

■ 技術報告 ■

中国宝山鋼鉄公司における高炉ガス専焼複合発電設備導入による省エネルギー効果について

Energy Saving Effect of BFG Firing CCPP for BAO STEEL of China

中 洲 皓*・張 宣 万**・胡 志 勇**

Ko Nakasu Zhang Yiwan Hu Zhiyong

(原稿受付日1998年6月25日, 受理日1998年10月7日)

1. はじめに

中国宝山鋼鉄公司(以下、宝鋼)は1985年9月にNo.1高炉を完成し、現在4000m³以上の高炉3基を有する中国における最新鋭の製鉄所であるが、その設立当初から高炉より発生する高炉ガス(Blast Furnace Gas, 以下BFG)の大気中への放散問題を抱えており、資源浪費となるためBFGの有効利用と利用率の向上は長年にわたる重要な課題であった。

このたび、この問題の解決方法として、最新鋭のガスタービンを有した世界最大のBFG専焼150MW複合発電設備(Combined Cycle Power Plant, 以下CCPP)を建設し、1997年11月28日より営業運転に入った。

本CCPPは操業開始以来省エネルギー効果および経済性の高さを当初の目標通りに発揮して運転を継続している。

本文では宝鋼において本CCPP導入により3基の高炉から発生する余剰BFGの有効利用がいかん改善されたかについて記載する。

2. 宝鋼CCPP建設に至る経緯

BFGは製鉄時に高炉から発生する副生ガスであり、量が多く、発熱量が低く、発生量の変動が大きいことが特徴である。宝鋼においてBFGは高炉熱風炉、圧延設備加熱炉、低圧ボイラ等の製鉄設備に使われる。発生BFGのうちこれら製鉄設備で使った残りが余剰BFGである。宝鋼設立初期においては余剰BFGは宝鋼自家発電所(以下、発電所)の汽力発電設備(以下、BTG)用ボイラ燃料として使われていたが、それ

も使いきれないBFGは大気中に燃焼放散せざるをえなかった。これはエネルギーの浪費で、余剰BFGの有効利用は大きな課題であった。

1980年代の末、宝鋼第二期工事の中心をなすNo.2高炉の建設当時、宝鋼の設計担当部門である重慶鋼鉄設計研究院は宝鋼における余剰BFGの利用問題を解決するための最適な案としてBFG焚きのCCPP建設の具体案を提案していた。CCPPは製鉄所内のエネルギー平衡を保持しつつBFGを燃料とする他の発電設備と比べ高い熱効率を有し、大量のBFGの利用が可能である。宝鋼ではBFGの高効率利用、宝鋼第三期工事後の蒸気不足の解消等の視点から、BFGを主燃料とする先進性のある145MW CCPP案と、従来技術である50MWの汽力発電設備2台案とを比較検討した。最終的に投資額とエネルギー需要の双方を考慮して、宝鋼第三期工事においてCCPPを建設することに決定した。

次の段階のCCPPの仕様決定において、一般に単独では安定燃焼の難しい3266kJ/m³_Nという極めて低い発熱量(因みに天然ガスは約41000kJ/m³_N)のBFG専焼型150MW CCPPと、BFGにコークス炉ガス(以下、Cガス)を混入し3980kJ/m³_Nに増熱したガ

