

# 2001年8月例会資料

## 火力発電の変遷

- 大容量化と高効率化への挑戦 -

Keywords 蒸気タービン、ガスタービン、発電機、ボイラ、複合サイクル

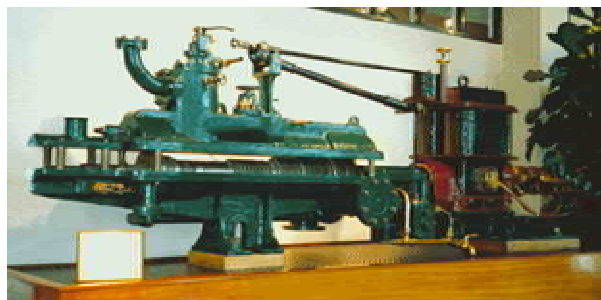
大地 昭生

### 1. はじめに

火力発電は19世紀末に出現し、100年以上の歴史を持つ、効率的な電力供給方式としてその後の産業の発展に多大の貢献をしてきた。また、火力発電は現在でも電力供給の60%を占めており、21世紀においても依然として電力供給の主力を占めると予想される。そこで本稿では火力発電所の歴史を振り返り、21世紀を展望してみたい。

### 2. 火力発電所の誕生と発展

エジソンが白熱灯を発明したのは1879年である。それまでのランプに代わり、白熱灯は当時の人々の生活を飛躍的に向上させた。その普及に多大の貢献をしたのが1882年にニューヨークのパール・ストリートに出現した、世界初の集中式火力発電所である。電灯の優秀性を実証し、それを普及するためにエジソンが建設したと言われている。その後、電動機が発明され、電気は動力源としても利用されるようになり、急速な産業の発達を促した。



一方、我が国では1883(明治16年)に東京電灯が創業し、1887年(明治20年)には、東京第二電灯が我が国初の火力発電所を建設、送電を開始した。アメリカに遅れることわずか5年であった。その後、産業の発展に伴い、発電所容量も急速に大形化し、それまでの蒸気機関では対応出来なくなり、大容量化の容易な蒸気タービンが利用されるよう

になった。また、燃料の多様化に伴い、様々な発電方式が考案され大容量化が図られ、現在に至っている。

## おおじ・あきお

1964年(株)東芝入社。蒸気タービン・ガスタービンの計画、開発企画、エンジニアリングに従事。現在、電力システム社首席技監。日本機械学会、ガスタービン学会、ターボ機械協会、火力原子力発電技術協会、日本技術士会会員。

### 3. タービンの創生と発展

#### 3-1 蒸気タービン

初期の火力発電所では、駆動機として蒸気機関が採用されていた。蒸気機関はフランスのパバンによって発明され、その後、イギリスのニューコメンが実用化、ジェイムズ・ワットにより改良が加えられ、18世紀後半のイギリスの産業革命を支えた主力原動機である。

その後、100年間にわたり、基幹産業を支える主要な原動機として活躍した。

しかし、蒸気機関は蒸気の持つ熱エネルギーをピストンの往復運動によって機械エネルギーに変換していたため、効率も低く大容量化は困難であった。しかし、1880年代の初頭に相次いで実用化された蒸気タービンは、回転運動によってエネルギー変換を行うため、効率も高く大容量化が容易であった。そのため、火力発電所の普及大形化に伴い、蒸気機関に代わり蒸気タービンが動力供給の主角となり、その後の基幹産業を支える主要な原動機となった。

蒸気タービンの実用化は、1883年スウェーデンのド・ラバルによる衝動式タービン（ノズルで全蒸気が膨張）と1884年のイギリスのC・A・パーソンズによる反動式タービン（ノズル・羽根で半分ずつ膨張）の試作に始まる。1889年にはパーソンズは発電機駆動用蒸気タービンを実用化した。（図1参照）

1895年にはアメリカのカーチスが速度複式衝動タービン（羽根2列、速度反転、ガイドベーン付）を、また、1898年にはフランスのラトーが圧力複式タービン（ノズル、羽根を多段配列）を実用化し、現在の蒸気タービンの原型が実現した。その後、これらの蒸気タービンを原型として欧米の各タービンメーカーは大形化、高効率化の開発に注力、その間、タービンメーカーの集合離散を繰り返し、現在の圧力複式、反動タービンを製作するメーカーと圧力複式衝動タービンを製作するメーカーに発展していった。また、国内の蒸気タービンメーカーも、欧米の主要蒸気タービンメーカーと提携し、発展していった。

### 3-2 ガスタービン

ガスタービンは、1930年代にイギリス・ドイツで相次いで実用化された。イギリスではフランク・ホイットルが1936年にガスタービンの原型となる単純なジェットエンジンを開発した。

