21世紀へ飛躍する新火力発電技術*

浜 松 照 秀^{*1}The Technologies of Advanced Fossil-Fuelled Power Generation Systems
Progressing for the 21st Century

Teruhide HAMAMATSU

The 21st century is the new era of fossil fuel utilization for the global environmental problems. This paper takes a view of those advanced thermal power generation systems and the technologies, such as IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) combined cycle and fuel cells working at higher temperatures, which are to be developed and prepared for the century of the emerging coal age.

Key Words: Fossil-Fuelled Power Generation, IGCC, PFBC, Fuel Cell, Combined Cycle

1. 結 言

化石燃料の発見・利用は人類の繁栄と便益をもたらした。そのために開発された技術は酸化燃焼によらない原子エネルギーの獲得へと変遷してきている。一方わが国はエネルギー資源のほとんどを海外に依存しており、セキュリティ確保のために燃料の多様化は重要な基本である。すなわち化石燃料と原子燃料がバランスした電源システムの構築が不可欠であるが、極めて不透明な状況にある。

そこで21世紀を視点におくと、経済的可採埋蔵量が多く、広く分布している石炭、ならびに天然ガスが電力供給の一翼を担うものとして期待される。最近の「長期エネルギー需給見通し」⁽¹⁾によれば、これらによる火力発電設備容量は現在の数倍を必要としており、火力発電技術の飛躍的な進歩が課題である(図1)。とくにCO₂など地球環境問題で逆風がふいている石炭については特段の技術革新が課せられる。

現在の火力発電技術はガスタービンの進歩による複合サイクル化など性能改善が著しいが、これらの石炭火力への適用や、また極めて高い発電効率が期待できる燃料電池複合発電の開発・実用化が注目をあびてい

る。

21世紀は地球環境時代とも言われているが、首題の技術はこれに調和するものでなければならない。本稿では、従来の火力発電方式とは著しく異なった、石炭ガス化複合発電、加圧流動床燃焼複合発電、高効率燃料電池複合発電を中心に、その要素技術、プラント技術の現況を述べ、今後解決すべき研究課題についても触れてみたい。

なお、これらの技術分野は多分に学際的、業際的であり、なじみきっていない表現もあるが、日本機械学会ではすでにこの方面について「動力・エネルギー技術の最前線」と題するシンポジウムを2回開催し、会

図1 21世紀の火力発電設備開発のシナリオ例

* 原稿受付 平成3年1月5日。

*¹ 正員、(財)電力中央研究所横須賀研究所 (〒240-01 横須賀市長坂2-6-1)。

員の関心を呼んでいる⁽²⁾⁽³⁾。

また、個々の技術については膨大な情報量であり、日本機械学会の便覧⁽⁴⁾でも紹介されている。本稿では発電システムの視点でとらえたい。

2. 種々の新火力発電方式

火力発電の範疇には数多くの方式があるが、ここでは小規模向きのものやコージェネレーション用は除外する。また IEA 加盟国では石油扱いの燃料による火力は新增設できないので、対象となる燃料は主として石炭、天然ガス(LNG)、メタノールなどである。

一方、在来の蒸気サイクルとちがった事業用高効率発電方式を対象とすると、すでに述べたもののほかに MHD 複合発電などがある。(LNG ガスタービン複合発電はすでに実用化済) これらの発電方式を図2で概念的にとらえてみる。同図のなかで加圧流動床ボイラ型蒸気サイクル複合発電が他のものとサイクルの組み合わせ方が異なっている(後述)。

火力発電の高効率化の方向は、これまでの蒸気条件向上のほか、ガスタービンによる複合サイクル化にある。最近の天然ガス導入とガスタービンの著しい進歩は1300°C級を実現、単機容量約200 MWに至っている。その結果として天然ガスの火力はもちろんのこと、新型石炭火力もガス(または膨張)タービンによる複合サイクルの効果を期待しており、おおむね石炭ガス化、加圧流動床ボイラ、高温ガス精製技術の開発の成否にかかっている。