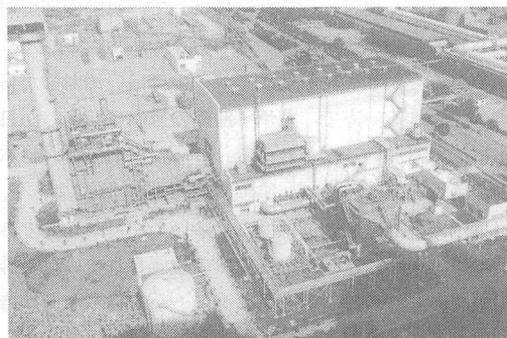


図-1 設備全景

* 川崎重工工業(株)原動機事業部タービン部参与

〒650-8670 神戸市中央区東川崎町3-1-1

** 宝鋼集団重慶鋼鉄設計研究院

住所 中国上海市宝山区鉄路2510号

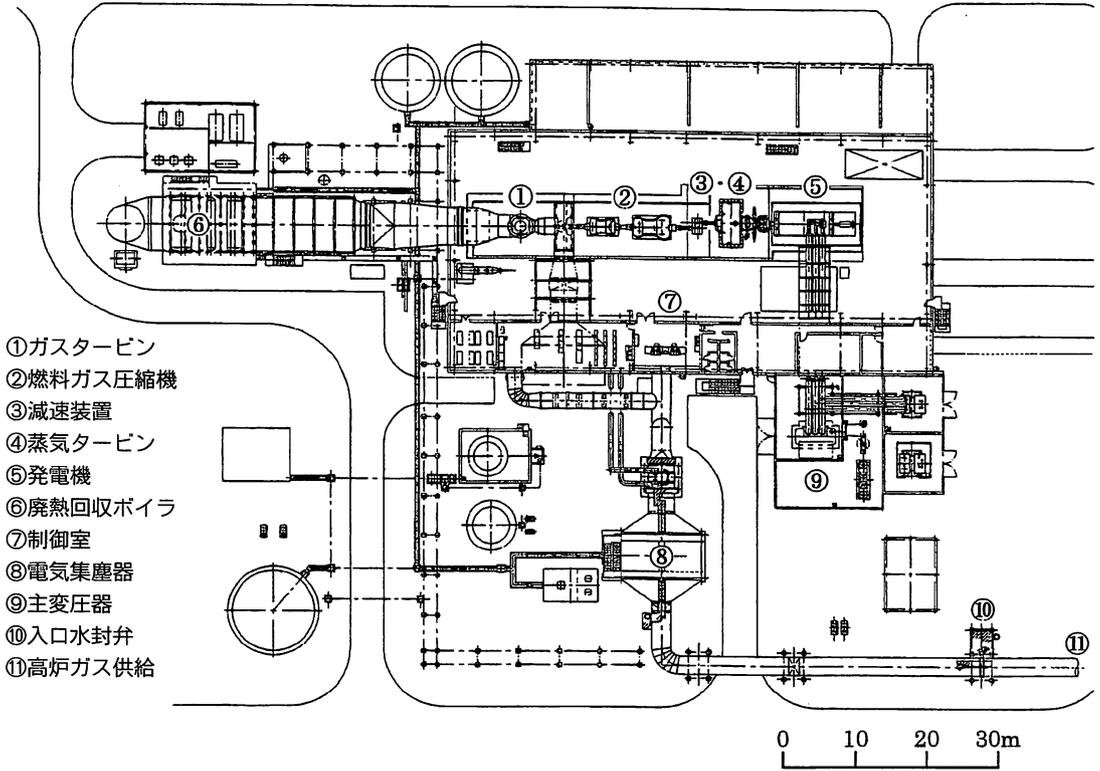


図-2 設備平面図

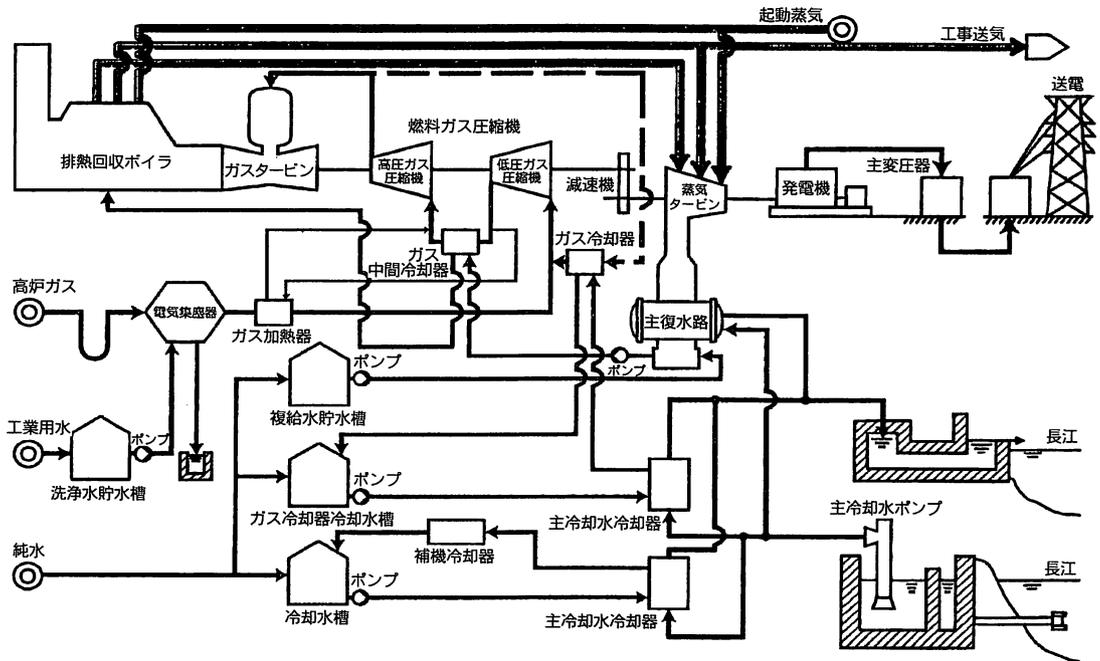


図-3 設備系統図

スを焚く混合ガス燃焼型の145MW CCGPとの2方式が比較検討された。

宝鋼におけるCガスの用途は多く、CガスをCCGPの燃料として使用すると別に外部から燃料を調達することが必要となり全体のエネルギー平衡に与える影響が大き過ぎることから、宝鋼は長期的視点に立って省エネルギー効果と経済性を見据え、当時大容量BFG専焼型CCGPの実績はなかったが、リスクを承知の上でBFG専焼型150MW CCGPを導入するという決定を行った。

3. 宝鋼CCGPの概要

本CCGPは宝鋼内の約105m×135mの敷地に建設された。図-1に設備全景、図-2に設備平面図、図-3に設備系統図、表1に主要機器要目を示す¹⁾。

本CCGPの設備規模は発電出力149.6MW、発電熱効率45.52%であり、BFGの定格消費量は 362.2×10^3

表1 主要機器要目

機 器	要 目
ガスタービン	型式：ABB 11N2LBTUガスタービン 定格出力：144MW 回転数：3600rpm
蒸気タービン	型式：KHI SCE500 内部抽気2段混圧復水式 定格出力：60.5MW 回転数：3000rpm
燃料ガス圧縮機	高圧：遠心式5段 低圧：軸流式15段、静翼全段可変式 回転数：3600rpm
減速機	型式：ダブルヘリカル形 最大伝達馬力：100MW 回転数：3600rpm/3000rpm
発電機	型式：横軸円筒回転磁界全閉空冷式 定格容量：176MVA 回転数：3000rpm
排熱回収ボイラ	型式：川崎Vogt式横形複圧式自然循環形 定格高圧蒸気：6.3MPa×513°C×169t/h
