

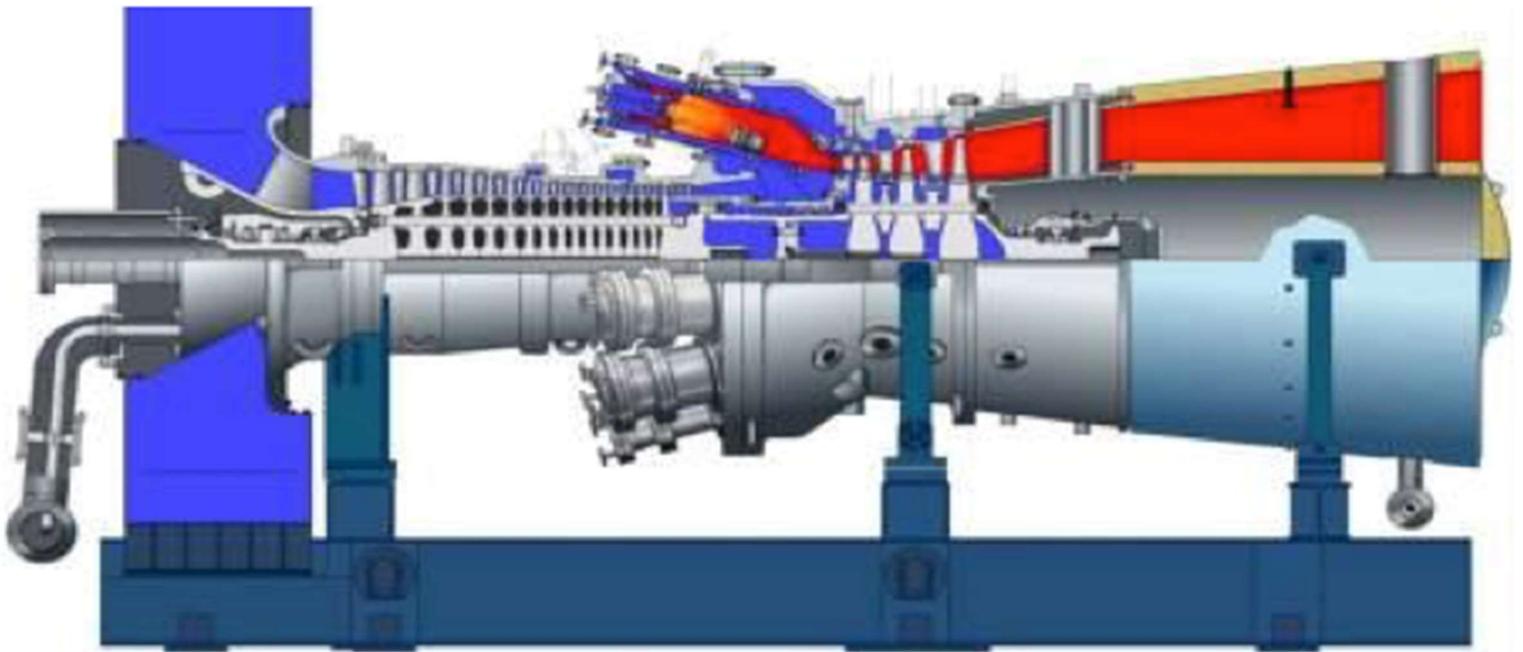
ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

JSAE エンジンレビュー

特集：火力発電システム

コラム：自動車排出ガスと大気環境問題



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム：自動車排出ガスと大気環境問題 1
Vehicle Exhaust Emissions and Air Pollution Monitoring
飯田訓正 (慶應義塾大学大学院)
Norimasa IIDA (Keio University Graduate School)
- エンジン技術者にとっての火力発電技術 3
Thermal Power Generation Technology for Reciprocating Engine Engineers
遠藤浩之 (三菱重工業エンジン&ターボチャージャ株式会社)
Hiroyuki ENDO (Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger, Ltd.)
- 火力発電システム 5
Thermal Power Generation Systems
岡崎 輝幸 (三菱日立パワーシステムズ株式会社)
Teruyuki OKAZAKI (Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.)
- 発電用微粉炭焚きボイラの燃焼技術・数値解析の最前線 9
State-of-the-art Combustion Technology and Numerical Simulation of a Pulverized Coal Fired Boiler for Power Generation
半田 雅人 (三菱日立パワーシステムズ株式会社)
Masato HANDA (Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.)
- 発電用ガスタービン燃焼技術 15
Combustion Technologies for Industrial Gas Turbines
浅井 智広 (三菱日立パワーシステムズ株式会社)
Tomohiro ASAI (Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.)

■ JSAE エンジンレビュー編集委員会

委員長: 飯田 訓正 (慶應義塾大学)

副委員長: 村中 重夫 (元・日産自動車)

幹事: 飯島 晃良 (日本大学)

委員: 遠藤 浩之 (三菱重工エンジン&ターボチャージャ)

大西 浩二 (日立オートモティブシステムズ)

奥井 伸宜 (自動車技術総合機構)

菊池 勉 (日産自動車)

小池 誠 (豊田中央研究所)

小酒 英範 (東京工業大学)

清水 健一 (元・産業技術総合研究所)

下田 正敏 (元・日野自動車)

西川 雅浩 (堀場製作所)

野口 勝三 (本田技術研究所)

平井 洋 (日本自動車研究所)

細谷 満 (日野自動車)

山崎 敏司 (編集)

渡邊 学 (JXTG エネルギー)

発行所: 公益社団法人 自動車技術会

発行日: 2018年9月30日

発行人: 大下守人 (アイシン精機)

〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2

電話: 03-3262-8211

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN

Vol. 8 No. 5 2018

自動車排出ガスと大気環境問題

Vehicle Exhaust Emissions and Air Pollution Monitoring



飯田訓正

Norimasa IIDA

JSAE エンジンレビュー編集委員長

慶應義塾大学大学院

Keio University Graduate School

環境基準の達成状況からみて課題があると思われるものとして、光化学オキシダントおよびPM2.5が挙げられる。これらの大気汚染状況について、公表されている最新の観測データである平成28年度データに基づいて説明したい。

◆平成28年度の光化学オキシダントは、一般環境測定局の1,143局、自動車排出ガス測定局（道路沿道の測定局）の29局の合計1,172局にて測定されている。光化学オキシダントの環境基準値は1時間値が0.06ppm以下であり、基準達成した局数は、一般局、自排局ともに0局であり、達成率0%という状況にある。汚染状況の経年変化は達成率では把握できないことから、環境省は、長期的推移を評価するための指標として「日最高8時間値の年間99%パーセンタイル値の3年移動平均」を導入した。この指標によれば年々減少傾向にあるとしている（図1）。

光化学オキシダントとは、工場や自動車から排出される窒素酸化物NOxおよび揮発性有機化合物VOC等の一次汚染物質が、大気中にて太陽光の照射を受けて生じる光化学反応で生成する二次的な汚染物質である。よって、オキシダントの削減には、原因物質のバランスの取れた削減が必要である。窒素酸化物の削減が進んだものの、一方でVOCの削減が進まないことが原因と考えられている。自動車が排出する窒素酸化物NOxは平成28年度で50万トン/年と見積もられており、10年後の平成38年度には30万トン/年まで削減される見込みである。例えば神奈川県は、工場・自動車・船舶・一般のNOx排出量5万トン/年であるが自動車の寄与分はその1/5である。

◆平成28年度のPM2.5は、一般局で785局、自排局で223局にて測定されている。基準の達成率で見ると、一般局で88.7%、自排局で88.3%である。前年の平成27年度は一般局で74.5%、自排局で58.4%であり、改善の傾向にある（図2）。

全国的に見ると、日本全域にて達成局数が増加しているが、西日本を中心に非達成局が見られる状況にある。日本におけるPM2.5の二次粒子の原因物質の70%は隣国の中国からの越境汚染によるものと推計されている。平成28年度のPM2.5の環境基準達成度が改善された要因としては、国内のNOxやVOCの排出量の減少に加えて、越境汚染の減少にあると考えられる。

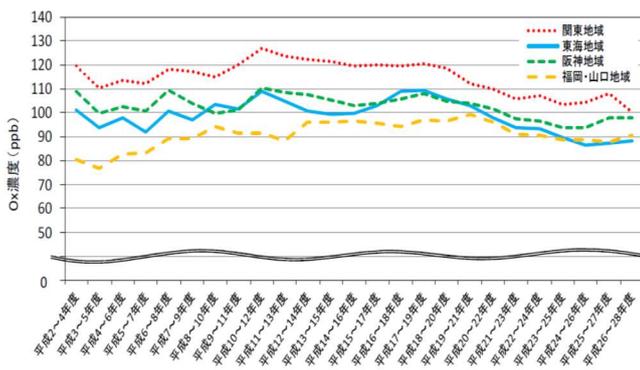


図1 光化学オキシダントの長期的推移

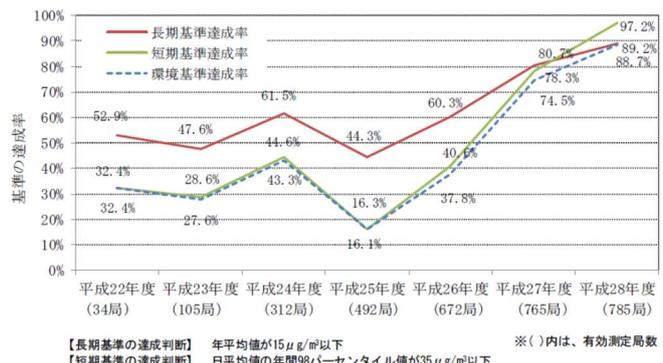


図2 一般局におけるPM2.5環境基準達成の状況の推移

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

PM_{2.5}とは、大気中に含まれている2.5ミクロン以下の粒子を指している。排出源から粒子として排出されるものを一次粒子と呼び、大気中にて多種に及ぶPM_{2.5}の原因物質が、凝縮・合体・化学反応等の(物理的・化学的なプロセス)を経て生成する二次粒子とに分類される。