さて、これらの各種新火力発電方式がどの程度の発電効率をもつか、種々のプロジェクトの目標値、設計

研究例、メーカ試算値など筆者がもっているデータで表したものが図3である。同図は送電端効率を指標にしているが、とくに石炭火力は発電方式により所内動力がおおきく異なるからである。実際のプラントは燃料費、建設費、信頼度の判断によりシステムがかわり、これらの値も変化する。ちなみに各発電方式の略号を以下に示す。

- PCF-SC : 超臨界圧微粉炭焚火力
- USC(1~2): 超々臨界圧(蒸気条件向上)
- PFBC-CC: 加圧流動床燃焼-複合発電
- IGCC-1300: 石炭ガス化複合発電1300°C
- CER: // セラミックス
- IG-MCFC-cc: 石炭ガス化燃料電池複合発電
溶融炭酸塩形
- SOFC-cc: // 固体電解質形

3. 石炭ガス化複合発電

IGCC=Integrated Gasification Combined Cycle は石炭をガスに改質して、高温ガスタービンによる高効率発電を期待するものである。したがって石炭ガス化炉が大前提の技術である。図4にそのシステム構成を示す。主要装置は、ガス化炉(GF)、ガス精製装置(CU)、ガスタービン(GT)、蒸気サイクル系(SG-ST)に分かれるが、既存の超臨界圧 PCF に対して優位性をもつためには高温ガスタービンおよび乾式(高温)ガス精製が必要である。

3・1 噴流床石炭ガス化技術 石炭ガス化は1920年代からの長い歴史をもっており、石炭化学の分野で数多くの著者や研究成果があり、本稿では割愛せざるをえない。火力発電技術の進歩と石油危機などにより、発電用ガス化炉の開発が盛んになり、大型化、負荷応動性といった観点から噴流床式が主流となりつつある。この方式は石炭を微粉炭にし、気流搬送または水

図2 火力発電の高効率化の流れ

図3 新型石炭火力発電の性能期待値

スラリーで供給するものである⁽⁵⁾。

石炭ガス化は、空気または酸素による部分燃焼エネルギーを利用し、石炭の乾留熱分解、生成したチャー（固体）とガス、ガス同士の反応により、主としてCO、H₂、CH₄（少量）、CO₂、H₂O、などを発生させる（図5）。噴流床方式は石炭灰を溶融させガラス状のスラグとして取り出すもので、環境性に優れた灰の形態である。これらの機能のために炉形式は千変万化する。

噴流床ガス化炉の重要な指標は石炭の灰の特性、特に灰流動点である。図6はわが国で使われる炭種の性状を概ね示している。図中各炭種の右端が灰流動点であり、炉内のスラグ排出機能をもつ部分はこれよりじゅうぶん高温に保つか、融点降下剤（フラックス）⁽⁶⁾、混炭などの技術が必要である。

また炉は、大容量化、ガスタービンの上流にあることなどから加圧されている。炉壁材は耐久性を念頭に水冷壁あるいは耐火材が使われ、これらと灰の成分との干渉が注目される。

図7にわが国で開発中または製造されている主なガス化炉の構造概念図をしめす。同図(a)は電中研/MHIが、(b)はTEXACOが、(c)は日立がそれぞれプロセスを開発したものである。

図4 IGCC システム基本系統図

図6 日本の発電用一般炭性状例⁽⁷⁾

図7 日本で開発・製造されているガス化炉概念図

3・2 乾式ガス精製技術 石炭ガス化炉で発生したガスは、ばいじん（チャー粒子）を含んでおり、少くともガスタービンに支障のない程度に精製する必要がある。石炭ガスの生産目的が原料ガス、都市ガスのような場合は水スクラバ方式、脱硫液による、いわゆる湿式法が有効であり、実用化済みといってよい。しかし、わが国のように微粉炭火力の高性能化がすすみ、燃料を国外に依存している状況下ではこの方式による発電効率は低すぎる。

乾式（高温）ガス精製は 400℃前後の高圧下で集じん、脱硫するもので、ガス温度を常温まで下げる湿式に比べてプラント全体の発電効率を 2～3%（絶対値）向上させる。

