

ガスタービン複合発電の動向

Tendency of Combined-Cycle Power Plant

舟 津 正 之*

Masayuki Funatsu

1. ま え が き

我が国では、現在、エネルギー消費の約60%を石油資源に依存し、しかもその99%以上を輸入によって賄っている。こうした状況において、石油への依存度低下を狙い省エネルギーの推進と代替エネルギーの開発が実施されており、国家プロジェクトとしてもムーンライト計画・サンシャイン計画が引続き実施されている。また、国際的には、1981年の国際エネルギー機構(IEA)閣僚理事会および先進国首脳会議の方針に沿って、省エネルギーの推進とエネルギー資源の多様化が各国で進められている。

こうした省エネルギー推進とエネルギー資源多様化の状況の中で、ガスタービンと蒸気タービンを組合わせたガスタービン複合発電が、熱効率の飛躍的向上ということから注目され、国内においてもLNGを燃料とする複合発電プラントの建設が進められている。発電プラントに関する技術は戦後著しい発展を遂げ、最近の大容量超臨界圧プラントにおいて40%前後の熱効率を達成している。これに対し、最近の高性能ガスタービンを使用した複合発電により、42~43%（発電端、高位発熱量ベース）以上の熱効率を得ることができる。

さらに、ムーンライト計画の一環としての高効率ガスタービンの開発に見られるように、ガスタービン高温化の技術開発が米国・日本等で進められており、この高温ガスタービンの実現によってガスタービン複合発電の熱効率の一層の向上が可能となる。

本稿では、ガスタービン複合発電の最近の動向について紹介する。

2. ガスタービン複合発電の方式の推移

ガスタービン複合発電は、ガスタービンの発達とともに各種の方式が採用されてきた。(図-1)

2.1 過給ボイラサイクル方式

ガス温度レベルが低い初期のガスタービンにおいては、ガスタービンの燃焼室を加圧ボイラとして構成し、蒸気発生後のボイラ出口の高温ガスをガスタービンに導入する過給ボイラサイクル方式の複合発電プラントが出現した。この初期のガスタービンでは排ガス温度が低く、排気再燃サイクル方式あるいは排熱回収サイクル方式としてもそれ程の熱効率の向上が期待できず、従って熱効率向上の度合の大きい過給ボイラサイクル方式が注目されたものである。

この方式はソ連およびヨーロッパを中心に採用され、現在100~200MW級のプラントが稼動している。しかし、ボイラを耐圧構造とする必要があり、また運転制御系が複雑になる等の理由から、あまり多くは使用されていない。

2.2 給水加熱サイクル方式

ガスタービンの排ガスで蒸気サイクル系の給水を加熱する方式であり、アメリカにおけるガスタービン複合発電の実用化はまずこの方式で着手された。初号機は、Oklahoma Gas & Electric社 Belle Isle 発電所で1949年に運転を開始した38MWプラント（ガスタービン：3.7MW、蒸気タービン：34.3MW）である。

2.3 排気再燃サイクル方式

ガスタービンの運転信頼性の向上に従い、ガスタービンを積極的に複合化できる排気再燃サイクル方式が実用化された。この方式は、ガスタービンの排ガスの顕熱をボイラで利用するとともに、排ガス中の残存酸素をボイラ燃料の燃焼に使用するものである。

1963年 Oklahoma Gas & Electric社 Horseshoe Lake 発電所で運転を開始した216MWプラント（ガスタービン：23MW、蒸気タービン：193MW）が最初の大容量排気再燃サイクルプラントである。日本では、1968年に32.9MW（丸住製紙・川之江工場）、1970年に225MW（四国電力・坂出發電所）の排気再燃サイクルプラントが運転を開始した。

*三菱重工業火力プラント技術部主任

〒108 東京都港区芝5-34-6

排気再燃サイクル方式は、プラント出力に占めるガスタービンの出力割合が1/6と小さく、蒸気タービン主体の複合発電であり、プラント熱効率は蒸気タービンプラント熱効率に対し相対的に5~10%の向上にとどまる

