21世紀に向けた発電プラント用材料

新 田 明 人*

1. は じ め に

最近、気候温暖化、酸性雨等の地球規模の環境問題が国際的に大きな関心を集めている。このうち温暖化の元凶となっている二酸化炭素(CO₂)に注目すると、我が国では、電力分野がCO₂排出量の約3割を占めており、その削減対策が緊急の課題となっている。とりわけ、化石燃料を用いる火力発電には燃料消費量の抑制をはかる高効率化が不可欠となっている。そのため、現在蒸気条件の一層の高温・高圧化を進めた超々臨界圧汽力プラント、超高温ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた複合発電プラントなどの開発・実用化が進められており、将来的には複合発電が基本となるものと考えられる。これらは、いずれも高温化によって高効率化を実現しようとするものであり、その使用環境はますます過酷なものとなっている。したがって、これらの発電用高温機器に使用される材料には優れた高温強度等が要求されることとなり、新しい材料への期待も大きい。

そこで、ここでは、21世紀中葉までの超長期に及ぶ火力発電プラント技術の見通しに立ち、それを支える材料技術について展望する。

2. 21世紀に求められる火力発電の姿

上述した地球規模の環境問題への対応の一環として、気候温暖化の原因となるCO₂の排出を抑制する国際的な動きが高まりつつある。我が国では、地球温暖化防止行動計画が1990年10月に策定されたが、これによると、2000年以降の国民1人当たりのCO₂排出量をおおむね1990年レベルで安定化することを目標としている。我が国の1990年現在のCO₂排出量は約3.2億トンであり、上述したように、そのう

ちの約3割を占める電力分野においては、化石燃料を使用する火力発電の高効率化が不可欠となっている。

電力中央研究所⁽¹⁾は2010年には1988年の約1.6倍、2050年には約2.5倍になるものと想定して火力発電によるCO₂排出量の推移を予測している。その結果を図1⁽¹⁾に示すが、同図には発電効率が向上する場合と向上しない場合の2ケースを併示している。これを見ると、発電効率を現状維持とする場合のCO₂発生量は2000年にピークを示した後、2010年まで減少している。これは、当初原子力等の非化石エネルギーの電源設備が電力需要に追いつかず、火力発電の増大によりCO₂発生量も増加するものの、その後電力需要の伸びの鈍化と非化石エネルギーによる供給力の強化により一時的に低下することを示唆している。しかし、その後は、非化石エネルギーの開発を最大限期待しても、徐々にCO₂発生量は増大していき、2050年まで1990年のレベルを上廻ることとなる。一方、発電効率が向上する場合は、高効率新型火力発電を最大限に導入するものであり、初期の抑制効果は小さいも

図1 火力発電の高効率化によるCO₂発生量の予測⁽¹⁾。

* (財)電力中央研究所 柏江研究所 金属材料部次長(〒201 柏江市岩戸北2-11-1)

Advanced Materials for Power Plants Toward the Twenty-First Century; Akito Nitta (Komae Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Komae)

Keywords: power plants, high temperatures, structural material, material development, advanced alloy, intermetallic compound, ceramic, composite

1994年6月21日受理

の、2005年以降は1990年のレベル以下になっている。したがって、火力発電の高効率化が長期的にCO₂発生を抑制し行動計画の目標達成に大きく貢献することになる。

図2⁽¹⁾は、発電効率向上ケースの基本となる高効率新型火力発電技術の実用化時期とその達成可能な効率をまとめたものである。

我が国では、1967年に蒸気圧力24.2 MPaの超臨界圧プラントが初めて運開して以来、超臨界圧プラントの導入が進み、40%の最高効率を達成するに至った。その後、1980年代まで蒸気条件の大きな改善は見られなかったが、1980年代に入ると、上述した地球規模の環境問題への対処のため、再び高効率化が進められることとなり、蒸気条件の超々臨界圧(USC)化やガスタービン(GT)と蒸気タービンとの複合発電化が注目されるようになった。

USCプラントの技術開発は、1979年頃から開始され、その開発目標として、ステップⅠでは圧力31.0 MPa・温度866 K、ステップⅡでは圧力34.5 MPa・温度922 Kが設定され、従来の超臨界圧プラントの熱効率に比べ、相対値でそれぞれ6%および8%の向上が見込まれることとなった⁽²⁾。

一方、ガス・蒸気複合発電プラントでは、1984年以降運開された東北電力(株)東新潟3号系列が液化天然ガス(LNG)を燃料とした1370 K級GTを採用し、約44%の高効率を達成した⁽³⁾。現在、LNG 燃焼GTは1670 K級が実用化段階にあるが、2000年運開予定の東新潟4号系列では1720 K級GTを採用することにより50%の高効率化が見込まれており、今後は一層の高効率化を目指した1770 K級の開発が進められようとしている。また、石油や天然ガスに比し埋蔵量が数倍も豊富で、経済性にも優れ、かつ安定供給が期待される石炭は21世紀の我が国における主要なエネルギー源と考