ここでは紙面の都合で若干の現状紹介をしておきたい。処理すべきガス温度レベルでの性能などを念頭に酸化鉄を利用したものが開発されており、方式としては流動床脱硫システム（粒状脱硫剤流動床＋グラニューラベッド集じん）¹⁰⁾、固定床脱硫システム（ポーラスフィルタ＋ハニカム脱硫剤）¹¹⁾が代表的である。

これらの装置構成を図 8、9 に示す。前者は石炭技術研究所 (IHI, KHI) が、後者は電中研-MHI が開発

してきた。乾式ガス精製は欧米では難度の高い技術とされてきたが、近年日本での開発の進捗が注目をあびている。

ちなみに脱硫プロセスにおける、石炭ガス中の硫黄化合物 (H_2S , COS 等) から硫黄分を除去する諸反応式を以下に示す。

(脱硫)

(再生：発熱)

(還元)

再生プロセスの SO_2 含有ガス処理は硫黄還元プロセスで単体硫黄として回収される。

また、ガス精製での目標は排ガス目標値からもとめられ、おおむねばいじん 5～10 $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ 以下、硫黄濃度 100 ppm 以下とされている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

3・3 ガスタービン技術 石炭ガスはガス化剤に空気、酸素のいずれを用いるにしても発熱量は LNG にくらべてはるかに低い、(1 000～3 000 $\text{kcal}/\text{m}^3\text{N}$)⁽¹²⁾ すなわち、ガスタービンで高温燃焼ガスを発生するには低発熱量のために空気量を抑えねばならず、燃焼器内筒に分配できる空気量は少ない。さらに石炭ガスには炭種、運転条件によりアンモニアが含まれ、乾式ガス精製装置を通過してガスタービン燃焼器で NO_x に転換されるので NO_x 抑制への設計配慮が要る。

したがって、石炭ガス用燃焼器は従来の LNG 用とはまったく異なった設計が要求される。このようにガスタービンに課せられる技術、特性解明の課題は多いが、本発電方式実現の障害になることはないようである⁽¹¹⁾。

一方 IGCC の長所は、石炭がガス燃料に改質されており高性能ガスタービンを開発すれば発電効率を向上できる点にある。前述のようにガスタービン技術はすでに 1 300℃級に達しており、IGCC も当面この温度を目標にしているが、さらに超 1 400℃級へと動きつつある。複合発電プラント全体効率への寄与は冷却空気量の増加により 1 500℃程度までとみうけられる。

また先端的な技術としてセラミックガスタービンの開発がコージェネ用、発電用などに活発化してきている。これは冷却空気量の大幅削減により同じガス温度で効率が格段に向上する魅力をもっている。

3・4 大型ガス化炉・IGCC の開発動向と課題 IGCC の実用化は石炭ガス化炉が大前提であることは

図 8 流動床方式ガス精製システムの構成⁽¹⁰⁾

図 9 固定床方式ガス精製システムの構成⁽¹¹⁾

したがって、燃焼器技術の確立、高温ガス用耐食性翼技術の確立が必要である。また、本発電方式の高効率化はガスタービンの高温化の寄与が大きく、金属製機器により 1400°C 以上をねらう開発や、セラミックガスタービンの研究開発にも期待したい。

(プラント全体)

石炭ガス化炉・ガス精製装置はガス生産装置ということだけでなく、蒸気発生装置でもあり、オンラインで運転されるので、全体のシステム最適化、協調制御方式の確立が不可欠である。そのためにはガス化炉の運転条件と全体との動的関係の解明が必要である。

また、空気、ガスの流れが従来の LNG 複合発電方式と異なり、構成機器の発生する擾乱が他の機器またはシステムの作動に影響しない技術ノウハウも必要となろう。

4. 加圧流動床燃焼複合発電

PFBC=Pressurized Fluidized Bed Combustion による複合発電は、流動床燃焼によるボイラを加圧炉とし、ガスタービンサイクルの燃焼器としての機能をもたせ、かつ排熱回収も行うものである。したがって、PFBC ボイラによる蒸気サイクル系は蒸気条件を独立に決定することができる(図 11)。