2.4 排熱回収サイクル方式

ガスタービンの温度レベルの向上に伴い、ガスタービンを主体に構成される排熱回収サイクル方式がより熱効率を向上する方式として出現した。

アメリカでは、1970年代に1,000℃級ガスタービンが現われ、排気再燃サイクル方式から排熱回収サイクル方式へと移行した。1973年に、Public Service of Oklahoma社Commanche発電所の240MWプラントが運転を開始している。

排熱回収サイクル方式は、プラント出力の約2/3をガスタービンが占めるガスタービン主体の方式であり、プラント熱効率はガスタービン熱効率に蒸気タービンによる出力増分を上乗せしたものとなる。

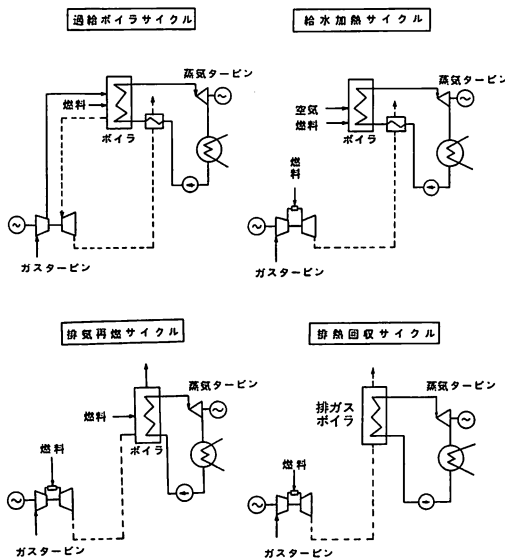


図-1 ガスタービン複合発電の方式

3. 排熱回収サイクル方式の動向

ガスタービン複合発電は、前述のようにガスタービンの発展とともに変遷してきた。現在、ガス温度レベル1,100~1,200℃級のガスタービンが実用化され、熱効率がよく設備構成が簡素な排熱回収サイクル方式がガスタービン複合発電の主流となっている。

3.1 海外での動向

現在稼働しているガスタービン複合発電プラントは、

世界で総出力20,000MWに及んでいる。このうち、アメリカとヨーロッパで、夫々10,000MWと総出力を二分している。

アメリカでは排熱回収サイクル方式が1970年代以来ガスタービン複合発電の中心となっており、総出力の85%を占めている。一方ヨーロッパでは、排気再燃サイクル方式が85%を占めている。この差異は、アメリカ系とヨーロッパ系のガスタービンの特性の違い等によるものである。最近ではヨーロッパにおいても、ガスタービンの温度レベルの向上につれ排熱回収サイクル方式の採用が増えてきている。

3.2 国内での動向

国内の電力会社におけるLNG燃料による発電計画において、排熱回収サイクル方式によるガスタービン複合発電が多く採用される傾向にある。これは、LNGのように良質な燃料を複合発電により高効率で利用することが可能であり、かつ環境安全性・経済性に優れているからである。

現在、運転・建設中の複合発電プラントを表に示す。(表1)

表1 日本において運転・建設中の排熱回収サイクル方式ガスタービン複合発電設備

施設者名	発電所	出力	燃料	運開年月
日本国有鉄道	川崎	140MW	灯油	56.3
新日本製鉄	釜石	25MW	BFG, COG	57.2
東北電力	東新潟(3号)	1090MW	LNG	59.12/60.10
東京電力	富津(1号)	1000MW	LNG	61.11
"	"(2号)	" MW	"	63.11
中部電力	四日市	560MW	LNG	63.7
九州電力	新大分(1号)	690MW	LNG	64.4
"	"(2号)	870MW	LNG	65.4/68.4

3.3 排熱回収サイクル方式の特徴

排熱回収サイクル方式のガスタービン複合発電プラントは、従来形火力に比し、優れた熱効率・迅速な起動・低公害化等の多くの特長を有している。(表2)

この排熱回収サイクル方式ガスタービン複合発電プラントは、複数台のガスタービン・夫々のガスタービンに対応する排ガスボイラ・1台の蒸気タービンからなる別軸(多軸)構成と、ガスタービンと蒸気タービンを一つの軸に結合し共通の発電機を駆動する同軸(一軸)構成がある。(図-2)