主変圧器	屋外強制空冷式、2巻線形 定格容量：180MVA 定格電圧：15kV/110kV
制御装置	型式：ABB PROCONTROL P 分散形、デジタル式

m^3_N/h である。さらにコージェネレーションとして宝鋼内に180t/hの蒸気を供給（工場送気）できる能力を持っている。

本CCGPの主要機械設備であるパワートレインは図-2に示すように3600rpmのガスタービン①と2台の燃料ガス（BFG）圧縮機②を3000rpmの蒸気タービン④と発電機⑤に減速機③を介して一軸に配置した構成であり、排熱回収ボイラ⑥はガスタービンの排気端に軸方向に配置されている。燃料配管設備は、BFGが低圧で大流量のため大口径となり、またダスト、ミストを含むため母管から分岐したBFG配管にこれらを取り除く湿式電気集塵器⑧を設置するなど、スペースが必要である。

本CCGPは起動条件確立後回転上昇から最大負荷取まで全自動シーケンスで運転されている。プラントの運転制御、監視はCCGP制御室に設置の4台のオペレーターステーションで行われており、運転監視操作が迅速容易に行われている²⁾。

4. 宝鋼におけるBFGの利用

4.1 余剰BFGの発生

1994年9月、宝鋼No.3高炉の完成により、3基の高炉が同時に生産を行う状態になった。この時点で計画ガス平衡に基づくBFGの年間総発生量は $15600 \times 10^6 m^3_N/y$ である。このうち製鉄設備で使用された後の余剰BFGは表2に示すようになり、年間総量は発生量の約1/3の $4844 \times 10^6 m^3_N/y$ であり、標準石炭に換算すると $540 \times 10^3 t/y$ になる。

宝鋼におけるBFGの概略系統を図-4に示す。

BFGを合理的に利用するためには、余剰BFGの流量とその発生時間との相関関係を十分に考慮しなければならない。統計によると、製鉄所の余剰BFG流量はほぼ正規分布に従って変化しており、正規分布曲線を積分すると、図-5に示す様に宝鋼の余剰BFG量の時間的变化のおおまかな特性が得られる。