PM_{2.5}の原因物質は、かつては一次粒子が大きな比率を占めており、工場の煙突から排出される煤煙、ディーゼルエンジンから排出される粒子状排出物(PM)が主要な排出源であった。現在のディーゼル車には、ディーゼル・パティキュレート・フィルタ(DPF)と呼ばれる排出粒子を捕捉する装置が装備されており、PMの排出量は激減した。平成28年度に自動車から排出されるPMは1.5万トン/年と推計され、平成38年度には0.4万トン/年まで削減する(図3)。日本のPM_{2.5}に対するディーゼル車の寄与度は現在10%程度と見積もられている。

この様に、大気環境負荷に及ぼす自動車排出ガスの寄与度は減少しており、自動車以外領域の排出ガス全体のバランスの取れた削減が求められている。中国、インドの都市部での汚染が厳しい状況にある。また、日本の大気環境は日本の国内対策のみでは解決できない状況にあり、アジア地域のグローバルな視点での協力が必要となっている。

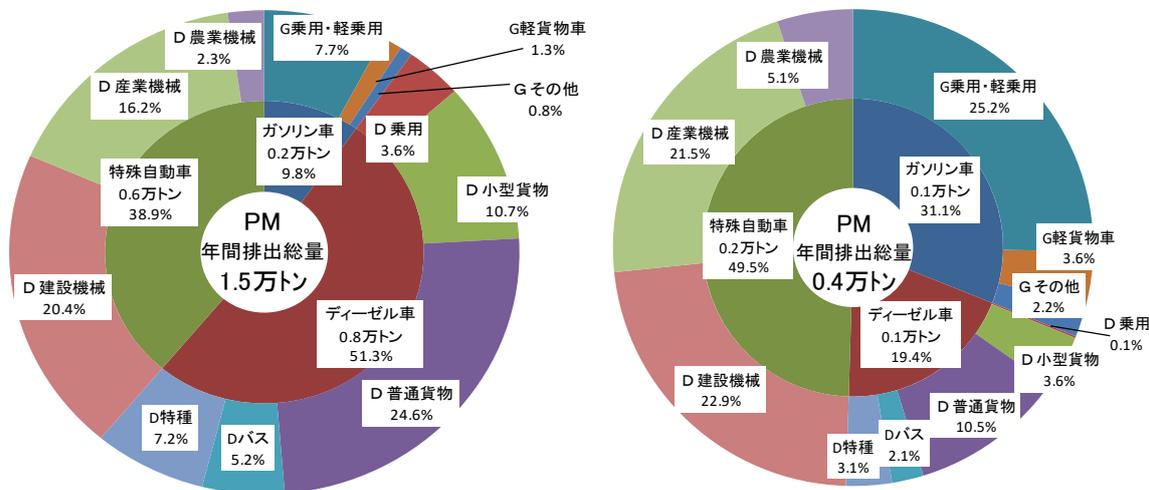


図3 自動車から排出されるPMの年間排出総量 (左:平成28年度, 右:平成38年度)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

エンジン技術者にとっての火力発電技術

Thermal Power Generation Technology for Reciprocating Engine Engineers

遠藤浩之

Hiroyuki ENDO

三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社

Mitsubishi Heavy Industries Engine & Turbocharger, Ltd.

今回、エンジンレビュー誌にて火力発電システムを特集として取り上げるにあたって、読者の大多数を占める自動車エンジン技術者にとってわかりやすい様に、燃焼法、サイクル、出力、熱効率、排出 NOx、排出 CO₂ 等について整理した。火力発電システムとして現在主流となっている LNG 焼きガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)火力発電と石炭焼き蒸気タービン火力発電について整理した結果を表 1 に示す。

表 1 火力発電システムの主要性能 (数値は一例)

システム	LNG 焼き ガスタービン コンバインドサイクル(GTCC) 火力発電	石炭焼き 蒸気タービン 火力発電
燃料	天然ガス	石炭
燃焼法	予混合燃焼	予混合燃焼
NOx 処理技術	アンモニア SCR	アンモニア SCR
サイクル	ブレイトンサイクル +ランキンサイクル	ランキンサイクル
出力	~700MW	~1000MW
LHV 熱効率	60%程度 ⁽¹⁾ [発電端]	43%程度 ⁽²⁾ [発電端]
発電電力当たりの排出 NOx [g/kWh]	0.1 ⁽³⁾ [東京電力の火力発電の平均値]	
発電電力当たりの排出 CO ₂ [g-CO ₂ /kWh]	297 ⁽⁴⁾	752 ⁽⁴⁾

最新の LNG 焼き GTCC 火力発電では、発電端効率で 60%以上⁽¹⁾が実用化されており、燃料が天然ガスであることも併せて、極めて低い CO₂ 排出量となっており、燃焼をもとにしたエネルギー変換システムとしては最高レベルのシステムである。また石炭焼き蒸気タービン火力発電においても、ランキンサイクルとしては高効率な 40%以上⁽²⁾の熱効率を実現している。なお排出 NOx については、SCR 脱硝装置を備えるため、東京電力の火力発電所平均⁽³⁾のみでも 0.1g/kWh と非常に低いレベル (最新プラントではさらに一桁低いレベル) を達成している。

これら 2 方式のうち LNG 焼き GTCC 火力発電システムと自動車用エンジンを比較して説明する。自動車用エンジンは基本的にはエンジン単体で完結している (ターボコンパウンドなどの一部例外もある) が、GTCC 火力発電システムの場合は、ガスタービンエンジン出口の排ガスで蒸気を発生させ蒸気タービンを駆動することによって排ガス温度が低いところまでエネルギーを回収し高効率を実現している。サイクルを 2 つ組み合わせているため、コンバインドサイクルと呼ばれる。自動車用エンジンでもランキンサイクルによる排熱回収がトライされているが、ガスタービンに比べると排ガス温度が低いため、大きな効率向上が得られない割に構造が複雑化する問題がある。また排出 NOx については、GTCC の場合は希薄予混合燃焼によってガスタービンエンジン出口 NOx を低減し、さらにアンモニア脱硝によって数 ppm レベルまで低減している。自動車用エンジンでは希薄予混合燃焼+脱硝触媒は、量論比燃焼+3 元触媒に比較するとコスト高となるため、最近ではあまり使われていない。

これらの火力発電システムで使用されている燃焼制御技術は、自動車用エンジン開発の参考になる点もある上、火力発電の CO₂ 排出量は、EV 車の CO₂ 排出量に直結するため、自動車技術者にとっても知っておく必要がある。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 8 No. 5 2018*

【参考文献】

- (1) http://www.tepco.co.jp/torikumi/thermal/images/fire_electro_efficiency.pdf のP.1
- (2) <http://www.jcoal.or.jp/coaldb/shiryu/material/08horikawa.pdf> のP.14
- (3) <http://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/environment/emissions-nox-j.html> より
- (4) <http://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf> と熱効率より著者にて計算

火力発電システム

Thermal Power Generation Systems

岡崎 輝幸

Teruyuki OKAZAKI

三菱日立パワーシステムズ株式会社

Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.

1 世界のエネルギー状況と火力発電の役割

周知のように、発電用として、化石燃料は利用しやすい安価な燃料として長い期間利用されてきた。しかし、近年ではCO₂排出の観点から、その利用を抑制する動きが全世界的に展開されている。代替エネルギーとしては、再生可能エネルギーが急速に増加しているが、その偏在性や、気候や季節による発電量の大幅な変化などを考慮すると、当面は火力発電のエネルギーに頼らざるを得ない状況である。

ところで、化石燃料とひとつに括っているが、火力発電で利用される主な化石燃料としては、石炭、天然ガスがその代表と考えて良い。ここで、「石炭は過去のエネルギー源だと思うが、今も使われているのか?」という質問をよく受ける。図1に示すとおり、2016年のエネルギー消費量において、全世界では約28%、日本国内でも約27%が石炭であることが分かる⁽¹⁾。また、中国は60%以上のエネルギーを石炭に依存している。

このように、石炭は世界中に広く存在し、発熱量あたりの価格も安価という特徴があることから、多くの国で利用されている。しかし、石炭は燃焼によって発生するCO₂の量が他の化石燃料に比べても多いため、地球温暖化の観点から使用を制限する要求も強く、先進国を含め、中国などでも石炭の使用量を抑制する方向である。一方で、インドや東南アジアの新興国では、エネルギー需要の拡大により、石炭使用量は今後も増加すると予測されている⁽²⁾。天然ガスは、他の化石燃料に比べ、燃焼時に単位発熱量あたりのCO₂、窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)の発生量が少ないという特徴がある。また、今後もその消費量がさらに増加すると考えられている。

ただし、2015年にパリで開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議(21st Conference of the Parties: COP21)では、温室効果ガスの発生量の多い国々は、CO₂の削減に取り組むことが義務づけられている。よって、発電事業から発生するCO₂発生量を抑制する技術開発は、ますます重要となっている。また、火力発電は出力の増減を燃料流量で素早くコントロールできるので、近年では再生可能エネルギーのバックアップとして、系統を安定化する負荷調整の重要な役割も担っている。再生可能エネルギーが増加するほど、ますます機動性の良い火力発電システムが重要となっている。

2 火力発電システムの概要

それでは「火力発電システム」と聞いて、どのようなイメージを持っているだろうか。多くの人が、化石燃料を燃焼することで得られる熱エネルギーを電力に変換する発電システム、と理解していると思う。定義はこれで正しいが、その詳細な仕組みや運転方法などをご存知だろうか。「火力発電システム」を構成する機器・熱サイクルなどの組み合わせは多岐にわたり、様々なシステムが存在する。そこで、本節では主なものについて説明する。

火力発電の発電方式としては、ボイラと蒸気タービンを組み合わせた汽力発電と、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発

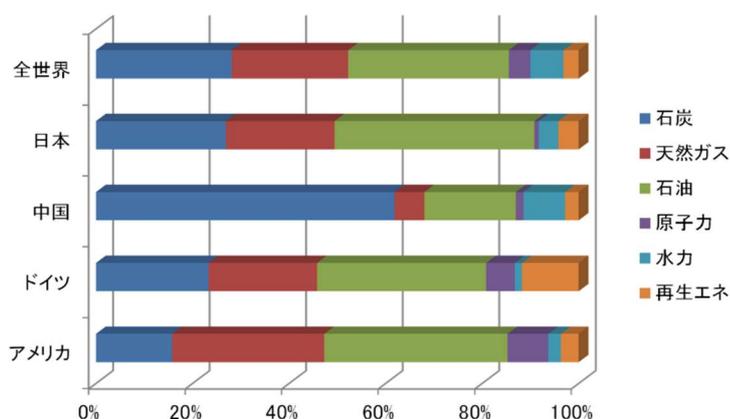


Fig 1 Energy Consumption in 2016

(created by author from BP statistical data)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