図2 高効率新型火力発電技術の実用化の展望⁽¹⁾。

えられている。そのため、このような優れた利点をもつ石炭の有効利用をはかる石炭ガス化複合発電が将来の火力発電の主力と目されており、国のプロジェクトとして1983年以降開発が進められている⁽⁴⁾。さらに、環境保全性と高効率化を飛躍的に向上させる水素燃焼タービンを2030年に実用化させるため、まず要素技術の確立を図る国のプロジェクトが1994年より開始された。

3. 火力発電の高効率化を支える材料技術

発電プラントの高性能化は、他の機械・設備と同様、材料技術の進歩によるところが大きい。たとえば、ガスタービンは18世紀にアイデアの提案があったものの、適用可能な耐熱材料がなかったため、その実用化は1938年まで待たざるを得なかった。また、その後のガスタービンの高性能化はガスタービン入口温度の高温化により進められてきたが、それは、図3⁽⁵⁾に示すように、ガスタービン翼の冷却技術とともに、高温に耐えうる材料開発が大きな役割を果たしてきた。このような耐熱材料のこれまでの進歩と今後の展望についてまとめると、図4⁽⁶⁾のようになる。

以下では、最近の材料開発の動向を踏まえ、将来の火力発電の高効率化のための材料技術について展望する。

(1) 最近の材料開発における特徴

(i) 材料間の重要度の変化

図5⁽⁷⁾は、金属、高分子材料、複合材料およびセラミックスの4分野における相対的重要度の変遷として、過去から未来に至る材料の進歩を示したものである。

これを見ると、今世紀中葉まで金属材料の重要度が増大し続けてきたものが、それ以降次第に他の材料に取って代わられる傾向が認められる。すなわち、金属材料からセラミックやプラスチックといった無機・有機系材料へと重要度が移行し、材料の多種・多様化が進んでいる。その一例として、図4に示したガスタービン等の耐熱材料においても、ガス温度の超高温化とともに、金属系材料からセラミック系材料へ発展していく傾向がうかがわれる。

図3 ガスタービン入口ガス温度の推移⁽⁵⁾。

図4 耐熱材料の開発動向⁽⁶⁾。

(ii) 複素・複合化の進展

各種材料間の相対的重要度を示した図5から、今後複合材料の重要度が増大していく傾向が認められる。その具体例として、図4に示した耐熱材料の発展を見ると、将来の超高温耐熱材料にはセラミック系や炭素系の複合材料が有望視されていることがわかる。このように、優れた機能・性質をもった特定の材料を単一利用してきた、これまでの段階から、複数・多種の材料の個々の優れた機能・性質を活かし合

い、より一層の高性能化を目指す複素・複合化が今後主流となるであろう。たとえば、1985年に我が国で最初にアイデアが提案された傾斜機能材料は、金属材料とセラミックの複合化により、大きな熱応力低減効果等を付与しうる新材料のひとつであり、将来の高性能タービン翼等への適用が期待される。

また、現時点では発電プラントへの適用性については未知であるが、このような複素・複合化による高性能化を目指す新概念のひとつとして、自己診断性(予知・予告性)や自己修復性をもたせる材料のインテリジェント化が挙げられる。

さらに、従来それぞれ独自に進展してきた材料開発と構造設計を融合させることにより、一層の高性能化を図る融合材料という新概念も提案されており、今後の発展が期待されている。

(iii) プロセス技術の革新

既存材料の改良をはじめ新しい材料の創製による高性能化は、その製造工程におけるプロセス技術の革新に負うところが大きい。図4に見られる耐熱超合金の進歩においても、プロセス技術の果たしてきた役割は大きいと言える。非常に硬く高強度の超合金によるガスタービン翼の製造には、通常、精密鋳造が用いられる。従来の普通鋳造法では、多結晶状態となり、高温破壊の起点となる結晶粒界が多数存在することとなる。これに対し、高性能結晶制御を可能とする一方向凝固鋳造法や単結晶鋳造法の開発により、数個あるいは1個の結晶から成るガスタービン翼が実用化され、高温強度の一層の改善が図られた。これらの製造法は、いずれも米国において、それぞれ1965年および1967年に開発されている。その後、我が国や欧米を中心として単結晶超合金の開発研究