流量変動が大きい余剰BFGを効果的に利用するために宝鋼としては、ベースの量を高効率の設備で利用し、さらに流量の変動分を吸取出る設備を組み合わせ

表2 宝鋼第三期工事後の余剰BFG

$$(\text{余剰BFG}) = (\text{発生BFG}) - (\text{製鉄設備用BFG})$$

余剰BFG 段階	最小流量 ($\times 10^3 m^3_N/h$)	最大流量 ($\times 10^3 m^3_N/h$)	日平均量 ($\times 10^3 m^3_N/h$)	年総量 ($\times 10^6 m^3_N/y$)	標準石炭換算 ($\times 10^3 t/y$)
高炉3基同時生産	113	993	553	4844	540

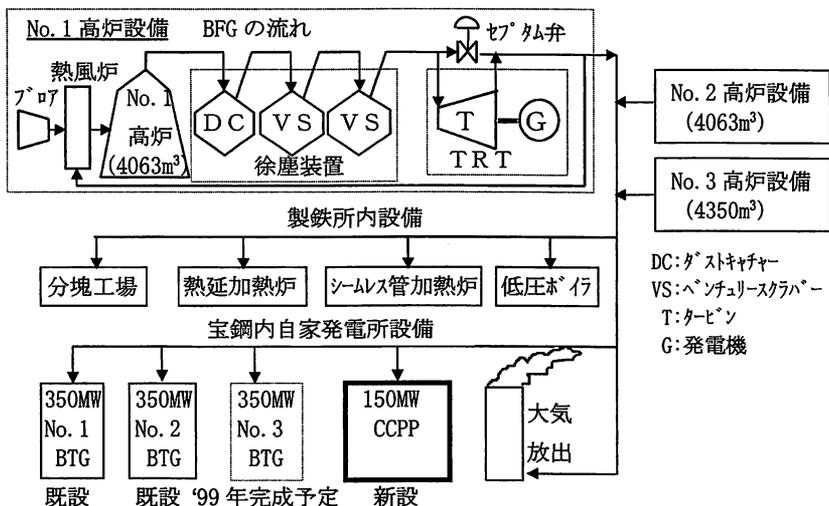


図-4 宝鋼におけるBFG利用の概略系統

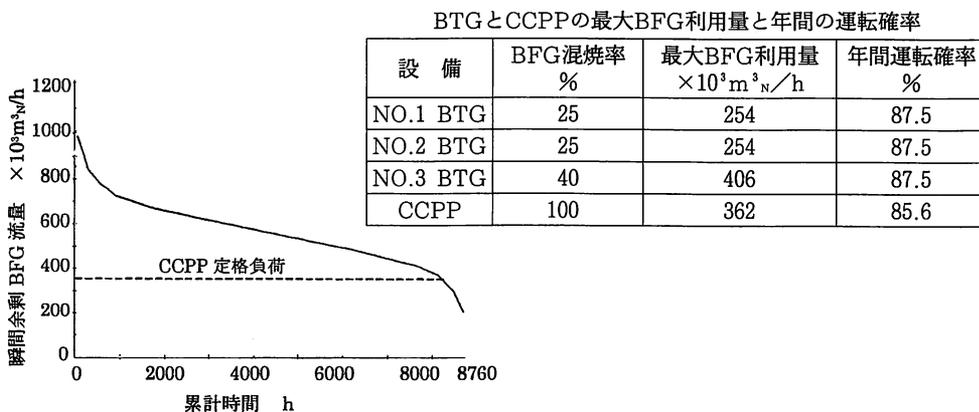


図-5 宝鋼余剰BFG流量曲線（3基高炉同時生産時）

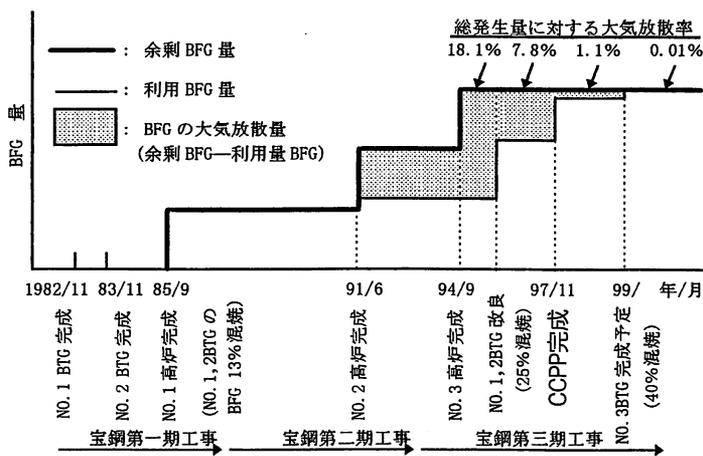


図-6 BGFの利用設備の建設と大気放散率の変遷

せてBFGの 대기放散を極力少なくするように計画した。

No. 1 高炉建設に先立って完成した発電所のNo. 1, No. 2 BTGのボイラは石炭、重油およびBFGを燃料とする混焼ボイラで、設計上のBFGの最大混焼率は13%で、1基当りのBFG利用量は $132 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ に相当した。その後、省エネルギー効果を狙ってBFGの利用率を高めるためボイラの改良がなされ、BFGの混焼率を25%に高めた。

その後建設された本CCPPは熱効率が高く、図-5に示すようにBFGの使用量も多いため、余剰BFGのベースの量を優先的に利用する設備として計画された。BFGの変動量を吸収する設備としては発電所のBTGが引き受けており、BTGによるBFG利用能力を引き上げるため、現在建設中のNO.3BTGでは最大混焼率は40%に設計されている。

これらの余剰BFG利用設備の建設を進める過程でのBFGの 대기放散率は図-5に示す各発電設備の最大BFG利用量と年間の運転確率を使って計算され、その変遷を図-6に概念的に示す。

以下、宝鋼における余剰BFGの利用が導入設備によってどのように改善してきたかを説明する。

4.2 CCPP完成までの余剰BFGの利用状況

本CCPP完成までは宝鋼の余剰BFGは発電所のNo. 1, No. 2 BTGでしか利用されず、この混焼率が当初の13%の場合、3基の高炉が同時に生産を行うとBFGの放散量は $2829 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ にも達し、BFGの総発生量の18.1%に相当する。