電の2方式がある。前者は主に石油や石炭を、後者は天然ガスを燃料とする場合が多い。

まず、汽力発電システムの模式図を図2に示す。燃焼火炉（ボイラ）において、燃料と空気を燃やして熱が発生する。この燃焼熱は燃焼火炉内に設置された伝熱管で水や水蒸気と熱交換され、高温・高圧の蒸気を生成する。そして、この蒸気を使って蒸気タービンの羽根車を回し、タービンと連結した発電機を動かして発電する。1ユニットで発電量100万kWを越えるような最新の大型の発電プラントはこの方式を採用することが多く、蒸気を600°C以上、圧力を25 MPa以上の超々臨界圧の過熱蒸気にすることで、熱効率を高めている。現在、国内において発電端効率は40%を越え、世界最高レベルに達している。また、さらなる効率向上のために、蒸気の高温化・高圧化に対応可能な材料の開発、蒸気タービンの翼の形状や蒸気のシール技術の改良を図っている⁽³⁾。

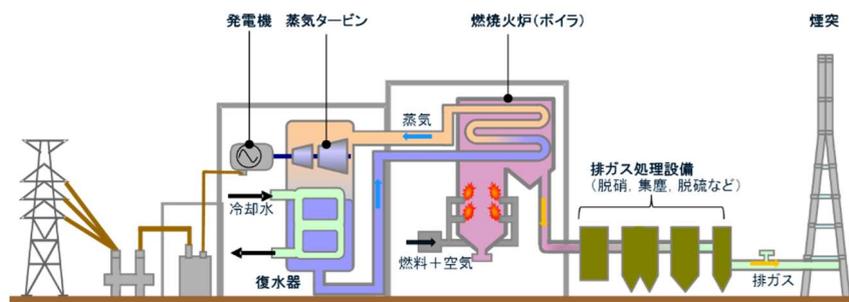


Fig 2 Schematic diagram of Steam Electric Power Plant

次に、コンバインドサイクル発電システムの模式図を図3に示す。ガスタービンの圧縮機を用いて空気を圧縮し、この高圧空気と燃料を燃焼器で燃焼して高温の排ガスを発生させる。排ガスは、ガスタービンのタービンで膨張し、仕事として発電機と圧縮機を回転させて発電する。また、ガスタービンの排ガスの余熱を利用して、排熱回収ボイラで蒸気を発生させ、蒸気タービンを回転させるエネルギーとして回収する。これにより、高い熱効率を得ることができ、熱効率が60%を越えているプラントもある⁽⁴⁾。

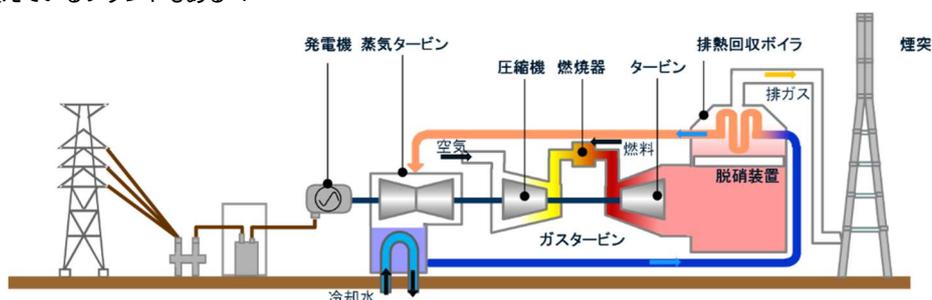


Fig 3 Schematic diagram of Combined Cycle Power Plant

また、コンバインドサイクル発電システムは、ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせにより、一軸型と多軸型の型式に分けられる。図3に示した構成は、ガスタービン、蒸気タービン、発電機の軸を一直線に並べた構成をひとつのユニットとした一軸型となる。一軸型では、このユニットを複数並べて構成しているプラントが多い。運用するユニット数の増減で出力を変えられることや、広出力範囲で定格出力と同等の高い熱効率を得られる特徴がある。一方、多軸型では、ガスタービンと蒸気タービンの軸が分かれていて、複数台のガスタービンと一台の蒸気タービンで構成され、それぞれ発電機を接続している。多軸型は、蒸気タービンの容量を大きくでき、定格出力時の熱効率が良いのが特徴で、ベース負荷運用に適している。

ここで、コンバインドサイクル発電システムで重要な機器であるガスタービンについても、少し説明しておく。ガスタービンの効率に最も影響を与えるものは、タービン入口での燃焼排ガス温度と、空気の圧縮の度合いを示す圧力比（＝圧縮機出口の空気圧力／入口の空気圧力）である。その燃焼排ガス温度が上昇すると、タービンの膨張過程で利用できる熱差が増加し、タービンの出力・効率が向上する。一方、圧力比は、熱効率に最大値が存在するので、最適な設定範囲がある⁽⁵⁾。なお、燃焼排ガス温度が1300°C級のシステムをACC (Advanced Combined Cycle) 発電、1500°C級以上のものをMACC (More Advanced Combined Cycle) 発電と呼ぶこともある。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

3 火力発電システムの環境への取り組み

火力発電が取り組む大きな課題は、やはり環境負荷の低減である。つまり、燃焼に伴って発生する排ガスの中に含まれるガス成分が、人体や環境に影響を与えることが社会問題となっている。従って、火力発電システムにおいて、燃焼技術の進歩が最も重要な項目のひとつと考えるとよい。とりわけ、地球温暖化に影響を与えるCO₂の発生抑制に向けた燃焼技術の取り組みは、ますます重要になっている。

CO₂発生量を削減するための主な燃焼技術としては、発電効率を高めて単位発電量あたりのCO₂発生量を減らす燃焼技術、CO₂を回収する燃焼技術、カーボンニュートラル/カーボンフリーな燃料の燃焼技術などがある。以下にそれぞれの技術開発の状況を説明する。

発電効率を高める技術として、天然ガスを燃料とするガスタービンでは、燃焼温度の高温化の技術開発が進められている。国内では2004年から国家プロジェクトとして、図4に示すように、タービン入口での燃焼排ガス温度を1700℃級とする大型ガスタービンの開発を継続している^{(6), (7)}。米国においても2015年から1700℃ (3100°F) 級ガスタービンの開発で、効率65%を目指している⁽⁸⁾。ただし、高温化に伴うサーマルNO_xの発生量の増加をいかに減らすかが大きな課題となっている。

次に、石炭を高効率で燃焼する方法として、石炭ガス化複合発電 (Integrated coal Gasification Combined Cycle: IGCC) がある。燃料として石炭ガス化炉で生成された石炭ガス化ガスを用いたコンバインド発電システムである⁽⁹⁾。国内では、2013年に出力250 MW規模の発電プラントが商用運転を開始しており、2020年の運転開始を目指して500 MW規模の発電プラントが建設されている。図5に示した石炭火力発電の効率の推移からもわかるように、コンバインド発電システムとすることで大幅に効率を向上させる予定である⁽⁶⁾。

CO₂を回収する燃焼技術としては、天然ガスを燃料とし、従来のガスタービンと同程度の発電効率を有しながら、CO₂を回収できる超臨界圧CO₂火力発電システムがある。現在は、出力250 MW級のCO₂タービン及び燃焼器実現を目指した検証試験計画を通して、商用化へのプロセスに進んでいることが報告されている^{(10), (11)}。カーボンニュートラルな燃料の燃焼技術としては、石炭・バイオマス混焼技術がある。微粉炭焚きボイラは、現在の石炭火力発電の大半を占める方式であり、バイオマスの混焼率を増加させることは、CO₂削減の観点から大きな意味を持つ。そのため、微粉炭焚きボイラに木材チップのようなバイオマス燃料を混焼させる技術の開発も進められている。国内では150 MW級商用機での木質バイオマスの高比率混焼実証試験が実施され、バイオマス混焼率25cal%が達成されている⁽¹²⁾。カーボンフリーな燃料の燃焼技術としては、水素専焼やアンモニア直接燃焼の技術がある。再生可能エネルギーの普及に伴って、余剰電力で水を電気分解して水素を生成し、その水素を燃焼する発電システムが提案されている。ただし、水素は逆火のリスクがあるため、それに対応する燃焼器の開発や、水素燃料の貯蔵や輸送にかかるコストを減らす技術開発が必要である。燃焼器としては、発電効率を下げずに低NO_xを達成するドライ低NO_x型水素専焼ガスタービン燃焼器が開発予定で、実用化は2030年以降を目指している^{(13), (14)}。また、アンモニアは再生可能エネルギーの水素キャリアとして期待されているが、一方で燃料としてそのまま燃焼させるアンモニア直接燃焼ガスタービンの開発が、内閣府のイノベーション創造プログラム (SIP) で取り組まれている。本研究は2013年から開始され、2016年度からは燃焼器テストリグによる燃焼器の改良試験が進められている⁽¹⁵⁾。

