

コンバインドサイクル発電の現状と動向

Current Status and Future Prospect of Combined Cycle Power Generation

宮 本 忠*

Tadashi Miyamoto

1. はじめに

約10年前にわが国の電気事業に初めて導入された1,100°C級ガスタービンによる本格的コンバインドサイクル発電は、ボイラ・タービンからなる従来型汽力発電方式を大きく凌ぐ高い熱効率や負荷変化率等の優れた運用実績をあげている。また、一層の高効率発電を可能とする1,300°C級ガスタービンによる改良型コンバインドサイクル(Advanced Combined Cycle; ACC)発電は次代の火力発電を担う主要な柱の一つとして、近年各方面において開発導入が積極的に進められており、すでに一部のプラントは運転を開始している。(表1)本稿では、東京電力におけるコンバインドサイクル発電の導入背景、実績、そして今後の展望について紹介する。

2. コンバインドサイクル発電の導入経緯と運用実績

わが国における火力発電は、1950年代以降主として米国から導入した火力発電技術をベースとし、これを国産化することにより高度な技術として完成させ、質・量ともに飛躍的な発展を遂げた。現在、火力発電は事業用発電の内では、発電設備容量、発電電力量とも全体の約6割を占めるに至っている。

このうち、ボイラと蒸気タービンで構成される従来型汽力方式では、再熱再生サイクル、超臨界圧プラントの採用など、熱効率向上を図る技術を積極的に導入すると共に、ユニットの大容量化によるスケールメリットを活かし、その熱効率は1950年代当初の約30% (高位発熱量基準表示; 以下同様) から40%強へと飛躍的な発展を遂げ、建設単価と発電コストの低減が図られてきた。(図-1)

その後、石油危機を契機として、石油代替エネルギーによる電源のベストミックスが進められているが、火力発電は依然として高い比率で拡充されており、電源の約6割を担っている。そのため、エネルギー資源の有効活用及び地球規模での環境改善の観点から、一層の熱効率の向上が強く望まれている。

一方、電力の需給面から言えば、需要パターンは夏期冷房需要の急増等によって、季節間並びに昼夜間の格差が増大する傾向となっている。さらに原子力発電がベース電源として拡充する結果、需要供給ギャップを吸収する負荷調整機能が火力発電に求められている。

このような状況のもとで、コンバインドサイクル発電は下記のような優れた特長を備えており、火力に要請される機能を十分に果たすことができる発電方式である。

(1) 熱効率が低い

コンバインドサイクル発電の発電端熱効率は、従来のLNG焚汽力発電の約40%に対して、1,100°C級(ガスタービン動翼入口ガス温度; 以下同様)では約43%、1,300°C級ACCでは48~50%に達し、後述の部分負荷効率が低いこと、起動停止時間が短く、その損失が少ないこと、また所内動力が少ないこと(汽力発電の所内動力率は4~5%に対して約2%)などの特長とあいまって、従来の汽力発電に比べ1~2割以上の燃料節約が可能である。また同様にCO₂排出量についても、1~2割以上低減されることとなり、環境保護対策としてもその効果は大きいと言える。

(2) 部分負荷での熱効率の低下が小さい

コンバインドサイクル発電プラントは比較的小容量の単位機を組み合わせで大容量プラントが構成されるため、出力の増減をこの単位機の運転台数の増減で行うことにより、広い出力範囲にわたり、定格出力時と同等の高い熱効率を維持することができる。