No. 1, No. 2 BTGの改良により混焼率が25%となった時点でもBFGの放散量は $1208 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (BFG総発生量の7.8%) にしか減少しない。

4.3 CCPP完成後の余剰BFG利用状況

(1) CCPP完成後からNo. 3 BTGの発電開始まで
本CCPP完成によってBFGの利用率が高まり、No. 1, No. 2 BTGと合わせてBFGを利用する事によってBFGの放散量が $180 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (BFG総発生量の1.1%) まで減少した。No. 1, No. 2 BTGおよび本CCPPを運転することにより実質上BFGの放散は無くなったと言える。

(2) No. 3 BTGの発電開始以後

第三期工事の完成によって、BFGを大量に利用する高効率CCPPが存在するうえに、BFG流量変動を十分な容量で吸収出来るNo. 3 BTGが完成し、製鉄所における余剰BFGを利用するための2つの必要条

件(ベースの量の高効率利用と流量の変動分の吸収)を満たすことになる。この時点から設計上、BFGの放散量は $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (BFG総発生量のわずか0.01%) に減少し、宝鋼のBFGの99.99%が利用されることとなる。

5. CCPPの運用

5.1 CCPPの効果的運用

一般にガスタービンは部分負荷での効率低下が大きい。本CCPPでは工場送気無しの場合、図-7に示すようにガスタービンの負荷を下げるとCCPP発電熱効率は大きく低下する。このため、CCPPの特長である高効率性を十分に活かすためにはCCPPの高負荷運転を維持することが必要となる。

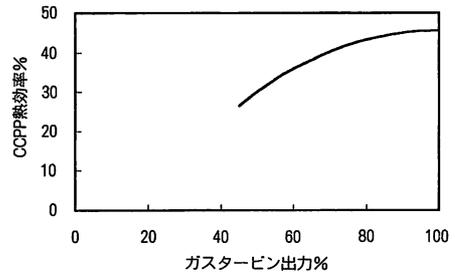


図-7 CCPPの部分負荷効率

5.2 運転方式の決定

本CCPPは3項で述べたように蒸気タービンから抽気し製鉄所内に最大180t/hの蒸気を供給(工場送気)するコージェネレーションとして利用でき、熱エネルギーの総合的な利用率が向上する。熱エネルギーの利用効率をコージェネレーションで通常よく使用されるような定義 [(発電出力エネルギー+工場送気熱エネルギー)/(ガスタービン投入燃料エネルギー)] で表すと、コージェネレーションとして最大の熱エネルギーの利用率は77.6%にも達する(送気圧力1.67MPa, 温度260℃の時)。具体的には宝鋼における生産全体の電力、熱エネルギーの需要およびこれらの価格などの要素を考慮して最適な運転点を選んでいる。

