ガスタービンリパワリングのシステム選定の考え方と適用事例

株式会社日立製作所システム事業部 坂 内 正 明

Gas Turbine Repowering Systems and Application

Masaaki Bannai

Systems Engineering Div. Hitachi, Ltd.

Cogeneration systems (CGS) have been widely accepted in the market, and various modified systems are in operation. Among them, a gas turbine repowering system is very interesting, in which a gas turbine generator (GT) is added to an existing combined power system of a boiler and a steam turbine (ST). In this system, the exhaust heat of GT is directed to ST, is used as an additional combined cycle, and the overall heat efficiency is improved.

The characteristics of this repowering are: energy saving by 10–30 percent by step-by-step (cascade) energy use, less emission of carbon dioxide and nitrogen oxides, additional power generation by GT and total energy saving in a mill.

1. はじめに

近年、産業構造の高度化、都市化に伴ってエネルギー需要の伸びと共に、電力供給の不足が懸念され、分散電源・昼間の最大電力のピークカット対策・省エネルギーへの真剣な取り組みへの重要性が増している。

これらへの取り組みとして、自家発電システム、特に燃料のエネルギーを最初に電力に変え、その後残存熱エネルギーを蒸気等で回収するコージェネレーションシステム（以下CGSと略す）は、電力と熱を得ることで、エネルギーの利用効率を高めることができるので、非常に有効な手段である。

CGSは、昭和61、62年度に実施された通商産業省による商用電力との連系や特定供給の規則緩和等により、広汎に設備されるようになりその市場も順調に大きくなりつつある。市場が大きくなるにつれ、CGSも多種多様なシステムが生まれつつあるが、そのなか

でも、特に既設ボイラーとスチームタービン（以下、STと略す）による発電設備にガスタービン（以下、GTと略す）発電設備を付設し、その排熱を既設のST設備に利用してコンバインドサイクルを構成し、発電出力の増加と熱効率の向上を図るリパワリングシステムが注目を集めている。

本稿では、産業用リパワリングの選定方法と実際の稼働事例を紹介する。

2. リパワリングシステムについて

リパワリングとは、既存発電所の効率改善を伴う発電能力の増強であり、GTを利用するリパワリングは、GTの排熱を既存発電所（ボイラ・ST）に使用しコンバインドサイクル化することにより、省エネルギーとGT分の発電出力の増加を図るものであり、以下に特徴を示す。

(1) エネルギーを多段的に有効利用（カスケード利

用)でき、従来よりも10%~30%の省エネルギーが図れる。

(2) 環境面においては、省エネルギー効果により二酸化炭素 (CO₂)、窒素酸化物 (NO_x) の低減が図れる。

(3) 付設したGT分の発電出力の増加が図れる。

(4) 省エネルギーにより工場のエネルギーコストの低減が図れる。

図1にGTを使用したリパワリングに概念フローを示す。

リパワリングの方法は、GTの排熱利用形態により、3方式に大別される。

(1) 給水加熱形コンバインドサイクル

(2) 排熱回収形コンバインドサイクル

(3) 排気再燃形コンバインドサイクル

上記(1)~(3)方式の特徴の比較を表1に示す。

(1)の給水加熱形は、GT用煙突の設置と給水加熱に必要な熱量に適合するGTとの組み合わせを前提とするので、工事に要する発電停止期間が短いという利点があり緊急電源の適用に評価される方式である。

(2)の排熱回収形は、新設にも適用される多軸形排熱回収コンバインドサイクルと同じ方式であり、高い効率が期待できる。既設ユニットの長期間の停止を必要とするが、中・小容量火力のリパワリングには適している。

(3)の排気再燃形は、GTの排ガスをボイラ燃焼用酸素源として使用するため、給水加熱形や排熱回収形に比べて単位出力当たりの取り扱いガス量が少なく環境条件対応に優れている。また、短期の既設停止で出力