(3) 起動停止時間が短い

前項と同様、小容量機の組み合わせとなるため、負

*東京電力㈱火力部火力エンジニアリングセンター課長
〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

表1 我が国での運転中及び建設計画中のコンバインドサイクル発電プラント（電気事業用）

電力会社	東京								東北				関西		中部				四国		九州				
	富津		横浜		千葉		品川		川崎		東新潟		姫路第一		四日市		川越		新名古屋		柳井		新大分		
系列	1号	2号	7号	8号	1号	2号	1号	1号	2号	3号	4号	5号	6号	4号	3号	4号	7号	8号	1号	2号	1号	2号	3号		
出力(MW)	1,000	1,000	1,400	1,400	1,440	1,440	1,140	1,500	1,500	1,090	1,610	670	670	560	1,650	1,650	1,458	1,458	700	700	690	870	1,695		
型式	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	多軸	多軸	多軸	多軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸	一軸		
GT台数	7	7	4	4	4	4	3	3	3	6	4	3	3	5	7	7	6	6	6	4	6	4	6		
ST台数	7	7	4	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1	5	7	7	6	6	6	4	6	4	6		
運転開始時期	85/12 ~ 86/11	87/12 ~ 88/11	96/6 ~ 98/3	96/7 ~ 98/3	99/2 ~ 2000/2	99/2 ~ 2000/2	2001/7 ~ 2002/3	2002/7 ~ 2003/3	2009/7 ~ 2010/3	84/12 ~ 85/10	99/7 ~ 2000/7		95/4 ~ 96/4		88/2 ~ 88/7	96/6 ~ 97/1	97/6 ~ 97/12	98/8 ~ 2002/8	2002/3 ~ 2002/8	90/11 ~ 92/12	94/3 ~ 96/1		91/6 ~ 95/2	94/2 ~ 2004/7	98/7 ~ 2004/7
製造社	GE	GE	GE	GE	三菱	GE	未定	未定	未定	三菱	三菱	三菱	日立	東芝	日立	三菱	東芝	未定	日立	日立	日立	日立	三菱	未定	

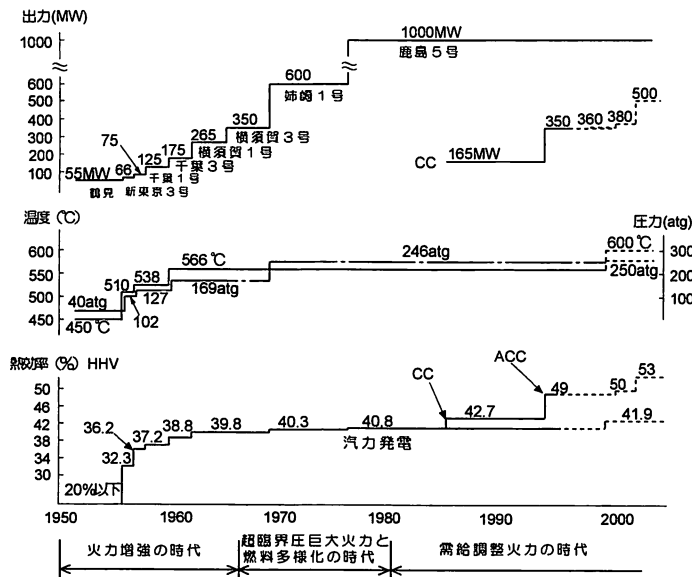


図-1 ユニットの出力、熱効率の推移（東京電力の例）

荷変率が大きく、また短時間での起動停止が容易である。8時間停止後の起動（ホット起動；ガスタービン起動～定格出力）時間は、1,000MW級汽力プラントが3時間程度であるのに対して、一軸型コンバインドサイクル発電の場合、1軸当たり約1時間程度である。

(4) 温排水量が少ない

コンバインドサイクル発電プラントの蒸気タービンは、その入口蒸気条件は大型汽力発電プラントに比べ低圧低温となるが、分担する出力はプラント全体の3分の1と小さいため、温排水量は、同容量の汽力プラントの6～8割程度となる。

我が国では昭和60年頃から、東京電力富津1・2号、東北電力東新潟3号、中部電力四日市4号（いずれも1,100℃級）など、数多くのプラントが建設され、これまで良好な運用実績を納めている。

東京電力の富津火力1・2号系列コンバインドサイクル発電プラントは、GE社製一軸型排熱回収式であり、1軸165MWが7軸で1系列を構成、それが2系列で2,000MWの発電設備となっている。この富津火力の運用実績については、昭和60年の第1軸目運転開始以来、平成8年3月までの1軸あたりの平均運転時間は48,000時間、平均起動回数は1,180回に達しており、