当社の場合、最新鋭大容量ガスタービンMW-501D形(60Hz), MW-701D形(50Hz)その他を使用している。

プラント熱効率にとって、ガスタービンの性能とと

表2 排熱回収方式ガスタービン複合発電の特徴

卓越した熱効率	現在のガスタービンとの組み合わせで、最新鋭従来形火力プラントを上まわるプラント熱効率が得られる。 ガスタービンの高性能化にともない、一層の性能向上が可能であり、省エネルギー発電設備として有望である。
優れた運転特性	最低負荷を低くとることができ、またガスタービンの運転台数を順次切替えることにより高い部分負荷熱効率を確保することができる。
迅速起動	通常起動 (daily start) では約60分で定格出力が確保でき、夜間停止を行うミドル負荷運用にも適している。
少ない温排水	温排水のないガスタービンの出力がプラント出力の約9%を占めるため、従来形火力プラントにくらべ温排水量が大幅に減少する。

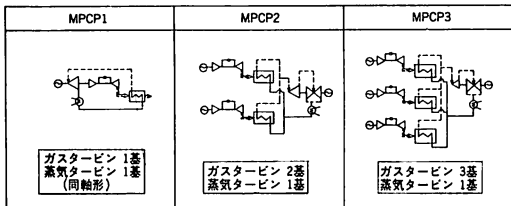


図-2 排熱回収方式の基本構成

もに、蒸気系をどのように選定するかが重要である。蒸気系の選定にあたっては、プラント熱効率とともに、その運用条件と経済性、および運転操作性を考えた必要がある。現在のところ、蒸気サイクルの構成としては非再熱混圧もしくは非再熱単圧サイクルが採用されている。

なお、将来の高熱効率ユニットでは、ガスタービンの高温化に伴い再熱混圧サイクルが検討されることが考えられる。

4. ガスタービン複合発電プラントの実例

以下に、最近の排熱回収サイクル方式によるガスタービン複合発電プラントの実例を紹介する。

4.1 新日本製鉄(株)釜石製鉄所

製鉄所内の高炉ガスとコークス炉ガスの有効利用を目指したガスタービン複合発電プラントであり、設備更新と熱効率向上に寄与するとともに、製鉄所内電力の供給信頼性を高めている。

ガスタービンは、低カロリの高炉ガスおよびコーク

ス炉ガス焼きのMW-151Sである。高炉ガスの供給が停止されても、軽油専焼による電力供給機能を持たせた設備である。排ガスボイラは、配置上の制約を考慮して、ガス逆流方式を採用した。なお、蒸気タービンは既設を使い、設備の有効利用を計っている。(表3、図-3)

表3 釜石製鉄所複合発電プラントの諸元

施設者名	新日本製鉄㈱
発電所形式	釜石製鉄所 排熱回収サイクル方式
ガスタービン出力	16MW
蒸気タービン出力	9MW
プラント出力	25MW
運開	57年2月

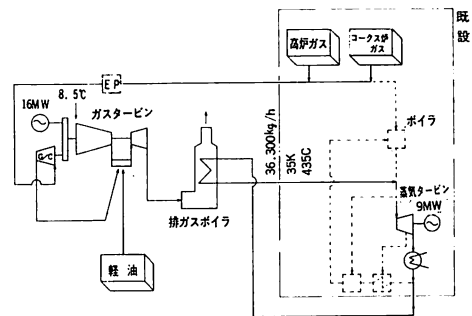


図-3 釜石製鉄所複合発電プラントの構成

4.2 東北電力(株)東新潟第3号系列

東北電力㈱東新潟第3号系列は世界最大容量の1,090 MWガスタービン複合発電プラントであり、ガスタービンには最新鋭大容量のMW-701D形を使用している。

(1) プラント構成

この複合発電プラントは、ガスタービン6台、排ガスボイラ6台、および蒸気タービン2台の主要機器から構成されている。ガスタービンと排ガスボイラを夫々1台ずつ組合せ、これら3組と1台の蒸気タービンを組合わせて1系列とし、これら2系列でプラントを構成している。(図-4)