増加と効率向上が図れることから、わが国でのリパワリング計画のほとんどがこの方式であり、海外の実績も大多数がこの方式である。

3. システム導入検討

ここでは、産業用リパワリングシステムの導入を検討する場合の考え方と検討項目を述べる。

図2に産業用リパワリングシステム導入検討フローを示す。導入検討をする際には、まず、現状調査をする必要がある。調査項目は、既存のSTシステム、蒸気と電力のデマンド、生産プロセスとSTシステムとの関係、将来のデマンド増加予測、生産システムの将来計画などであり、更に実際の導入の際に問題となるスペース、要求工期、公害規制上の条件等も確認しておく必要がある。

次に、実際のシステム構築（リパワリング方式と、GT機種決定）となる。システムを決定したら、導入前後のデマンド、エネルギーバランスを検討し、経済性の評価を行う。この際には、必要に応じ、商用への売電メリットも検討する。この経済性評価、あるいは、デマンド、エネルギーバランスの評価によりシステムの再検討を行なっていき、最適案が決定される。

図3にリパワリング方式、GT機種決定のフローを示す。リパワリング方式については、排熱回収方式と、排気再燃方式の2方式を示している。排熱回収方式は、蒸気量を主体としてGTを決定する方式であり、排気再燃方式では、GTの排ガス条件と既存ボイラの適合性を主体としてGTを決定する方式といえる。

排熱回収方式では、既存ボイラの構造等に影響をう

図1 産業用リパワリング概念フロー図

表 1 リパワリング主要システム

システムの種類 項 目		(1) 給水加熱形	(2) 排熱回収形	(3) 排気再燃形
1. システム概要		<p>・ガスタービンの排ガスで蒸気サイクルの給水を加熱する。</p>	<p>・既設ボイラを撤去し、ガスタービンと排熱回収ボイラを設置する。</p>	<p>・ガスタービンの排ガスを、ボイラ燃焼用酸素素源として利用する。</p>
2. 既設改造範囲		ボイラ給水系	既設ボイラ撤去後 ガスタービン+排熱回収ボイラ設置	ボイラ給気部 (燃焼部、予熱系他)
3. 適合するガスタービン容量		ガスタービン 排ガス熱量 ≦既設ボイラ 給水加熱 熱量	ガスタービン排ガスから の回収蒸気 ≦既設ボイラ容量 または蒸気需要量	ガスタービン 排ガス量 ≦既設ボイラ 通ガス量 (ボイラでの燃焼用O ₂ 量が 制約となる場合も有)
4. 性 能	出力増加*	10～30%	～300%	20～40%
	効率改善	4～5%	20%以上	10%以上
5. 運転制御		簡 易	ガス～蒸気サイクル 一体運用	ガス～蒸気サイクル 協調運用要
6. 対環境	排ガス量	ガスタービン 排ガス分増	大	小
	CO ₂ , NO _x 削減率	小	大	大
7. 工事期間**		短	長	中

注：*既設蒸気サイクルが復水タービンの場合における発電出力増分。

**ボイラ形式、GTとの適合性、適用改造範囲によって工事期間は大きく異なるが、一般的な期間を示す。

けることはほとんどなく、要求される蒸気条件を満足すればよい。しかし、設置スペースの問題、既存ボイラでも一部蒸気をまかなう場合におけるボイラ負荷率等の運用上の問題を解決せねばならない。

排気再燃方式では、既存ボイラの改造を行うので、既存設備の仕様、構造の十分な検討を行わなければならない。GT機種を仮に決定した後の熱計算、圧損のチェック、全体プラントのヒートバランス、制御方法、また、改造点の検討を行っていく。これらの検討の後、許容できる制約条件（スペース、工期、設備投資、運

用方法等）を踏まえた実現可能性の検討を行い、最終のシステム（リパワリング方式、GT機種）を決定する。このとき最終決定は、デマンド、エネルギーバランスの評価と、経済性評価を十分に行わなければならない。