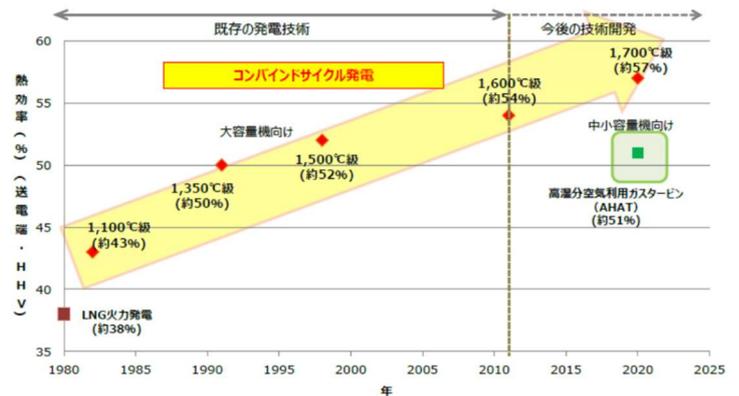


Fig 4 Improvement of Gas Turbine Combined-cycle system Thermal Efficiency

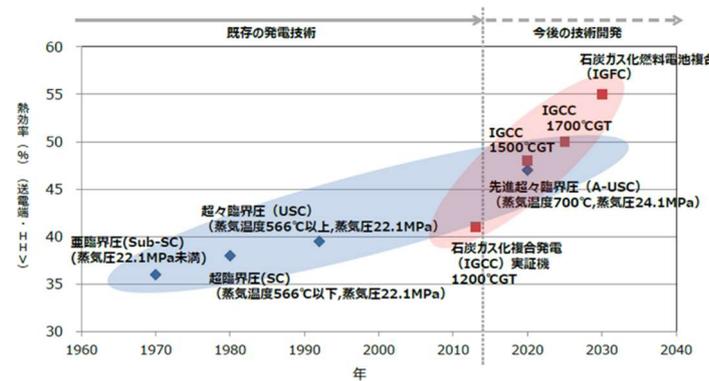


Fig 5 Improvement of Coal-fired plant thermal efficiency

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

また、燃焼技術そのものではないものの、燃焼状態を最適化するため、人工知能 (Artificial Intelligence : AI) が火力発電所の過去の運転データを分析し、コンピューター上で発電所を再現するデジタルツイン技術も急速な発展をみせている。燃料の量や種類、電力の出力など最適な運転方法を導き出すことができ、火力発電所の効率的な運転を実現する技術として注目されている。

4 まとめ

以上、火力発電システムの概要と環境への最新の取り組みについて説明した。分野の違う読者に、少しでも火力発電システムを理解してもらえれば幸甚である。なお、火力発電で最も重要な課題である環境負荷の低減には、燃焼技術をさらに進歩させていく必要がある。

【参考文献】

- (1) BP, “BP Statistical Review of World Energy June 2017”,
<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf> (参照日2018年3月25日)
- (2) International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2017 – Executive Summary”,
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WE0_2017_Executive_Summary_Japanese_version.pdf (参照日2018年3月25日)
- (3) 齊藤 英治, 松野 成之, 田中 恵三, 西野 慎, 山本 隆一, 今野 晋也, “最新鋭蒸気タービンの技術開発と展望”, 三菱重工技報, Vol. 52, No. 2, pp. 36-43, (2015)
- (4) 東京電力フュエル&パワー 川崎発電所, <http://www.tepco.co.jp/fp/thermal-power/list/kawasaki.html> (参照日2018年3月25日)
- (5) エネルギー総合工学研究所, “新エネルギーの展望 ガスタービン技術”, pp. 8-9, (2007)
- (6) 資源エネルギー庁, “火力発電の高効率化に向けた 発電効率の基準等について”,
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/karyoku/pdf/003_01_00.pdf (参照日2018年3月25日)
- (7) 正田 淳一郎, “発電用ガスタービン技術の変遷と将来展望”, 日本機械学会誌, Vol. 119, No. 1173, pp. 434-437, (2016)
- (8) GE Power, “Advanced Multi-Tube Mixer Combustion For 65% Efficiency”, National Energy Technology Laboratory, UTSR Workshop
<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Events/2015/utsr/Tuesday/Advanced-Multi-Tube-Mixer-Combustion-For-65-25-Efficiency.pdf> (参照日2018年3月25日)
- (9) 橋本 貴雄, 坂本 康一, 石井 弘実, 佐々木 啓介, 熊谷 健志, 多田 宏明, “石炭ガス化技術”, 火力原子力発電, Vol. 67, No. 721, pp. 33-40, (2016)
- (10) 岩井 保憲, 伊東 正雄, “超臨界CO₂サイクル火力発電用ガスタービン燃焼器”, 東芝レビュー, Vol. 70, No. 5, pp. 16-19, (2015)
- (11) 高橋 武雄, “超臨界CO₂サイクル火力発電用ガスタービンの開発”, 火力原子力発電, Vol. 67, No. 721, pp. 54-60, (2016)
- (12) 河西 英一, 福島 仁, 田村 雅人, 犬伏 和之, 中田 俊彦, “木質バイオマス高比率混焼システムへの挑戦”, IHI技報, Vol. 57, No. 1, pp. 76-93, (2017)
- (13) 岡田 邦夫, 堀川 敦史, 古賀 和樹, 飴 雅英, “2MW級ガスタービンにおけるドライ低NO_x水素専焼燃焼器の開発”, 第44回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, pp. 209-214, (2016)
- (14) 経済産業省, “大型の水素タービン技術の方向性”,
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/006_03_00.pdf (参照日2018年3月25日)
- (15) 壹岐 典彦, 倉田 修, “アンモニアを燃焼するガスタービン”, 日本燃焼学会誌, Vol. 58, No. 186, pp. 27-34, (2016)

発電用微粉炭焚きボイラの燃焼技術・数値解析の最前線

State-of-the-art Combustion Technology and Numerical Simulation of a Pulverized Coal Fired Boiler for Power Generation

半田 雅人

Masato HANDA

三菱日立パワーシステムズ株式会社

Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.

1 はじめに

石炭は可採年数が100年以上と長く、世界中に広く分布しているため日本のエネルギーセキュリティ上重要な資源である。また、2040年まで世界的にも油やガスと共に主要な一次エネルギー源であると予測されている⁽¹⁾。しかし、天然ガスに比べると地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出量が多い。そこで、石炭火力発電では効率向上のために、石炭ガス化複合発電システム(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)の実用化⁽²⁾が進められている。一方、実質的な二酸化炭素排出を減らすため、既存の石炭火力発電設備を活用して、石炭とバイオマス、あるいは、アンモニアとの混焼技術の開発が、近年急速に進められている。

本稿では、まず、発電用微粉炭焚きボイラの構造と設計上の留意点を説明する。次に、混焼技術の現状と課題を説明する。また、課題解決のための有力な手段のひとつである、微粉炭燃焼の数値解析技術の現状についても紹介する。

2 石炭焚きボイラの概要

発電事業用の石炭焚きボイラは、自動車に比べて巨大な構造物である。図1にボイラの構造の概略を示す。ボイラは図中の丸枠で示された建屋(奥行き: 約80m, 高さ: 約90m, 幅: 約70m)の中に格納されており、鉄骨で吊られている。ボイラは大きく分けて、燃焼用空気を搬送するダクト群と、燃焼炉と熱交換器群を合わせた耐圧部とで構成される。耐圧部の高さは、25階建マンションとほぼ同じである。

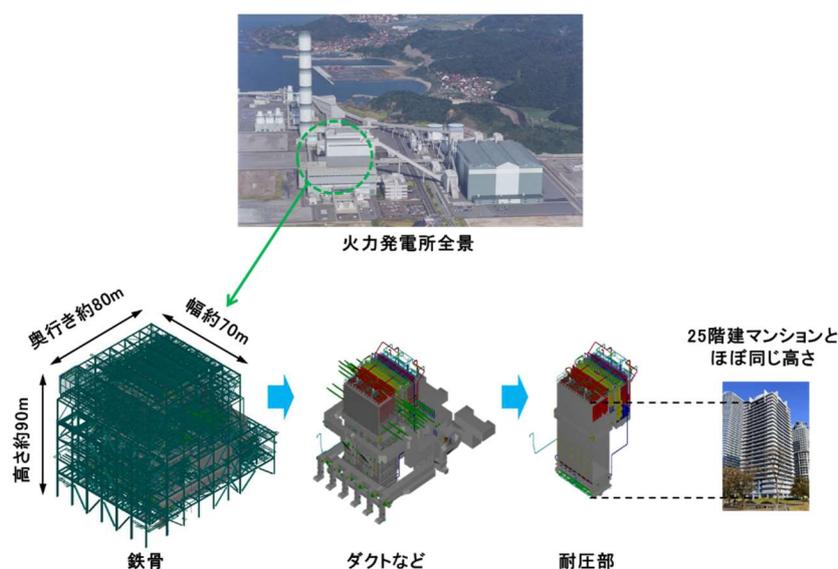


Fig. 1 Overview of a coal fired boiler for a power generating station

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

図2に石炭焚きボイラ内の物理現象の概略を示す。自動車の主燃料であるガソリンや軽油とは異なり、原炭は反応性が悪い。そのため、粉砕機で74 μ m(200メッシュ)以下の質量割合を70%程度まで粉砕する。加えて、ボイラの排熱を利用して加熱した空気(300 $^{\circ}$ C程度)を粉砕機へ送り込むことで、原炭を乾燥させる。乾燥させた微粉炭と空気は、火炉まで搬送されて燃焼する。石炭の成分は、工業分析により水分、揮発分、固定炭素、灰分に分類される。石炭が加熱されると、初めに固体中の水分が蒸発する。さらに加熱すると、400 $^{\circ}$ C以上で固体から気体の可燃物が放出される。この可燃物のことを揮発分、可燃物の放出のことを熱分解と呼ぶ。また、石炭は同じ工業分析値であっても、含まれる炭素、水素、酸素、窒素、硫黄等の元素比率が異なる。元素比率は元素分析により測定される。石炭の産地により工業分析値、元素分析値が異なり、揮発分の化学組成も異なる。揮発分は空気と混合して、気相で燃焼するが、石炭毎に化学組成が異なるため燃焼速度も異なる。熱分解後に残る固体成分は、主に炭素と灰から構成されていて、チャーと呼ばれる。チャーは、酸素、二酸化炭素、水蒸気と反応する。日本国内の発電事業用ボイラではバーナ部の空気量を少なくし、酸素不足の還元領域を形成させてNOxをN₂へ還元する二段燃焼法が用いられる。還元領域ではチャーと二酸化炭素・水蒸気との反応であるガス化反応が生じる。また、バーナ部近傍では燃焼による発熱でガスや粒子温度が高くなる。このため、火炉壁への伝熱形態としては、ふく射の割合が大部分を占めると考えられている。火炉内で固体の可燃物の大部分が燃焼するので、火炉の出口では灰と少量の炭素を主体としたチャーだけが残る。