- (1) 定格熱効率は平均43.8%（汽力最新鋭機は約41%）。
- (2) 平成7年度1年間の1軸平均起動回数は133回、利用率60%で運用熱効率は42%強。
- (3) NOx排出値は、濃度で8.4ppm以下、系列あたり70m³/h以下。
- (4) 一軸起動時間は8時間停止後のホット起動で60

分。

- (5) ガスタービン燃焼器、動静翼などの高温部品の寿命は設計値以上。

などの優れた運用実績を納めている。

3. 1,300°C級ACC発電プラントの開発導入

1,100°C級ガスタービンを採用した富津火力1・2号系列の優れた運用実績は、省エネルギー性をはじめとして、環境性、運転性、保守性、耐久性、信頼性、そして経済性等の各観点より、コンバインドサイクル発電の優位性を実証するに十分なものである。これらの良好な運転実績を反映し、さらに高い熱効率を達成する1,300°C級ガスタービンによる改良型コンバインドサイクル（ACC）の導入に向けて、近年、各方面で積極的な開発・導入が進められている。東京電力でも、特にユーザーの見地より開発技術の検証を慎重に進め、横浜7・8号増設計画へのACC発電プラントの導入を行った。ACC発電の開発要素としては、

- (1) 1,300°C級高温大容量ガスタービンの開発とその検証
- (2) 低NO_x燃焼器の開発
- (3) ACCシステムの最適化

の3点がその主要な項目としてあげられる。

3.1 1,300°C級ガスタービンの開発

ACC発電プラントの主体となる1,300°C級ガスタービンの主要な開発要素としては、より高度で信頼性の高い空気力学設計（コンプレッサ翼とガスタービン翼の最適設計）、高温耐力の高い金属材料、主に動静翼のより精密な冷却構造、そして大型部品製造技術と精密加工技術の開発などが挙げられる。

当時、1,300°C級のガスタービンの開発は米国のGE社が最も先行しており、60Hz機の実機検証を実施中の段階にあった。横浜7・8号系列に導入するACCの1,300°C級ガスタービンは、50Hz機としては世界初の開発となるもので、先行して開発されている60Hz機の実証試験の実績を踏まえ、50Hz機を試作試験し、性能、信頼性、耐久性などの検証を慎重に進めた。

検証に当たっては、まず高温部品の応力・メタル温度等の各設計値とりわけ材料のクリープ強度に対する設計裕度について、実績のある1,100°C級ガスタービンと比較すると同時に、60Hz機の実負荷実証試験結果により、各メタル温度等が設計値通りであることを検証し、その耐久性等を確認した。また性能特性については、60Hz機の実負荷試験結果により設計性能以

上の値を納めていることを、またコンプレッサのサージマージンについても、実機特性試験により1,100°C級と同等以上の裕度のあることを確認した。

一方、1,300°C級は、1,100°C級に比べ各部品とも大型化しており、また高温部冷却構造等の形状も複雑となるため、大型部品製作技術と品質管理について各製品の試作段階より、材料成分、強度、製作プロセスなどについて十分な検査確認を実施した。

最後に、50Hz用試作機の工場試験により、コンプレッサ特性をはじめとした各種性能特性、高温部品のメタル温度、排ガス温度とその分布等について検証し、試験運転後の内部点検により各部の健全性を確認した。

50Hz用ガスタービンGE-MS9001FA型は60Hz用MS7001FA型と比較して、燃焼器と軸受部を除いて、基本的に1.2スケール比の相似設計となっている。また1,100°C級と比べて空気流量は約1.5倍、出力は約2倍となっており、動静翼新材料の適用、タービン動翼へのリターンフロー冷却、一方向凝固材の適用等をはじめ、翼車の新設計並びにインコネル材の適用等、高温化技術の採用による性能と信頼性・耐久性の向上を図っている。（写真1）

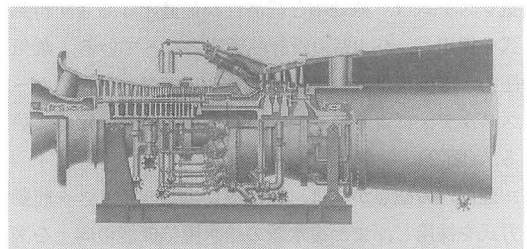


写真1 GE社MS9001FA型ガスタービン断面

3.2 低NO_x燃焼器の開発

NO_x低減対策については、環境性向上の観点から、また東京湾内の過密地域へのプラント設置に向けて、特にその強化が望まれるところであり、その主力技術であるガスタービン燃焼器のNO_x低減技術は重要である。