4. 排気再燃方式サイクル構成

4.1 排気再燃形コンバインドサイクルの特徴

排気再燃形コンバインドサイクルは、次のような特徴を持っている。

(1) 出力増加、効率向上が図れる。

*1 調査項目

(1) 既存 ST	(3) 蒸気/電力デマンド
①型式	(4) 生産プロセスとの関係
②出力	(5) 将来計画
③蒸気条件、必要蒸気量	(生産計画、設備更新等)
(2) 既存ボイラ	(6) スペース
①型式	(7) 要求工期
②蒸気量、蒸気条件	(8) 公害規制
③空気量、煙突	(9) その他

*2 基本方針決定

将来計画（生産計画、設備更新）を踏まえ、現状のスペース、要求工期、燃料転換、売電、等を考慮して、リパワリング方式やGT容量等の基本方針を決定する。

*3 リパワリング方式、GTの決定については図3参照

図2 産業用リパワリングシステム導入検討フロー

ガスタービン形式や適切なサイクル構成の選定によって効率向上が可能である。

- (2) 既設設備の有効利用が可能。

既設ボイラ設備、燃料設備、煙突などの流用が可能である。

- (3) 短いプラント停止期間（解列一火入れ）で、リパワリング改造が実施可能。

既設設備運転中に土木建築、機器追設などの工事が、定期検査期間中に改造工事が、それぞれ実施できる。

- (4) 環境対応が比較的容易なこと。

ガスタービン追設によって増加するNO_xには、既設脱硝装置の改造などによって対応が可能である。

4.2 検討項目

本方式は既存のボイラを改造するため、以下に示す問題が生じる。

4.2.1 ボイラ改造上の技術的問題点

- (1) 燃焼空気と燃料のミキシング

フレッシュ空気使用時に比べると、燃料と燃焼用ガスの割合が大きくなるため、均一にミキシングできるような構造のバーナを採用しなければならない。

- (2) ボイラ内部におけるドラフト損失

フレッシュ空気使用時に比べ、ガス量の増加、伝熱面積の増加により、ボイラ内部のドラフト損失が増加する。

- (3) 排ガスダクトの改造

(2)項で記載した事項とガスタービン許容背圧を考慮すれば、既設の排ガス流速よりも、さらに遅くなるように排ガスダクトを改造するケースもある。

但し、配置上、不可能な場合もある。

- (4) 低差圧バーナとターンダウン

全体許容ドラフト損失が減少するため、低差圧バーナの採用が必要となり、ターンダウン比率がフレッシュ空気時よりも大きくなる可能性がある。

- (5) 伝熱面積追加の必要

- (a) 蒸気部の追加

- (b) ガス式空気予熱器の削除と節炭器の設置

(6) ガスタービン運転時の排ガス運転モードと停止時のフレッシュ空気運転モードへの切り換え時における押込通風機の起動、停止方法

- (7) 空気ダクト、締切ダンパーの熱変形

4.2.2 配置上の問題

既設ボイラの燃焼空気にGT排ガスを利用するので、圧損を考慮し、既設ボイラの近隣にGTを設置する必要がある。

また、ボイラサイドとしても以下の改造スペースが必要となる。

- (1) 燃焼空気取入部（ボイラ缶前）に、場合によっては誘引通風機（IDF）が必要な場合もある。

- (2) 給水加熱器/空気予熱器の改造/移設/新設スペース

4.2.3 運転・制御上の問題

システムの運転・制御上の問題として、特に蒸気の部分負荷時及び停止時について述べる。

- (1) 部分負荷時

蒸気負荷減に対して、ボイラバーナの調整範囲内であれば支障ないが、それ以下の低負荷ではGT側の負荷制御が必要となる。

その際、GTの機種にもよるが、GT用コンプレッサの風量制御範囲外ではGTの排ガス量は、自身の負荷によらずほぼ一定となるため、ボイラサイドから見ると燃焼用給気の風量が変わらず温度が変化する形

図 3 リパワリング方式、GT の決定フロー

となる。

特にGT低負荷時には、ボイラ負荷が低い際は、熱収支の関係で節炭器内でスチーミングを起こす可能性が有る。

従ってプロセス蒸気の部分負荷運転については、ボイラバーナ、GTの制御方案と合わせて低負荷時の節炭器スチーミング対策を考慮する必要がある。

(2) 停止時

GT停止時に既設ボイラの運転継続を行うには、フレッシュエアの供給が必要となる。従って、この場合には、システムとして押込通風機（FDF）及び切り換えダンパを含めたフレッシュエアの供給ラインが必要だが、切り換えに際してはGT側の回転数低下（風量低下）に合わせての立上げが必要となる。