本来この技術は低品位燃料の燃焼あるいは石炭の低コスト炉内脱硫をねらったものであるが、複合発電による高効率化が可能な PFBC-CC 発電が脚光をあびてきている。

流動床燃焼は本稿でとくに解説するまでもなく、常圧の産業用では既に実用化されている技術といってよいものである⁽⁴⁾。図 12 にボイラ内ガス速度による形式の分類を示す。産業用では同図タイプ A (バブリング形) の実績を踏んで現在ではタイプ B (循環形) が主流であり、後者が一歩進んだものとの見解をもつメー

カもある⁽¹⁹⁾。実際、産業用の実績は図 13 のように循環型が主流になってきている⁽²⁰⁾。

一方、発電用加圧流動床ボイラは常圧が加圧になっただけとは言え、加圧下の燃焼技術、信頼度、大容量化、運用性も含めて開発途上にあると言える。PFBC ボイラは石炭石あるいはドロマイトにより炉内脱硫を行い、通常石炭火力の排煙脱硫装置を省くねらいがあり、建設費を抑えることができるとされている。また、加圧炉でコンパクトなプラントにすることができる利点があるとも言われている。

また、炉内は 850°C 近辺が脱硫性能、NO_x 発生 の両面で最適と言われているが、後流ガス(膨脹)タービンを利用するためにこの燃焼ガスのばいじんを除去する必要があり、高温集じん技術が必要である。

図 3 で示される PFBC 発電の効率は蒸気サイクル系の蒸気条件を亜臨界圧から超々臨界圧(温度も当然上げる必要があり、538→約 650°C)まで変えたものを示している。

さて、PFBC-CC 発電プラントの開発状況であるが、わが国のような排煙処理の高度化が進んでいない欧米では、環境規制に対応する技術として注目されている。すなわち、ABB 社の技術系列(バブリング形 PFBC)により、1990~1995 の間に相次いで 100~350

図 12 流動床ボイラ内ガス速度による形式⁽¹⁸⁾

図 11 PFBC-CC 発電の基本構成
(850°C~助燃高温化の膨脹タービン)

図 13 日本における FBC 導入実績(設備容量)⁽²⁰⁾

MW 級の PFBC 発電プラントが運開する予定と報告されている(図 14)。

一方わが国では、電源開発が常圧 FBC ボイラ (50 MWe, 1986 運転開始) の開発に続いて上記バブリング形 PFBC と超々臨界圧(USC)蒸気タービンを組み合わせた高効率 PFBC 複合発電の開発を開始している。前述の高温集じん技術は国際協力による開発が着手されている。

PFBC-CC の当面の技術課題は前述のことからわかるように、PFBC ボイラ技術の確立、高温(約 850°C)集じん技術に絞られる。燃焼問題はもちろんのこと、伝熱管信頼性、ボイラの動的運用性など発電用大型プラントに欠かせない技術課題が多い。

また、循環形 PFBC はアールストロム社、B&W 社などが開発中であるが、ベンチスケール段階にあるといえよう。

5. 燃料電池複合発電

燃料電池発電の原理は通常の電池と同じ電気化学に基いているが、話題にのぼっているのは水素の酸化による化学反応直接発電である。これを化石燃料による発電技術として実用に供するには、電池本体も含めてシステム全体にわたり多方面の知見・技術の集約が必要である。

開発が進められている燃料電池 (FC=Fuel Cell) は、イオン導電物質である電解質の種類でリン酸形 (PAFC=Phosphoric Acid)、熔融炭酸塩形(MCFC=Molten Carbonate)、固体電解質形(SOFC=Solid Oxide)の 3 種類があり、それぞれ第 1, 2, 3 世代とも称されている。ちなみに PAFC は、作動温度が

200°C、燃料が水素(少量の一酸化炭素含有で白金触媒を被毒)で、技術的にはすでに実用の域に達しており、分散形、オンサイト形の電源として実証運転が盛んに行われているので、本稿では割愛する。