1,100°C級富津コンバインドサイクル発電プラントでは、当時最も確実なNO_x低減技術であった燃焼器内への蒸気噴射によって、ガスタービン出口NO_xの低減を図っている。しかし熱効率の一層の向上のためには、燃焼器内への蒸気噴射を行わない乾式低NO_x燃焼器の開発導入が必要であった。

この観点より、当社は、富津火力プラントの建設着

工と同時期に予混合式低NO_x燃焼器の開発に着手し、以来10年間その技術開発を推進してきた。

この予混合式低NO_x燃焼器は、燃料ガスと燃焼用空気を燃焼前に予め十分混合してから着火させることにより、従来の拡散燃焼器による場合の局部的な燃焼高温域をなくし、燃焼温度の均一化と低温化を図ってNO_xの発生を抑制する方式である。この燃焼器によりガスタービンでの発生NO_xを50ppm（16%O₂換算、以下同様）以下まで低減することが十分可能であり、既に富津プラントにより1年間の実機実証試験を完了している他、各所でその性能が実証されている。

3.3 ACCシステムの最適化

ACC発電プラントの開発では、600℃程度の高温のガスタービン排ガスの持つエネルギーをより有効に利用し一層の熱効率を向上すると共に、1,100℃級の富津プラントより大型となるACCプラントの機動性、保守性等運用性の向上を図ることも大きな課題であり、当社では蒸気サイクルシステムをはじめとしたACC全体について、最適システムを確立した。最適化に当たっては、熱効率、機動性、経済性の一層の向上を図り、特に運用性、保守性の観点から、富津プラントでの運転・保守の経験を最大限反映したシステムとした。蒸気システムは、熱効率と経済性が最適となる3圧再熱式を採用し、48.9%の設計熱効率となっている。蒸気圧力・温度及び蒸気系統構成については、各種のケーススタディにより最適値並びに最適システムを決定している。（図-2）

運用性の観点からは、発電機によるサイリスタ起動方式を採用し、また復水器の給水脱気機能の向上を図るなど、毎日の起動操作性の向上を図ると共に、蒸気タービンの通気方法等の改善等により富津火力と同等

以上の高い負荷変化率と短い起動時間を可能としている。

脱硝装置は、その触媒の活性が最大となる350℃程度の排ガス温度域である高圧蒸発器下流近辺に設置し、90%の高効率設計としている。

4. 横浜火力7・8号系列ACC発電プラントの現状

横浜7・8号系列ACC発電プラントは、同火力既設1～6号機が設置されている現敷地の隣接地に設置される発電設備で、GE社製MS9001FA型1,300℃級ガスタービンを主体とした一軸型3圧再熱排熱回収式コンバインドサイクル発電プラントである。（写真2）

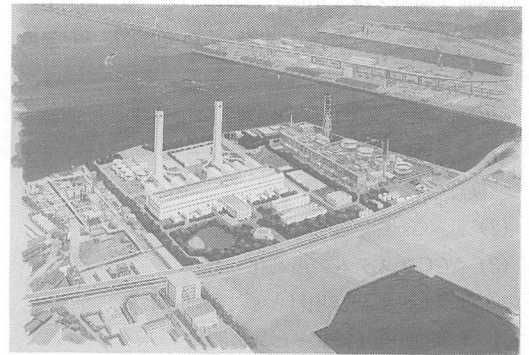


写真2 横浜7・8号系列ACC発電プラント完成予想図

単位ユニットである1軸の出力は350MW（大気温度5℃時）、1系列は4軸にて構成され1,400MW、7・8号2系列合計で2,800MWの定格出力である。発電端熱効率は48.9%以上と富津プラントをさらに1割以上上回る高い熱効率の設計とし、NO_x排出濃度は、予