また、風量だけではなく、排ガスから空気への切り換えにより給気温度が低下するため、給気ラインの構成を含めたGT・ボイラの制御・インタロックの検討が必要となる。

5. 事例紹介

5.1 リパワリングシステム導入の背景

日本紙業株式会社殿東京工場（旧亀有工場）にはボイラ・ST設備が昭和42年に設置され、以来約30年間運転が行われ工場操業に寄与している。東京工場は東京都葛飾区に位置し住宅地域にあるため、周辺環境への配慮は非常に重要である。

本自家発電設備は、C重油を使用（排煙脱硫装置付）している大型設備であり、同社では、都で平成3

年3月15日より施行された「ボイラー室素酸化物排出低減指導要項」の主旨に従って、既設ボイラのガス（13A）化を検討していたが、燃料コストがネックとなっていた。このような背景から、燃料のガスへの転換を実施すると同時に、排気再燃形リパワリングシステムを導入し、エネルギーコストの削減と共に、併せて環境への影響の低減・自家発電比率の向上を図ることとなった。

5.2 システム概要

本リパワリングシステムのシステムフロー構成を図4に示す。

- (1) 付設するGTは、長時間連続運転に耐えるヘビーデューティ形で、出力は4,300kW（於大気温度7℃）である。その排ガスは排出量約65,500kg/hであり、温度約500℃である。
- (2) ボイラは、既設設備を改造し、燃料転換と共にボイラ単独/排気再燃のいずれの運転も可能とし、最大蒸気発生量は62,000kg/hである。また、STは最大出力8,000kWである。
- (3) GTとボイラ間の煙道にボイラバイパススタックと、GT排ガス大気放出ダンパ（DMP-3）を設けると共に、低温エコノマイザー入口には、大気放出時のガス遮断ダンパ（DMP-1）を設けた。排気再燃時にはDMP-1を開、DMP-3を閉にすることによってGT排ガスをボイラに導入する。また、GT・ボイラ単独運転時にはGT排ガスをバイパススタックから大気に排出し、ボイラは、FDFからの燃焼用空気のみで運転することとし

図4 システムフロー図

表 2 主要機器の仕様

機 器 名 称	仕 様		備 考
1. ガスタービン	形 式 単純開放サイクル一軸形 出 力 4,300 kW (於 大気温 7℃) 回転数 16,500 rpm 燃 料 13 A ガス NO _x 低減方法 水噴射		新設
2. スチームタービン	形 式 衝動式背圧タービン 出 力 8,000 kW		既設
3. ボイラ	改造前	改造後	既設改造 燃焼転換
最大連続蒸発量 最高使用圧力 過熱器出口蒸気圧力 過熱器出口蒸気温度 燃焼方式	72 t/h 93 kg/cm ² G 83 kg/cm ² G 483℃ C重油専焼 大気燃焼	62 t/h 93 kg/cm ² G 83 kg/cm ² G 483℃ 都市ガス専焼 大気燃焼および 排気燃焼

図 5 GT 構造図

た。

表 2 に主要機器の仕様を示す。また、図 5 に GT 構造を示す。

5.3 システムの特長と問題点

産業用リパワリングでは、事業用発電所とは異なり、特に使用者側のニーズに合わせたシステム構築・設計を行うことが重要である。多様化する使用者の要望に応えるための適切なシステムエンジニアリングこそが、

リパワリング導入成否の重要な要素である。

特に、製紙工場の場合、夏季、冬季のプロセス蒸気の変動、大型機器の補修、原料切れ（紙切れ）による主要電動機のトリップ等、その運転パターンは多種多様であり、これらに充分対応できるシステムを確立する必要がある。

(1) プロセス蒸気の確保

製紙工場では、その製造工程で多量の乾燥用蒸気を