ガス焚ガスタービンの変更内容を以下に紹介する。

4.2 空気圧縮機

天然ガス焚と副生ガス焚のフローバランスを図4に示す。

副生ガスは低カロリーのためガスタービンへ供給される燃料ガス量が増加する。そのため標準の天然ガス焚ガスタービ

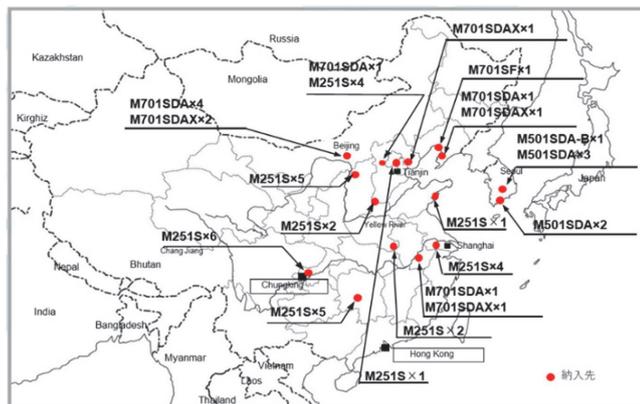


図2 中国、韓国向け製鉄所副生ガス焚ガスタービンの納入場所

表4 燃料発熱量と設計コンセプト

発熱量	高 42 - 105 MJ/m ³ N	標準 (天然ガス) 36MJ/m ³ N	中 8.5 - 29 MJ/m ³ N	低 3.1 - 8.4 MJ/m ³ N
空気圧縮機	標準	標準	標準	設計変更もしくは運転制限
燃焼器	標準 (マッテージェンジ [®])	標準	標準 (マッテージェンジ [®])	設計変更
タービン	標準	標準	標準	標準
燃料供給システム	標準 (マッテージェンジ [®])	標準	標準 (マッテージェンジ [®])	設計変更
燃料	LPG, B-B	LNG	Syngas	製鉄所副生ガス

表3 代表的な燃料ガス性状

燃料	LNG	BFG	増熱BFG	空気吹き Syngas
組成 (vol.%)				
CH ₄	88.0	—	2.02	2.9
C ₂ H ₆	7.11	—	0.24	—
C ₃ H ₈	3.58	—	—	—
C ₄ H ₁₀	1.24	—	—	—
C ₅ H ₁₂	0.05	—	—	—
N ₂	0.02	55.4	51.02	30.7
CO	—	22.4	20.88	11.0
CO ₂	—	20.4	19.78	10.9
H ₂	—	2.0	6.05	16.8
Ar	—	—	0.01	0.80
LHV (MJ/m ³ N)	40.9	3.0	4.2	4.3
可燃範囲 (—)	3.2	2.1	4.2	9.8
燃焼速度 (cm/sec)	37	3	16	44