石炭焚きボイラの設計での重要な性能の評価項目としては、①NOx排出量、②未燃分、③火炉出口のガス温度(FEGT: Furnace Exit Gas Temperature)が挙げられる。①と②は自動車エンジンの設計においても重要な項目であるが、③は大きく異なる点である。石炭には灰が含まれるため、灰が伝熱管に付着して凝固する。FEGTが灰の融点を超過していると、下流に設置された熱交換器で、伝熱阻害や閉塞が生じる可能性がある。一方、FEGTを下げるためには単純に炉を大きくすればよいが、炉を大きくするとコストが高くなるので、適切なサイズに炉を決める必要がある。また、日本では、エネルギーセキュリティ上、様々な産地から石炭を輸入している。したがって、幅広い種類の石炭に対して、ロバストに性能を満たさなければならない難しさもある。先に述べたように、ボイラは非常に巨大な構造物であるため、試作品を作って実験で性能を評価することが難しい。そのため、数値解析による性能評価が重要視されており、メーカー・大学等の様々な研究機関で技術開発が進められている。そのいくつかを4章で紹介する。

3 混焼の現状と課題

3.1. バイオマス混焼

地球温暖化対策を推進する観点から2012年7月1日から再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT: Feed-In Tariff)が開始され、2016年3月には総合資源エネルギー調査会の火力発電にかかわる判断基準ワーキンググループより省エネ法の改正案が提言されている³⁾。バイオマスは植物が成長する過程で二酸化炭素を吸収しているので、バイオマスを燃焼させて二酸化炭素を排出しても大気中の二酸化炭素は増加しないと考えられており、再生可能エネルギーのひとつと認識されている。発電効率は発電設備への投入エネルギーと発電で得られる電力エネルギー量との比率であり、省エネ法で定義される発電効率の計算式では、バイオマスによる入熱はカウントされず、バイオマスを混焼した分だけ発電効率が向上する結果となる(図3参照)。このため、火力発電所におけるバイオマスエネルギーの利用は地球温暖化対策および発電効率向上の観点から有効であり、バイオマス専用発電設備導入や石炭焚きボイラでの木質バイオマス混焼が促進されている。

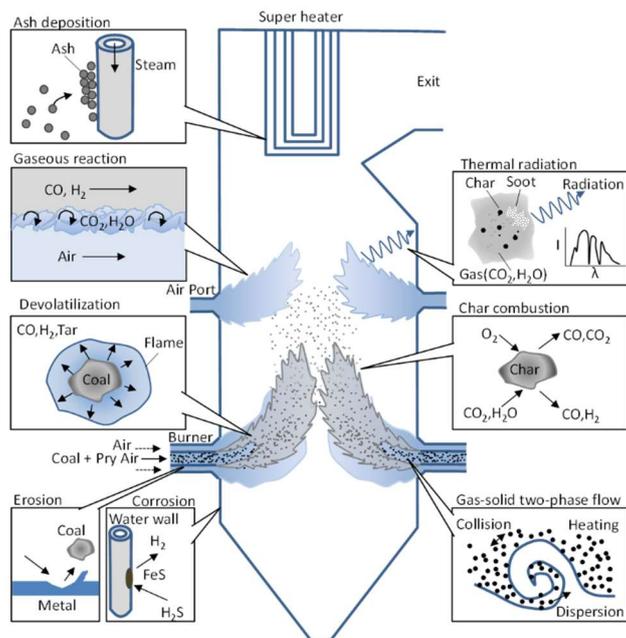


Fig. 2 Physical phenomena in a pulverized coal fired boiler

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

燃料種 (発電方式)	単位	新設基準 (発電端・HHV)	既設基準 (発電端・HHV)
石炭火力	%	42.0	41.0
ガス火力	%	50.5	48.0
石油その他火力	%	39.0	39.0

<バイオマス混焼を行う場合の発電効率の算出方法>

$$\text{発電効率} = \frac{\text{発電設備から得られる電力エネルギー量}}{\text{発電設備に投入するエネルギー量} - \text{発電設備に投入するバイオマス燃料のエネルギー量}}$$

対象事業者: 下記要件のいずれも満たし、事業者発電容量1万kW以上を対象
 ①売電比率50%以上、②自家発自家消費率5割以下、③当該発電設備発電容量1000kW以上

Fig. 3 Evaluation of power generation efficiency when biomass fuel is burned⁽³⁾

一般的なバイオマス燃料の例を図4に示す。バイオマス燃料は石炭等の従来燃料に比べて一般に発熱量が低いという特徴があり、性状の変動幅も大きい。またペレット燃料以外のバイオマス燃料は含有水分が多い。バイオマス燃料の炉内への投入方法として、バイオマスペレットを石炭とともに石炭粉砕機に投入することにより微粉炭と粉砕されたバイオマスが混ざった状態で石炭バーナより火炉内へ投入する方法（混合粉砕方式）と、バイオマスペレット専用の粉砕機と専用バーナを用いて火炉内へ投入する方法（専用粉砕方式）がある。混合粉砕方式では、従来の石炭粉砕機を流用できることから改造が少ないというメリットがあるが、バイオマスペレットに対する粉砕能力の制限から通常混焼率は入熱比3～5%⁽⁴⁾が上限となる。これに対して、専用粉砕方式ではバイオマスペレット混焼率を高くできる。専用粉砕方式では、バイオマスペレット用の燃焼設備を最適化することで、従来の石炭焼きボイラ設備から大幅な機器の変更を行わず、バイオマスペレットの混焼率を入熱比30%超⁽⁵⁾まで高くできる。一方、混焼率が上がるにつれ、炉内温度や粒子挙動が石炭専焼時と異なってくるため、着火や灰付着の予測が困難になる。これらを数値解析で予測し、様々なケーススタディを実行できることが、ボイラ設計では求められている。なお、バイオマス燃焼全般の最新技術は、文献⁽⁴⁾で解説されているのでぜひ参照されたい。



Fig. 4 Biomass fuels⁽⁴⁾

3.2. アンモニア混焼

近年、二酸化炭素排出抑制の観点から、水素の利用は世界中で進められているが、輸送・貯留の取扱いに難点がある。また、サプライチェーンも十分に確立していない。一方、アンモニアは、取扱いが水素よりも容易であり、かつ、サプライチェーンも確立しているため、低コストな水素キャリアとして注目を集めている。内閣府総合科学技術・イノベーション会議が主導する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation promotion Program)の構想では、自然エネルギーで製造した水素由来のアンモニアを、既存の化学タンカーで輸送して燃料電池、ガスタービン、石炭焼きボイラに用いることで、二酸化炭素排出量を低減することを計画している⁽⁶⁾。

アンモニアを石炭と混焼する場合、改造範囲の少ない直接混焼技術が有力案のひとつである。直接混焼の技術課題のひとつとして、NOx発生量の増加が考えられる。環境規制値以下になるように混焼率・混焼方法を決定する必要がある。国内研究機関、メーカー、電力会社で各々検討が進められている⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。今後、実機で混焼率を高めていくためには、NOx発生量低減のための基礎的な燃焼方法はもちろんのこと、混焼が引き起こす炉内環境の変化（例えば収熱バランスなど）も検討する必要がある。

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

4 微粉炭焚きボイラの数値解析技術

2章で述べたように、ボイラ実機的设计には、数値解析による評価が有効である。一方、ボイラ内での石炭燃焼は、スケールが大きく異なる流動、化学反応が非常に複雑に絡み合うマルチスケールの物理現象である。そのため、その全てを精度よく評価する解析技術は未だ発展途上である。以下、混焼評価で特に重要となる、物理現象と解析技術の概略を紹介する。他の現象の解説と解析方法の詳細は、文献⁽¹⁰⁾を参照されたい。

4.1. 乱流

火炉内のレイノルズ数は高く (10^5 以上)、乱流である。また、火炉内では横風噴流、旋回流、壁面近傍流れ等の様々な形態の複雑な流れが生じている。現時点の計算機能力ではDNS(Direct Numerical Simulation)で計算できないため、乱流モデルの使用が必要である。火炉の燃焼シミュレーションには、一般的に標準 $k-\epsilon$ モデル等のRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)モデルが使われている。しかしRANSモデルは複雑な流動場で精度が低下するので、より汎用的で高精度な乱流モデルが求められる。RANSより汎用的な乱流モデルにLES(Large Eddy Simulation)がある。今までは、非燃焼場やガス燃焼場に限定されていたが、最近になって石炭燃焼場にも適用された⁽¹¹⁾。汎用性の高さの観点でLESは期待されているが、RANSに比べて計算負荷が高いことが課題である。

4.2. 気相反応

固体から気相に放出された可燃分が、気相で酸素と反応する。この気相反応は、ガス燃料の燃焼分野で幅広く研究されている。詳細な素反応機構を用いたDNSならば、正確に反応場を計算できる。しかし、乱流燃焼場をDNSで計算することは計算負荷が高く難しいので、計算の精度を落とさずに高速化するモデルが必要である。微粉炭燃焼場の気相反応には、渦消散モデル⁽¹²⁾が使われることが多い。これは、石炭に、水分、揮発分、チャーの成分が存在するので、燃焼モデルに高い汎用性が求められるためである。一方、ガス燃料の燃焼に使用されている精度の高いモデルのひとつがFlameletモデル⁽¹³⁾であるが、燃料が1種類に限定されているので、そのまま石炭燃焼場に使用できなかった。最近になって、複数の混合分率の輸送方程式を計算することで、多種成分に対応した石炭向けのFlameletモデル⁽¹⁴⁾が開発され、着火や火炎の安定性の検討に適用された⁽¹⁵⁾。今後、石炭と他燃料との混焼に対応したFlameletモデルの拡張が期待される。

