

## ■ 論 説 ■

## 高効率発電システムの開発動向

Development of High Efficient Electric Power Generation System



福 江 一 郎\*

Ichiro Fukue

## 1. はじめに

最近地球環境問題が社会の大きな関心事となっており、あらゆる社会活動が、環境に対する影響をいかに最少限にとどめるかを中心に考えられるようになってきた。発電システムの分野も例外でなく、システム外に汚染物質を放出しない事はもちろんの事、温排水およびCO<sub>2</sub>の放出も出来る限り最少限にとどめる事が要求される。またエネルギーの有効利用の観点から高効率である必要があり、クリーンで高効率な『地球にやさしい発電システム』の開発が望まれる。このような社会の要求に応じて、新発電方式（燃料電池、太陽光発電等）の研究開発も盛んに行なわれており、この内一部はすでに実用化されつつある。また一方で、これらの新発電方式が完全に実用域に入るまでの間、あるいは当分新発電方式と併行して使われる、従来の発電方式の高効率化も重要な課題となっている。

このような従来の発電方式の高効率化の中で、最近特に注目を集め、かなり実用化が進んでいるものが、高温ガスタービンと蒸気タービンを組合せた複合発電システムである。最新の複合発電システムでは、タービン入口温度1350℃～1400℃の高温ガスタービンを使用し、蒸気サイクルと組合せた総合効率では48%（HHV）を超えるものも表われてきている。さらに高温化が進めば50%以上の熱効率達成も手が届く範囲にあり、効率上昇のポテンシャルの高さが大きな特徴となっている。また燃料に関しては、現在LNG気化ガスを使うものが多いが、将来は石炭ガス化炉の生成ガス、さらに将来は、水素燃料など幅広く対応可能であり、いわゆるベストミックスに適合する発電システムとして期待されている。

## 2. 複合発電システムの特徴

複合発電システムは、トッピングサイクルとして高温ガスタービンを使用し、ボトムサイクルに蒸気サイクルを適用するシステムである。原理的に、良質の高温エネルギーからガスタービンで直接動力を取り出した後、残りの比較的低温のエネルギーを蒸気サイクルを使って回収する事から、いわゆるエクセルギーの有効利用の観点から良く出来たシステムと言える。当然複合発電システムの効率は、トッピングサイクルであるガスタービンのタービン入口温度に依存しており、今後の効率改善の鍵は、ガスタービンの高温化技術が握っている事になる。

複合発電システムの特徴を整理すると下記の如くなる。

- 1) 高効率化のポテンシャルが高い。
- 2) 多種の燃料に対応が可能である。
- 3) 新発電方式に比べて、技術的に従来技術の延長にあるものが多く、実用化の見通しが立て易い。

図-1は、ガスタービンのタービン入口温度と、複合発電の熱効率の関係を示すものであるが、今後材料および冷却技術の革新が進み、タービン入口温度が1500℃を超える事が可能となれば、燃料電池が当面の目標

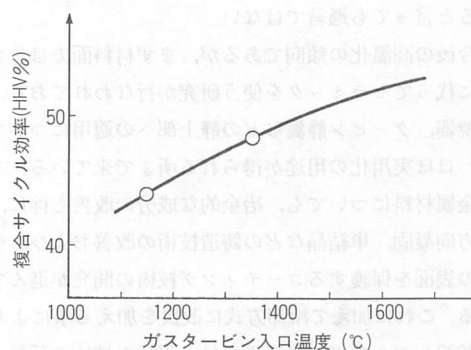


図-1 ガスタービン入口温度と複合サイクル効率の関係

\* 三菱重工㈱高砂製作所タービン技術部タービン開発課長  
〒676 高砂市荒井町新浜 2-1-1

としている熱効率60%も射程範囲となってくる。今後の開発の進展によっては、タービン方式の高効率化と化学反応方式の高効率化の競争となる事も考えられる。

### 3. 高温ガスタービンの開発動向

発電用ガスタービンの基本原理は、航空用ジェットエンジンのそれと同じあり、本格的に実用化されたのは、最近の事である。高温ガスタービンのタービン入口温度の上昇の歴史は図-2に示す通りであるが、これまでは、高温化のリード役は航空エンジンがとり続けてきている。しかし最近では、発電用ガスタービンの技術開発もかなり進歩を見せており、高温化と言う面では、航空用と殆んど肩をならべる所まで来ている。

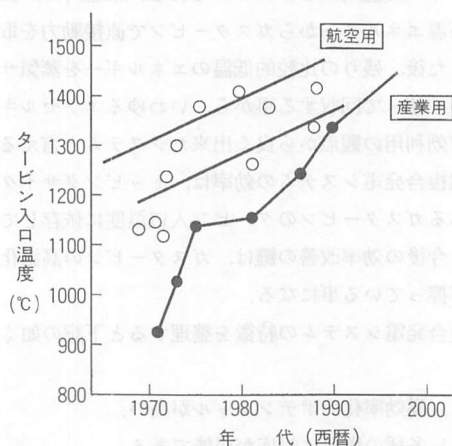


図-2 ガスタービン入口温度上昇の歴史

ガスタービンの高温化は、もちろん材料開発の成果に負う所が大であるが、図-3に示す様に、金属材料の改良により得られるゲインは、全体の高温化の進展に比べればむしろ微々たるものであり、最近の高温化は、その殆んどがタービン翼の冷却技術により達成されていると言っても過言ではない。