また、ドイツでハンス・フォン・オハインが1938年にジェットエンジンを実用化、1939年にはジェット推進による初飛行に成功している。スイスではBBCが1939年、世界初のガスタービンによる発電に成功している。

我が国では第二次世界大戦中、航空機用のジェットエンジンと高速艦艇用のガスタービンを開発していたが、いずれも実用化には至らなかった。

戦後、アメリカではGE社が航空機用ジェットエンジンの開発に注力、これを発電用に転用したヘビーデューティガスタービンを実用化した。1949年にはオクラホマ電力のベルアイル発電所に、世界初のコンバインドサイクル用ガスタービンとしてMS3002型3000kW機を納入した。GE社はこのガスタービンを原型として、その後、次々と新機種を開発、現在までの累積納入台数は6000台で世界の50%以上を制覇している。

一方、我が国では、戦後初めて開発されたガスタービンは、鉄道技術研究所向の2MWの重油焚ガスタービンであった。このガスタービンは、石川島芝浦タービン（現東芝）が戦時中、艦艇用に開発中であったものに改良を加え、実用化したと言われている。その後、ガスタービンの大容量化に伴い、自主技術での対応が困難となり、国内ガスタービンメーカーは欧米の主要ガスタービンメーカーと提携し発展していった。

## 4 火力発電の躍進

### 4-1 石炭から重油へ

戦後、我が国の火力発電技術は欧米先進国からの技術導入により長足の進歩を遂げ、その単機容量も飛躍的に増大した。従来の火力発電の燃料は、石炭が主体であり、重油は補助燃料の位置付けであった。しかし、火力発電が事業用電力の中心になるに伴い、石炭燃料の確保の問題

と大規模油田発見に伴う、低廉豊富な石油が国際市場に流入したため、1960年代に入ると重油専焼火力が相次いで建設された。(1961年 中部電力(株) 三重火力4号)

また、大形火力の建設とともに、蒸気条件向上に伴う発電効率改善も続けられ(図2・図3参照) 1967年には我が国初の60万kW超臨界圧プラントが運転に入り、我が国も超臨界圧時代に突入した。(東京電力(株) 姉ヶ崎1号)

#### 4-2 単機容量の増大、蒸気条件の向上と中間負荷運用

1970年代に入り、単機容量がさらに増加し、ついに100万kWが建設された。(東京電力(株) 鹿島火力5号)

また、超臨界圧ユニットの建設が増加し、50万 kW以上のユニットは超臨界圧が標準的蒸気条件となった。その結果1980年代には事業用発電設備の約40%が超臨界圧ユニットで占められるようになった。

また、原子力発電設備の増加と昼夜間電力格差の増加に伴い、火力発電設備の中間負荷運用の傾向が強まり、ユニットの急速起動、停止、負荷変化に対する運転制御、信頼性確保、寿命予測技術などの技術開発が進められた。このため、火力プラントは中間負荷運用に適した変圧プラントが数多く建設されるようになった。(東京電力(株) 広野火力1、2号)

#### 4-3 LNG火力の導入と省エネルギー化の推進

1973年の第1次石油危機を契機として、脱石油化を目指した燃料の多様化、省エネルギー化の機運が高まり、従来の重油に代わりLNGの積極的導入が図られた。また、効率向上の機運が急速に高まり汽力プラントでは蒸気条件の向上が図られるとともに、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた天然ガス焚のコンバインドサイクルの積極的導入が図られた。汽力プラントでは中部電力(株) 川越火力1、2号700 MWプラントで超々臨界圧2段再熱(31 MPa、566/566/566)の蒸気条件が採用され、従来の超臨界圧ユニットに比べ熱効率を5%以上向上させた。ガスタービンは、1970年代まではガスタービンの入口温度も低く容量も小さかったため、緊急電源用として利用されていたが、1980年代に入ると入口温度が飛躍的に上昇、信頼性も向上したため、蒸気タービンと組み合わせることにより高い熱効率が期待できるようになったため、中核電源として積極的に導入されるようになった。

1984年には、我が国で初めて本格的なコンバインドサイクルの導入が行われ(東北電力(株) 東新潟 3号系列109万kW) 我が国も天然ガス焚コンバインドサイクルの時代に突入した。ガスタービンは入口温度1100 級、単機容量10万kWのガスタービン(WH-三菱重工製)が適用された。