4.3. NO_x反応

微粉炭焚きボイラでは、NO_x排出量の削減のため低NO_xバーナや二段燃焼法等の燃焼方法が開発されてきた。NO_x反応は、熱分解、チャー燃焼、気相反応、伝熱とも関係しており、空気量、温度、石炭種、粒度、空気の混合方法等の燃焼条件により複雑に変化する。さらに新しい燃焼法を開発するには、微粉炭燃焼場のNO_x予測技術およびモデル化が必須である。一例として、Taniguchiら⁽¹⁶⁾のNO_x反応モデルを図5に示す。NO_xの反応は、燃料中のN分に由来するフューエルNO_xと空気中の窒素が酸化して生じるサーマルNO_xに大別される。まず、フューエルNO_xについて説明する。熱分解によりシアン等のN化合物の中間生成物(XNと記載)が生成される(R1)。XNが酸化するとNO_xを、還元されるとN₂を生成する(R2, R3)。また、チャー燃焼と共に、チャーに含まれているNが酸化してNO_xが生成される(R4)。また、NO_xは炭化水素ラジカル(CHi)により還元される(R6)。炭化水素ラジカルは、熱分解(R7)やチャー燃焼(R8)により生成される。さらに、R5はチャーによるNO_x還元反応である。サーマルNO_xとは高温の酸化領域で空気中の窒素が酸化されて生成されるNO_xである。温度が高い(1500°C以上)と急激にNO_x生成速度が高くなるという特徴がある。これらの複雑なNO_x反応のモデルを開発するには、各反応速度を求められるように、温度、空気比、混焼ガス性状等の条件を変化した多数の燃焼試験が必要である。

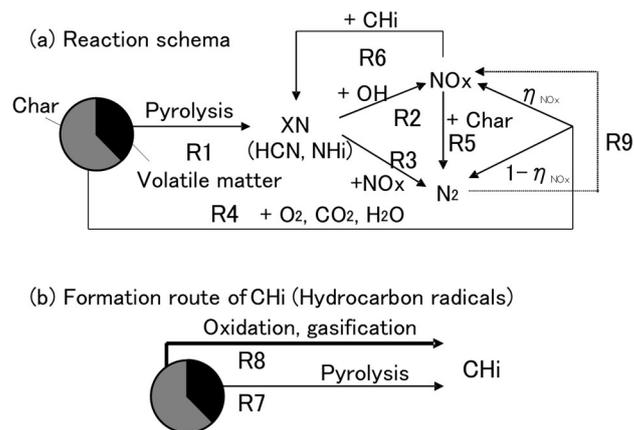


Fig. 5 NO_x reaction model for coal combustion ⁽¹⁶⁾

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

4.4. ふく射伝熱

ボイラ火炉の伝熱は、その90%以上がふく射伝熱によるものと考えられている。燃焼場のふく射光は波長の異なる光の集まりであること、波長によりふく射媒体の吸収率が変化することが現象を複雑にしている。例えば、微粉炭燃焼場でふく射光の吸収・散乱に影響する主な媒体は、気体分子 (CO_2 , H_2O), チャー, 煤である。ふく射媒体の濃度や温度から吸収係数や散乱係数を計算するモデルをふく射物性モデルと呼ぶ。気体分子では、分子の種類や温度による吸収係数の波長依存性が大きい。ふく射光を波長毎に分けて厳密に計算する方法 (Line by Line法) があるが、計算負荷が高く3次元の燃焼解析と組み合わせることはできない。そこで、微粉炭焚きボイラの数値解析では、計算負荷の低いWSGG (Weighted Sum of Gray Gases) 法⁽¹⁷⁾が使われることが多かった。近年、低計算負荷で、Line by Line法と同程度の精度が得られるk分布モデルの適用⁽¹⁸⁾も開始されている。煤は強力なふく射媒体であり、混焼時の生成量が石炭専焼時に比べて大きく変わる可能性がある。したがって、煤の生成量予測は炉内伝熱の評価に重要であり、現在でも研究が進められているトピックスのひとつである⁽¹⁹⁾。また、アンモニア混焼時には、アンモニアそれ自身もふく射媒体であるため、 CO_2 と H_2O を主要物性としてきたWSGG法を修正する可能性も考えられる。

5. まとめ

本稿では、発電事業用微粉炭焚きボイラに着目し、昨今話題となっている混焼技術とボイラ火炉の数値解析技術を中心に概説した。石炭は古い歴史を持つ燃料だが、石炭燃焼の物理現象は大変複雑である。また、現象の複雑さに加え、ボイラの大きさと石炭燃焼の現象のスケールが大きく異なる。このため、マルチスケールの物理現象を取り扱える解析手法が求められており、それらの研究開発は未だ発展途上である。

本稿をきっかけに、異なる産業機器の燃焼解析技術の情報共有が進み、今後の研究開発の発展に繋がれば幸いである。

【参考文献】

- (1) BP, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-fuel/coal.html> (参照日2018年4月9日)
- (2) 三菱日立パワーシステムズ, <https://www.mhps.com/jp/products/igcc/> (参照日2018年4月9日)
- (3) 経済産業省, “総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 火力発電に係る判断基準ワーキンググループ 最終取りまとめ,” http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/karyoku/pdf/report01_01.pdf (参照日2018年4月9日)
- (4) 横式 龍夫, 江守 大昌, 岩元 英明, 筒場 孝志, 越智 健一, 松本 慎治, “MHPS グループのバイオマス焚きボイラ技術の紹介,” 三菱重工技報, Vol. 54, No. 3, pp. 54-58 (2017)
- (5) 三菱日立パワーシステムズ, <https://www.mhps.com/jp/news/20180329.html> (参照日2018年4月11日)
- (6) 内閣府, “戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) エネルギーキャリア (新しいエネルギー社会の実現に向けて) 研究開発計画,” http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/4_enekyari.pdf (参照日2018年4月9日)
- (7) IHI, http://www.ihl.co.jp/ihl/all_news/2017/technology/2018-3-28/index.html (参照日2018年4月9日)
- (8) 中国電力, <http://www.energia.co.jp/press/2017/10697.html> (参照日2018年4月9日)
- (9) 電力中央研究所, https://criepi.denken.or.jp/press/pressrelease/2017/01_10press.pdf (参照日2018年4月10日)
- (10) 山本 研二, “微粉炭燃焼シミュレーションの現状と今後,” 日本燃焼学会誌, Vol. 58, No. 186, pp. 204-10 (2016)
- (11) K. Yamamoto, T. Murota, T. Okazaki, and M. Taniguchi, “Large eddy simulation of a pulverized coal jet flame ignited by a preheated gas flow,” Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, No. 2, pp. 1771-1778 (2011)
- (12) B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, “On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion,” Symposium (International) on Combustion, Vol. 16, No. 1, pp. 719-729 (1977)
- (13) H. Pitsch, “Large-eddy simulation of turbulent combustion,” Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 38, pp. 453-482 (2006)

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN *Vol. 8 No. 5 2018*

- (14) J. Watanabe and K. Yamamoto, "Flamelet model for pulverized coal combustion," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 35, pp. 2315-2322 (2015)
- (15) J. Watanabe, T. Okazaki, K. Yamamoto, K. Kuramashi, and A. Baba, "Large-eddy simulation of pulverized coal combustion using flamelet model," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 36, pp. 2155-2163 (2017)
- (16) M. Taniguchi, Y. Kamikawa, T. Okazaki, K. Yamamoto, and H. Orita, "A role of hydrocarbon reaction for NO_x formation and reduction in fuel-rich pulverized coal combustion," Combustion and Flame, Vol. 157, pp. 1456-1466 (2010)
- (17) T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman, "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 104, No. 44, pp. 602-608 (1982)
- (18) J. Cai, M. Handa, and M. F. Modest, "Eulerian-Eulerian multi-fluid methods for pulverized coal flames with nongray radiation," Combustion and Flame, Vol. 162, No. 4, pp. 1550-1565 (2015)
- (19) A. J. Josephson, D. O. Lignell, A. L. Brown, and T. H. Fletcher, "Revision to modeling soot derived from pulverized coal," Energy and Fuels, Vol. 30, No. 6, pp. 5198-5199 (2016)

発電用ガスタービン燃焼技術

Combustion Technologies for Industrial Gas Turbines

浅井 智広

Tomohiro ASAI

三菱日立パワーシステムズ株式会社

Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.

1 はじめに

世界のエネルギー消費量は増加し続けており、その中で化石燃料（石油、天然ガス、石炭）の消費量が最も多い。化石燃料が占める割合は2015年で約86%、2035年では80%以上と大部分を占めると予測されている⁰⁾。化石燃料を使う火力発電からは温室効果ガスの二酸化炭素（CO₂）が排出され、地球温暖化防止のため、その排出規制が厳しさを増している。火力発電のひとつであるガスタービン発電は、高い発電効率によりCO₂排出量を抑制し、さらに環境汚染物質の排出が少ないクリーンな発電を実現できるため、このようなエネルギー需要と環境問題を解決できる発電方式としてその重要性が増している。本稿は発電用のガスタービンに着目し、その発電方式、およびその構成要素のひとつである燃焼器を対象に開発された燃焼技術を概説する。

2 発電用ガスタービンの概要

発電用ガスタービンの概略を図1に示す。ガスタービンは主に空気圧縮機、燃焼器、タービン、発電機で構成され、次の過程により発電する。空気圧縮機は大気から吸入した空気を圧縮し、圧縮空気を燃焼器に供給する。燃焼器は燃料を投入し圧縮空気と混合・燃焼させることで、高温・高圧の燃焼ガスを発生させ、タービンに導く。タービンは燃焼ガスを膨張させることで回転し、回転エネルギーを得る。発電機はガスタービンの回転軸に設置され、タービンの回転エネルギーにより電気エネルギーを得て発電する。発電機の代わりに、例えばガスプラント用の圧縮機を設置することで、機械駆動用としてもガスタービンを使用できる。ガスタービンはガスタービンコンバインドサイクル発電（Gas Turbine Combined Cycle : GTCC）により更に効率向上を図ることができる。GTCCの概略を図2に示す。GTCCはガスタービンで発電するとともに、ガスタービンの高温の排ガスを利用して排熱回収ボイラで蒸