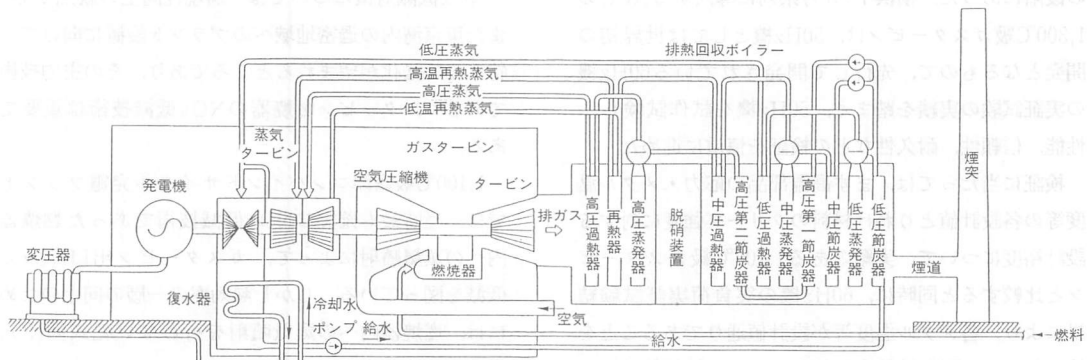


図-2 ACC発電プラントの蒸気系統図

表2 富津コンバインドサイクルと横浜7・8号系列ACCプラントの仕様諸元

	富津1・2号系列CC	横浜7・8号系列ACC
発電プラント プラント形式 出力 熱効率 使用燃料	系列 一軸型排熱回収式 1,000MW×2系列(32℃) 165MW×7軸×2系列(8℃) 設計 42.7% 実績 43.8% LNG	一軸型排熱回収式 1,400MW×2系列(5℃) 350MW×4軸×2系列(5℃) 48.9% 49.7%(試運転仮値) LNG
ガスタービン 型式 入口ガス温度 圧縮比 燃焼器	GE社製MS9001E 1,100℃級 12 拡散燃焼式(蒸気噴射付)	GE社製MS9001FA 1,300℃級 15 乾式予混合燃焼式
蒸気タービン 型式 高圧蒸気 中圧蒸気 低圧蒸気 最終段翼長	混圧単流排気復水型 6.5MPa/531℃ — 1.5MPa/198℃ 26インチ	三圧再熱複流排気復水型 10.3MPa/538℃ 2.4MPa/536℃ 0.5MPa/275℃ 26インチ
ボイラ 型式 蒸発量	排熱回収二汽胴式堅型 220t/h×7台×2系列	排熱回収三汽胴式横型 382t/h×4台×2系列
脱硝装置 脱硝方式 脱硝効率 出口NO _x (16%O ₂ 換算)	乾式アンモニア接触還元法 80% 8.4ppm	乾式アンモニア接触還元法 90% 定格時: 5ppm 運用最大: 8.5ppm

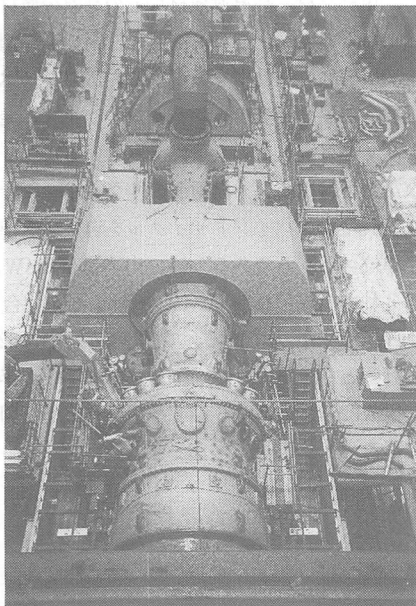


写真3 横浜7・8号系列パワートレイン据付け工事

混合式低NO_x燃焼器と90%高効率脱硝装置により、定格時5ppm、部分負荷時における最大値は8.5ppm以下としている。一方ガスタービンおよび蒸気タービンは大型化しているが、起動時間、負荷変化率等の機動性能については、富津プラントと同等以上の設計性能となっている。その他各仕様諸元の富津コンバインドサイクルプラントとの比較は(表2)の通りである。