今後の高温化の傾向であるが、まず材料面では、金属に代ってセラミックを使う研究が行なわれており、燃焼器、タービン静翼などの静上部への適用については、ほぼ実用化の用途が得られる所まで来ている。また金属材料についても、冶金的な成分の改善と共に、一方向凝固、単結晶などの casting 技術の改善および、金属の表面を保護するコーティング技術の開発が進んでいる。これに加えて冷却方式に改良を加える事により1500°Cレベルのガス温度までは、現状の技術の延長、すなわち金属翼をベースとし、冷却の改善とコーティ

ングを取り入れたもので対応可能とされている。さらに将来高温化する場合は、セラミック等の新材料が必要となる。

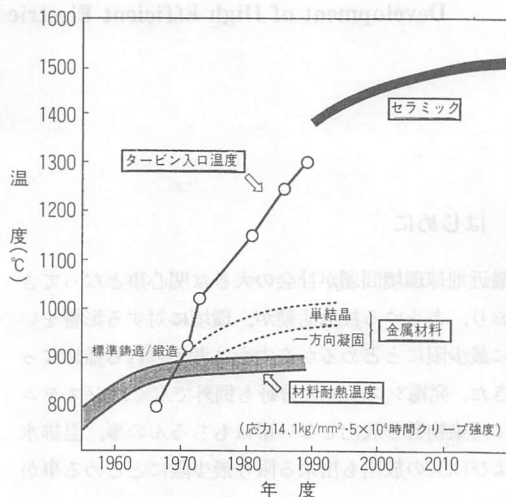


図-3 タービン入口温度上昇と材料開発の推移

### 4. カルノーサイクルへの挑戦

熱サイクルを使う発電システムである限り、その効率はカルノーサイクルで規定される理想サイクルの上限を超える事が出来ないのは当然の事であるが、工業的にこの限界にどの程度近づく事が出来るかは、これからの研究テーマとして興味のあるものである。はたして今後、熱機関としての発電システムは、どこまで進展が可能であろうか。図-4は、サイクルの最高温度をパラメータとして、カルノーサイクルで得られる理想サイクルの熱効率と、実際に工業的に得られた熱効率を比べたものである。比較的成熟していると言われる蒸気タービンを例にとってみる。蒸気サイクルの最高温度は、実際はボイラの火炎温度である2000°Cと考えるべきかも知れないが、ここでは蒸気の温度を最高温度として、蒸気タービンと復水器のシステムでの熱効率を対象とした。この仮定によると蒸気タービン系のカルノーサイクル効率達成率(実際の熱効率を同じサイクル温度を持つカルノーサイクルの理想効率で割ったもの)は約73%となる。これは種々の避けられない損失を考えるとかなり高い達成率と考える。一方、高温ガスタービンを使う複合サイクルでは、1350°Cクラスのサイクルで、その達成率は59%程度となり、蒸気タービンに比べれば、達成率は低く、まだまだ改善の

の余地がある事が判る。温度を上昇するに従って、各部の冷却等でカルノーサイクルからの逸脱が増えてくるのは、止むを得ない事であるが、例えば、今後の材料の改善等により、2000℃までサイクルの温度を上昇し、且つ蒸気タービン並に機械を熟成したとして、得られる熱効率は約63% (HHV) となる。この熱効率は、例えば水素と酸素を直接燃焼して得られる高温水蒸気を、タービンで膨張させて動力をとり出す『水素・酸素燃焼タービン』で計算される熱効率と同じであり、この辺の値が熱機関としての熱効率の上限値ではないかと考えられる。

水素・酸素燃焼タービンの原理は古くからあるが、水素・酸素燃焼のガス温度が超高温となり、適当な耐熱材料が見つからなかった事から実用化の研究は、今まであまり進んでいなかった。しかしながら、最近航空宇宙関連技術開発の一環として、2000℃まで耐えるカーボン・カーボン材料の研究が進んできて、水素・酸素燃焼タービンの実用化の可能性が出てきた。このタービンは、従来のボイラの代わりに水素・酸素の燃焼器を持ち、高温の水蒸気を最初はカーボン・カーボン材料を主体とした高温ガスタービンの中で膨張させ、低温まで膨張した後は従来の蒸気タービンの中で膨張させて動力を取り出す原理である。エネルギー密度は抜群に高く、コンパクトで高出力を取り出す事が出来る究極の熱機関である。最近国のプロジェクトとしても取り上げられ、基礎的な調査研究が始められた所である。この水素・酸素燃焼タービンの熱効率が60%前後となる。

この60%と言う値は、燃焼電池の理論値などに比べれば、ポテンシャルが低いと言わざるを得ないが、実

際の工業化の要易さを考えると総合評価はどうであろうか。タービンを使う熱機関の成熟度の高さ、エネルギー密度の高さ、大容量集中型の現在の発電・配電形態に適している等、多くの長所が挙げられる。