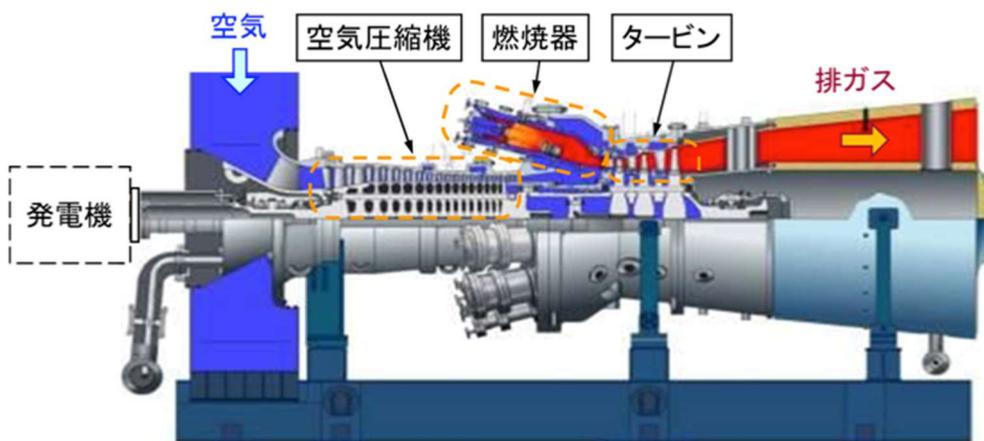


Fig 1 Schematic diagram of industrial gas turbine

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

気が発生させ、蒸気タービンでも発電する複合発電システムである。

ガスタービンは、燃焼ガス的高温化により効率向上が可能、多様な燃料への対応が可能（燃料多様化）、起動性・負荷追従性に優れるといった長所をもつ。それに対して、高温化によって、燃焼器からは環境汚染物質である窒素酸化物（Nitrogen Oxides: NOx）の排出が増加するため、低NOx燃焼技術が必要であり、さらに、燃焼器構造の損傷の原因となりうる燃焼振動や逆火を発生させない安定燃焼も求められる。

3 ガスタービンの燃料と燃焼方式

ガスタービンは多様な燃料に対応できるのが特長であり、これを燃料多様化と呼ぶ。本稿ではガス燃料に着目し、ガスタービンで対応可能なガス燃料を図3に示す。図の横軸は単位体積当たりの低位発熱量、縦軸は燃焼速度を表す。燃焼速度は火炎の伝播速度を表し、燃焼速度が速いほど火炎がバーナに逆流（逆火）しやすくなる。燃料は発熱量により高・中・低カロリー燃料の3種類に大別される。高カロリー燃料には炭化水素燃料が属し、標準的なガスタービン燃料である天然ガスはこれに分類される。中カロリー燃料には石炭ガス化ガス（酸素吹き）や製油所や製鉄所の副生ガスであるオフガス、コークス炉ガス（Coke Oven Gas: COG）が属し、低カロリー燃料には石炭ガス化ガス（空気吹き）や高炉ガス（Blast Furnace Gas: BFG）が属する。

ガスタービンの従来の燃焼方式は、拡散燃焼方式と予混合燃焼方式に大別される。これらの燃焼方式を図4に比較する。拡散燃焼方式はバーナから燃料と空気を燃焼室内に別々に供給して燃焼させるため、バーナへの逆火のリスクは低い。したがって、水素（H₂）を多く含む水素リッチ燃料など燃焼速度が速い燃料をはじめ、様々な燃料に対応可能である。しかし、燃焼領域の局所の火炎温度が上昇しNOxが増加するため、NOxの低減に水や蒸気、窒素などの希釈剤を投入する必要があり、それに必要なエネルギーの消費によりプラント効率が低下する。希釈剤投入によるNOx低減方法を湿式（ウェット）と呼ぶ。それに対して、予混合燃焼方式は燃料と空気を予め混合して燃焼させるため、局所火炎温度が低下し低NOx燃焼が可能である。さらにNOx低減に希釈剤の投入が不要となることで、プラント効率の低下を防止できるため、高効率化を実現できる。本方式を乾式（ドライ）、この燃焼器をドライ低NOx燃焼器と呼ぶ。標準的なガスタービン燃料である天然ガスには予混合燃焼方式が採用される。しかし、水素リッチ燃料など燃焼速度が速い燃料に対しては、バーナへの逆火のリスクが高くなり、対応が難しくなる。

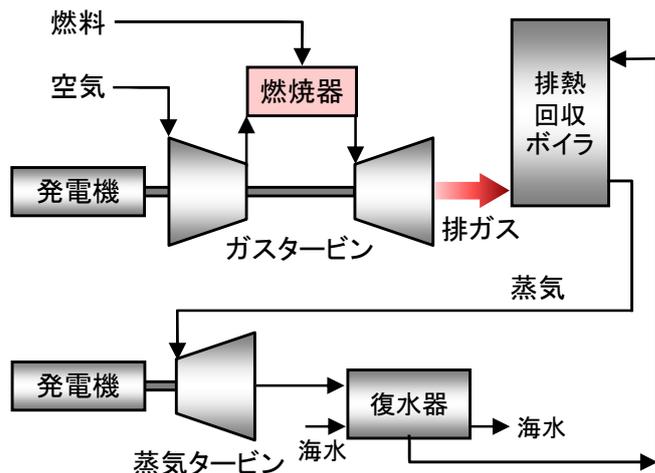
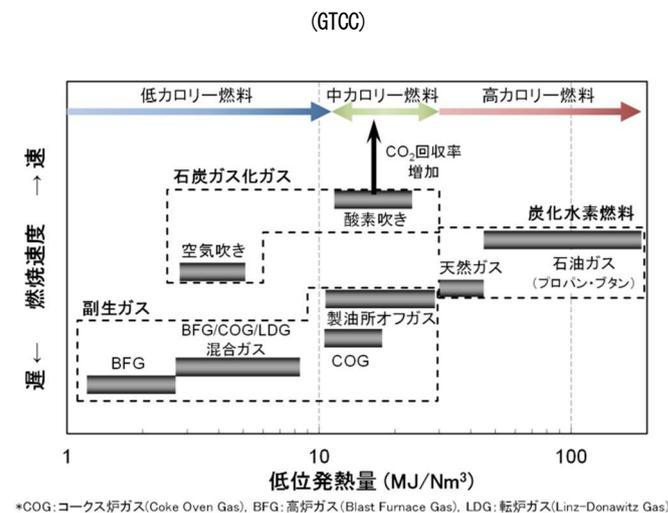


Fig 2 Schematic diagram of gas turbine combined cycle



*COG: コークス炉ガス(Coke Oven Gas), BFG: 高炉ガス(Blast Furnace Gas), LDG: 転炉ガス(Linz-Donawitz Gas)

Fig 3 Available gaseous fuels for gas turbine

		拡散燃焼方式	予混合燃焼方式
構造		湿式(ウェット) バーナ 逆火リスク小 燃料、空気、希釈剤(水、蒸気、窒素) 高温領域	乾式(ドライ) バーナ 逆火リスク大 燃料+空気 低温領域
	特徴	長所: 逆火リスク低 短所: プラント効率の低下 (NOx低減の希釈剤投入のため)	低NOx, 高効率化 逆火リスク高
NOx低減		湿式(ウェット) (希釈剤の投入必要)	乾式(ドライ) (希釈剤の投入不要)
対応燃料		天然ガス, 水素リッチガス, 低カロリーガス	天然ガス

Fig 4 Comparison between conventional combustion methods

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

4 燃料多様化燃焼技術

本節では、天然ガス、石炭ガス化ガス、水素、副生ガスの種々の燃料に対して開発された燃料多様化燃焼技術を解説する。

4.1. 天然ガス

天然ガスは石油や石炭に比べてCO₂やNO_xの排出量が少ないクリーンな燃料であり、最も標準的なガスタービン燃料である。世界的なエネルギー需要の拡大やシェールガス田開発による天然ガスの供給拡大によって、今後も引き続き天然ガスが最も重要なガスタービン燃料になると考える。天然ガス燃焼GTCCには、燃焼ガス温度1600°Cもの高温化を実現する最新鋭のドライ低NO_x予混合燃焼器が開発され²⁾、それにより発電効率が64%にまで向上している³⁾。図5に高温条件で低NO_xを実現したキー技術のひとつである改良型燃料ノズルを示す。従来型燃料ノズルに比べて、改良型燃料ノズルにより燃料と空気をより均一に混合でき、その結果、燃焼領域の局所火炎温度を低減して低NO_xを実現している⁴⁾。

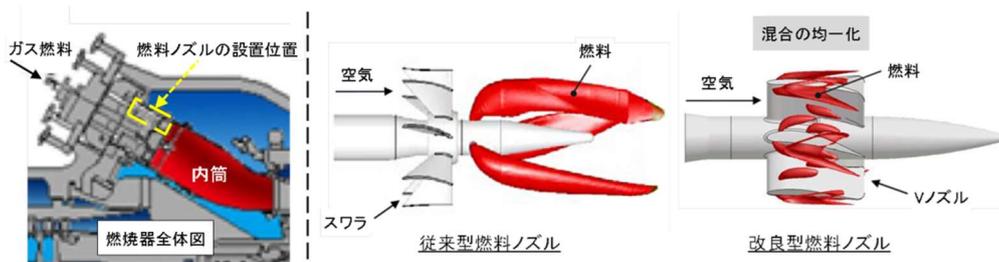


Fig 5 Improved fuel nozzle for highly-efficient gas turbine

4.2. 石炭ガス化ガス

石炭は世界に広く分布し埋蔵量も豊富であるため、エネルギー供給安全性の点から重要な化石燃料と考えられている。石炭燃焼火力発電は油や天然ガス燃焼に比べてCO₂排出量が多いことが課題である。そこで、石炭燃焼からのCO₂排出量削減には、石炭ガス化複合発電 (Integrated coal Gasification Combined Cycle: IGCC) が有望である。IGCCは複合発電により高効率化を実現でき、さらに石炭ガス化ガスの炭素分をCO₂へ転換し回収・貯留 (Carbon Capture and Storage: CCS) することで、CO₂排出量の大幅な削減が期待できる。

CCSを備えたIGCCプラントの概略を図6に示す。ガス化炉にて石炭を酸素でガス化 (酸素吹き) し、ガス精製設備にてその合成ガス中の不純物が除去され、CO₂回収設備のシフト反応器にて精製ガス中の一酸化炭素 (CO) と水蒸気が反応してH₂とCO₂に変換され、発生したCO₂を回収する。コンバインドサイクルでは、CO₂回収後のガス (主成分がH₂の水素リッチガス) が燃料としてガスタービンに供給されて発電し、その排熱を利用して蒸気タービンでも発電する。CCS-IGCCではCO₂回収に大きなエネルギーが必要のため、プラント効率の低下が技術課題となっている。