これまでに主要設備の土木建築工事、ならびに各機器の据付工事はほぼ終了し、現在ガスタービン、蒸気タービン、発電機、排熱回収ボイラなどの主要機器の据付工事を実施中である。(写真3)平成8年7月末現在で最初の2軸がすでに営業運転を開始し、49.7%と計画値を上回る熱効率を記録した。同プラントは平成10年3月までに全8軸2系列が運転開始の予定である。

5. 今後のACCプラント計画

東京電力では今後も積極的にACCプラントの開発・

表3 東京電力の運転中及び計画中のコンバインドサイクル発電プラント緒元比較

		富津1・2号系列 1,100℃級	横浜7・8号系列 1,300℃級ACC	千葉1・2号系列 1,300℃級ACC	品川1号系列 1,300℃級ACC	川崎1・2号系列 1,450℃級 次世代ACC
出力	系列 1軸	1,000MW×2系列 165MW	1,400MW×2系列 350MW	1,440MW×2系列 360MW	1,140MW 380MW	1,500MW×2系列 500MW
熱効率 ()内は低位 発熱量基準	設計	42.7% (47.2%)	48.9% (54.1%)	49.0% (54.2%)	50.0% (55.3%)	52.8% (58.4%)
	実績	43.8% (48.4%)	49.7% (55.0%)	—	—	—
NOx排出値 (16%O ₂ 換算)		定格時 8.4ppm	定格時 5 ppm (運用最大 8.5)	同左	同左	同左
起動時間 (8時間停止後)		60分	同左	同左	同左	同左
運転開始時期		1985 - 1988	1996 - 1998	1999 - 2000	2001 - 2002	2002 - 2010

計画を進めていく。(表3)

5.1 ACCプラントによる経年火力の設備更新

横浜7・8号系列に引き続き計画を進めている千葉火力1・2号系列および品川火力1号系列プラントは、どちらも経年火力の設備更新計画である。

現在運転中の火力発電プラントの中には、運転開始後長い年月が経過し、経年劣化が進行しているものも増えつつあり、経年火力の抜本的な対策としての設備更新が課題となっている。即ち、建設後30年以上を経過した200MW級以下の小容量プラントを、運転開始後40年程度を目標にビルド&スクラップあるいはスクラップ&ビルドする計画である。ACCは、出力、熱効率、環境性、スペースファクター、経済性、ならびに建設工事の容易性などの面から、これらの経年火力の設備更新用として最適な発電プラントである。

千葉火力1・2号系列ACC発電プラントは、既設125～175MW 4機、計600MWの発電プラントの隣接地に建設した後、既設経年火力を撤去するビルド&スクラップ計画である。1軸360MW、4軸で構成する系列出力は1,440MW、2系列合計で2,880MW、熱効率49.0%の計画である。

品川火力のACC発電プラントは、既設の125MW 3機とガスタービン1機、合わせて405MWを撤去した

跡地に建設するスクラップ&ビルド計画である。同プラントは、ガスタービン入口ガス温度をさらに約28℃上昇した1,300℃級改良機3軸で構成され、出力は1,140MW、熱効率は50.0%の計画となっている。

5.2 次世代型コンバインドサイクル技術

高い熱効率、環境性、機動性を備えたACC発電は、1990年代後半から2000年代のLNG火力の主力として、各所で多くの新設計画が進められており、また、経年火力の設備更新適用機種としても、出力の拡大と熱効率の改善効果は極めて大きい。

一方、単結晶材、高温遮熱材などの高温金属材料や蒸気冷却などのガスタービン高温化技術の開発適用による、52～54%の熱効率を実現する1,450℃(ガスタービン動翼入口温度)級のコンバインドサイクル発電の開発も、すでに実用化の段階に入っている。

東京電力では川崎火力発電所のリフレッシュ計画にこの次世代型コンバインドサイクルを導入する予定である。単位ユニットである1軸の出力は500MW、1系列は3軸で構成され1,500MW、1・2号系列合計で3,000MWの定格出力である。発電端熱効率は52.8%以上の計画となっている。同プラントは平成10年に着工し、平成22年までに全6軸2系列が営業運転開始の計画である。