図5 工業材料の発展⁽⁷⁾。

が進み、多くの合金が開発されている。

この他にも、酸化物微粒子を均一に分散させ高強度化を図る機械的合金化(メカニカル・アロイング)法による酸化物分散強化型合金の開発、金属粉末とセラミック繊維を混合・成形する粉末冶金法による金属基複合材料の開発、原料粉末の熱間等方加圧(HIP)法によるセラミック材料の成形、急速焼入れ法によるアモルファス合金の開発、高純度化による鋼の強靱化、レーザービーム等による表面改質法の開発、等が挙げられ、プロセス技術は日進月歩の状況にある。

(2) 材料技術の将来予測

表1⁽⁸⁾は、経済企画庁経済審議会が1992年7月にとりまとめた「2010年の技術的予測」のなかで分析した、我が国の将来の産業経済に与えるインパクトが大きい新素材をはじめとする未来技術の実用化時期を一覧したものである。このうち、新素材について見ると、今世紀末までに高性能炭素繊維強化プラスチック等の実用化を挙げており、2010年までには、水素吸蔵合金、アモルファス合金、高性能C/Cコンポジット等の実現を予測し、それ以降21世紀中葉までに超電導材料、高性能セラミック系複合材料、高性能金属系複合材料等について見通している。いずれにしても、今後の材料開発研究においては、高品質・高性能・高(新)機能・高付加価値がより一層指向されていくものと考えられる。

(3) 発電効率向上のための材料技術

USCプラントは、従来の超臨界圧プラントの設計概念に基づき、高温・高圧化には使用材料の高強度化で対処しようとするものである。したがって、その成否はまさに材料技術の改良・開発にかかっていると言える。ステップⅠのUSC蒸気タービンでは、主要部品はすべてフェライト系材料で構成でき、高温ローターには改良12Cr鋼が採用されている。これらは、現用のCr-Mo-V鋼および12Cr鋼ではステップⅠの温度条件に対し360Ms(10⁵h)クリープ破断強度の確保が困難であったことから、現用12Cr鋼の組成改善によって

高強度化したものである⁽²⁾。また、ステップⅡの高温ローターには、さらに高温強度の高いオーステナイト系合金の採用が不可欠であり、大形鍛造が可能な改良A286合金が開発されている⁽⁹⁾。

一方、図3に示したように、ガス・蒸気複合発電の高効率化はガスタービンの高効率化、すなわち入口ガス温度の高温化に大きく依存する。現在、ガスタービン部品には金属系耐熱材料が用いられており、特に高温部には、鉄基・コバルト基やニッケル基の超合金が採用されている。最近では、上述したように、結晶制御技術をはじめ、粉末冶金や機械的合金化等の加工技術に代表されるプロセス技術が進歩し、さらに高性能の合金が開発されている⁽¹⁰⁾。なお、このようなガスタービン材料には、過去の発電用ガスタービンの損傷原因が腐食・浸食(47%)、疲労(29%)、クリープ(9%)と報告されている⁽¹¹⁾ことから、高温強度と耐食性の両面でバランスのとれたものでなければならないと言える。

さらに高効率化を目指した超高温ガスタービンには、セラミック、金属間化合物、炭素/炭素複合材料等の先進材料が期待されている⁽¹⁰⁾。このうちセラミックは炭化けい素や窒化けい素を中心に、燃焼器や静翼への適用が進められている。セラミック静翼の一例を図6⁽¹²⁾に示す。また、動翼へのセラミックの適用研究も進められている⁽¹³⁾が、現在のところ、遮熱効果を高めたセラミック被覆は実用化の見通しが得られているものの、セラミック動翼の開発には未だ多くの時間を要するものと思われる。さらに傾斜機能材の発展も今後期待される。一方、Ni₃Al、TiAl等の金属間化合物は脆さと耐酸化性の克服が不可欠であり、また、炭素・炭素複合材料は炭素繊維の耐熱性の向上や耐酸化性被覆技術の開発が課題とされており、今後の研究開発の一層の進展が必要である。特に、水素燃焼タービンでは2273Kまでを想定した超高温材料の開発が不可欠とされており、高性能耐熱合金、金属間化合物の他、セラミック系や炭素系複合材料等が注目されている。

表1 わが国における未来技術の実用化時期⁽⁸⁾。

分野	1990～2000年		2001～2010年		2011年以降	
	実用化技術	時期	実用化技術	時期	実用化技術	時期
新素材	高性能CFRP セラミックスガスタービン	2000 2000	磁性材料	2010	非線形光電子材料	2020
			水素吸蔵合金	2010	光化学ホールバーニングメモリ	2020
			光IC	2010	超電導材料	2030
			半導体超格子素子	2010	熱可塑性分子複合体	2040
			ニューガラス	2010	分子デバイス	2040
			アモルファス合金	2010	高性能CMC	2050
			高性能C/Cコンポジット	2010	高性能MMC	2050
エネルギー	高効率ヒートポンプ	1995	太陽光発電	2010	燃料電池	2015
			モジュール型軽水炉	2010	超電導電力貯蔵施設	2020
					高速増殖炉	2025
					核融合炉	2050