(2) 主要機器の要目

ガスタービンは、一軸開放サイクル形で、LNG 気化ガスを燃料とし、低NO_x燃焼器を使用している。排ガスボイラは、ガス横流方式の複圧(混圧)式ボイラであり、乾式脱硝装置が組込まれている。この排ガスボイラにはモジュール工法を採用し、品質向上と据付工期の短縮を計っている。蒸気タービンは、最終翼に高性能40インチ翼を使用した二車室構造である。(表4)

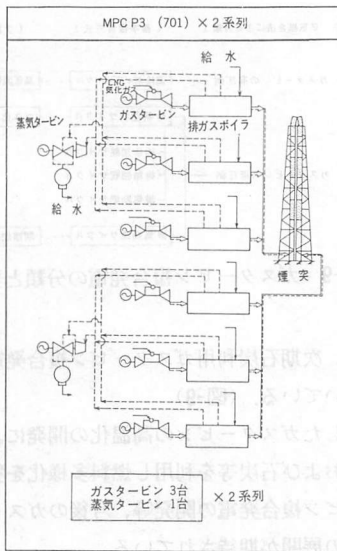


図-4 東新潟第3号系列の構成

表4 東新潟第3号系列の諸元

(1) ガスタービン	6 台	
種類	一軸開放サイクル形	
出力	133,000 kW (大気温度15°Cにて 118,000 kW)	
燃料	LNG気化ガス	
(2) 排ガスボイラ	6 台	
種類	排熱回収複圧式	
	(高圧)	(低圧)
蒸発量	194 t/h	57 t/h
(3) 蒸気タービン	2 台	
種類	反動くし形2流排気式複圧復水形	
出力	195,500 kW (大気温度15°Cにて 191,000 kW)	
	(高圧)	(低圧)
入口圧力	65kg/cm ² g	5kg/cm ² g
入口温度	500°C	飽和温度

(3) 機器配置

機器配置としては、ガスタービンと蒸気タービンは屋内配置、排ガスボイラはガスタービンに直列な屋外配置である。機器配置設計に際し、縮尺1/50および1/25のプラントモデルを作成し、運転性・保守性お

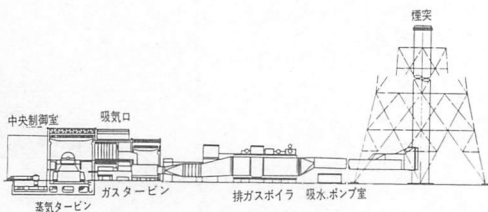


図-5 東新潟第3号系列の機器配置(側面)

よび据付工事を含めた総合検討を行った。(図-5)

(4) 制御システムと制御方法

複数の主機で構成されるガスタービン複合発電プラントでは、各主機間および各系列間の協調を図りながら、プラント全体を総合的に監視制御する協調制御が重要である。

このプラントの制御システムには、階層・機能分散形の総合デジタル計算機制御システムを使用し、柔軟で多様なプラント運用を可能としている。即ち、プラント全体を統括的に制御・監視する上位階層には制御用計算機と監視用計算機を設け、各発電ユニットの単独サブグループの低位階層には個々の計算機制御装置を設けている。(図-6)

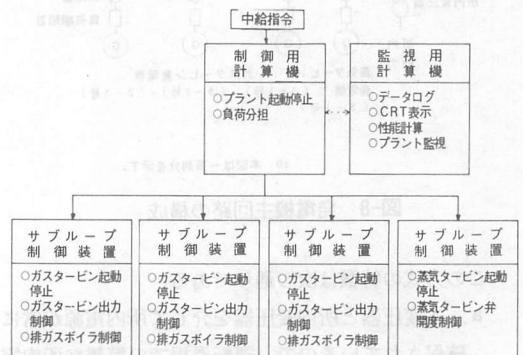


図-6 東新潟第3号系列の制御システム構成

中央制御盤は、複数の主機から構成されるプラント全体を監視制御する協調制御デスク、ガスタービン・排ガスボイラおよび蒸気タービンを夫々監視制御するユニット制御デスク、並びにプラント起動準備操作を行う補助盤から構成されている。少人数での運転管理が容易なように盤配置および監視操作器具を配列し、グラフィックCRTを活用したマン・マシンインターフェースに優れたものとしている。(図-7)