その後、さらにガスタービンの高温化が進み、現在では入口温度1300 級のガスタービンを適用したコンバインドサイクルが主流となっている。

#### 4-4 石炭火力の復活

2度にわたる石油危機を契機として、燃料多様化の観点からLNG火力の導入と並行し、石炭火力の復活が図られた。(電源開発(株) 松島1、2号) 石炭は、世界的にも埋蔵量が豊富で低廉なため、海外炭の積極的導入が行われた。石炭は火力燃料の中では、炭酸ガスの発生量が多いため、地球環境保護の観点から蒸気条件の高温化により熱効率の向上を図り、炭酸ガスの排出量を減らす努力が払われている。

また、石炭火力のNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、煤塵を低減するための排煙処理装置が装備され、日本は世

界で一番クリーンな石炭火力を建設しているといえる。

## 5. 今後の展望

火力発電は、現在でも全電力供給の60%を占めており、21世紀においても依然として電源供給の主力を占めると予想される。今後は脱石油化を目指した燃料の多様化、並びに地球環境保護の観点からCO<sub>2</sub>排出の抑制を焦点に電源開発が行われることになるだろう。

### 5-1 石炭火力の大容量化・高効率化

石炭火力はCO<sub>2</sub>抑制の観点から汽力プラントでは蒸気条件をさらに高温化し、効率向上を図る必要がある。

現在、運転中のユニットの蒸気条件は25MPa、600/610が最高であるが（電源開発(株) 橘湾1、2号）、今後30MPa、630/630、将来的には37.5MPa、700/725/725の高蒸気条件の検討も進められよう。また、システム的には、石炭をガス化してガスタービン燃料として利用しコンバインドサイクル発電を行う、石炭ガス化複合発電（IGCC）および加圧流動床ボイラとガス化炉を組み合わせたアドバンスド加圧流動床複合発電（A-PCFB）将来的には、固体電解質燃料電池（SOFC）とガスタービン複合発電（IGCC）を組み合わせたシステム（IGFC）等の高効率発電システムの検討も進められよう。

また、発電コスト低減の観点から機器のコンパクト化、スケールメリットの追求が図られている。

蒸気タービンを例にとると、高速回転最終段翼（3600rpm - 40インチチタン翼）の適用により単機容量100万kWクラスでもタンデム機の製作が可能となった（中部電力(株) 碧南火力1、2号）。また、クロス機（2軸式）では110万kWクラスのユニットが計画されている。

### 5-5 ガス焚コンバインドサイクルの高効率化

天然ガス焚コンバインドサイクルでは、ガスタービンの高温化が一段と加速されよう。

現在、1300級のガスタービンが主力であるが1500級ガスタービンも開発中であり、一部実用化されている。（東北電力(株) 東新潟4号系列）

ガスタービンの高温化は耐熱材料、コーティング技術、冷却技術がポイントである。

GE社は米国DOEの支援のもとに、2002年の運開を目指し、蒸気冷却翼を採用した1500級のH型ガスタービンを開発中である。本ガスタービンを適用したコンバインドサイクル発電システムの開発に当たってGE社は東芝と提携し、開発費用を削減している。

熱効率は、低位発熱量基準で60%を目指している。

### 5-6 燃料の多様化

燃料供給のセキュリティ確保、CO<sub>2</sub>排出抑制の観点から、種々の低炭素燃料の検討が行われている。石炭ガスをジメチルエーテル燃料（DME）、メタノール燃料へ転換する方法、石炭・天然ガスより炭素を固定化し、水素燃料を抽出する方法、重質油よりガスタービン燃料油を抽出する方法等、実用化への努力が払われている。

## 5-7 経年火力の再生

経年火力が増加し、運開後、10万時間以上を経過したプラントが全体の3/4を占めている。劣化更新、延命化、リパワリング、スクラップ&ビルドの必要性がさらに増すと思われ、これらの技術開発が加速される。

## 6 . まとめ

以上、火力発電発展の歴史を振り返ってみた。火力発電が20世紀の科学技術の発達、産業の発展の中でいかに重要な位置を占めてきたか御理解頂けたものと思う。

今後、21世紀に向け、火力発電は益々その重要性を増すものと思われる。今後とも微力ながら火力発電の発展に貢献したい。本稿が今後の電源計画の一助になれば幸いである。

- 文献 -

(1)角家 ; 「最近の発電用蒸気タービンの技術動向」

ターボ機械学会 25巻1号(1997-1)

(2) 「機械工学100年の歩み」

日本機械学会(1997)

(3)中村 ; 「超々臨界圧プラント川越火力発電所700MWの建設計画」

火力原子力発電 Vol 38-9(1987-8)

(4)石木 ; 「蒸気タービン低圧最終段用チタン合金製40インチ長翼の開発」

火力原子力発電 Vol 39-6(1988-6)

(5)大久保 ; 「1500 級次世代高効率コンバインドサイクルプラントの計画」

火力原子力発電 Vol 51-3(2000-3)