FC の起電力は水素酸素反応におけるギブス自由エネルギー変化 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ がもとになっており、 ΔH に対するカルノー効率に制約される熱機関より理想効率ははるかに高い。しかし、FC の両電極における水素・酸素ほかのガス分圧などに起電力が依存(ネルンストの式)するとともに、次式に示すように発電時の内部抵抗、反応抵抗によっても低下する。

$$V = E^0 - i \sum R_i$$

V : 電圧, E^0 : 開路時電圧, i : 電流, R : 種々の抵抗 (MCFC 複合発電)

MCFC の電解質は LiCO_3 , K_2CO_3 などその荷電担体としてのイオンは CO_3^{2-} である。電極材は通常燃料極(アノード)に Ni, 空気極(カソード)に NiO が使われている。

燃料に CO を用いても支障がないので LNG 改質ガス、石炭ガスがそのまま使える利点があり、作動温度が 600~700°C で PAFC に比し高効率発電が期待できる。

図 15 は MCFC の原理と単セルの構造例(単セルの厚さ 7~8 mm)で、その起電力は現実には 1 V に満たない。面積 1 m² で約 1 kW が達成されるが、大出力化には積層したもの(スタック)を压力容器に収納することになる。薄肉のものを多数重ね合わせ、界面で反応を行わせるには、その管理が極めて重要である。セルの発電特性は例えば図 16 のようであるが、耐久性向上も課題であるので、劣化メカニズムの解明と電池製造技術への反映が必要と考える。

さて、原理図から判るように、少なくとも燃料と同モルの炭酸ガスが空気極側に供給されねばならず、燃

図 14 350 MWe 用 PFBC ボイラ⁽²⁰⁾
(Philip Sporn 1995 運開予定)

図 15 MCFC の原理と単セル構造概念

料極の排ガスを改質してリサイクルしなければならない。このほか電池内発熱のための冷却、燃料の利用効率と発電効率の向上を狙って図 17 のような各種リサイクルが必要となる。このように電池本体のみでなく、周辺の高圧プラント技術が不可欠である。電中研では加圧条件のもとに 6 kW 級電池スタックによるリサイクル運転に世界で初めて成功している⁽²¹⁾。

一方、発電システム全体の姿は、LNG、石炭の改質ガスを利用した、たとえば図 18 のようなものとなる。同図(a)は 2 種類が示されている(1つはアノードリサイクルのないもの)。分散型の電源でも送電端 45% 以上が期待できる。電池本体内部で改質する方式の開発も盛んで、~60% 達成可能とも言われている。また、同図(b)は石炭ガス利用すなわち IG-MCFC-CC の例⁽²²⁾で、送電端 50% もの画期的な効率を得られる。技術的难度からみてまず LNG-MCFC が実用化され、その後 IG-MCFC-CC が出現すると考えられる。

MCFC による複合発電システムは種々の変化があり、むしろそれ自身が研究開発課題であるが、極めて高効率であり、開発の加速化が望まれる。

つぎに MCFC 技術の研究開発状況をまとめておこ

図 16 単セルの加圧特性例 (日本)

図 17 ガスリサイクル運転

う。日本のムーンライト計画の研究開発状況を中心とした各種燃料電池の開発状況を図 19 に示す。同計画は第 1 期(1981~86)で 10 kW 級スタックの開発が行われ、第 2 期(87~95)の前半に LNG 改質ガスによる 100 kW システムの開発を目指して MCFC 技術研究組合により推進されている。さらに 90 年代半ばには 1000 kW 級プラントの計画が描かれている。

一方、海外については、MCFC に限らず米国が先行してきている。20 年以上の基礎研究段階を経て、DOE, GRI, EPRI が主な推進者として資金源となっている。開発機関としては ERC, IGT, IFC など、25 kW 級

(a) LNG-MCFC 複合発電 (45%NET 以上)

(b) 石炭ガス化 MCFC 複合発電 (50%NET)⁽²²⁾

図 18 MCFC 複合発電システム例

図 19 燃料電池の開発状況 (地域名は電力会社)