—経済企画庁経済審議会「2010年の技術的予測」(1992年7月)より抜粋—

図6 セラミック静翼の構造⁽¹²⁾。

4. お わ り に

地球環境問題に適切に対処するとともに、電力の安定供給を将来にわたり確保していくには、火力発電の高効率化が不可欠である。それとともに、ここまでは触れなかったが、環境負荷の小さい原子力発電も主要な役割を果たす必要がある。そのため、実績を積み重ねてきた軽水炉発電の長期利用とともに、エネルギーセキュリティの面からも準国産エネルギーとして位置づけられる高速増殖炉の実用化など、より一

層安全で経済性の高い原子力発電技術の確立が求められている。いずれにしても、このような火力・原子力発電技術を支えるベースとして、これから先も材料技術の進歩に期待するところが大きいといえる。

最後に、火力発電技術分野のエネルギー開発における今後の材料ニーズをまとめた表2⁽¹⁴⁾を引用させていただき、本稿の締めくくりとしたい。

文 献

- (1) 電力中央研究所：電中研レビュー，No. 29(1992)。
- (2) 伊東正道，河村祐士，桑原和矢，宮崎松生，福井 寛，竹田頼正，羽田壽夫，石本礼二，田村広治：火力原子力発電，**37**(1986)，727。
- (3) 齋藤哲朗，狩野公男：日本ガスタービン学会誌，**18**(1990)，30。
- (4) 和食 靖：日本機械学会シンポジウム「動力・エネルギー技術の最前線」Part II 講演論文集，No. 890-60(1989)，79。
- (5) 久保田道雄：火力原子力発電，**42**(1991)，228。
- (6) D. W. Petrasek, D. L. McDanel, L. J. Westfall and J. R. Stephens: Metal Progress, **130**(1986)，27。
- (7) M. F. Ashby: Phil. Trans. R. Soc. London, No. A322(1987)，393。
- (8) 経済企画庁経済審議会：2010年の技術的予測(1992)。
- (9) 古谷春日，肥爪彰夫，藤川卓爾，横田 宏，国分孝友，竹田頼正：日本機械学会論文集(B編)，**56**(1990)，3889。
- (10) 塩入淳平：日本ガスタービン学会誌，**19**(1991)，4。
- (11) EPRI: Report Ap-4475(1986)。
- (12) 久松 暢，阿部俊夫，三巻利夫，宮田 寛，町田隆志，大島亮一郎：日本機械学会論文集(B編)，**57**(1991)，819。
- (13) 土屋利明：日本ガスタービン学会誌，**18**(1990)，6。
- (14) 通商産業省基礎産業局新素材対策室監修：1993新素材便覧，(1993)，664。

表2 エネルギー開発における材料ニーズ⁽¹⁴⁾。

課 題	対応の方向	素材面からの対応	対象新素材	今後のポイント
エネルギー 高効率変換	超々臨界圧機 (蒸気の高温 高圧化)	大型耐熱材料	改良 9~12% Cr 鋼	コスト低減
		高比強度材料	Fe または Ni 基合金	製造技術
複合サイクル発電 (ガスタービンの 大型化)		大型耐熱材料	Ti 合金	コスト低減
			Ni, Co 基超合金	製造技術
廃棄物発電 燃料電池		耐食性材料	結晶制御合金	コスト低減
		電極等材料 耐食性材料 (PAFC)	高融点合金 セラミックス	信頼性向上
		電極	ステンレス鋼，高 Ni 基合金	信頼性向上
		触媒	孔質炭素繊維 (多孔質電極)	低コスト化，耐久性向上
		セパレーター	フェーネスブラック	低コスト化，信頼性向上
			白金合金微粒子	製造技術
		耐熱耐食 材料 (MCFC)	フェノール系樹脂脂合浸 グラファイト	
		電極	NiCo, NiCr	長寿命化
		電解質	多孔質体	製造技術
		セパレーター	LiAlO ₂ , K ₂ CO ₃ +Li ₂ O ₃	
		高温導電性 材料 (SOFC)	高耐食ステンレス鋼	
		電極	Ni, Ni-ZrO ₂	長寿命化
		電解質	サーメット	製造技術
			Y 安定ジルコニア	
超電導発電機	高臨界電流密度 超電導材		金属系超電導材	信頼性，耐久性向上，
			酸化物系超電導材	高臨界電流密度，線材化技術
MHD 発電	耐熱，耐食性， 絶縁壁&電極材料		セラミックス	