総合的なエネルギー効率、すなわち、機器を製作するのに要したエネルギーと、その機器の寿命が尽きるまで発生するエネルギーの比率（これは発電単位に近いものになるが、物を製作するのに投入したエネルギーと、経済価値は必ずしも一致しないので注意が必要である）の観点から考えると、現在のタービン方式の熱機関は、まだまだ発電システムの中での評価は高く、今後の改善により主要な地位を当分保ち続けるものと確信する。

## 5. 燃料の将来性

現在種々の発電システムが使用している化石燃料の将来性はどうであろうか。クリーンな燃料として当面LNG気化ガス等の良質の燃料が主役であるが、しばらく後には石炭系の燃料が出て来るものと考えられる。石炭をクリーンに、しかも効率よく燃焼させる方法として石炭ガス化複合発電や、加圧流動床ボイラ（これにもガスタービンが一部使われるが）が考えられており、近い将来経済性の問題が解決されれば、どんどん実用化が進むものと考えられる。

これらの化石燃料を使う限り、CO<sub>2</sub>の発生は避けられない問題であるが、発電システムの高率化による総量抑制の効果は大きく、全体で1割から2割の効率改善が出来れば、それだけで当面は持ちこたえる事が出来る事となる。

CO<sub>2</sub>を出来る限り濃縮した形で放出するシステムとして、ガスタービンを使ったCO<sub>2</sub>ガスの循環サイクルも考えられているが、CO<sub>2</sub>を放出しない究極の発電システムは、燃料として水素と酸素を使う発電システムと言う事になる。もちろんこの場合、水素燃料の供給システムをどの様に確立するかの方が問題であり、水素を燃料として発電するシステムの開発の方は二次的な問題ではある。

以上、述べた種々のシステムの中で、中心的役割をしているが、ガスタービンを使う複合リサイクルであり、効率を高めるため、また各種の燃料に対する適応性の良さから、今後とも火力発電におけるガスタービンの比重がますます高まっていくものと考えられる。

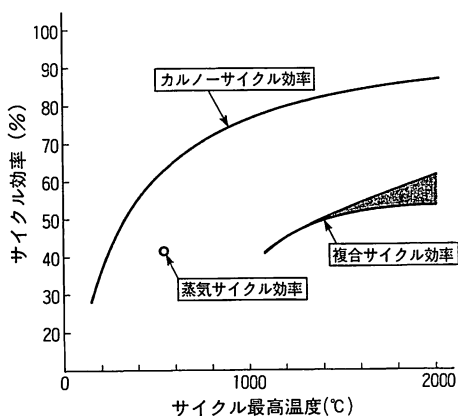


図-4 サイクル最高温度とサイクル効率の関係

## 6. 発電システムの将来像

21世紀を目前とした現在、発電システムに望ましい将来像とは、どのようなものであろうか、またこの中で、本稿で取り上げた高効率複合発電システムの位置付けはどのようなものになるのか、燃料供給の将来見直しはどうか等、なかなか将来の方向性は見出し難いのが現状であろう。しかし、将来の選択の道としてはそれ程数多くある訳でなく、大きく分けて次の分類になる。

- A.核分裂・核融合などのエネルギーを使う方式
- B.自然エネルギーを利用する方式
- C.化石燃料を効率良くクリーンに使う方式

いずれの場合も、今後の発電形態の選択に当ってはまず環境に影響を及ぼさない事が大きな規範となってくる事は間違いのない事である。

これらの発電形態の内、C項の化石燃料を使う発電形態は、現在の発電システムの中で主要な地位を占めており、燃料供給の有限性と言う制約はあるものの、今後かなりの長期間にわたり、主役の地位にあり続けるものと予想される。当面、化石燃料を使う火力発電のシステムなしでは電力の供給を満足できないと言う現実を踏まえて、火力発電システムの高効率化、およびクリーン化が重要な研究テーマとなってくる。

前に述べた様に、火力発電システムの高効率化・ク

リーン化の開発の中では、高温ガスタービンを使う複合サイクルが最も実用化が進んでおり、このシステムにますます磨きをかける事で、化石燃料を使う発電形態では最も高効率化のポテンシャルが高いとされている燃料電池にも匹敵する熱効率達成も夢でないと考ええる。

## 7. おわりに

以上、火力発電システムの高効率化の中で、最近注目を集めている高温ガスタービンと蒸気タービンを組合せた複合発電システムの現状と将来像について述べたが、タービンの開発に携っている立場からの観点が強くなり、いささか燃料電池に対する対抗意識が出過ぎた点はお許し願いたい。しかしながら、例えば将来水素燃料の供給システムが確立された場合、この良質の燃料を燃料電池だけで使うのは、片手落ちであり発電方式のベストミックスを考慮して、ここで取り上げた水素・酸素燃焼タービンなども当然有力な候補となってくるものと考ええる。

いずれにしても、今後の発電システムの高効率のため各種方式がお互いに切磋琢磨して、可能な限り高効率でクリーンな発電システム完成を目指す事が必要であり、この中で自然に競争力がある発電システムが生残って行くはずである。