のスタック開発を終了し、1993 年までには 50 kW、100 kW の開発を行うことにしている。

MCFC 本体および周辺技術の課題について、大型化技術の他に、温度・圧力など運転条件による電極材溶出等劣化、電解質の移動・散逸といった寿命に関わるミクロな課題を挙げたい。またスタック全体の静・動的挙動と電池状態/入力の制御手法、経済性確保のための製造技術、電池運転条件と性能ならびにコストとの関連など研究開発すべき課題は多い。

(SOFC)

SOFC は、酸素イオンを荷電担体とし、電解質には一般にイットリア安定化ジルコニア（セラミックス）が使われ、多孔質電極にも基本的に酸化物セラミックスが用いられる。電解質の導電性が小さいためこれを薄くする必要があり、薄膜製造技術が適用される。このように、材料組成、薄膜製造技術など、戦略的要素が加わり情報開示があまり進んでない。しかし、SOFC は高温（約 1000°C）作動であり、たとえば天然ガスは電池内部で容易に改質されるので、極めて高効率な発電ができ、あるいは小規模発電の可能性があるので、開発の動機は強い。

SOFC のセル構造は円筒形と平板形が開発されているが、前者について WH 社の開発が進んでいる（図 19 参照）。SOFC の開発にはなお時間を要すると考えられるので発電プラントのイメージは今後の研究を待ちたい⁽²³⁾⁽²⁴⁾。

6. 結 言

21 世紀は間近であるが、火力発電に対する要請が極めて高度なものになりつつある。本稿で展望してみた新型火力発電技術はその実現にかなりの時間を要するものばかりであり、放っておいては 21 世紀初頭に間に合わない。

IGCC⁽²⁵⁾、PFBC などについては今世紀中に実用化すべく努力がなされようとしているが学術的な支援も併行して重要である。

本特集号の主題はこれまでの論文集にあまり見うけられなかったものであるが、拙稿が各論文の背景の理解と同時に、今後の技術開発進捗に役立てば望外の喜びである。

また、本稿を執筆するにあたり、日本機械学会動力エネルギーシステム部門戸田三朗委員長（東北大）、慶大長島昭先生、九大吉田駿先生に御指導をいただいた。末尾ながら深甚の謝意を記す。

文 献

- (1) 通産省、電気事業審議会需給部会中間報告 1990-6.
- (2) シンポジウム機構論, No. 870-10, (1987).
- (3) シンポジウム機構論, No. 890-60, (1989).
- (4) 機械工学便覧 C-7, (1988), 1-56.
- (5) 「石炭ガス化炉の大型化技術調査」新エネルギー財団, (1984).
- (6) 芦澤ほか, 電中研研究報告 W89027, (1989).
- (7) 浜松, 関西支部定時総会講演 No. 904-2, 16 (1990).
- (8) 渡辺, 日機学会講習会教材 No. 900-87, 17 (1990).
- (9) NEDO, 昭和 63 年度研究成果年報 [1], 154 (1989).
- (10) 徳積, サンシャインジャーナル 7-1, 2, 48, (1986).
- (11) 電中研レビュー, No. 23, (1989), 30.
- (12) 森塚, 浜松, 火力原子力発電・九州 1-30, No. 1, 3, (1990).
- (13) Demkolec News, No. 1, Jan. (1990).
- (14) 機誌, 93-861, 年鑑特集号, (1980), 73.
- (15) 加藤, 火力原子力発電, 38-10, 38, (1987).
- (16) 辻ほか, 燃料協会誌第 69 巻, 第 4 号 239, (1990).
- (17) 森塚ほか, 火力原子力発電, 1989-9, 47.
- (18) 荒川, 火原協九州支部資料 (1989-1).
- (19) 杉山ほか, 日立評論 72-6 (1990).
- (20) 岩坪ほか, 電中研調査報告, W 89053, (1990).
- (21) 渡辺ほか, 電中研研究報告, W 89046, (1989).
- (22) 森塚ほか, 電中研内部資料, No. W 89905, (1989).
- (23) 阿部, 火力原子力発電, 1990-12, 196.
- (24) 田川, 機誌, 94-861, (1990), 81.
- (25) 浜松, 火力原子力発電, (1990-12), 184.