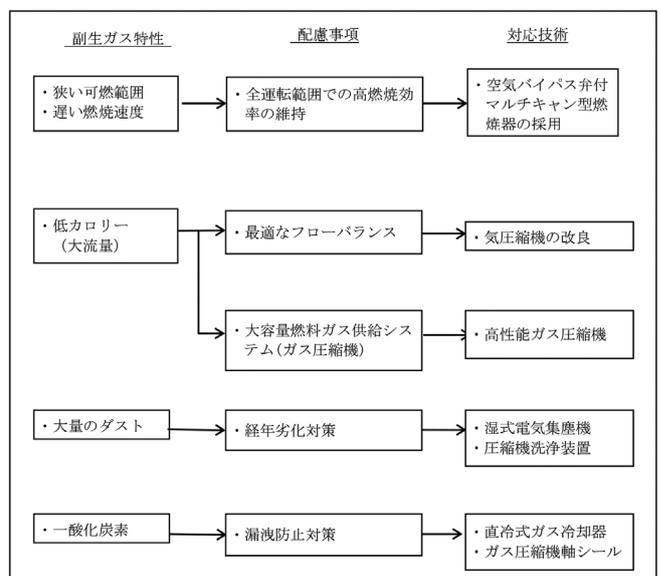


図3 製鉄所副生ガス焚ガスタービンの設計配慮一覧

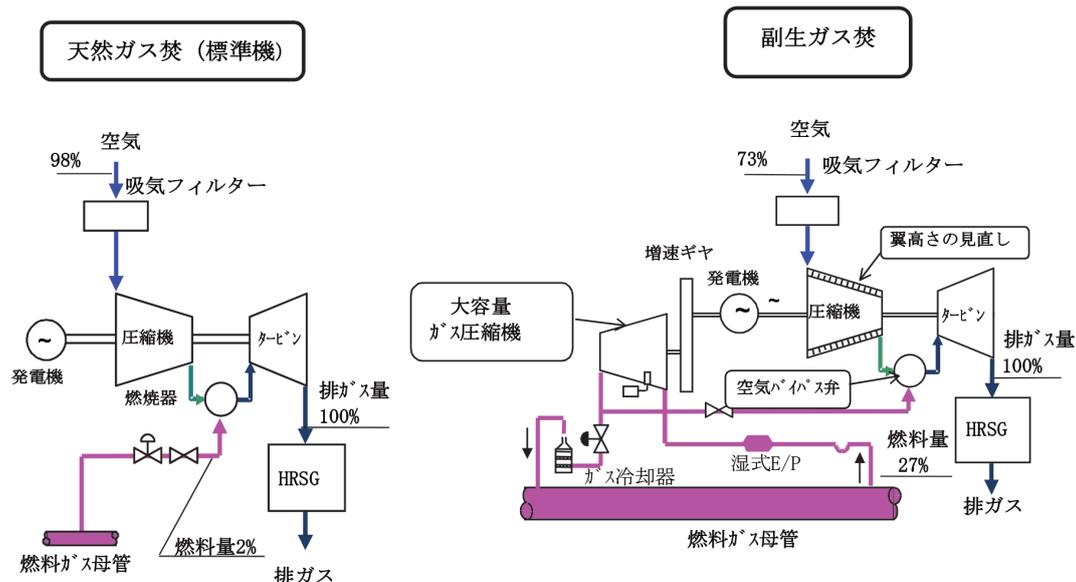


図4 天然ガス焚と製鉄所副生ガス焚のフローバランス

ンを適用すると圧力比が上昇し空気圧縮機のサージング及びタービンのオーバーロードが懸念される。これらを防止するためにタービンへの流入ガス量を同等にするように、空気圧縮機を標準機に比べて小型化し吸気流量を翼高さの調整(チップカット)によって減少させている。

4.3 燃焼器

副生ガス焚の場合、燃焼の安定性という観点のみを考えるとパイロットトーチ付きの単筒型燃焼器の方が適している。しかしながら、タービン翼の信頼性なども含めてガスタービン信頼性の全体評価から、マルチチャン型燃焼器がより好ましい。以下に本燃焼器について説明をする。

副生ガス焚ガスタービンでは燃焼器内筒の冷却用空気が減少するので冷却が困難となる。本対策として、大型の単筒型燃焼器と比べ冷却面積が少ない小型のマルチチャン型燃焼器を採用している。

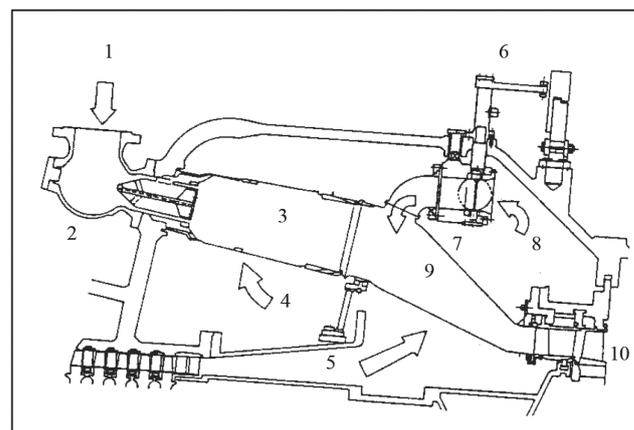
また、副生ガスは、可燃範囲が狭い特徴を有しており、部分負荷運転も含めて高燃焼効率を維持する為には常に燃空比を同程度にする必要がある。この燃空比制御の為に空気バイパス弁を設置している。

マルチチャン型副生ガス焚燃焼器の断面図を図5に示す。

空気バイパス弁は、燃焼器の尾筒部に取付けられており、弁開度の調整により内筒燃焼域への燃焼空気量を制御することが可能である。

この燃焼器の検証には、製鉄所内の実ガス(BFG/COG)を使用して燃焼試験を行った。

空気バイパス弁開度の設定は、無負荷時と全負荷時で安定かつ高燃焼効率が可能な燃空比を設定し、部分負荷時も高



- 1. 燃料ガス
- 2. 球状燃料室
- 3. 内筒
- 4. 燃焼用空気
- 5. 圧縮機吐出空気
- 6. 空気バイパス弁可変機構
- 7. 空気バイパス弁
- 8. バイパス空気
- 9. 尾筒
- 10. タービン