6. 宝鋼CCPPの省エネルギー効果のまとめ

一般に、中国の製鉄所では高発熱量のガス(Cガス、転炉ガス等)の利用率が高く、一方低発熱量のBFGは余っており、有効に利用されず大量に空中に放散せざるを得ない状況である。宝鋼において世界初のBF

表3 宝鋼主要省エネルギー設備の効果比較（1基での比較）

名称	エネルギー回収形態	年間回収量	標準石炭換算（ $\times 10^3 \text{t/y}$ ）
CDQ	蒸気	$964 \times 10^3 \text{t/y}$	113
TRT	電気	$120 \times 10^6 \text{kWh}$	39
OG	蒸気	$153 \times 10^3 \text{t/y}$	18
CCPP	蒸気+電気	$1047 \times 10^6 \text{kWh}$ (全て発電の場合)	283

G専焼大型CCPPが完成し操業に入ったことは、省エネルギーの観点から非常に大きな意義がある。宝鋼三期工事の余剰BFG利用に対する上記の説明を通じ宝鋼のCCPPの省エネルギー効果を明らかにしたが、以下に種々の観点からの評価を加えてまとめを行う。

(1) BFGの有効利用

ガスタービンには本CCPPの負荷運転時には発熱量 $3266 \pm 168 \text{kJ/m}^3_{\text{N}}$ のBFGで安定燃焼が得られるように設計されており、軽油やCガスなどの補助燃料を必要としない。現地での性能試験の結果、ガスタービンはこの要求仕様を満たしているばかりか、BFG発熱量の急変に対しても良く追従し、発熱量が $3015 \text{kJ/m}^3_{\text{N}}$ まで低下しても安定して燃焼を続けられることが確認され、実用上優れた設備であることが実証された。

(2) 高い発電熱効率

本CCPPの発電熱効率の設計値は45.52%であるが、性能試験で46.07%を確認した。一般にこれと同容量のBTGの発電熱効率は約32%、宝鋼自家発電所No.1, 2, 3 BTG (350MW) の発電熱効率は約38%であり、CCPPの採用により大幅な熱効率の改善が達成された。

(3) コージェネレーション

本CCPPは製鉄所内に蒸気が供給でき熱エネルギーの利用率を上げることができる。また、このため新たにボイラを建設する必要がなくなった。

(4) エネルギー平衡

本CCPPの優れた点は宝鋼として発生エネルギーであるBFGと需要エネルギーである電力と蒸気とを有機的に結合し、しかも柔軟に変換でき調整も簡単なことである。製鉄所の実際の熱電比の変動要求に応じて本CCPPは熱をベースとして電力を決定したり、逆に

電力をベースに熱を決定する運転が可能で、エネルギー平衡に対し理想的な効果をもたらしている。

(5) 最高の省エネルギー方式

宝鋼にはすでに稼働中の省エネルギー設備が多数ある。中でも、コークス炉乾式消火設備 (CDQ)、転炉余熱ボイラ設備 (OG)、炉頂圧発電設備 (TRT) などが突出しているが、取り分けCDQの省エネルギー効果が著しい。表3にこれら省エネルギー設備の比較を示すが、CCPPは省エネルギー効果を石炭に換算すると $283 \times 10^3 \text{t/y}$ でCDQの約3倍に相当し、製鉄所における最高の省エネルギー設備である。

7. おわりに

中国冶金工業部の調査によると1996年の1年間で中国全国の大中高炉で発生するBFGは $18430 \times 10^3 \text{t/y}$ の標準石炭量に相当し、このうち利用しないで大気に放散しているBFGは12.8%である。これをCCPPで回収した場合、1年間に回収される発電量は約 $8800 \times 10^6 \text{kWh}$ と計算される。

したがって、本プラントのようにBFG専焼ガスタービンを用いたCCPPを全国の製鉄所に設置すれば、大きな省エネルギー効果が期待できる。

宝鋼におけるBFG専焼CCPPの成功は製鉄所の余剰BFGを効率よく利用する新技術の一つを実証したことで大きな意義がある。

参考文献

- 1) 今井ほか：火力原子力発電誌 Vol. 46, No. 10 (Oct. 1995) p. 1146
- 2) 稲垣ほか：川崎重工技報137号 (Apr. 1998) p. 20