なお、以上の制御装置および中央制御盤の総合機能

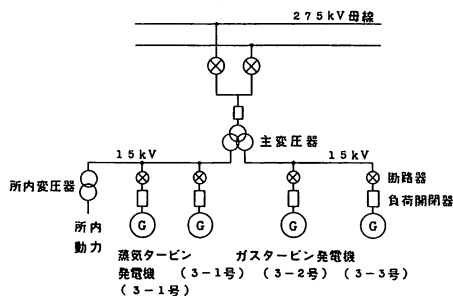


図-7 東新潟第3号系列の中央制御盤

を、工場にてシミュレータを用いて検証し、本制御システムが本プラントの動特性に適合していることを確認した。

(5) 発電機主回路の構成

本プラントには低圧同期投入方式を採用し、3台のガスタービン発電機と1台の蒸気タービン発電機に対して夫々の断路器および負荷開閉器を主変圧器との間に設けて、発電機主回路を構成した。(図-8)



注 本図は一系列を示す。

図-8 発電機主回路の構成

この方式の特徴は次の通りである。

- a. 主変圧器と所内変圧器を介して所内電源が常に確保されているので、運転過程での複雑な所内電源の切替操作が不要となり、運転面での信頼性が高い。
- b. 起動変圧器の省略、主変圧器の台数削減、および主変圧器の削減に伴う開閉所機器の削減等により機器配置スペースの縮小化を計る。

(6) 試運転状況

現地据付を完了後、1号系列（ガスタービン3台、排ガスボイラ3台、蒸気タービン1台）の負荷運転・特性試験を実施して来ており、全負荷運転もすでに達成した。

これら試運転にて、プラント及び各機器の性能・機能を総合的に確認し、熱効率・NO_x特性を始めいづれも予想以上の良好な結果を得ている。

5. 今後の展望

ガスタービンの高温化によって高効率ガスタービン複合発電プラントが可能となる。

ガスタービン複合発電の夫々の方式は、その特長を生かして、過給ボイラサイクルは高圧流動床ボイラサイクルへ、排熱回収サイクルは石炭ガス化排熱回収サイクルへ、排気再燃サイクルは間接燃焼ボイラサイク

(ガス・蒸気結合法による分類) (基本複合方式) (次期石炭利用方式)

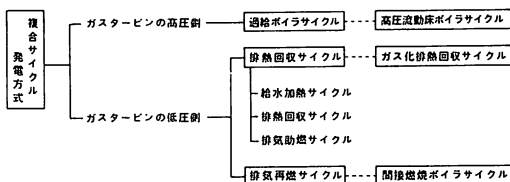


図-9 ガスタービン複合発電の分類と発展

ルへと、次期石炭利用ガスタービン複合発電の開発に結びついている。(図-9)

こうしたガスタービンの高温化の開発による高熱効率化、および石炭等を利用し燃料多様化を狙う次期ガスタービン複合発電の開発等、今後のガスタービン複合発電の展開が期待されている。

参考文献

- 1) 伊藤：コンバインドサイクルプラントの運転保守，火力原子力発電 Vol.26 No.5 (May.1975)
- 2) 三輪他：高効率ガスタービン（内外の技術動向），火力原子力発電 Vol.29 No.10 (Oct. 1978)
- 3) 森，岩田，木村：最新の複合サイクル発電プラント，三菱重工技報 Vol.17 No.2 (1980・3)
- 4) 竹矢：高効率ガスタービン，火力原子力発電 Vol.31 No.6 (Jun. 1980)
- 5) 中西：複合サイクル発電に関する最近の状況，日本機械学会誌 Vol. 86 No.770 (58-1)
- 6) 矢吹：東新瀉火力発電所第3号系列複合発電設備の計画概要について，第11回ガスタービン定期講演会講演論文集（'83-6）
- 7) A. Yamakawa 他：Design and Construction of Gas Steam Combined Cycle Plant for Higashi Niigata Thermal Power Station No.3, 1983 Tokyo International Gas Turbine Congress 83-TOKYO-IGTC-107(Oct.1983)
- 8) 矢吹：東新瀉火力発電所第3号系列の建設について，第12回ガスタービン定期講演会（'84-6）