図5 マルチチャン型副生ガス焚燃焼器

燃焼効率が得られるように図6に示すような弁開度のスケジュールに設定している。

4.4 燃料供給システム

副生ガス焚は天然ガス焚と比べて燃料ガス量が多くなるため、天然ガス焚に比べて配管や弁のサイズが大きくなる。一方、ガスタービンへの配管反力を小さくするためには、配管径を小さくする必要がある。しかし、配管径を小さくすると圧力損失を増加させることになり、プラント効率を低下させる。そのため、全体のバランスを考慮して最適な配管径を計画する必要がある。

5 製鉄所副生ガス焚ガスタービンコンバインドサイクルプラントの特徴

従来は、副生ガスをフレア処理で大気放散したり、ボイラ焚の燃料として使用し発生した蒸気で蒸気タービンを駆動させ発電を行うコンベンショナルプラントの活用が主流であった。低カロリーの副生ガスはボイラ焚燃料としては燃焼させやすい一方で、プラント効率が低く、この結果単位電気出力当りの二酸化炭素量も多く排出する面がある。

近年、地球環境問題への取り組みの一つとして、地球温暖化防止の観点から二酸化炭素排出削減に向けた技術開発が求められている。この見地から製鉄所副生ガス焚ガスタービンコンバインドサイクルプラントの特徴を紹介する。

5.1 エネルギーバランスについて

図7に製鉄所副生ガス焚ガスタービンコンバインドサイクルプラント（以下：GTCC）とコンベンショナルプラント（以

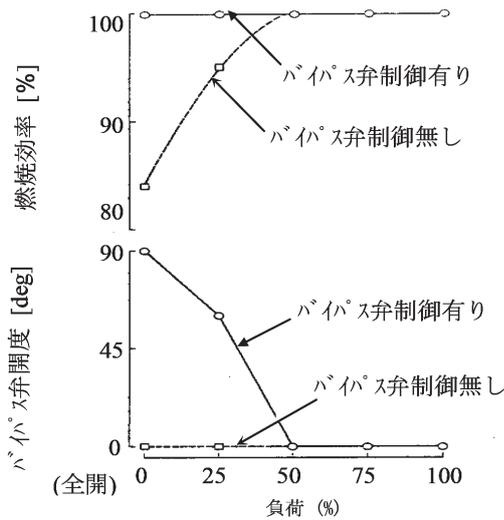


図6 空気バイパス弁開度と燃焼効率

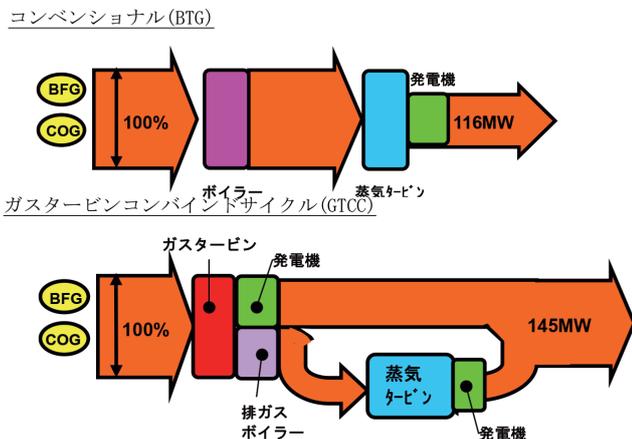


図7 エネルギーバランス図

下：BTG）とのエネルギーバランスの例を示す。また図8にプラントの効率と出力の比較のグラフを示す。

BFGとCOG (Cokes Oven Gas) の混合ガスを燃料とし、BTGとGTCCとで入熱量を同値とした場合、プラント熱効率（低位発熱量基準）は、BTGで36%及、GTCCで45%となりプラント発電端出力においてGTCCはBTGに比べて29MW (GTCC 150MW級にて比較) の増加が見込まれる。

5.2 CO₂排出削減効果について

CO₂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CO₂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。

図9は極端な例であるが、新興国で見られるようにBFGが現状発電設備に利用されず大気放散されていた場合とGTCC導入後の比較である。GTCCで145MW出力を発電させる代わりに、現状の石炭焚BTGで発生させていた145MW分を削除することが出来る。その石炭焚BTGのCO₂削減分は年間発電時間を8,000時間と仮定すると104.4万トン/年のCO₂削減効果となる。