ガスタービンに供給される水素リッチ燃料は、CO₂回収率が0%から90%まで変化すると、水素濃度が20%程度から80%以上の高濃度まで幅広く変化する。水素リッチ燃料は燃焼速度が速いため、この燃料を用いる燃焼器では逆火のリスクが懸念される。現状は水素リッチ燃料に対して逆火リスクが低い拡散燃焼方式が採用されているが、NO_x低減に必要な希釈剤投入によりプラント効率が低下する。一方、予混合燃焼方式では水素リッチ燃料に対して逆火リスクが高く、この方式の採用は難しくなる。したがって、高効率CCS-IGCCの実現には、水素リッチ燃料に対応した新たなドライ低NO_x燃焼方式が必要である。

そこで、新たな燃焼方式のひとつとして「多孔同軸噴流バーナ (クラスタバーナ)」が開発された⁵⁾。図7にクラスタバーナを備えた燃焼器 (マルチクラスタ燃焼器) を示す。クラスタバーナは、同軸に配置した燃料ノズル1本と空気孔1個を基本構成要素とし、この組み合わせを多数備える。燃焼器は中央にパイロットバーナ、その周囲にメインバーナを備え、それぞれのバーナは上記の基本構成要素を多数備える。このバーナは、燃料と空気同軸噴流を用いた急速混合による低NO_x燃焼、さらに短い混合距離による逆火リスク低減を図っており、予混合と拡散燃焼方式の両方の長所を併せもつ。

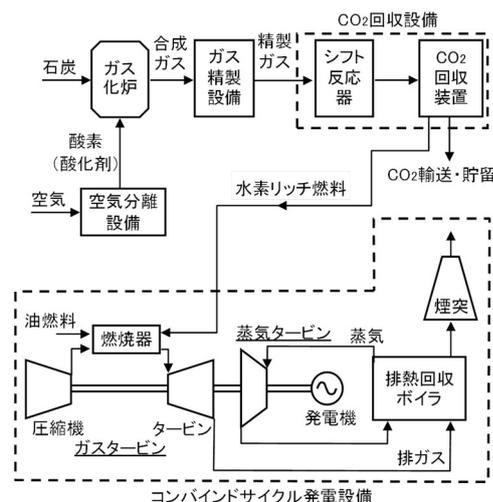


Fig 6 Schematic diagram of CCS-IGCC

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

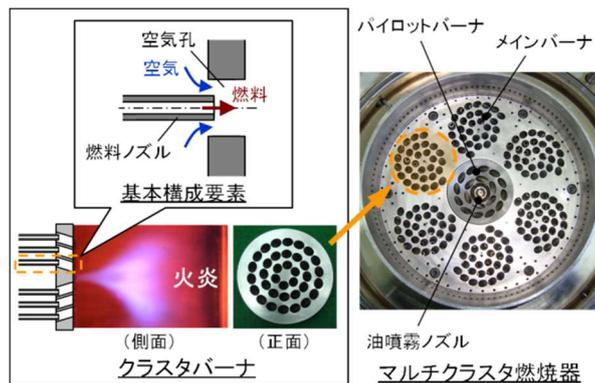


Fig 7 Multi-cluster combustor⁽⁵⁾

4.3. 水素

水素は多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造でき、エネルギー供給安全性の向上、省エネルギー・環境負荷低減、および産業振興に貢献できる将来の二次エネルギーの中心的役割として期待されている⁽⁶⁾。しかし、水素供給インフラの構築や水素供給コストに課題があり、水素の本格導入のためには水素サプライチェーンの確立が不可欠である。水素専焼、あるいは他の化石燃料との混焼による発電（水素発電）は、化石燃料の消費を抑えることでCO₂排出量を削減でき、さらに大規模で安定した水素需要を創出し水素価格の低下に貢献できるものとして期待される。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and industrial technology Development Organization : NEDO）は、将来の水素社会の実現に向けて、水素利用、水素製造、およびエネルギーキャリアを用いた水素の貯蔵・輸送などの研究開発を進めている。NEDO事業のもと、水素を燃料とする1MW級ガスタービンによる熱電併給システムの実証試験が神戸市で進められている⁽⁷⁾。大型ガスタービンでは、上述の最新鋭の天然ガス焼き1600°C級ドライ低NO_x燃焼器をベースに燃料ノズルを改良し、実圧燃焼試験にて、天然ガスに水素30%を混ぜた燃料で低NO_xと安定燃焼が可能ことが確認された⁽⁸⁾。さらに、クラスタバーナの考えをベースに、大型ガスタービンに適用可能な水素専焼ドライ低NO_x燃焼器の開発も進められている⁽⁹⁾。今後、水素社会の実現に向けて、水素関連の研究開発が加速されていくと考える。

4.4. 副生ガス

製油所や製鉄所では製造プロセスの中で副生ガスが発生する。副生ガスを発電用燃料として利用できれば、燃料コストの削減につながる。本節では、特に製鉄所の副生ガスである高炉ガス（BFG）に対応した燃焼技術を述べる。BFGは可燃成分の一酸化炭素を約25%、不活性成分（窒素、二酸化炭素）を約70%含む低カロリー燃料である。不活性成分を多く含むことから、燃焼範囲が狭い、燃焼速度が遅い、最高火炎温度が低いという特徴をもつため、低NO_x化よりも安定燃焼の確保が課題である。そこで、BFGに対して安定燃焼の確保に有利な拡散燃焼方式が採用されている。その一例の燃焼器を図8に示す⁽¹⁰⁾。BFGは燃焼速度が遅いため、空気流速が速いと燃焼が不安定となって火炎喪失に至るリスクがある。そこで、燃焼器の内筒の孔径を拡大することで空気流速を低下させ、火炎の安定化を図っている。

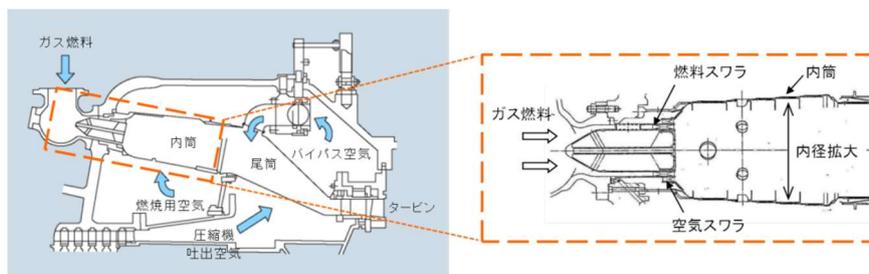


Fig 8 Diffusion-flame combustor for BFG⁽¹⁰⁾

ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 8 No. 5 2018

5 ガスタービンの運用柔軟性の向上

近年、太陽光や風力、水力といった再生可能エネルギーによる発電の普及が進んでいる。再生可能エネルギー発電は、CO₂排出がゼロという長所をもつが、その発電量が季節や天候、場所に大きく左右され出力が常に変動するため、電力の安定供給のためにはシステムの安定化が不可欠である。そこで、再生可能エネルギーの大きな出力変動に対応するため、運用柔軟性に優れたガスタービン発電の利用が期待されている。NEDO事業では、ガスタービンの運用柔軟性の向上のため、負荷追従性の向上、急速起動性能の向上、最低負荷の低減、部分負荷効率の向上など、負荷変動対応に関係する要素技術の開発が進められている⁽¹⁾。

6 まとめ

本稿では、発電用ガスタービンに着目し、GTCCとIGCC発電、および燃料多様化燃焼技術を概説した。ガスタービンの重要性は益々大きくなっており、エネルギー需要と環境問題の解決に貢献できるものとして、今後の研究開発の加速が期待される。

【参考文献】

- (1) BP, “BP Energy Outlook 2017 edition”, <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017>
- (2) 由里 雅則, 正田 淳一郎, 羽田 哲, 若園 進, “J形ガスタービンの運転実績とJACの開発”, 三菱重工技報, Vol. 54, No. 3, pp. 16-22, (2017)
- (3) 三菱日立パワーシステムズ, “JAC形ガスタービンの発電効率が64%にJ形シリーズ全体の累計稼働時間は50万時間に到達”, ニュースリリース 2018年1月22日発行 第191号, <http://www.mhps.com/jp/news/20180122.html>, (2018)
- (4) 由里 雅則, 正田 淳一郎, 塚越 敬三, 伊藤 栄作, 羽田 哲, “1600°C級J形技術を適用した発電用高効率ガスタービンの開発”, 三菱重工技報, Vol. 50, No. 3, pp. 2-10, (2013)
- (5) Asai, T., Dodo, S., Karishuku, M., Yagi, N., Akiyama, Y., Hayashi, A., “Performance of Multiple-Injection Dry Low-NO_x Combustors on Hydrogen-Rich Syngas Fuel in an IGCC Pilot Plant”, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 137, pp. 091504-1:11, (2015)
- (6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), “NEDO 水素エネルギー白書 —イチから知る 水素社会—”, 日刊工業新聞社, (2015)
- (7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 大林組, 川崎重工業, “世界初, 市街地で水素100%による熱電供給を達成—地域コミュニティにおけるエネルギー最適制御技術の確立へ—”, ニュースリリース 2018年4月20日発行, http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html, (2018)
- (8) 三菱日立パワーシステムズ, “大型高効率ガスタービンで水素30%混焼試験に成功 —発電時のCO₂排出削減に貢献—”, ニュースリリース 2018年1月19日発行 第190号, <https://www.mhps.com/jp/news/20180119.html>, (2018)
- (9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “水素専焼タービンの先導的研究開発等に着手 —水素社会実現に向けた課題解決への取り組みを強化—”, ニュースリリース 2016年7月5日発行, http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100596.html, (2016)
- (10) 田中 克則, 西田 幸一, 秋月 涉, “環境に貢献するガスタービン燃焼器技術”, 三菱重工技報, Vol. 46, No. 2, pp. 7-12, (2009)
- (11) 高橋 毅, “図解 次世代火力発電 —環境性・経済性を両立する実用化への道—”, 日刊工業新聞社, (2016)