BTGで比べると図10に示すように、GTCCが約21万トン/

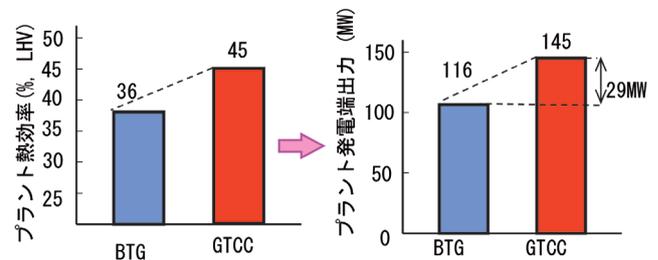


図8 BTGとGTCCの効率と出力比較

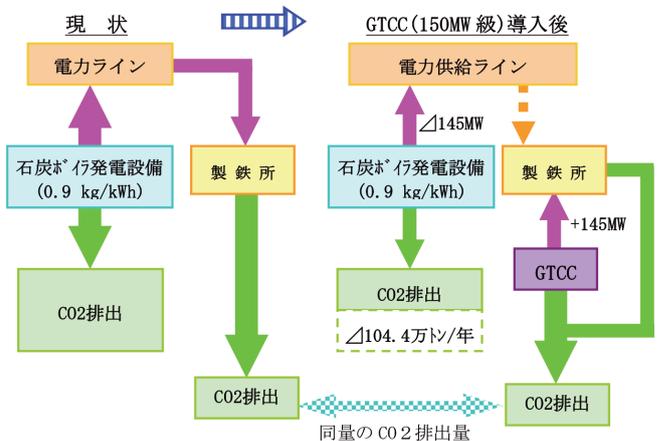


図9 CO₂削減のイメージ図

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みる事が出来る。

6 最新鋭 180MW級副生ガス焚 M701SDAX形ガスタービンコンバインドサイクルプラントの紹介

JFEスチール(株)扇島火力発電所新1号機は、最新鋭M701SDAX形ガスタービンを適用した副生ガス焚コンバインドサイクルプラントで、ガスタービン、蒸気タービン、ガス冷却器、復水器、制御装置といった主要機器を当社が納入している。表5にプラントの主要仕様を、図11にプラント概要系統を示す。また、図12に発電設備の配置図と図13に発電設備の全景を示す。

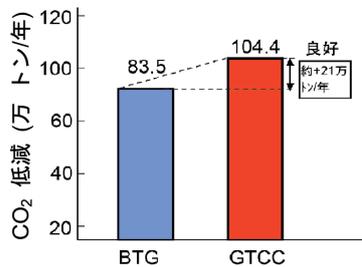
BFGは発熱量が低いいため、ガスタービンへ供給するためにCOGを混合し4.4MJ/m³N-dry (LHV) まで発熱量を上げて安定燃焼を図っている。ガスタービン、増速ギア、発電機、蒸気タービン、ガス圧縮機は一軸で構成されており、ガス圧縮機でBFGにCOGを混合した副生ガスを圧縮しガスタービ

ンの燃料として供給している。ガスタービンの起動装置として、既設のボイラからの蒸気を使用した蒸気タービンを用いている。燃焼器は空気バイパス付きのマルチチャン型燃焼器を採用し、蒸気噴射及び水噴射を行うことなく低NO_xでの運転を実現した。

表5 発電プラントの主要仕様

発電端プラント出力		188.2 MW
ガスタービン	燃料	副生ガス(BFG(増熱COG))
	型式	開放単純サイクル一軸式 M701SDAX (1250°C 級)
	出力 回転数	111.2 MW (ガス圧縮機動力分を除く) 3000 rpm
蒸気タービン	型式	一車室単流排気混圧復水形
	出力 回転数	77.0 MW 3000 rpm
	蒸気条件	蒸気タービン入口
	高圧蒸気 低圧蒸気	7.53 MPaG / 515°C 0.42 MPaG / 154°C
発電機	型式	AC 三相交流同期 水素冷却式
	容量	224,000 kVA
	電圧	16.5 kV
	回転数	3000 rpm

(大気温度:20°C, 大気圧力:1,013hPa, 相対湿度:70%)



年間運転時間 : 8,000hrs/年
CO₂ 低減対象 : 0.9kg/kWh (石炭焚 BTG)

図10 二酸化炭素排出量の比較

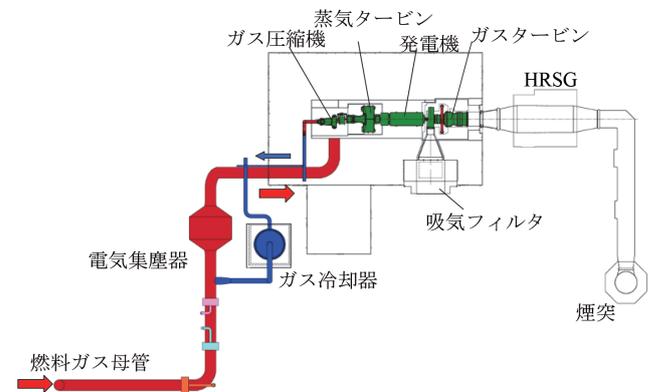


図12 発電設備の配置図

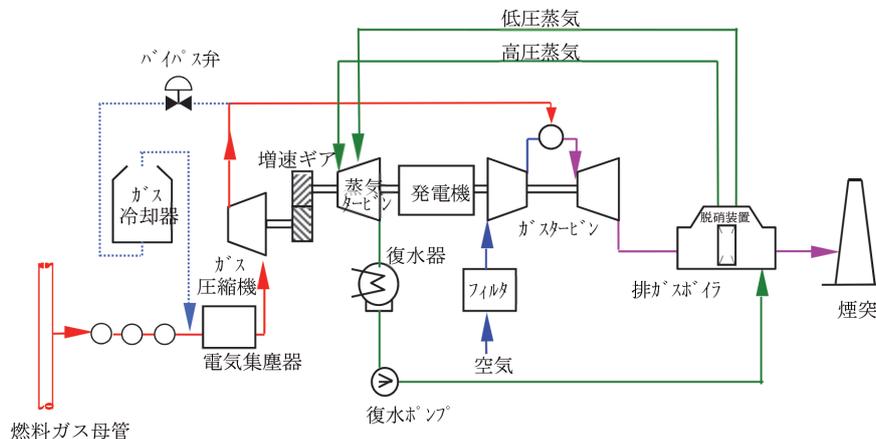


図11 プラント概略系統



図13 発電設備の全景

6.1 運転実績

本プラントは2019年7月から11月の試運転にて、性能および信頼性の検証を行った上で、2019年11月20日から営業運転を開始した。現在も順調に営業運転を継続している。プラントの工程を表6に示す。

6.1.1 プラント熱効率

性能試験において、プラント熱効率は計画値47.2%（発電端、低位発熱量）を達成した。

6.1.2 窒素酸化物排出値

性能試験において、ガスタービン出口のNO_x値は25ppmv（O₂、16%換算値）、煙突入口のNO_x値は5ppmv（O₂、16%換算値）を満足していることを確認した。

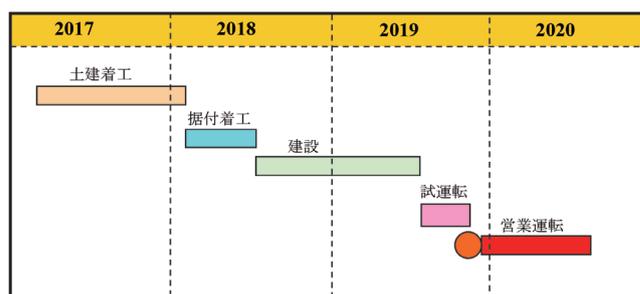
6.1.3 負荷遮断試験

100%負荷遮断試験の結果、速度上昇率は最大値で約6.8%であり、ガバナの制御性は良好であった。また、負荷遮断時の燃空比急変に対しても安定燃焼を継続しており、燃焼器の吹き消え特性の優位性を確認した。

6.1.4 起動特性

100%負荷上昇までの起動時間は、ホット起動で約60分、ウォーム起動で約115分、コールド起動で約190分を達成した。

表6 プラント工程



6.1.5 トリップ試験

BFG母管圧力の上昇値が水封弁の設定圧力を超えないことを監視しながら低負荷から徐々に実施した。100%負荷トリップ試験においては最大上昇圧力が計画値以下であり健全であることを確認した。

6.1.6 定期検査結果

営業運転開始から現在に至るまでに初回の定期検査を実施済みであり、初回定期検査では高温部品の燃焼器、タービンとも良好な結果を得ている。

7 おわりに

当社の製鉄所副生ガス焚ガスタービンの技術を導入した発電設備は、現在、海外で設計・建設中のものがあり、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応え、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) 松田秀雄, 岡雄一, 小森豊明, 山上展由: 三菱重工技報, 41 (2004) 5, 262.
- 2) 古迫達夫, 小森豊明, 山上展由, 木村秀夫: 平成16年度火力原子力発電大会論文集, (2004) 17.

(2020年10月15日受付)